

УДК 621.3

А.В. Носов

## Меандровые структуры для защиты от импульсных помех: систематизация, классификация, теория и направления совершенствования

Проводится систематизация и классификация защитных меандровых структур. Они классифицированы по характеру диэлектрического заполнения, геометрии поперечного сечения, топологии и способу комбинирования. Показано, как последовательное усложнение структуры от простых симметричных витков до сложных гибридных систем позволяет наращивать эффективность защиты, достигая ослабления сверхкороткого импульса до 143 раз. Предложены формулы для оценки потенциального числа импульсов на выходе структуры, которые напрямую связаны с ее эффективностью. На основе этого анализа представлены теория разложения и методика синтеза меандровых структур с заданными характеристиками. Для демонстрации методики синтезирована и исследована новая структура с ослаблением сверхкороткого импульса до 17,6 раза, а электростатического разряда – до 2,5 раза. Представлены направления дальнейшего совершенствования меандровых структур.

**Ключевые слова:** меандровая линия, электромагнитная совместимость, защита от импульсных помех, сверхкороткий импульс, электростатический разряд, модальная фильтрация, связанные линии передачи, расщепление импульса, пассивное защитное устройство, гибридное устройство.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-2-29-41

Современные тенденции развития радиоэлектроники, такие как миниатюризация, повышение быстродействия и снижение напряжений питания, увеличивают уязвимость радиоэлектронных средств (РЭС) к воздействию преднамеренных и непреднамеренных импульсных помех [1]. Особую опасность представляют сверхкороткие импульсы (СКИ) и электростатические разряды (ЭСР). Обладая широким частотным спектром, СКИ способны проникать внутрь аппаратуры, минуя экраны через апертур и элементы конструкции [2, 3]. Из-за довольно коротких фронтов СКИ и ЭСР, измеряемых нано- и пикосекундами, многие классические средства защиты неэффективны, что приводит к функциональным сбоям и необратимым физическим повреждениям [4, 5].

Традиционные подходы к обеспечению электромагнитной совместимости, включающие экранирование, фильтрацию и использование нелинейных ограничительных элементов, имеют ограничения при воздействии таких помех. Эффективность экранирования резко падает на высоких частотах [2], а классические  $RLC$ -фильтры сами становятся источниками проблем из-за собственных паразитных параметров [6, 7]. Такие устройства защиты, как газоразрядники и варисторы, обладают значительным временем срабатывания и недостаточным быстродействием [8, 9]. Это обуславливает острую необходимость в разработке новых, преимущественно пассивных защитных решений, основанных на иных физических принципах.

Перспективной альтернативой является использование волновых процессов в многопроводных линиях передачи. Подход, известный как модальная фильтрация, основан на эффекте разложения импульсного воздействия на последовательность импульсов меньшей амплитуды [10, 11]. Этот эффект возникает из-за разности фазовых скоростей распространения мод (например, четной и нечетной) поперечных волн

(далее в тексте просто «мод») в линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением и позволяет создавать пассивные защитные устройства, эффективность которых растет с уменьшением длительности импульсной помехи [12]. Особый интерес представляют меандровые линии (МЛ), которые традиционно применяются для выравнивания задержек, но чей потенциал как защитных элементов изучен недостаточно.

Ряд работ посвящен исследованию эффекта модального разложения в отдельных конфигурациях МЛ. В частности, рассмотрены базовые принципы разложения СКИ в простом витке [13], предложены способы его совершенствования за счет сворачивания структуры и добавления пассивных проводников [14], а также применения асимметрии поперечного сечения [15]. Однако, несмотря на значимые результаты, полученные в этих исследованиях, отсутствуют в явном виде систематизированное и комплексное исследование МЛ, их классификация, теория разложения и методика их синтеза и направления путей их совершенствования в целях эффективной защиты от СКИ и ЭСР. Цель данной работы – восполнить эти пробелы.

### Систематизация и классификация защитных меандровых структур

Механизм разложения импульса в витке МЛ зависит от характера диэлектрического заполнения и геометрии поперечного сечения. Как простейший рассмотрим симметричный виток МЛ в однородном диэлектрическом заполнении (в воздухе) [16]. Его схема соединений (где  $R1 = R2 = (Z_0 Z_0)^{0.5}$ ) и поперечное сечение представлены на рис. 1. В такой структуре скорости распространения четной и нечетной мод равны, и разложения СКИ (см. рис. 1, в) на эти составляющие не происходит. Однако в этом случае из-за электромагнитной связи между проводниками

СКИ раскладывается на импульс перекрестной помехи на ближнем конце и основной импульс, представляющий собой суперпозицию четной и нечетной мод. Условие такого разложения

$$2\tau l \geq t_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – погонная задержка,  $l$  – длина полувитка,  $t_{\Sigma}$  – общая длительность импульсного воздействия. Для рассматриваемой линии в однородной среде (в воздухе) погонные задержки четной ( $\tau_e$ ) и нечетной ( $\tau_o$ ) мод равны друг другу и  $\tau (\tau_e = \tau_o = \tau = 1/c$ , где  $c$  – скорость света, поскольку МЛ в воздухе). Кроме того, за счет оптимальной связи между проводниками амплитуды двух импульсов на выходе МЛ выравниваются, а ослабление в этом случае составляет 1,7 раза (здесь и далее относительно  $E/2$ ) (см. рис. 1,  $\varepsilon$ ). Отметим, что в представленных далее структурах электромагнитная связь между проводниками также имеет ключевое значение для ослабления СКИ.

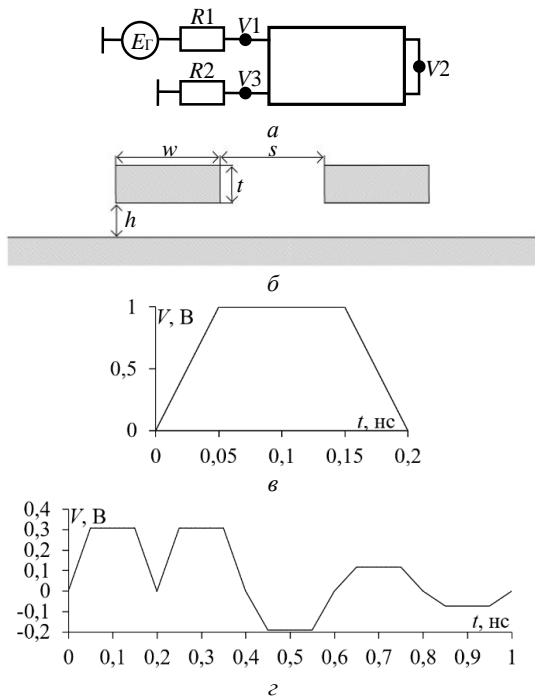


Рис. 1. Схема соединений витка МЛ в однородном диэлектрическом заполнении –  $a$ ; его поперечное сечение –  $b$ ; форма ЭДС источника –  $c$ ; форма напряжения на его выходе при оптимальных параметрах –  $d$

Большее ослабление СКИ достигается при неоднородном диэлектрическом заполнении, как в витке меандровой микрополосковой линии (МПЛ), симметричной в поперечном сечении [17]. Его схема соединений такая же, как на рис. 1,  $a$ , а поперечное сечение представлено на рис. 2,  $a$ . В этом случае  $\tau_e \neq \tau_o$ , что приводит к разложению СКИ на последовательность уже из трех импульсов меньшей амплитуды. Условия такого разложения

$$2\tau_{\min} l \geq t_{\Sigma}, \quad (2)$$

$$2l|\tau_e - \tau_o| \geq t_{\Sigma}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\min}$  – наименьшая из  $\tau_e$  и  $\tau_o$ . Эти условия и оптимальная связь между проводниками дают ослабление СКИ в 2,4 раза (см. рис. 2,  $b$ ).

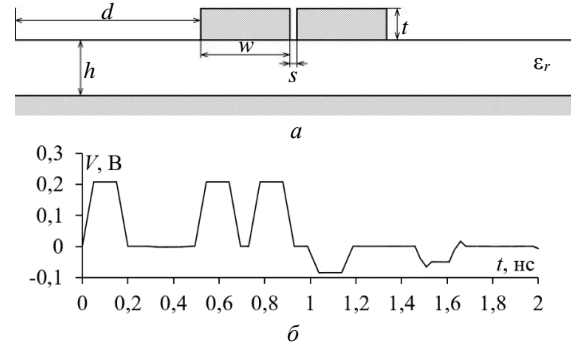


Рис. 2. Поперечное сечение витка симметричной меандровой МПЛ –  $a$ ; форма напряжения на его выходе при оптимальных параметрах –  $b$

Дополнительное ослабление СКИ дает асимметрия поперечного сечения. Для примера рассмотрим структуру витка МЛ с лицевой связью [18]. Его схема соединений такая же, как на рис. 1,  $a$ , а поперечное сечение представлено на рис. 3,  $a$ . Такое конструктивное решение приводит к появлению дополнительного импульса разложения. Для такого разложения СКИ необходимо выполнить (2) и

$$l(\tau_o - \tau_e) \geq t_{\Sigma}. \quad (4)$$

Тогда СКИ на выходе структуры раскладывается уже на 4 импульса, что дает ослабление СКИ до 3 раз (см. рис. 3,  $b$ ).

