

УДК 621.372

## Уменьшение габаритов защитных структур из двух отрезков на основе модальной фильтрации управлением последовательностью импульсов разложения

Носов А. В., Газизов Т. Р.

**Постановка задачи:** С ростом плотности монтажа и быстродействия радиоэлектронных средств (РЭС) традиционные средства защиты от сверхкоротких импульсов (СКИ) становятся малоэффективными из-за недостаточного быстродействия, массогабаритных ограничений и низкой радиационной стойкости. Применение многовитковых меандровых линий (МЛ) и модальных фильтров (МФ) позволяет решить эту проблему, однако использование покрытий с высокой диэлектрической проницаемостью (например, радиопоглощающих материалов (РПМ)) для их миниатюризации может привести к инверсии скоростей распространения мод. Это делает классические условия модального разложения неприменимыми и требует корректировки математического аппарата для проектирования таких устройств. **Целью работы** является минимизация габаритов структур из двух отрезков, соединенных последовательно, на основе модальной фильтрации за счет инвариантных к порядку прихода импульсов мод условий разложения и оптимизации этого порядка. **Используемые методы:** использован подход, включающий анализ, структурно-параметрическую оптимизацию эвристическим поиском, а также вычислительный эксперимент в системе TUSUR.EMC. **Новизна:** впервые получены аналитические выражения для инвариантных условий разложения СКИ в двухпроводных структурах из двух отрезков, соединенных последовательно, основанных на упорядочивании мод по экстремумам погонных задержек, что обеспечивает корректность расчетов при инверсии порядка прихода их импульсов вследствие изменения диэлектрической среды. Обосновано преимущество альтернативных последовательностей разложения, обеспечивающих кратное сокращение длины витков при сохранении ослабления СКИ. **Результат:** показано, что для двухвитковой меандровой микрополосковой линии оптимизация порядка прихода импульсов в комбинации с РПМ позволяет сократить суммарную физическую длину в 5,1 раза при сохранении ослабления СКИ 4 раза. Для МЛ с лицевой связью продемонстрирована возможность разложения СКИ на 16 основных импульсов, что обеспечило ослабление СКИ 6,61 раза при длине 334,6 мм. Установлено, что гибридные структуры (последовательное соединение МФ и МЛ) обладают наибольшим защитным потенциалом, обеспечивая ослабление СКИ до 6,65 раза. **Практическая значимость:** предложенные решения и математический аппарат позволяют проектировать компактные устройства защиты на основе модальной фильтрации для критичных РЭС.

**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, меандровая линия, лицевая связь, гибридная защита, инвариантные условия разложения, миниатюризация.

### Актуальность

Современные тенденции развития радиоэлектронных средств (РЭС) характеризуются ростом плотности компоновки и быстродействия, что неизбежно ведет к снижению рабочих напряжений и увеличению восприимчивости ком-

#### Библиографическая ссылка на статью:

Носов А. В., Газизов Т. Р. Уменьшение габаритов защитных структур из двух отрезков на основе модальной фильтрации управлением последовательностью импульсов разложения // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 2. С. 50-68. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-050-068

#### Reference for citation:

Nosov A. V., Gazizov T. R. Minimizing the dimensions of two-segment protective structures based on modal filtering by managing the decomposition pulse sequence. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 2, pp. 50-68 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-050-068

понентов к электромагнитным помехам. Известно, что преднамеренные электромагнитные воздействия (ПДЭМВ) могут представлять угрозу для современной РЭС [1, 2]. Так, генераторы мощных ПДЭМВ могут быть использованы злоумышленниками для дестабилизации или полного выведения из строя критической инфраструктуры [3–7]. Одной из наиболее опасных угроз для РЭС является воздействие сверхкоротких импульсов (СКИ) субнаносекундного диапазона [8]. Традиционные средства защиты на основе полупроводниковых компонентов (TVS-диоды, варисторы) обладают рядом критических недостатков: ограниченным временем срабатывания, значительной собственной емкостью и низкой радиационной стойкостью, что ограничивает срок эксплуатации [9].

В качестве перспективной альтернативы рассматриваются пассивные устройства защиты, основанные на технологии модальной фильтрации в связанных линиях передачи. Принцип действия таких устройств заключается в разложении исходного СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды за счет разности скоростей распространения мод структуры [10, 11]. Ранее показано [12, 13], что меандровые линии (МЛ) способны эффективно ослаблять как СКИ, так и пиковый выброс электростатического разряда (ЭСР) по модели человеческого тела. В частности, успешно продемонстрировано ослабление СКИ в меандровой микрополосковой линии (МПЛ) из двух витков с использованием радиопоглощающего материала (РПМ) [14]. Развитием данного подхода стал синтез гибридных защитных структур. Так, в работе [15] теоретически обосновано преимущество последовательного соединения трехпроводного модального фильтра (МФ) и МЛ, что позволило достичь высокого ослабления СКИ.

Практическое внедрение таких устройств в малогабаритную РЭС затрудняется их значительными габаритами: для полного разложения импульса на стандартных подложках требуются линии длиной до нескольких метров или подложки с большой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_r$  до 80). Использование РПМ в качестве покрытия и подложек с большой  $\epsilon_r$  для миниатюризации, предложенное в [16], эффективно уменьшает длину, но вносит новые эффекты. Так, при определенных значениях  $\epsilon_r$  среды происходит сближение и/или последующее «пересечение» (инверсия) задержек мод так, что порядок их прихода на выход структуры меняется на обратный. Это создает математическую неопределенность при автоматизированном проектировании и оптимизации параметров в САПР, что ранее не учитывалось в классических расчетных моделях [17, 18]. Кроме того, требуется оптимизация временной последовательности импульсов в структурах из двух витков. Большинство существующих работ по устройствам защиты на основе модальной фильтрации из двух и более последовательно соединенных устройств [18, 19] ориентировано на стандартный порядок прихода импульсов разложения, в то время как изменением этого порядка можно сократить физическую длину конечного устройства, не ухудшая защиты.

Учитывая вышеизложенное, создание универсального математического аппарата, инвариантного к изменению порядка прихода импульсов мод, и оптимизация сложных многовитковых и гибридных структур по габаритному критерию являются необходимыми условиями для создания новых устройств защиты РЭС от СКИ.

Целью работы является минимизация габаритов структур из двух отрезков, соединенных последовательно, на основе модальной фильтрации за счет инвариантных к порядку прихода импульсов мод условий разложения и оптимизации этого порядка. Для её достижения надо решить следующие задачи.

1. Разработать систему инвариантных условий разложения СКИ для структур из двух витков, обеспечивающую корректность проектирования при инверсии порядка прихода импульсов мод.

2. Выполнить параметрическую оптимизацию геометрических параметров структур и сравнительный анализ альтернативных последовательностей прихода импульсов разложения.