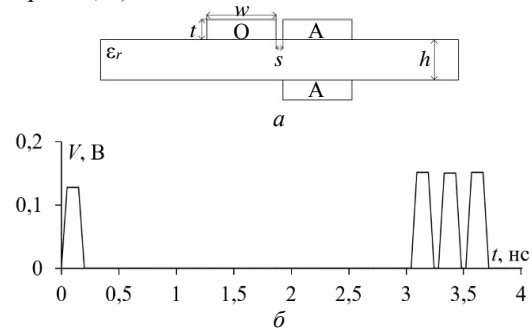


Рис. 3. Поперечное сечение витка МЛ с лицевой связью –  $a$  и форма напряжения на его выходе при оптимальных параметрах –  $b$

Таким образом, последовательное усложнение структуры (от однородного диэлектрического заполнения к неоднородному и от симметричной в поперечном сечении к асимметричной) дает все большее ослабление СКИ. После выполненного анализа базовых МЛ из одного витка естественно рассмотреть более сложные структуры: с увеличенным числом импульсов разложения за счет роста числа ее витков и введения дополнительных проводников.

Первый способ – увеличение числа витков. Последовательное соединение  $N$  витков МЛ значительно увеличит число импульсов разложения на выходе конечной структуры и ослабит СКИ. Например, переход от витка симметричной меандровой МПЛ к 5 виткам увеличит ослабление СКИ с 2,4 до 33 раз [19], а если структура асимметрична в поперечном сечении, – с 3 до 214 раз [20]. Схема соединений такой структуры из 5 витков представлена на рис. 4,  $a$ , где  $R1 = (Z_e Z_o)^{0.5}$  первого витка, а  $R2$  – последнего), поперечные сечения симметричных и асимметричных

ных витков такие же, как на рис. 2, а и рис. 3, а соответственно. Формы напряжений на выходе таких структур представлены на рис. 4, б, в, где из-за большого числа импульсов разложения (243 и 1 024 для симметричной и асимметричной структур) и их частичного наложения отклик на СКИ приобретает шумоподобный вид. Условия такого разложения СКИ в МЛ из  $N$  витков в неоднородном диэлектрическом заполнении и симметричных в поперечном сечении

$$2l_n\tau_{1n} \geq \sum_{i=n+1}^N 2l_i\tau_{2i} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N, \quad (5)$$

$$2l_n\tau_{2n} \geq 2l_n\tau_{1n} + \sum_{i=n+1}^N 2l_i\tau_{2i} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N, \quad (6)$$

где  $N$  – число витков,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – наименьшая и наибольшая из значений погонных задержек четной и нечетной мод витка соответственно. При подстановке вместо  $n$  поочередно числа витков от 1 до  $N$  получаются условия разложения СКИ в меандровой МПЛ из  $N$  симметричных в поперечном сечении витков. Для разложения СКИ в МЛ из  $N$  витков в неоднородном диэлектрическом заполнении и асимметричных в поперечном сечении необходимо аналогично выполнить (5) и

$$l_n\tau_{2n} \geq l_n\tau_{1n} + \sum_{i=n+1}^N 2l_i\tau_{2i} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N. \quad (7)$$

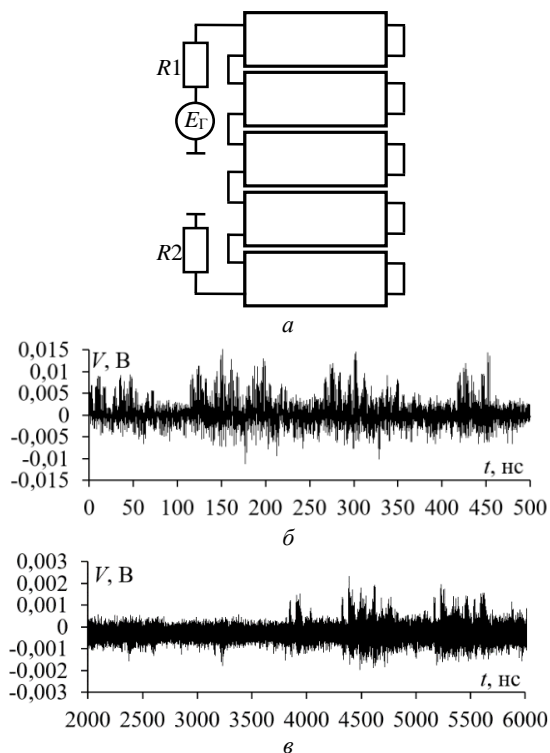


Рис. 4. Схема соединений МЛ из 5 витков – а; формы напряжений на выходе структур из 5 симметричных – б; 5 асимметричных витков – в

Важно отметить, что для разложения каждого импульса, с выхода предыдущего витка в последующем, длина такой структуры должна быть значительно увеличена. Этот недостаток может быть заметно снижен за счет методов структурно-параметрической оптимизации. Для сохранения высокого

ослабления при соблюдении жестких габаритных ограничений могут быть использованы два основных подхода: применение материалов с высокой  $\epsilon_r$  и/или использование компактной топологии путем дополнительного сворачивания длинной структуры в меандр. Второй способ – увеличение числа мод структуры. Это достижимо добавлением в поперечное сечение витка МЛ пассивных проводников. Так, в структуре с одним пассивным проводником помимо импульса перекрестной помехи на выходе формируется уже 3 импульса мод, а за счет асимметрии поперечного сечения присутствует 3 дополнительных [21], а с двумя – 4 импульса мод и 6 дополнительных [22]. Схемы соединений, поперечные сечения и формы напряжений на их выходе при оптимальных параметрах представлены на рис. 5, где все  $R$  приняты по 50 Ом на обеих схемах.

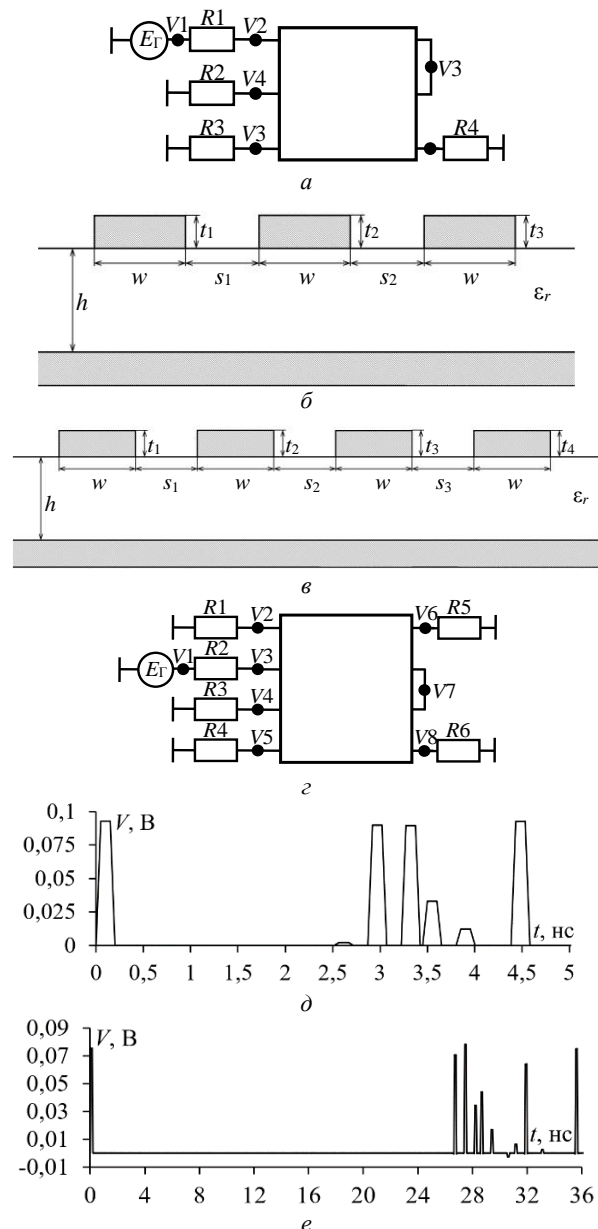


Рис. 5. Схемы соединений и поперечные сечения витков МЛ с 1 (а, б) и 2 (в, г) пассивными проводниками; формы напряжений на выходе МЛ с 1 – д и 2 – е пассивными проводниками

Так, в витке меандровой МПЛ с пассивным проводником получено ослабление до 5,4 раза, а с двумя пассивными проводниками – до 6,4 раза.

Условия такого разложения в меандровой МПЛ с одним пассивным проводником

$$2l\tau_1 \geq t_{\Sigma}, \quad (8)$$

$$l\tau_2 \geq l\tau_1 + t_{\Sigma}, \quad (9)$$

$$l\tau_1 + l\tau_3 \geq 2l\tau_2 + t_{\Sigma}, \quad (10)$$

$$l\tau_3 \geq l\tau_2 + t_{\Sigma}, \quad (11)$$

где  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – погонные задержки мод 1–3 (где индексы здесь и далее присвоены в порядке их возрастания).

Условия разложения в меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками аналогичны (8)–(11), а также

$$l\tau_1 + l\tau_4 \geq 2l\tau_3 + t_{\Sigma}, \quad (12)$$

$$l\tau_4 \geq l\tau_3 + t_{\Sigma}. \quad (13)$$

При практической реализации защитных МЛ возникает задача их компактного размещения на печатной плате [14]. Простое последовательное расположение витков (развернутая структура) может занимать значительную площадь. Решением этой задачи является сворачивание структуры, при котором витки располагаются в непосредственной близости друг от друга. Такое конструктивное исполнение не только решает задачу миниатюризации, но и приводит к дополнительному ослаблению СКИ. При сворачивании возникает сильная паразитная электромагнитная связь между проводниками витков, а также появляются многочисленные неоднородности в местах изгибов и перемычек. Все это приводит к возникновению множества отражений и перекрестных помех. В результате на выходе, помимо основных импульсов разложения, присутствует множество импульсов разной полярности. Они накладываются на основные импульсы разложения, что приводит к ослаблению СКИ. Таким образом, паразитная связь, которая в классическом представлении считается негативным фактором, здесь превращается в полезный инструмент для ослабления помехи. Так, показано, что свернутая структура обеспечивает более высокое ослабление СКИ: до 5 раз по сравнению с развернутой, где оно составляет 2,4 раза [14]. Схема соединений такой структуры (где  $R1 = R2 = 50$  Ом) и форма напряжения на её выходе представлены на рис. 6.

Максимальная эффективность защиты от импульсных помех достигается при комбинировании МЛ с другими защитными устройствами, что позволяет создавать гибридные устройства с уникальными свойствами. Исследованы два типа таких устройств: пассивные структуры и с нелинейными элементами.

Пассивные гибридные структуры представляют собой последовательное соединение двух или более структур, использующих модальное разложение. Например, на выходе модального фильтра (МФ) формируется последовательность из двух импульсов, которые затем подаются на вход МЛ, в которой каждый из них раскладывается. При этом важно отметить, что МЛ, в сравнении с аналогичным МФ, более эффек-

тивна из-за наличия третьего импульса (перекрестной помехи) и компактности (вдвое меньшая длина структуры). Такой подход позволяет реализовать гибридную пассивную защиту в условиях ограниченного пространства на печатной плате, поскольку дает возможность использовать существующие линии передачи с защитными свойствами МФ в качестве первого каскада, а также применять более компактные МЛ в качестве последующей ступени для эффективной защиты.

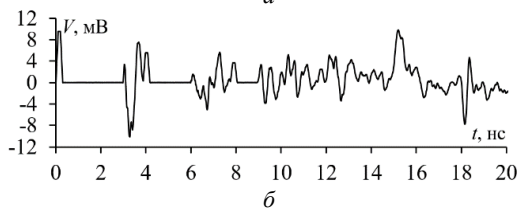
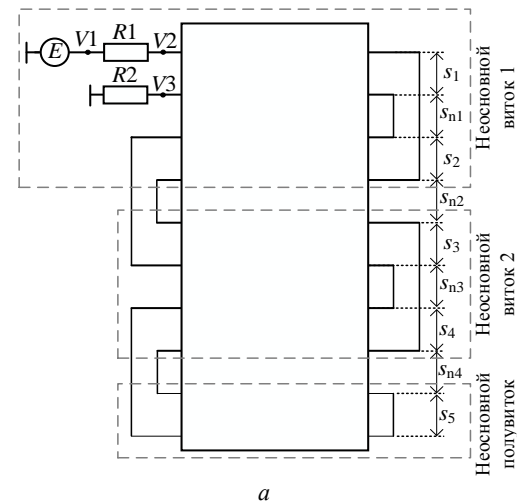


Рис. 6. Схема соединений – а; форма напряжения на выходе свернутого витка меандровой МПЛ – б

Принцип реализации такой защиты схож с многовитковыми МЛ, которые рассмотрены выше, но с учетом специфики МФ. В результате в гибридном устройстве на основе последовательного соединения 5-проводного МФ и меандровой МПЛ СКИ ослаблен в 26,6 раза [23]. Схема соединений такой структуры (где  $R1$ – $R10$  приняты по 50 Ом) и форма напряжения на её выходе в диапазоне 15–55 нс (поскольку кроме импульса перекрестной помехи до 15 нс импульсов нет, а после 55 нс наблюдаются только импульсы меньшей амплитуды, вызванные отражениями) представлены на рис. 7.

Наибольшая эффективность МЛ показана с нелинейным элементом в виде газоразрядного устройства. Исследованы два сценария его включения [24].

*Сценарий 1* – после МЛ. В этой конфигурации МЛ выполняет функцию «подготовки» газоразрядного устройства к срабатыванию. СКИ с такой длительностью, с которой не успел бы перевести газоразрядное устройство в рабочий режим (режим горения дуги), сначала раскладывается в МЛ на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Это растянутое по времени воздействие, сравнимое с периодическим импульсным воздействием, приводит к сра-

быванию газоразрядного устройства, эффективно подавляющего остаточную часть. Такое сочетание позволяет достичь ослабления СКИ до 44 раз [24]. Эффективность такого подхода максимальна при воздействии мощного СКИ, амплитуда которого после прохождения МЛ все еще достаточна для срабатывания газоразрядного устройства, но исходная длительность мала для его своевременного срабатывания.

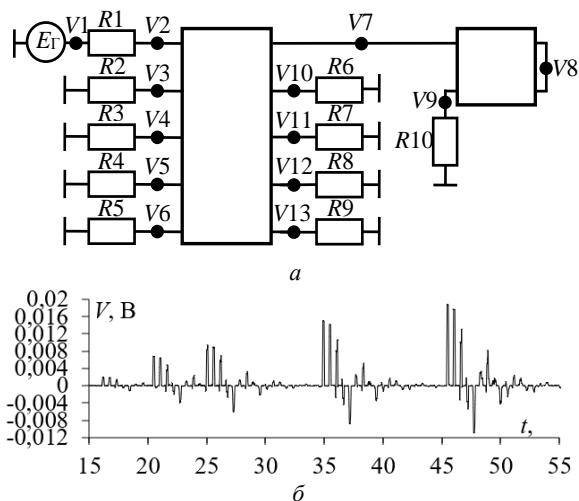


Рис. 7. Схема соединений структуры из 5-проводного МФ и витка меандровой МПЛ – а; с формой напряжения на её выходе – б

**Сценарий 2** – перед МЛ. В этом случае при воздействии СКИ определенной длительности газоразрядное устройство срабатывает с задержкой. За это время через него успевает пройти часть импульса, которая короче исходного. Она приходит в МЛ и раскладывается в ней с гораздо большей эффективностью, поскольку эффективность модального разложения напрямую зависит от соотношения длительности импульса и разности задержек мод. Это возможно использовать, когда в МЛ не обеспечиваются требуемые задержки для разложения исходного воздействия (большей длительности). В этом случае ослабление СКИ может достигать до 143 раз [24].

Структуры на основе МЛ могут использоваться для ослабления не только СКИ, но и ЭСР. Принцип защиты в этом случае заключается в разложении первого, наиболее опасного пикового выброса импульса ЭСР, поскольку именно он несет основную угрозу для быстродействующих РЭС, а длительность всего импульса ЭСР велика. Так, в меандровой МПЛ ослабление ЭСР составило до 1,4 раза [25], в МЛ с лицевой связью – 1,6 [26]. Как отмечалось выше, для эффективного ослабления СКИ важна связь между проводниками. Во всех рассмотренных случаях выше оптимальная связь достигалась выбором расстояния между проводниками эвристическим поиском. Исключение составляют витки МЛ в однородном диэлектрическом заполнении и МПЛ. Для них аналитически получены оптимальные коэффициенты связи и условия равенства амплитуд составляющих отклика на выходе витка МЛ [27]. Кроме того, оптимизация

может проводиться, например, и посредством генетических алгоритмов или эволюционных стратегий. Для этого сначала необходимо задать критерии оптимизации, основанные на условиях разложения и требуемом ослаблении, как показано в [14].