3. Разработать систему инвариантных условий для гибридных защитных устройств на основе последовательного соединения двухпроводного МФ и МЛ, оптимизировать их и проанализировать их защитные характеристики.

4. Сопоставить преимущества рассмотренных структур по габаритам и ослаблению СКИ.

### Исходные данные

Для достижения поставленной цели в работе рассмотрены 4 конфигурации защитных устройств: меандровая МПЛ из двух витков (структура 1); МЛ с лицевой связью из двух витков (структура 2); гибридные структуры, на основе последовательного соединения двухпроводного МФ и меандровой МПЛ (структура 3), а также на основе двухпроводного МФ и МЛ с лицевой связью (структура 4).

Поперечные сечения и схемы соединений исследуемых структур представлены на рис. 1. Их исходные параметры: ширина проводников  $w=1$  мм, расстояние между проводниками  $s=0,3$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h=1$  мм, толщина проводников  $t=70$  мкм, у подложки  $\epsilon_r=10$ . На схемах все сопротивления приняты по 50 Ом. Воздействовал трапециевидный СКИ с амплитудой ЭДС 1 В, длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс. Таким образом, общая длительность воздействия ( $t_{\Sigma}$ ) составляет 200 пс. Моделирование выполнено в системе TUSUR.EMC [20].

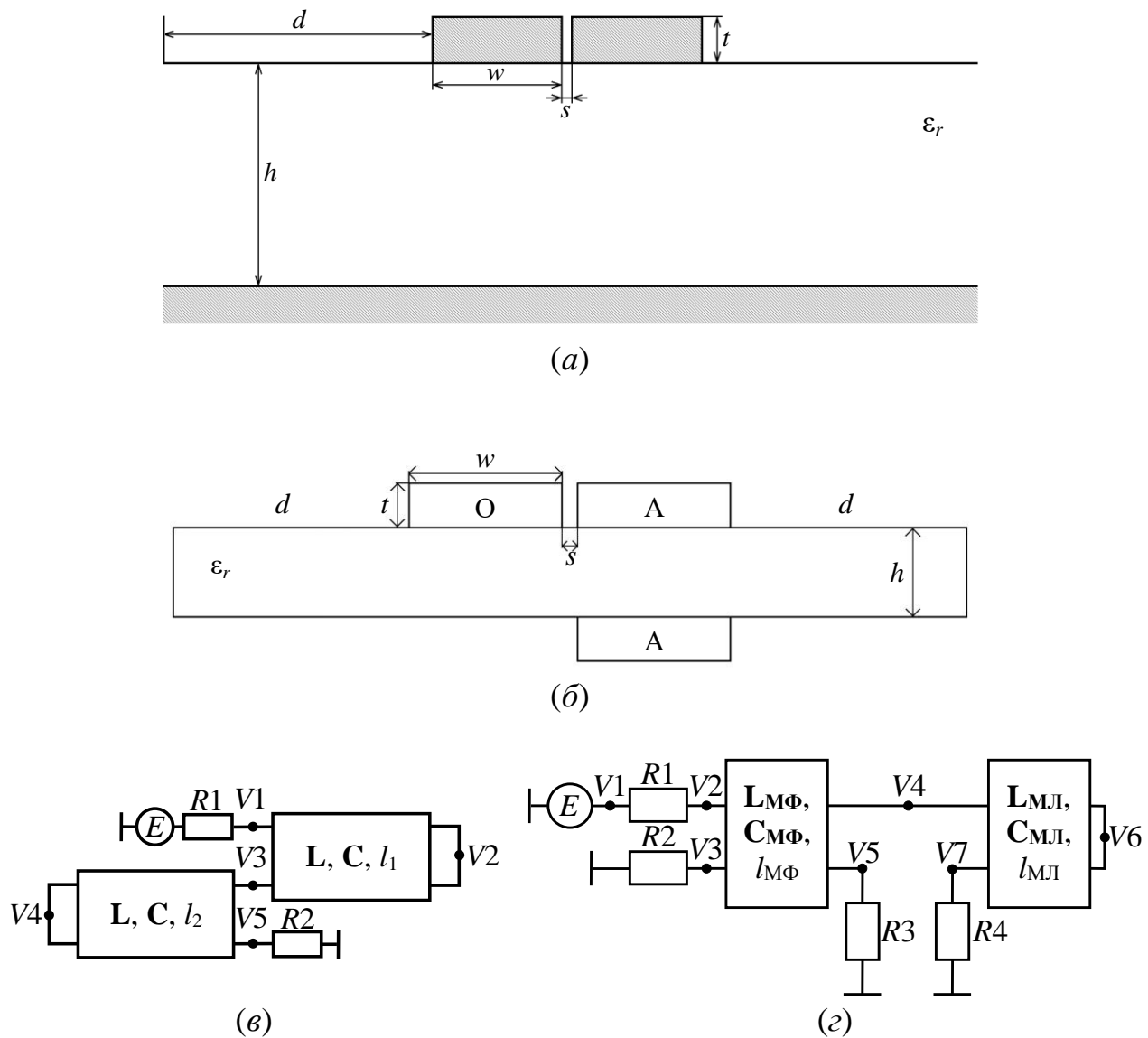


Рис. 1. Поперечные сечения, одинаковые для двухпроводного МФ и меандровой МПЛ (а), МЛ с лицевой связью (б), а также схемы соединений структур 1, 2 (в) и 3, 4 (г)

### Инвариантные условия разложения сверхкоротких импульсов в структурах из двух витков

Традиционный подход к проектированию устройств защиты на основе модальной фильтрации базируется на условиях разложения импульсов, жестко привязанных к одному порядку следования четной и нечетной мод: например,  $2l(\tau_e - \tau_o) \geq t_{\Sigma}$ , в случае двухпроводных структур [17]. Однако при переходе к многовитковым структурам с использованием покрытий с большой  $\epsilon_r$  (например, РПМ) для их миниатюризации, этот порядок может меняться из-за инверсии погонных задержек мод.

На рис. 2 представлены зависимости погонных задержек четной и нечетной мод ( $\tau_e$  и  $\tau_o$  соответственно, одинаковые для витков 1 и 2 из-за их аналогичных параметров) от диэлектрической проницаемости покрытия ( $\epsilon_{rП}$ ) структур 1 (меандровой МПЛ) и 2 (МЛ с лицевой связью). Толщина покрытия со-

ставляет 1 мм, а  $\epsilon_{r\Pi}$  изменялась в диапазоне от 1 до 20 (что близко к ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л, далее покрытие с  $\epsilon_{r\Pi}=20$  будет упоминаться, как РПМ).