С учетом проведенного выше анализа защитные устройства на основе МЛ классифицированы по 4 ключевым признакам:

1. По диэлектрическому заполнению: однородное или неоднородное.
2. По поперечному сечению: симметричное или асимметричное.
3. По топологии: одно- и многовитковые, несвернутые и свернутые структуры.
4. По комбинированию: с пассивными структурами, с нелинейными компонентами.

Первый признак определяет возможность ненулевой разности скоростей распространения мод. Второй признак определяет наличие дополнительных импульсов разложения, кроме основных. Третий признак определяет способ масштабирования базового эффекта разложения: последовательное соединение витковкратно увеличивает итоговое ослабление, а сворачивание решает задачу миниатюризации и вводит дополнительное ослабление помехи за счет паразитных связей. Наконец, четвертый признак позволяет использовать свойства МЛ совместно с другими пассивными или нелинейными компонентами. Каждый последующий признак по существу увеличивает возможное ослабление в соответствующей структуре. При этом для каждого признака возможна модификация для улучшения эффективности защиты посредством добавления пассивных проводников в поперечное сечение. Но в этом случае необходимы резисторы на концах пассивных проводников.

#### Теоретические основы разложения и методика синтеза

Представленная выше систематизация показывает, что защитный эффект МЛ основан на управляемом процессе временного разложения импульсной помехи на составляющие и оптимизации связи между проводниками. Процесс разложения подчиняется ряду аналитических условий, которые связывают параметры воздействующего импульса с электрофизическими и геометрическими параметрами структуры. Выравнивание амплитуд разложенных импульсов достигается оптимальной связью. В простых структурах (виток МЛ в однородном диэлектрическом заполнении и симметричная меандровая МПЛ) выравнивание достигается выполнением условий и выбором коэффициентов связи, полученных аналитически [27]. При этом если они не получены для других структур на основе МЛ, то возможна их разработка или оптимизация параметров структуры по критерию выравнивания амплитуд импульсов разложения. Совокупность этих подходов формирует теоретическую базу для целенаправленного синтеза защитных МЛ.

Для предварительного определения числа импульсов разложения (которых чем больше, тем больше ослабление помехи, как показано выше)

можно сформулировать общее правило: для структуры с  $M$  проводниками в поперечном сечении общее число возможных импульсов разложения  $N_s$  (с учетом перекрестной помехи) равно

$$N_s = 1 + M. \quad (14)$$

Если же исходная структура, к которой добавляются пассивные проводники, является асимметричной в поперечном сечении, то число импульсов разложения

$$N_a = 1 + M + H, \quad (15)$$

где  $H$  – число линейных комбинаций погонных задержек мод поперечных волн структуры:

$$H = (M(M-1))/2. \quad (16)$$

В многовитковых структурах на основе МЛ (когда число проводников в поперечном витке каждого витка одинаково), соединенных последовательно, число возможных импульсов разложения определяется как

$$K = L^i, \quad (17)$$

где  $L$  – число основных импульсов разложения на выходе первого витка, которое может определяться по (14) или (15), в зависимости от структуры, а  $i$  – число витков.

При последовательном соединении структур с разным числом проводников (например, 5-проводный МФ и виток меандровой МПЛ) число импульсов разложения будет определяться как

$$N_d = L_1 L_2 \dots L_k, \quad (18)$$

где  $L_1, L_2, L_k$  – число основных импульсов разложения в 1, 2 и  $k$ -й структурах ( $k$  – число структур), соединенных последовательно, которое может определяться, как  $M$  по (14) или (15), в зависимости от структуры.

Для разложения на требуемое число импульсов необходимо воспользоваться известными условиями разложения (1)–(13) либо разработать их для новых структур на основе МЛ, исходя из предварительного анализа выше и (14)–(18).

При включении структуры на основе МЛ с газоразрядным устройством на ее выходе для нее необходимо выполнить условия разложения и обеспечить оптимальную связь между проводниками с учетом условий для своевременного срабатывания газоразрядного устройства.

$$t_{cr} \leq t_{\Sigma ML}, \quad (19)$$

$$t_{tr} \leq \Delta t_{max}, \quad (20)$$

где  $t_{cr}$  – время, когда газоразрядник перешёл в рабочий режим (горение дуги),  $t_{\Sigma ML}$  – суммарная длительность последовательности импульсов на выходе МЛ,  $t_{tr}$  – время, которое газоразрядник находится в режиме тления,  $\Delta t_{max}$  – наибольшая разница задержек соседних импульсов разложения. Условие (20) необходимо выполнить для оптимальной работы газоразрядного устройства при периодическом воздействии (или когда с выхода МЛ приходит множество импульсов, следующих друг за другом без наложения).

Когда газоразрядник включен перед МЛ, необходимо выполнить аналогичные условия разложения из

раздела «Систематизация и классификация защитных меандровых структур» (или разработать новые, опираясь на (14)–(18)) с учетом длительности сокращенного газоразрядником воздействия.

Таким образом, при синтезе структур на основе МЛ (14)–(18) позволяют оценить эффективность их защиты от импульсных помех. Однако для перехода от теории разложения к созданию реальных устройств с заданными характеристиками необходим структурированный инженерный подход. На основе изложенной теории разложения и систематизации разработана обобщенная методика синтеза защитных структур на основе МЛ (рис. 8).

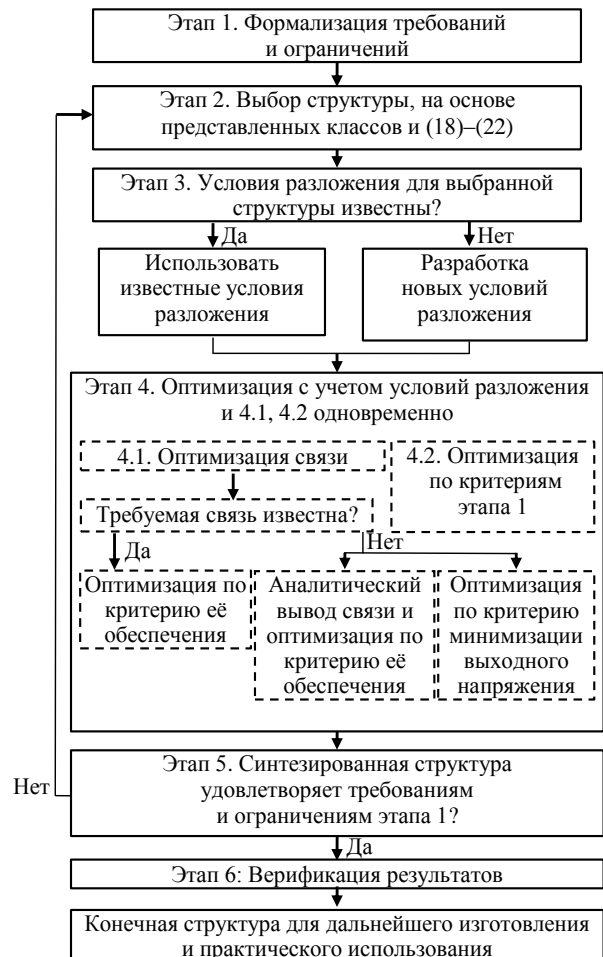


Рис. 8. Блок-схема обобщенной методики синтеза защитных структур на основе МЛ

На этапе 1 определяются все ключевые требования к защитной структуре, например, длительность помехи и её необходимое ослабление, частота среза, габариты структуры, материал подложки и ограничения по геометрическим параметрам, электрической прочности и т.д.

На этапе 2 выбирается класс структуры на основе известных из раздела «Систематизация и классификация защитных меандровых структур» предельных значений ослабления для разных классов или косвенной оценки по (14)–(18). Выбор стартовой конфигурации осуществляется на основе принципа



иерархической сложности: выбирается структура с минимальным количеством конструктивных элементов (витков, пассивных проводников) и простейшей топологией (развернутой), которая тем не менее потенциально способна удовлетворить требованию по ослаблению. Если на этапе 5 синтеза выясняется, что эта конфигурация не позволяет достичь цели в заданных ограничениях, происходит итерационный возврат на данный этап для выбора следующей, более сложной структуры (например, с увеличенным числом витков или добавлением пассивных проводников).

На этапе 3 для выбранной структуры определяются условия разложения из известных или разрабатываются новые, если синтезируемая структура неизвестна, опираясь на общие принципы теории связанных линий и модального анализа, как это сделано в разделе «Систематизация и классификация защитных меандровых структур».

На этапе 4 выполняется оптимизация с учетом условий разложения (этап 3) по критериям минимизации выходного напряжения и обеспечения заданных требований и ограничений на этапе 1. Минимизация амплитуды на выходе может обеспечиваться заданной связью. В случае если она неизвестна, необходим её аналитический вывод для новой структуры либо возможен поиск параметров, влияющих на связь между проводниками, при которых амплитуда на выходе будет минимальна. Все это достижимо эвристическим поиском или, например, генетическими алгоритмами. На данном этапе целесообразно квазистатическое моделирование для снижения вычислительных затрат.

На этапе 5 проверяется: если после оптимизации на этапе 4 не найдено решение, удовлетворяющее всем ограничениям, то возвратом на этап 2 выбирается более сложный класс структуры (например, с добавлением пассивного проводника или витка).

На этапе 6 проводится верификация, например, электродинамическим моделированием, полученной топологии в специализированной САПР. Цель верификации – подтвердить, что характеристики структуры соответствуют заданным требованиям. В случае обнаружения расхождений с квазистатической моделью (например, из-за влияния дисперсии, непостоянства группового времени запаздывания или изгибов), характеристики анализируются и корректируются. В результате успешной верификации получается конечная топология структуры, готовая для изготовления и практического использования.

#### **Апробация методики: синтез новой защитной структуры**

Практическая применимость разработанной методики показана на синтезе новой защитной структуры. Требования и ограничения приведены для примера.

*Этап 1: Формализация требований и ограничений.* Воздействия: импульс ЭСР с формой, соответствующей модели человеческого тела по стандарту ИЕС 61000-4-2, и СКИ с длительностью не более 300 пс по уровню 0,5.

Требуемое ослабление: СКИ не менее 17 раз, ЭСР не менее 2 раз.

Электрическая прочность: работа в цепях питания с постоянными напряжениями и токами до 40 В и 15 мА.

Возможность передачи данных: работа с низкоскоростным интерфейсом USB 2.0 «Full-speed».

Габариты структуры: длина и ширина структуры не более 98 мм.

*Этап 2: Предварительный выбор класса структуры.* Требуемое ослабление в 17 раз превышает возможности простых одновитковых структур, поэтому целесообразно использовать многовитковые. Но их практическая реализация сложна из-за больших длин витков и/или использования материалов с большими  $\epsilon_r$ . В этой связи выбран виток асимметричной МЛ с двумя пассивными проводниками (см. рис. 5, в, г), но дополнительно свернутый в витки.

*Этап 3: Определение условий разложения.* Известны условия разложения (8)–(13) для развернутого вида этой структуры, и они будут использованы далее. Используя (15), в такой структуре СКИ может быть разложен на 11 импульсов. В случае её сворачивания на них будут наложены отраженные импульсы отрицательной полярности, уменьшающие выходную амплитуду.

*Этап 4: Оптимизация с учетом условий разложения.* На данном этапе сначала выполнена оптимизация параметров поперечного сечения развернутой структуры по критерию обеспечения условий разложения. Затем она свернута в 10 неосновных витков и 1 неосновной полувиток с учетом её длины в несвернутом виде и требуемых габаритов. Наконец, свернутая структура оптимизирована по критерию обеспечения требуемого ослабления СКИ и ЭСР, а также других требований. После оптимизации параметры несвернутого витка МЛ:  $w_1 = 200$  мкм,  $w_2 = 300$  мкм,  $w_3 = 1900$  мкм,  $w_4 = 600$  мкм,  $t = 18$  мкм,  $s_1 = s_2 = s_3 = 400$  мкм,  $h = 450$  мкм,  $\epsilon_r = 10,2$ ;  $l = 1,6$  м. Резисторы на концах пассивных проводников приняты по 50 Ом.

*Этап 5: Проверка соответствия требованиям.* Максимальное ослабление СКИ на выходе структуры составило 17,6 раза, а ЭСР – 2,5 раза. Условия (8)–(13) выполняются для СКИ (на основе полученных задержек импульсов разложения  $t_{i2} = 24,81$ ;  $t_{i3} = 25,57$ ;  $t_{i4} = 26,34$ ;  $t_{i5} = 25,92$ ;  $t_{i6} = 26,69$ ;  $t_{i7} = 27,04$ ;  $t_{i8} = 27,99$ ;  $t_{i9} = 28,75$ ;  $t_{i10} = 29,1$ ;  $t_{i11} = 31,17$  нс). Согласно стандарту IPC-2221A и с учетом геометрических размеров, исследуемая линия может использоваться в цепях с постоянными напряжениями и токами до 40 В и 15,6 мА (в случае воздействия импульсных помех эти значения гораздо выше). В результате анализа глазковой диаграммы структуры с нанесенным на неё контуром маски USB 2 «Full-speed» она не пересекается с глазком, который остается открытым (при битрейте 12 Мбит/с). Длина и ширина структуры составили 96 и 98 мм соответственно. Таким образом, синтезированная структура соответствует требованиям.

*Этап 6: Верификация результатов.* Выполнено электродинамическое моделирование. Получено хо-

рошее согласование с квазистатическим моделированием после синтеза структуры с использованием методологии из рис. 8, изготовлен её макет (рис. 9).

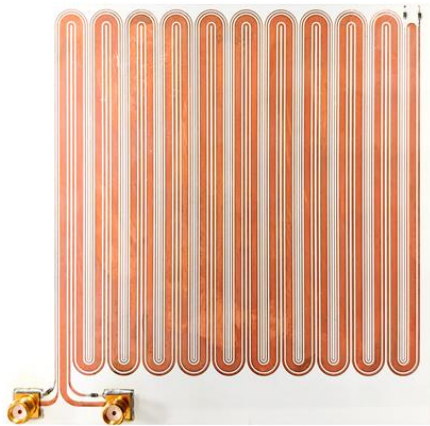


Рис. 9. Изготовленный макет синтезированной структуры [28]

Экспериментальные исследования выполнены с помощью измерения отклика во временной области (метод 1), а также измерением  $S$ -параметров с последующим вычислением временного отклика на заданное воздействие (метод 2). Кроме того, выполнено электродинамическое моделирование.

Метод 1 реализован на базе комбинированного осциллографа С9-11. При этом между выходом генератора и входом осциллографа С9-11 изготовленные макеты включались через SMA-соединители. Измерительная установка для анализа временных характеристик представлена на рис. 10, а, а оцифрованный импульс с выхода генератора С9-11 – на рис. 10, б.

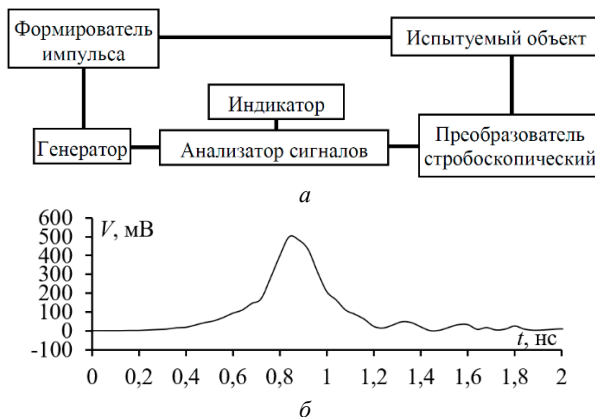


Рис. 10. Схема экспериментальной установки для анализа временных характеристик (а) и оцифрованный импульс с выхода генератора С9-11 (б)

Метод 2 реализован на базе векторного анализатора цепей Agilent Technologies E5071C с диапазоном рабочих частот от 300 кГц до 20 ГГц. В этом случае изготовленные макеты подключались к его портам через SMA-соединители с использованием высокочастотных кабелей. Затем по измеренным  $S$ -параметрам выполнялся анализ во временной области в Advanced Design System. Измерительная установка для анализа частотных характеристик представлена на рис. 11.

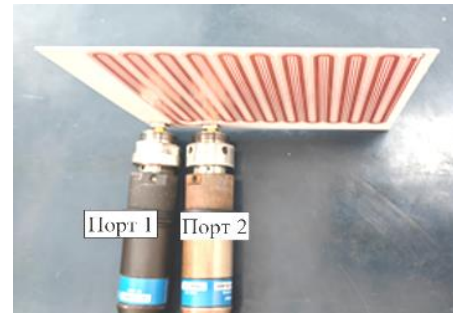


Рис. 11. Макет – а; измерительная установка для анализа его частотных характеристик – б [28]

На рис. 12 представлены формы напряжения на выходе исследуемой структуры, полученные с помощью методов 1 и 2, а также электродинамического моделирования в EMPro. Видно, что результаты хорошо согласуются. Из формы напряжения на выходе структуры следует выделить следующие импульсы: импульс перекрестной наводки на ближнем конце (практически не имеет задержки и приходит первым); основные импульсы разложения (с задержками в диапазоне 30–45 нс), а также множество импульсов, вызванных отражениями и перекрестными помехами от них из-за свернутой топологии, присутствующие во всем диапазоне. В результате такого разложения ослабление составило 17,6 раза.