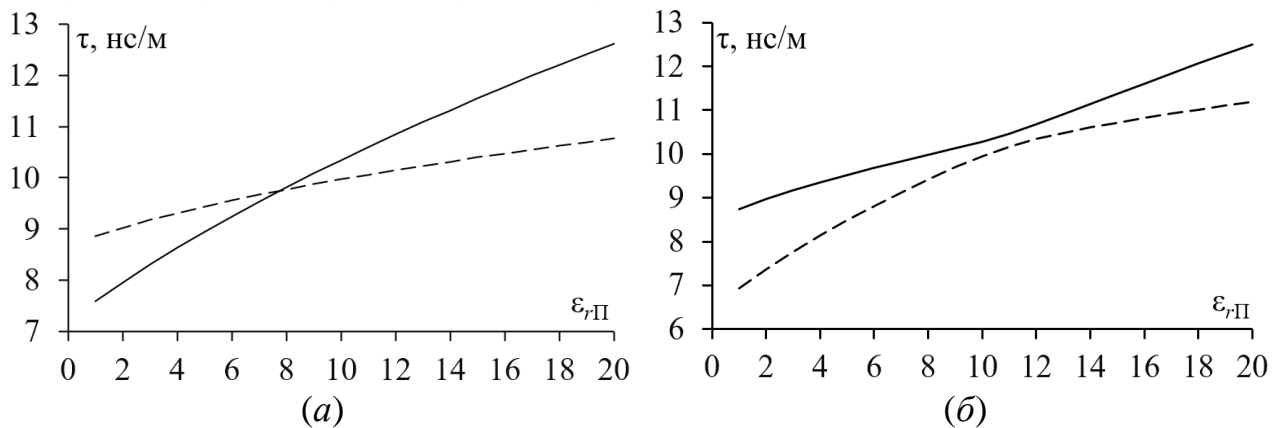


Рис. 2. Зависимости  $\tau_e$  (---) и  $\tau_o$  (—) от  $\epsilon_{r\Pi}$  структур 1 (а) и 2 (б)

Из рис. 2 видно, что рост  $\epsilon_{r\Pi}$  меняет  $\tau_e$  и  $\tau_o$  нелинейно. Для структуры 1 (рис. 2а) наблюдается точка пересечения, в которой разность задержек мод ( $\Delta\tau$ ) стремится к нулю. После прохождения этой точки мода, ранее «быстрая», становится «медленной». В МЛ с лицевой связью (рис. 2б) моды лишь сближаются до экстремума, однако при определенных сочетаниях параметров подложки и покрытия инверсия задержек проявляется и в них (при  $\epsilon_r=3$ , однако здесь эти результаты не приводятся). Кроме того, в МЛ с лицевой связью без покрытия исходно нечетная мода медленнее четной, а в меандровой МПЛ без покрытия – наоборот. Таким образом, привязка условий разложения к конкретным модам (индексам  $e$  и  $o$  в двухпроводной структуре) ограничивает процесс проектирования. При инверсии задержек традиционные расчетные модели не универсальны: они сужают пространство поиска и отсекают топологии, способные обеспечить эффективную защиту при меньших габаритах. Для преодоления этого и синтеза компактных структур необходим переход к математическому аппарату, не зависящему от того, какая мода является «быстрой», а какая – «медленной».

Для обеспечения устойчивости проектирования структур из двух проводников с любыми параметрами и средами выполнен переход к условиям, инвариантным к порядку прихода импульсов мод. Его новизна заключается в использовании индексов задержек по их экстремумам:  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\min}$  – максимальное и минимальное значения из  $\tau_e$  и  $\tau_o$  соответственно. С учетом этого, известная система условий из [17] для полного разложения СКИ требуемой длительности ( $t_\Sigma$ ) на 9 импульсов в меандровой МПЛ из двух витков примет инвариантный вид (вариант 1):

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

$$2l_2(\tau_{\max 2} - \tau_{\min 2}) \geq t_\Sigma, \quad (2)$$

$$2l_1\tau_{\min 1} - 2l_2\tau_{\max 2} \geq t_\Sigma, \quad (3)$$

$$2l_1(\tau_{\max 1} - \tau_{\min 1}) - 2l_2\tau_{\max 2} \geq t_\Sigma. \quad (4)$$

Отметим, что в соответствии с вариантом 1 задержки импульсов разложения ( $t_1$ ) определяются, как  $t_{1И1}=0$  нс (перекрестная помеха на ближнем конце),  $t_{1И2}=\tau_{\min 2}2l_2$ ,  $t_{1И3}=\tau_{\max 2}2l_2$ ,  $t_{1И4}=\tau_{\min 1}2l_1$ ,  $t_{1И5}=\tau_{\min 1}2l_1+\tau_{\min 2}2l_2$ ,  $t_{1И6}=\tau_{\min 1}2l_1+\tau_{e2}2l_2$ ,  $t_{1И7}=\tau_{\max 1}2l_1$ ,  $t_{1И8}=\tau_{\max 1}2l_1+\tau_{\min 2}2l_2$ ,  $t_{1И9}=\tau_{\max 1}2l_1+\tau_{\max 2}2l_2$ , где индексы И1–И9 соответствуют импульсу разложения (нумерация введена по мере их прихода), а индексы 1 и 2 у переменных соответствуют виткам 1 и 2 соответственно. Так, необходимо чтобы задержка каждого последующего импульса была не меньше задержки следующего за ним импульса, сложенной с  $t_\Sigma$  (далее это будет упоминаться, как правило разложения СКИ), в результате чего и алгебраических преобразований получаются (1)–(4). Допустим, что реализация варианта 1 обеспечивает строго последовательный приход всех импульсов разложения, однако на практике это накладывает избыточные требования к физической длине витков  $l_1$  и  $l_2$ . Ключевым решением для уменьшения габаритов является переход к реализации другого порядка следования импульсов разложения – варианту 2. Его новизна заключается в целенаправленном изменении порядка следования импульсов. Это снимает жесткие топологические ограничения варианта 1 и открывает возможность кратного уменьшения длины витков без потери эффективности защиты. Для понимания этого, задержки каждого из импульсов разложения при варианте 2 определены, как  $t_2$  с соответствующим импульсу разложения индексу (И1–И9 по мере их прихода) и приравнены к выражениям, определяющим задержки импульсов при варианте 1 ( $t_1$ ):  $t_{2И1}=t_{1И1}=0$  нс (перекрестная помеха на ближнем конце),  $t_{2И2}=t_{1И2}=\tau_{\min 2}2l_2$ ,  $t_{2И3}=t_{1И3}=\tau_{\max 2}2l_2$ ,  $t_{2И4}=t_{1И4}=\tau_{\min 1}2l_1$ ,  $t_{2И5}=t_{1И7}=\tau_{\max 1}2l_1$ ,  $t_{2И6}=t_{1И5}=\tau_{\min 1}2l_1+\tau_{\min 2}2l_2$ ,  $t_{2И7}=t_{1И6}=\tau_{\min 1}2l_1+\tau_{\max 2}2l_2$ ,  $t_{2И8}=t_{1И8}=\tau_{\max 1}2l_1+\tau_{\min 2}2l_2$ ,  $t_{2И9}=t_{1И9}=\tau_{\max 1}2l_1+\tau_{\max 2}2l_2$ . Из выражений видно, что при варианте 2 И7 приходит пятым, И5 – шестым, а И6 – седьмым. Тогда, для реализации варианта 2 необходимо воспользоваться этими выражения, правилом разложения СКИ выше и алгебраическими преобразованиями, в результате чего получаются (1)–(3) и