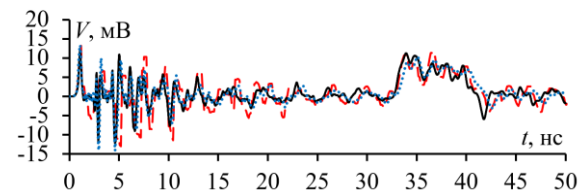


Рис. 12. Формы напряжения на выходе синтезированной структуры, полученные с помощью методов 1 (---) и электродинамического моделирования (—)

На рис. 13 представлены формы напряжения ЭСР в тракте без синтезированной структуры и на её выходе, полученные по методу 2 и электродинамическим моделированием при воздействии контактным разрядом посредством ONYX-30 (в соответствии с IEC 61000-4-2). Видно, как первая часть ЭСР раскладывается на импульсы меньшей амплитуды, которые плохо отслеживаются из-за влияния на них множества отражений, характерных для свернутой топологии. При этом вторая часть ЭСР (более длинная) при-



ходит с задержкой и не раскладывается, так как разность задержек мод для этого мала. Ослабление составило 2,5 раза.

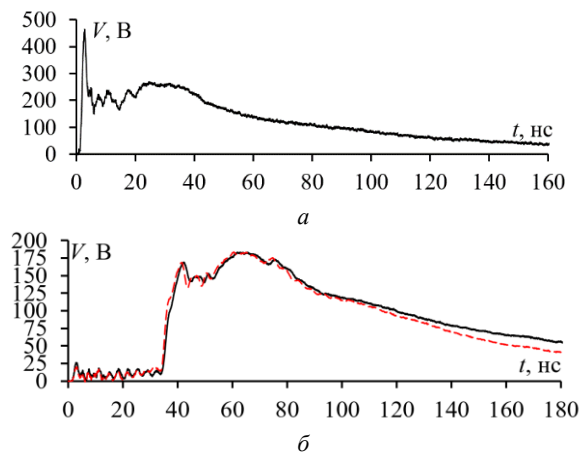


Рис. 13. Формы напряжения ЭСР в тракте без синтезированной структуры – а и на выходе исследуемой линии – б, полученные по методу 2 (—) и электродинамическим моделированием (---) при воздействии контактным разрядом посредством ONYX-30

Оценено влияние синтезированной структуры на целостность полезного сигнала в штатном режиме работы. Для анализа использован источник псевдослучайной двоичной последовательности (PRBS) из 10 000 бит и битрейтом 12 Мбит/с интерфейса USB 2.0 «Full-speed». Моделирование выполнено по измеренным S-параметрам структуры. На рис. 14 представлена глазковая диаграмма, на которую добавлен контур маски, показывающий требования к форме передаваемого сигнала для USB 2.0 «Full-speed». Получены следующие характеристики: высота глаза – 0,4 В, ширина – 81,7 нс, джиттер – 619,4 пс, отношение сигнал/шум – 6. Частота среза структуры по уровню минус 3 дБ составила 6,6 МГц. Видно, что глаз остается открытым и полностью соответствует требованиям маски стандарта, что подтверждает совместимость предложенной защитной структуры с данным типом интерфейса.

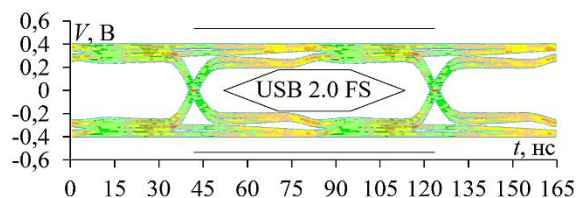


Рис. 14. Глазковая диаграмма синтезированной структуры, полученная с помощью метода 2 при битрейте 12 Мбит/с

### Направления дальнейшего совершенствования

Представленные в работе результаты открывают широкие перспективы для дальнейших исследований и разработок в области защиты РЭС с помощью МЛ. Предложенная методика их синтеза является универсальным инструментом, который может быть использован для реализации большинства из направлений

совершенствования, представленных ниже. Более того, сама методика является гибкой и может быть дополнена и усовершенствована в будущем по мере выявления новых физических эффектов и особенностей в синтезируемых структурах.

Ключевые направления для дальнейших исследований можно сгруппировать следующим образом:

1. Развитие гибридных систем и защита от разнообразных угроз.

1.1. Синергия с активными компонентами: например, исследование совместной работы МЛ с современными ограничительными элементами, такими как TVS-диоды и TVS-сборки, для создания гибридных систем с максимальным ослаблением и защитой от помех в широком охвате. Обоснование: показано, что МЛ способна «преобразовать» импульс для срабатывания инерционных элементов на примере газоразрядного устройства [24], что открывает путь к созданию высокоэффективных каскадных систем с TVS-компонентами.

1.2. Улучшение эффективности защиты от ЭСР: целенаправленное совершенствование структур (путем добавления пассивных проводников, сворачивания) и их комбинаций для увеличения ослабления не только пикового выброса ЭСР по МЧТ, но и других форм тока ЭСР, таких как механическая модель и модель заряженного устройства. Обоснование: предшествующие результаты и данная работа показали возможность подавления ЭСР по МЧТ за счет разложения его пикового выброса [25, 26], однако его ослабление невелико и поэтому логичным развитием является описанное выше в данном направлении.

1.3. Детальное исследование предельных характеристик: определение максимальных уровней мощности и энергии СКИ/ЭСР, которые могут выдерживать различные конструкции МЛ без необратимого повреждения, и изучение физических механизмов их отказа. Обоснование: для практического применения необходимо определить границы целесообразного применения предложенных структур, так как состояние исследований автора на текущий момент сфокусировано на механизмах ослабления МЛ, а не на её электрической прочности, которая достижима практически в любой степени, однако из-за чего могут значительно вырасти габариты конечной структуры.

2. Совершенствование топологии и использование новых материалов.

2.1. Совершенствование многовитковых структур: углубленное исследование многовитковых свернутых структур с усиленной связью между витками для использования этого эффекта как дополнительного механизма ослабления. Обоснование: показано, что сворачивание запускает дополнительный механизм ослабления из-за наличия множества импульсов разной полярности, вызванных отражениями и перекрестными наводками от них [14], амплитуды которых зависят от связи между проводниками и по-разному влияют на амплитуду выходного напряжения. Этот эффект недостаточно изучен подробно, в частности, лишь на примере простых структур МЛ

(например, свернутых в один виток), что может помочь в создании более эффективных структур в дальнейшем.

2.2. Расширение полосы пропускания: исследование методов увеличения полосы пропускания полезного сигнала в компактных свернутых структурах. Обоснование: результаты анализа целостности сигнала показали, что структура совместима с интерфейсом USB 2.0 Full-Speed. Для применения в более высокоскоростных интерфейсах (например, Gigabit Ethernet) потребуется разработка методов минимизации искажений полезного сигнала.

2.3. Новые материалы и технологии: проработка практической реализации МЛ по технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) и исследование влияния многослойных диэлектриков, материалов с высокой диэлектрической проницаемостью и перспективных метаматериалов для уменьшения габаритов устройств. Обоснование: не всегда возможна реализация компактных защитных МЛ, поскольку могут требоваться значительные погонные задержки мод или длины структур (например, для многослойных МЛ), решением чего является описанное выше в данном пункте.

3. Развитие теоретической базы и методов проектирования.

3.1. Разработка новых аналитических моделей: создание аналитических условий разложения для импульсов ЭСР разных моделей. Обоснование: представленная в статье теория разложения сфокусирована на СКИ и ЭСР с формой тока по МЧТ (в том числе имеются аналитические условия выравнивания амплитуд составляющих отклика на выходе МЛ при импульсном воздействии [27]), и создание аналогичных аналитических условий для стандартизированных импульсов ЭСР с формой других моделей позволяют эффективную защиту от них с помощью МЛ.

3.2. Интеграция методики в САПР: формализация разработанной методики синтеза и ее внедрение в виде специализированных модулей для автоматизированного проектирования. Обоснование: ее формализация и внедрение в САПР позволит автоматизировать и ускорить процесс проектирования защитных МЛ, а также сделать его доступным для широкого круга инженеров.

3.3. Применение методов машинного обучения: использование нейронных сетей и суррогатного моделирования для ускорения многокритериальной параметрической оптимизации сложных МЛ. Обоснование: процесс оптимизации, описанный в методике, является итерационным и вычислительно затратен для сложных структур, решением чего является описанное выше в данном пункте.

4. Расширение области применения и масштабирование.

4.1. Применение в других областях: проработка возможности использования МЛ не только для защиты, но и в качестве пассивных формирующих линий для генерации последовательностей импульсов. Обоснование: механизм разложения одного

импульса в последовательность нескольких по своей сути является процессом формирования, что открывает возможность для «обратного» применения защитных свойств МЛ – не для подавления, а для целенаправленной генерации пачки мощных импульсов в целях электромагнитного поражения РЭС.