$$2l_1(\tau_{\max 1}-\tau_{\min 1})\geq t_\Sigma, \quad (5)$$

$$2l_1(\tau_{\min 1}-\tau_{\max 1})+2l_2\tau_{\min 2}\geq t_\Sigma. \quad (6)$$

Для МЛ с лицевой связью (структура 2) аналогично получены аналитические выражения для условий разложения. В структуре 2, поскольку она асимметрична в поперечном сечении [21], возникает дополнительный импульс, задержка которого определяется как  $l(\tau_e+\tau_o)$ . Тогда СКИ в структуре 2 будет разложен на 16 импульсов разложения [22]. Инвариантные условия для варианта 1 разложения [22] (последовательный приход всех 16 импульсов) в структуре 2 такие же, как (1) и (3), а также

$$l_2(\tau_{\max 2}-\tau_{\min 2})\geq t_\Sigma, \quad (7)$$

$$l_1(\tau_{\max 1}-\tau_{\min 1})\geq t_\Sigma, \quad (8)$$

$$2l_2\tau_{\min 2}+2l_1(\tau_{\min 1}-\tau_{\max 1})\geq t_\Sigma, \quad (9)$$

$$2l_2(\tau_{\min 2}-\tau_{\max 2})+l_1(\tau_{\max 1}-\tau_{\min 1})\geq t_\Sigma. \quad (10)$$

В случае варианта 2 разложения в МЛ с лицевой связью, помимо условий (1), (3), (4) (7) и (8), необходимо выполнить:

$$2l_2\tau_{\min 2}-l_1(\tau_{\max 1}-\tau_{\min 1})\geq t_\Sigma, \quad (11)$$

$$l_1(\tau_{\max 1}-\tau_{\min 1})-2l_2(\tau_{\max 2}-\tau_{\min 2})\geq t_{\Sigma}. \quad (12)$$

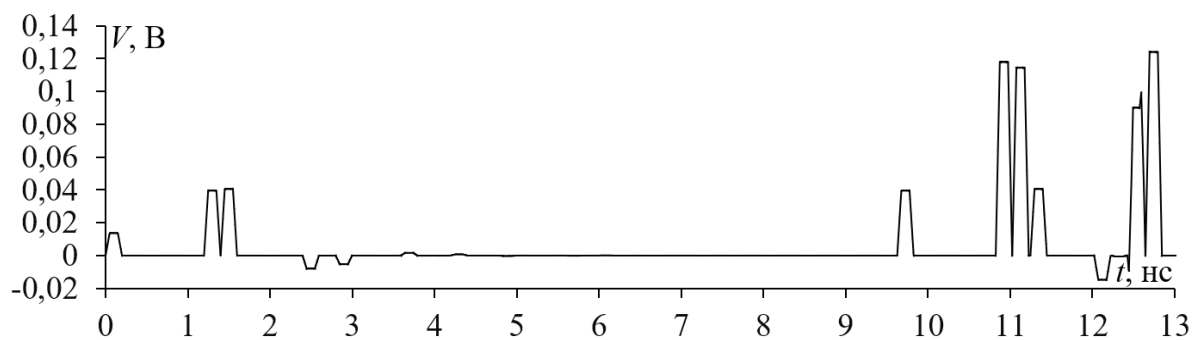
Предложенная система инвариантных условий (1)–(12) позволяет оптимизацию структур 1 и 2. Она не только гарантирует устойчивость процесса оптимизации в САПР в условиях инверсии скоростей мод, но и позволяет разработчику гибко выбирать между классическими вариантами 1 и 2 разложения СКИ, в зависимости от доступной площади на печатной плате (ПП).

### Параметрическая оптимизация структур 1, 2 и анализ последовательностей импульсов разложения

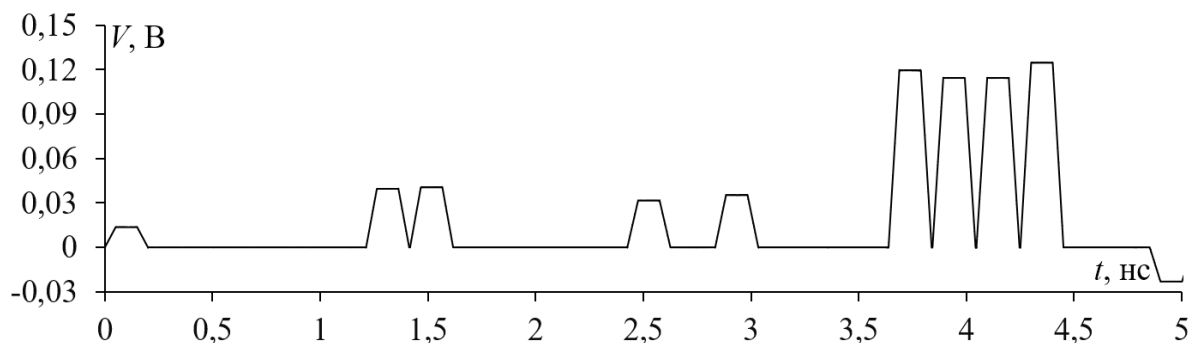
Результаты оптимизации длин витков ( $l_1$  и  $l_2$ ) исследуемых структур 1 и 2 (схема соединений представлена на рис. 1в, а соответствующие виткам поперечные сечения, в зависимости от структуры – на рис. 1а, б), полученные в системе TUSUR.EMC на основе (1)–(12), наглядно демонстрируют преимущество адаптивного выбора вариантов разложения (рис. 3, 4).

Рассмотрим эти результаты подробно. Параметры поперечного сечения приняты исходными, кроме  $\varepsilon_r$ . Решающее влияние на габариты оказало сочетание  $\varepsilon_r$  подложки и покрытия. Как показано на рис. 2а,  $\Delta t$  в структуре 1 без покрытия при  $\varepsilon_r=10$  невелика, что говорит о необходимости значительной физической длины линии. Так, реализация классического последовательного разложения (вариант 1) на рис. 3а требует суммарной длины витков  $l_0=714$  мм ( $l_1=635$  мм,  $l_2=79$  мм). Переход к оптимальной последовательности (вариант 2) на рис. 3б позволяет эффективно использовать временные «окна» в отклике первого витка, что сокращает  $l_0$  до 240 мм ( $l_1=160$  мм,  $l_2=80$  мм) при сохранении ослабления СКИ.

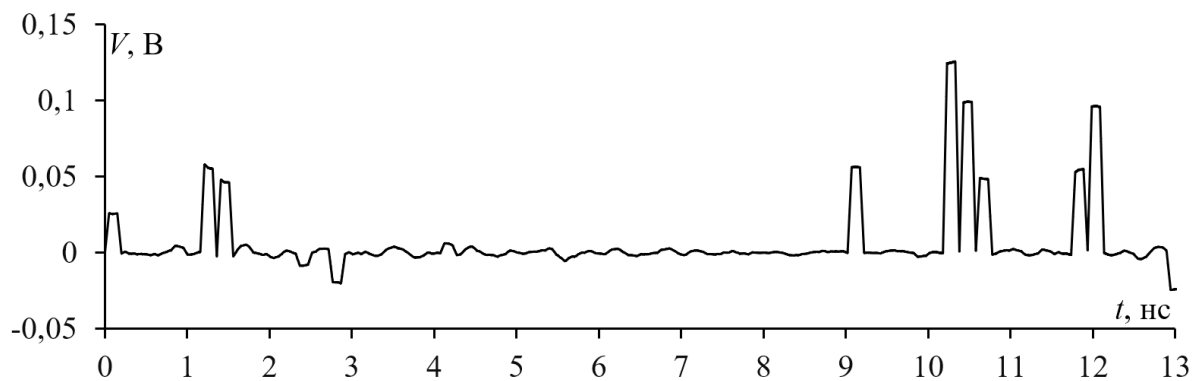
Применение покрытия, близкого к РПМ ( $\varepsilon_{rП}=20$ ) в структурах на подложке с  $\varepsilon_r=10$  позволяет уменьшить габариты устройства. Для варианта 1 с покрытием (рис. 3в)  $l_0=472,8$  мм ( $l_1=419$  мм,  $l_2=53,8$  мм), в то время как для варианта 2 (рис. 3г) достаточно  $l_0=162$  мм ( $l_1=108$  мм,  $l_2=54$  мм). Однако минимум длины достигается при подложках с низкой  $\varepsilon_r$  на рис. 4а ( $\varepsilon_r=3$ ), что наглядно подтверждается задержками мод на рис. 2а. За счет покрытия структуры 1  $\Delta t$  возрастает до 3,66 нс/м. При этом, как показано на рис. 4а, выгоднее вариант 1: для разложения достаточно  $l_0=139$  мм ( $l_1=111$  мм,  $l_2=28$  мм). Ослабление СКИ при этом не уменьшается. Реализация варианта 2 (рис. 4б) увеличивает длину до  $l_0=228,9$  мм ( $l_1=143$  мм,  $l_2=85,9$  мм), что доказывает отсутствие универсального топологического решения и необходимость индивидуального выбора варианта последовательности разложения под конкретную структуру. Для всех рассмотренных случаев у структуры 1 ослабление СКИ составило около 4 раз (относительно  $E/2$  здесь и далее).



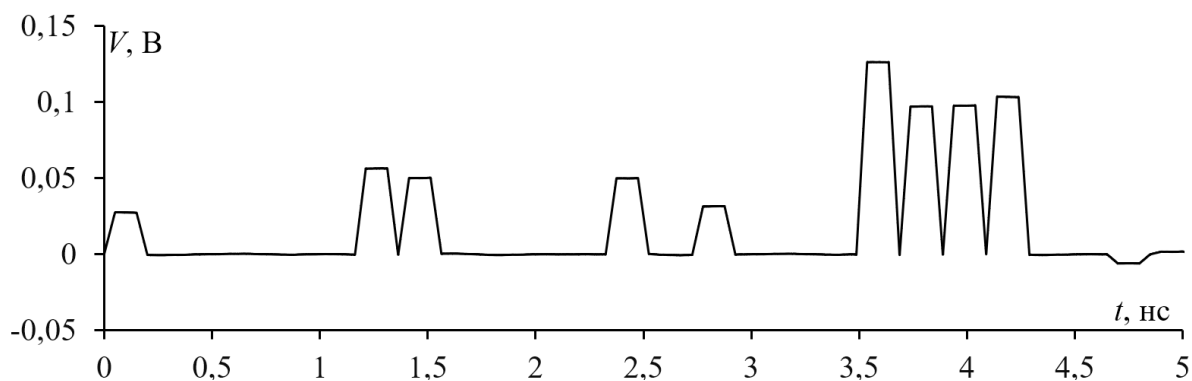
(а)



(б)

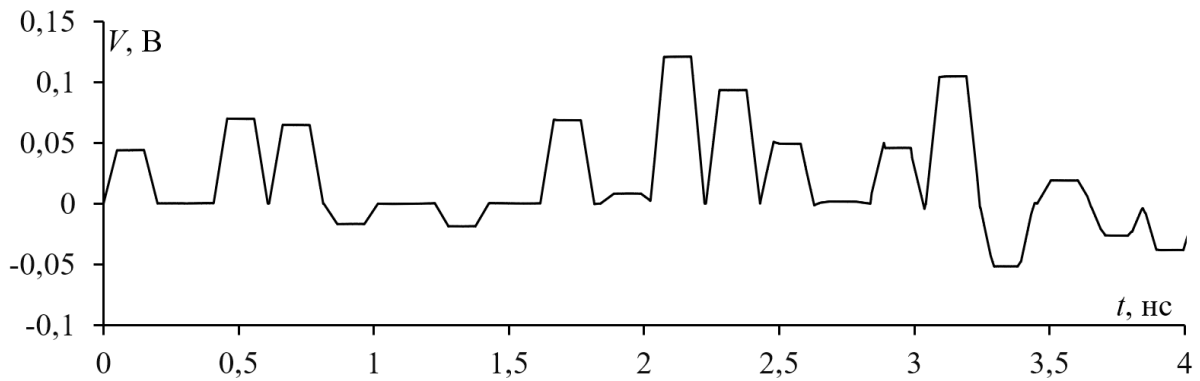


(в)

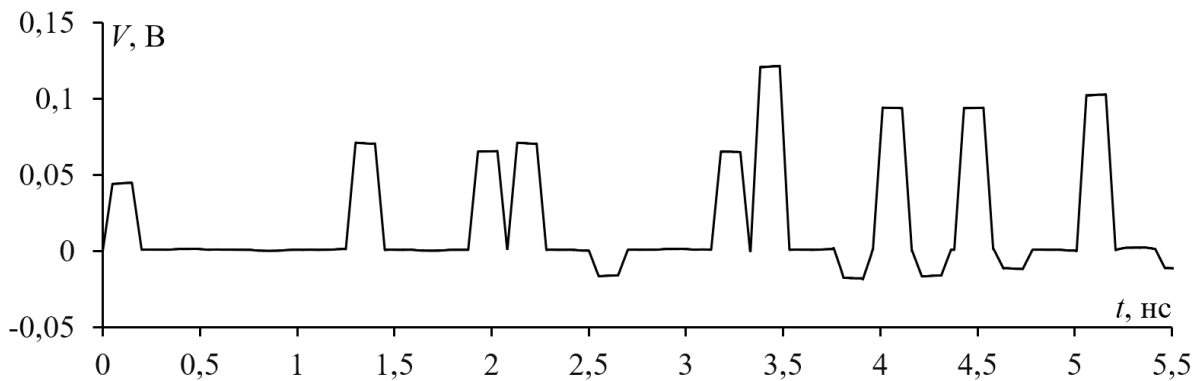


(г)