4.2. Масштабирование на уровень интегральных схем (ИС): изучение возможности применения принципов модального разложения в МЛ для защиты на уровне корпусов интегральных схем и непосредственно на кристалле. Обоснование: угроза СКИ и ЭСР крайне актуальна на уровне ИС, а модальное разложение в МЛ не зависит от масштаба, что позволяет перенести разработанные подходы с уровня печатных плат на уровень межсоединений в корпусах ИС и на кристалле.

4.3. Аппаратное кодирование и защита информации: исследование эффекта модального разложения в МЛ для физического кодирования информации. Обоснование: суть подхода в том, что предсказуемый и обратимый характер разложения импульса в МЛ может быть использован для преобразования битовой последовательности в сложный многоуровневый сигнал с применением разработанной методики при ее незначительной доработке при необходимости. На приемном конце, зная точные параметры МЛ (которые выступают в роли «ключа»), теоретически можно выполнить обратную операцию и восстановить исходные данные.

Практическая реализация такого декодера требует решения задачи его синтеза, способного компенсировать не только модальное разложение, но и дисперсионные искажения, вносимые кодирующей структурой.

Такой подход открывает перспективы для создания миниатюрных, пассивных и высокоскоростных устройств аппаратного кодирования, обеспечивающих дополнительный уровень защиты информации на физическом уровне.

### Заключение

Представлены результаты комплексного исследования нового класса пассивных защитных устройств на основе МЛ, предназначенных для защиты РЭС от СКИ и ЭСР.

Проведена систематизация и классификация защитных МЛ по диэлектрическому заполнению, поперечному сечению, топологии и способу комбинирования. Показано, как последовательное усложнение структуры от простых симметричных витков до сложных гибридных систем позволяет наращивать эффективность защиты, ослабляя СКИ до 143 раз.

Представлена теория, описывающая физический механизм разложения импульсов в структурах на основе МЛ. Сформулированы как частные, так и обобщенные аналитические условия разложения, которые являются основными для параметрического синтеза таких устройств. Кроме того, предложены правила для оценки потенциального числа импульсов на выходе, которые служат инструментом для предварительного выбора класса структуры на начальных

этапах проектирования. Все это формирует основу для синтеза таких устройств.

Предложена обобщенная методика синтеза устройств защиты на основе МЛ. Ее работоспособность продемонстрирована на примере синтеза новой структуры, ослабляющей СКИ в 17,6 раза, а ЭСР – в 2,5 раза в цепях питания с постоянными напряжениями и токами до 40 В и 15,6 мА или в интерфейсе USB 2.0 «Full-speed».

Важно отметить многофункциональную роль предложенных структур при защите от ЭСР. В зависимости от сценария воздействия и устойчивости защищаемой цепи они могут представлять:

1. Элемент первого эшелона: при воздействии мощных прямых разрядов МЛ ослабляет ЭСР, снижая как амплитуду его пика, так и скорость нарастания напряжения ( $dU/dt$ ). Это достигается разложением одного мощного импульса на последовательность более слабых, разнесенных во времени, что увеличивает общую продолжительность воздействия и обеспечивает условия для безопасной работы последующих ступеней защиты (например, TVS-диодов).

2. Самодостаточное устройство: при защите относительно устойчивых цепей, чувствительных именно к скорости нарастания напряжения, МЛ в одиночку устраняет ключевую угрозу – экстремально крутой фронт.

3. Финальное средство защиты: при воздействии вторичных эффектов ЭСР с меньшей амплитудой (например, 5–10 В) МЛ способна ослабить помеху до безопасного для низковольтной логики уровня.

Такая гибкость применения делает меандровые структуры универсальным инструментом для решения широкого круга задач обеспечения ЭМС.

Представлены направления дальнейшего совершенствования меандровых структур. Предложенная в работе методика их синтеза является универсальным инструментом реализации большинства из приведенных направлений. Более того, предложенная методика гибка и позволяет включать в себя учет новых физических эффектов и особенностей, которые могут быть выявлены при синтезе будущих структур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 25-29-00139, <https://rscf.ru/project/25-29-00139/> в ТУСУР.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту, д.т.н., профессору Т.Р. Газизову за многолетнюю поддержку и стратегическое видение, определившее направление данного исследования.

Отдельные слова глубочайшей признательности автор адресует д.т.н. Р.С. Суровцеву, за терпеливое наставничество и помощь в освоении основ научной работы, в особенности на начальном этапе.

Автор также благодарит рецензентов за их кропотливый труд, внимательность и ценные рекомендации, которые способствовали существенному улучшению статьи.

## Литература

1. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев // Технологии ЭМС. – 2006. – № 3 (18). – С. 36–45.
2. Здухов Л.Н. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Л.Н. Парфёнов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2 (65). – С. 22–34.
3. Lee K.S. EMP interaction: principles, techniques, and reference data a handbook of technology from the EMP interaction notes. – Washington, D.C.: Hemisphere Pub. Corp, 1986.
4. Guilleme D.S. Intentional electromagnetic irradiation of a microcontroller / D.S. Guilleme, T.J. Clarke, C. Christodoulou // 2019 International conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA). – Spain, 09–13 September 2019. – P. 1214–1218.
5. Кечиев Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. – М.: ИД «Технологии», 2005. – 352 с.
6. Weber S.P. Predicting parasitics and inductive coupling in EMI-filters / S.P. Weber, E. Hoene, S. Guttowski, J. John, H. Reichl // 21st IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2006. – Vol. 1. – P. 1157–1160.
7. Wang S. Effects of parasitic parameters on EMI filter performance / S. Wang, F.C. Lee, D.Y. Chen, W.G. Odendaal // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19, No. 3. – P. 869–877.
8. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания: монография / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.
9. Капура И.А. Анализ методов и средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных излучений / И.А. Капура, Б.В. Бакуменко // Системы обработки информации. – 2010. – № 6. – С. 87–90.
10. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС. – 2006. – № 4 (19). – С. 40–44.
11. Пат. 79355 РФ. Модальный фильтр / Т.Р. Газизов и др. – № 2008127527/22; заявл. 07.07.08; опубл. 27.12.08, Бюл. № 36.
12. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.
13. Суровцев Р.С. Модальное разложение в полосковых меандровых линиях для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных импульсных помех субнаносекундной длительности: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2024. – 366 с.
14. Малыгин К.П. Помехозащитные структуры на основе витка меандровой микрополосковой линии с улучшенными характеристиками: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2024. – 149 с.
15. Belousov A.O. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, A.V. Medvedev, A.V. Nosov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/7/1117/pdf>. – 2020. – Vol. 12(7), No. 1117. – P. 1–39.

16. Surovtsev R.S. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Siberian conf. on control and communications. – Omsk, Russian Federation, 2015. – P. 1–7.

17. Surovtsev R.S. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – June 29 – July 3, 2015. – P. 175–177.

18. Nosov A.V. Revealing new possibilities of ultrashort pulse decomposition in a turn of asymmetrical meander delay line / A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Chelal, Russia, 29 June – 3 July, 2020. – P. 149–153.

19. Kim G.Y. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines / G.Y. Kim, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.T. Gazizov, A.E. Maximov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – P. 1–6.

20. Kim G.Y. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protective devices based on meander lines with an asymmetric cross-section / G.Y. Kim, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. – Yekaterinburg, Russian Federation, 19–21 September 2022. – P. 131–135.

21. Nosov A.V. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor / A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862. – P. 1–6.

22. Малыгин К.П. Ослабление сверхкороткого импульса в меандровой микрополосковой линии с двумя пассивными проводниками / К.П. Малыгин, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 7. – 24 с.

23. Сирица В.А. Разложение сверхкороткого импульса в каскадно соединенных 5-проводном микрополосковом модальном фильтре и витке меандровой микрополосковой линии / В.А. Сирица, Р.С. Суровцев, А.В. Носов // Матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 321–324.

24. Ким Г.Ю. Гибридный способ защиты от сверхкоротких импульсов на основе меандровой линии и газоразрядного устройства / Г.Ю. Ким, К.П. Малыгин, Е.С. Жечев, В.Ю. Конев, А.В. Носов // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 2. – С. 149–172.

25. Nosov A.V. Investigation of possibility of protection against electrostatic discharge using meander microstrip line / A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, No. 2. – P. 1–6.

26. Носов А.В. Ослабление влияния электростатического разряда витком меандровой линии с лицевой связью // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 1–22.

27. Суровцев Р.С. Аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальными явлениями: монография / Р.С. Суровцев, З.М. Кенжегулова. – Томск: ТУСУР, 2023. – 172 с.

28. Malygin K.P. Attenuation of an ultrashort pulse in a folded meander microstrip line with two passive conductors / K.P. Malygin, A.V. Nosov, G.Y. Kim // International Journal of Circuit Theory and Applications. – 2024. – Vol. 52, No. 11. – P. 5630–5646.