Рис. 3. Формы напряжения на выходе структуры 1 с  $\epsilon_r=10$  без РПМ при вариантах 1 (а) и 2 (б) разложения СКИ и с РПМ при вариантах 1 (в) и 2 (г)



(а)



(б)

Рис. 4. Формы напряжения на выходе структуры 1 при  $\epsilon_r=3$  с РПМ при вариантах 1 (а) и 2 (б) разложения СКИ

Для структуры 2 анализ осложняется наличием уже 16 импульсов разложения. Как показано на рис. 2б, в структуре 2 с  $\epsilon_r=10$  наблюдается лишь значительное сближение погонных задержек мод без эффекта их инверсии (однако при  $\epsilon_r=3$  это происходит, как отмечено выше). Для варианта 1 в структуре 2 без покрытия с  $\epsilon_r=10$  необходима  $l_0=444$  мм ( $l_1=333$  мм,  $l_2=111$  мм), при которой ослабление СКИ составило 5,67 раза (рис. 5а). Другой вариант разложения при  $\epsilon_r=10$  не приводится, поскольку требует значительных  $l_1$  и  $l_2$ , а покрытие РПМ структуры 2 с  $\epsilon_r=10$  нецелесообразно (рис. 5б), так как ведет к деградации защитных свойств (ослабление СКИ около 3,5 раза) и увеличивает длину до  $l_0=615$  мм ( $l_1=461$  мм,  $l_2=154$  мм). Наилучший результат для структур 2 при  $\epsilon_r=3$  с покрытием  $\epsilon_{rП}=20$  при варианте 2 (рис. 5з):  $l_0=334,6$  мм ( $l_1=261,4$  мм,  $l_2=73,2$  мм) при ослаблении СКИ 6,61 раза. Вариант 1 в структуре 2 нецелесообразен (рис. 5в), поскольку требует  $l_0=1024$  мм ( $l_1=1507$  мм,  $l_2=483$  мм).

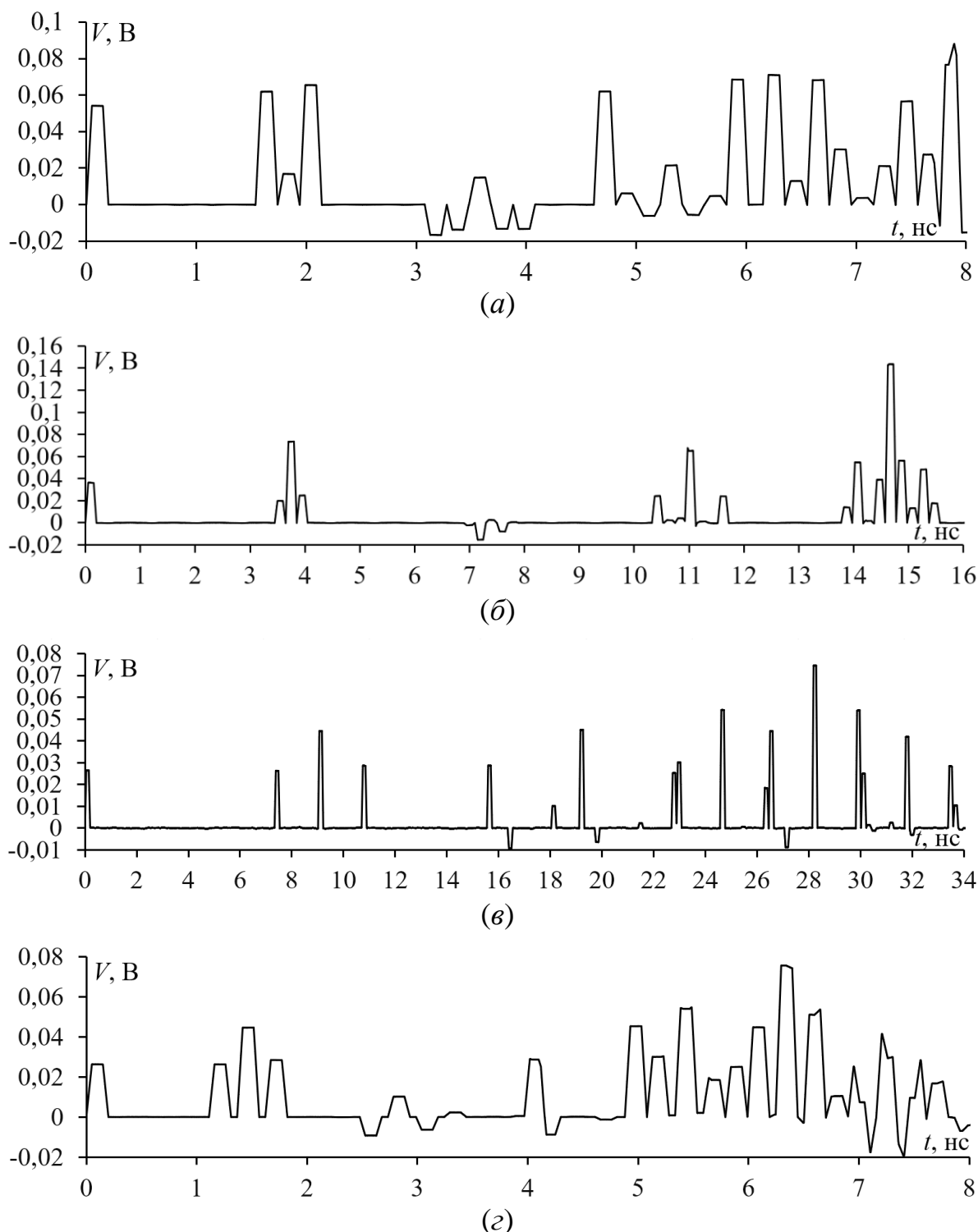


Рис. 5. Формы напряжения на выходе структуры 2 при  $\epsilon_r=10$  без РПМ (а) и с ним (б), а также при  $\epsilon_r=3$  для вариантов 1 (в) и 2 (г) разложения СКИ

### Оптимизация гибридных устройств защиты на основе двухпроводного модального фильтра и меандровой линии

Дальнейший рост эффективности защиты РЭС устройствами на основе модальной фильтрации достигается реализацией гибридных конфигураций на основе последовательно соединенных МФ и МЛ. Суть работы таких структур не отличается от структур 1 и 2 выше: сначала двухпроводный МФ расклады-

вает СКИ на два основных импульса, после чего каждый из них раскладывается в МЛ. В результате на выходе структуры 3 СКИ может быть разложен на 6 импульсов, а 4 – на 8. Схема соединений структур 3 и 4 представлена на рис. 1з, а соответствующие поперечные сечения МФ и МЛ в составе структур – на рис. 1а, б.

Целесообразность перехода к таким гибридным структурам обусловлена возможностью адаптивной интеграции элементов защиты в существующую топологию ПП. Зачастую на ПП уже есть проводники, конфигурация которых близка к МФ или МЛ, однако их параметры не оптимальны для подавления СКИ. Применение инвариантных условий разложения позволяет скорректировать параметры таких трасс без радикального изменения топологии, превращая их в полноценные структуры для защиты от СКИ. Кроме того, использование МЛ в последовательном соединении после МФ предпочтительнее использования второго МФ, поскольку МЛ обеспечивает требуемую разность задержек и разложение СКИ на большее число импульсов (3 или 4 импульса вместо 2) на меньшем участке полезной площади платы (при сравнении витка МЛ и двухпроводного МФ). Это позволит достичь высокого ослабления СКИ при минимизации общей физической длины защитного устройства.

Для разложения СКИ в структурах 3 и 4 разработаны инвариантные условия. Сначала определены выражения для вычисления задержек каждого из импульсов разложения на выходе структур 3 и 4. Выражения для структуры 1:  $t_{И1}=l_{МФ}\tau_{\minМФ}$ ,  $t_{И2}=l_{МФ}\tau_{\maxМФ}$ ,  $t_{И3}=l_{МФ}\tau_{\minМФ}+2l_{МЛ}\tau_{\minМЛ}$ ,  $t_{И4}=l_{МФ}\tau_{\maxМФ}+2l_{МЛ}\tau_{\minМЛ}$ ,  $t_{И5}=l_{МФ}\tau_{\minМФ}+2l_{МЛ}\tau_{\maxМЛ}$ ,  $t_{И6}=l_{МФ}\tau_{\maxМФ}+2l_{МЛ}\tau_{\maxМЛ}$  (где  $l_{МФ}$  и  $l_{МЛ}$  – длины МФ и МЛ соответственно,  $\tau_{\maxМФ}$  и  $\tau_{\minМФ}$  – максимальная и минимальная из погонных задержек мод МФ соответственно,  $\tau_{\maxМЛ}$  и  $\tau_{\minМЛ}$  – максимальная и минимальная из погонных задержек мод МЛ соответственно). Выражения для структуры 4:  $t_{И1}-t_{И4}$  такие же, как для структуры 3,  $t_{И5}=l_{МФ}\tau_{\minМФ}+l_{МЛ}(\tau_{\maxМЛ}+\tau_{\minМЛ})$ ,  $t_{И6}=l_{МФ}\tau_{\maxМФ}+l_{МЛ}(\tau_{\maxМЛ}+\tau_{\minМЛ})$ ,  $t_{И7}$  и  $t_{И8}$  такие же, как  $t_{И5}$  и  $t_{И6}$  для структуры 3 соответственно. С учетом этого и правила разложения СКИ выше, после алгебраических преобразований условия разложения СКИ в структуре 3:

$$l_{МФ}(\tau_{\maxМФ}-\tau_{\minМФ})\geq t_{\Sigma}, \quad (13)$$

$$l_{МФ}(\tau_{\minМФ}-\tau_{\maxМФ})+2l_{МЛ}\tau_{\minМЛ}\geq t_{\Sigma}, \quad (14)$$

$$l_{МФ}(\tau_{\minМФ}-\tau_{\maxМФ})+2l_{МЛ}(\tau_{\maxМЛ}-\tau_{\minМЛ})\geq t_{\Sigma}. \quad (15)$$

Условия разложения в структуре 4 такие же, как (13) и (14), а также

$$l_{МФ}(\tau_{\minМФ}-\tau_{\maxМФ})+l_{МЛ}(\tau_{\maxМЛ}-\tau_{\minМЛ})\geq t_{\Sigma}. \quad (16)$$

Применение инвариантных условий разложения СКИ позволяет оптимизацию структур 3 и 4 даже когда порядок следования мод в МФ и МЛ различается. Разработанные условия обеспечивают последовательность импульсов разложения оптимальную, по критерию минимальной длины, в сравнении с другими последовательностями в структурах 3 и 4.

Для структуры 3 оптимальные параметры, одинаковые для МФ и МЛ:  $w=1$  мм,  $h=2$  мм,  $t=105$  мкм,  $s=0,2$  мм,  $\epsilon_r=10$ ,  $l_{МФ}=l_{МЛ}=150$  мм. Для структуры 4 оптимальны:  $w=1$  мм,  $h=1,5$  мм,  $t=105$  мкм,  $s=0,2$  мм,  $\epsilon_r=10$ ,  $l_{МФ}=140$  мм,  $l_{МЛ}=260$  мм. На рис. 6 представлены формы напряжений на выходе структур 3 и

4 при оптимальных параметрах. Видно, что СКИ раскладывается на 6 и 8 импульсов разложения соответственно. В структуре 3 при общей длине  $l_0=300$  мм ослабление СКИ составило 4,47 раза, а в структуре 4 с  $l_0=400$  мм – 6,65 раза.