## Носов Александр Вячеславович

Канд. техн. наук, доцент, докторант каф.

телевидения и управления (ТУ) Томского университета

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0002-5005-3026

Тел.: +7-923-406-86-01

Эл. почта: alexns2094@gmail.com

Поступила в редакцию: 07.07.2025.

Принята к публикации: 05.08.2025.

Nosov A.V.

## Protective meander structures against pulse interference: systematization, classification, theory, and future directions

This paper provides a systematization and classification of protective meander structures based on key features: the type of dielectric filling, cross-sectional geometry, topology, and method of combination. The study demonstrates that progressively increasing structural complexity, from simple symmetric turns to complex hybrid systems, enhances protective performance, achieving an attenuation of ultrashort pulses by up to 143 times. To quantify this potential, formulas for estimating the number of output pulses are proposed. Based on this analysis, a comprehensive decomposition theory and a synthesis methodology are developed for designing meander structures to meet target specifications. The methodology is demonstrated through the synthesis and investigation of a new structure that achieves an attenuation of 17.6 times for ultrashort pulses and 2.5 times for electrostatic discharges. Finally, promising directions for future research and improvement are outlined.

**Keywords:** meander line, electromagnetic compatibility, pulse protection, ultrashort pulse, electrostatic discharge, modal filtering, coupled transmission lines, pulse decomposition, passive protection device, hybrid device.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-2-29-41

## References

1. Saharov K.Yu., Sokolov A.A., Miheev O.V. *Issledovanie funkcionirovaniya lokalnoj vychislitelnoj seti v usloviyah vozdeystviya sverhkorotkih elektro-magnitnyh impulsov* [Study of the functioning of a local area network under the influence of ultrashort electromagnetic pulses]. *Tekhnologii EMS* [EMC technologies], 2006, no. 3 (18), pp. 36–45 (in Russ.).

2. Zdukhov L.N., Parfenov L.N., Tarasov O.A., Chepelev V.M. *Tri vozmozhnyh mekhanizma vozniknoveniya otkazov elektronnyh ustroystv v rezul'tate elektromagnitnogo vozdeystviya* [Three possible mechanisms of failure of electronic devices due to electromagnetic influence]. *Tekhnologii EMS* [EMC technologies], 2018, no. 2(65), pp. 22–34 (in Russ.).

3. Lee K.S. EMP interaction: principles, techniques, and reference data a handbook of technology from the EMP interaction notes, Washington, D.C.: Hemisphere Pub. Corp, 1986.

4. Guillelte D.S., Clarke T.J., Christodoulou C. *Intentional electromagnetic irradiation of a microcontroller*. 2019 International conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA), Spain, 09–13 September 2019, pp. 1214–1218.

5. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. *Zashchita elektronnyh sredstv ot vozdeystviya staticheskogo elektrichestva* [Protecting electronics from static electricity]. Moscow: Publishing house «Technologies», 2005, 352 p. (in Russ.).

6. Weber S.P., Hoene E., Guttowski S., John J., Reichl H. Predicting parasitics and inductive coupling in EMI-filters. *21st IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2006, vol. 1, pp. 1157–1160.
7. Wang S., Lee F.C., Chen D.Y., Odendaal W.G. Effects of parasitic parameters on EMI filter performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 19, no. 3, pp. 869–877.
8. Gizatullin R.M., Gizatullin Z.M. *Pomekhoustojchivost i informacionnaya bezopasnost vy-chislitelnoj tekhniki pri elektromagnitnyh vozdeystviyah po seti elektropitaniya: monografiya* [Noise immunity and information security of computing equipment under electromagnetic influences via the power supply network: monograph]. Kazan, Kazan State Technical University Publ, 2014, 142 p. (in Russ.).
9. Kapura I.A., Bakumenko B.V. *Analiz metodov i sredstv zashchity radioelektronnoj apparatury ot vozdeystviya moshchnykh elektromagnitnykh izlucheniij* [Analysis of methods and means of protecting electronic equipment from the effects of powerful electromagnetic radiation]. *Sistemy obrabotki informacii* [Information processing systems], 2010, no. 6, pp. 87–90 (in Russ.).
10. Gazizov T.R., Zabolockij A.M. *Modalnoe razlozhenie impulsa v otrezkakh svyazannykh linij kak novyy princip zashchity ot korotkikh impulsov* [Modal decomposition of a pulse in sections of connected lines as a new principle of protection against short pulses]. *Tekhnologii EMS* [EMC technologies], 2006, no. 4 (19), pp. 40–44 (in Russ.).
11. Gazizov T.R. et. al. *Modalnyj filtr* [Modal filter]. Patent RF, no. 79355, 2008.
12. Gazizov T.R., Zabolockij A.M. *Teoreticheskie osnovy modalnoj filtracii* [Theoretical foundations of modal filtering]. *Tekhnika radiosvyazi* [Radio communication technology], 2014, no. 3, pp. 79–83 (in Russ.).
13. Surovtsev R.S. *Modalnoe razlozhenie v poloskovykh meandrovnykh liniyakh dlya zashchity radioelektronnykh sredstv ot konduktivnykh impulsnykh pomekh subnanosekundnoj dlitelnosti. Diss. na soisk. uch. st. doktora. tekhn. nauk* [Modal decomposition in strip meander lines for protection of electronic equipment from conducted impulse interference of subnanosecond duration. Doct. Diss.], Tomsk, 2024, 366 p. (in Russ.).
14. Malygin K.P. *Pomekhozashchitnye struktury na osnove vitka meandrovoj mikropoloskovoj linii s uluchshennymi harakteristikami. Diss. kand. tekhn. nauk* [Interference protection structures based on a meander microstrip line with improved characteristics. Cand. Diss.], Tomsk, 2024, 149 p. (in Russ.).
15. Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A., Medvedev A.V., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration. *Symmetry*, 2020, vol. 12 (7), no. 1117, pp. 1–39.
16. R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses. *Proc. of Siberian conf. on control and communications*, Omsk, Russian Federation, 2015, pp. 1–7.
17. 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, June 29 – July 3, 2015, pp. 175–177.
18. Nosov A.V., Surovtsev R.S. *Revealing new possibilities of ultrashort pulse decomposition in a turn of asymmetrical meander delay line*. XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Chelal, Russia, 29 June – 3 July, 2020, pp. 149–153.
19. 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, pp. 1–6.
20. Kim G.Y., Nosov A.V., Surovtsev R.S. *Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protective devices based on meander lines with an asymmetric cross-section*. 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. Yekaterinburg, Russian Federation, 19–21 September, 2022, pp. 131–135.
21. Nosov A.V., Surovtsev R.S. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1862, pp. 1–6.
22. Malygin K.P., Nosov A.V., Surovtsev R.S. [Attenuation of an ultrashort pulse in a meander microstrip line with two passive conductors]. *Journal of Radio Electronics*, 2022, no. 7, 24 p. (in Russ.).
23. Sirica V.A., Surovtsev R.S., Nosov A.V. *Razlozhenie sverhkorotkogo impulsa v kaskadno soedinen-nykh 5- provodnom mikropoloskovom modalnom filtre i vitke meandrovoj mikropoloskovoj linii* [Decomposition of an ultrashort pulse in a cascaded 5-wire microstrip modal filter and a meander microstrip line]. *Materialy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya»* [Proceedings of the reports of the International scientific and practical conference "Electronic means and control systems"], Tomsk, 2020, vol. 1, pp. 321–324 (in Russ.).
24. Kim G.Y., Malygin K.P., Zhechev E.S., Konev V.Y., Nosov A.V. [Hybrid method of protection against ultrashort pulses based on a meander line and a gas-discharge device]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 149–172 (in Russ.).
25. Nosov A.V., Surovtsev R.S., Gazizov T.R. Investigation of possibility of protection against electrostatic discharge using meander microstrip line. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 2, pp. 1–6.
26. Nosov A.V. [Reducing the electrostatic discharge impact by a meander line with broad-side coupling]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 1–22 (in Russ.).
27. Surovtsev R.S., Kenzhegulovala Z.M. *Analiticheskie modeli vremennogo otklika poloskovykh ustrojstv s modalnymi yavleniyami: monografiya* [Analytical models of time response of stripline devices with modal phenomena: monograph]. Tomsk: Tomsk State Univ. of Cont. Sys. and Radioelect. Publ, 2023, 172 p. (in Russ.).
28. Malygin K.P., Nosov A.V., Kim G.Y. Attenuation of an ultrashort pulse in a folded meander microstrip line with two passive conductors. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2024, vol. 52, no. 11, pp. 5630–5646.

#### Alexander V. Nosov

Candidate of Science in Engineering, Associate Professor, Doctoral Student, Department of television and control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-5005-3026  
Phone: +7-923-406-86-01  
Email: alexns2094@gmail.com

Received: 07.07.2025.

Accepted: 05.08.2025.