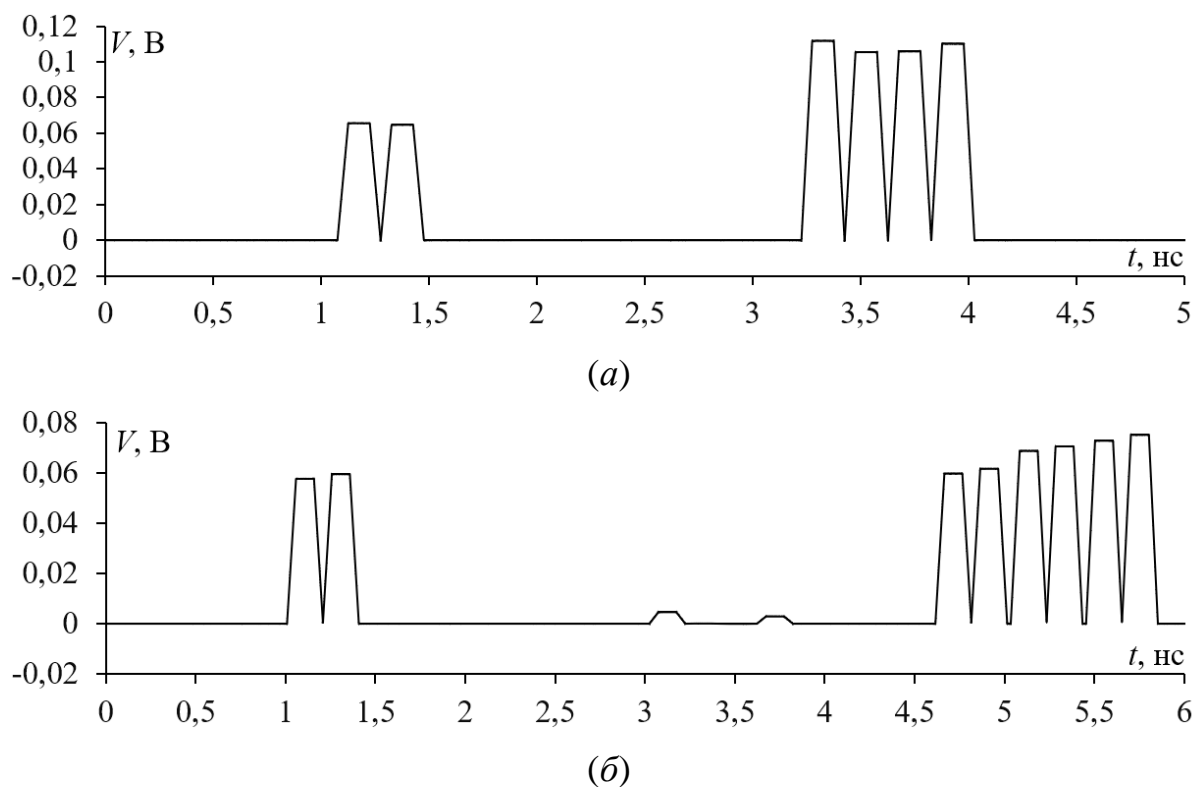


Рис. 6. Формы напряжения на выходе структур 3 (а) и 4 (б)

### Сравнение характеристик исследуемых структур

В таблицу 1 сведены характеристики всех рассмотренных выше структур (где  $l_1$  и  $l_2$  длины витков 1 и 2 структур 1 и 2 соответственно и МФ и МЛ в структурах 3 и 4 соответственно, а  $V_0$  – ослабление СКИ) для оценки их длин и ослабления СКИ в них.

Сравнение характеристик структур 1 и 2 без покрытия с  $\epsilon_r=10$  доказывает преимущество перехода от варианта 1 к 2. Для структуры 1 это снизило  $l_0$  с 714 до 240 мм (в 3 раза) при сохранении ослабления СКИ 4 раза. Структура 2 в аналогичных условиях даёт большее ослабление (5,67 раза) при меньшей протяженности проводников. При этом максимум ослабления (6,65 раза) СКИ в структурах без покрытия достигается в гибридной структуре 4.

Применение РПМ с  $\epsilon_{rП}=20$  в комбинации с различными подложками выявило важную закономерность: эффективность РПМ как средства миниатюризации максимально раскрывается только при подложках с низкой  $\epsilon_r=3$ . Для мандровой МПЛ при этом наиболее целесообразен вариант 1. За счет резкого роста разности погонных задержек мод достаточна  $l_0=139$  мм, что в 5,1 раза меньше, чем у варианта 1 в структуре 1 без покрытия и  $\epsilon_r=10$ . Для структуры 2 РПМ увеличил ослабление до 6,61 раза, но в варианте 2 при  $\epsilon_r=3$ . Это дало  $l_0=334,6$  мм, что почти в 5 раз короче, чем для варианта 1 в тех же условиях.

Важно отметить, что РПМ на подложках с высокой  $\epsilon_r$  для структуры 2 снижает ослабление СКИ до 3,48 раза, что доказывает необходимость тщательного подбора диэлектрического заполнения для каждого типа топологии.

Несмотря на достигнутое значительное уменьшение  $l_0$ , трассировка таких структур на ПП может быть затруднительна при плотном монтаже. Решением этого является сворачивание структур в неосновные витки. Ранее показано [23], что оно ведет к дополнительному уменьшению длин структур для их более компактного размещения на ПП, а также к перекрестным наводкам и паразитным осцилляциям разной полярности, существенно затрудняющим аналитическое прогнозирование временного отклика, но приводящих к дополнительному ослаблению СКИ.

Таблица 1 – Характеристики рассмотренных структур

Структура	Покрытие	$\epsilon_r$	Вариант	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм	$l_0$ , мм	$V_0$ , раз
1	–	10	1	635	79	714	4,03
			2	160	80	240	4,01
	РПМ	3	1	111	28	139	4,12
			2	143	85,9	228,9	4,11
		10	1	419	53,8	472,8	3,98
			2	108	54	162	3,96
2	–	10	1	333	111	444	5,67
			3	1	1024	483	1507
	РПМ	3	2	261,4	73,2	334,6	6,61
			10	1	461	154	615
3	–	10	–	150	150	300	4,47
4				140	260	400	6,65

### Выводы

Предложено и апробировано повышение эффективности ослабления СКИ в компактных связанных структурах. Основным теоретическим результатом является разработка инвариантных условий разложения СКИ в МЛ из двух витков (структур 1 и 2) и гибридных устройств (структур 3 и 4). Переход от классических индексов мод к экстремумам погонных задержек обеспечил математическую устойчивость алгоритмов оптимизации в условиях инверсии скоростей мод, возникающей в определенных средах и при определенных параметрах поперечных сечений структур. Это позволило оптимизацию параметров в широком диапазоне параметров и сред, что ранее было затруднительно при прежних условиях разложения СКИ.

Установлено, что оптимизация по времени порядка разложения (вариант 2) уменьшает свободные временные интервалы в отклике структуры, «уплотняя» сигнал. В сочетании с покрытием с высокой  $\epsilon_r$  (например, РПМ) на подложках с малой  $\epsilon_r$  это обеспечило уменьшение  $l_0$  структуры 1 в 5,1 раза при сохранении защитных характеристик. В структуре 2 предложенный

подход дал ослабление СКИ 6,61 раза и уменьшение  $l_0$  в 1,33 раза (с 444 до 334,6 мм).

Оптимизация гибридных структур из МФ и МЛ и анализ результатов показал возможность повышения защищенности РЭС. Так, в структуре 4 ослабление СКИ составило 6,65 раза. Комплексное сопоставление габаритных преимуществ и ослабления СКИ всех структур показало, что выбор конкретной топологии и варианта разложения может гибко адаптироваться под требования по площади монтажа или уровню защиты. Полученные результаты полезны для создания компактных устройств защиты на основе модальной фильтрации.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00102, <https://rscf.ru/project/24-79-00102>.*

### 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., and 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. Tsyantenka 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. Белоусов А. О. Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов. Дис. ... к-та техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2020. – 247 с.

11. 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: ТУСУР, 2024. – 366 с.

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

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

14. 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.

15. Nosov A. V., Belousov A. O., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition // *Journal of Physics: Conference series*. 2019. Vol. 1353. No. 1. P. 1–6.

16. Малыгин К. П. Помехозащитные структуры на основе витка меандровой микрополосковой линии с улучшенными характеристиками. Дис. ... к-та техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2024. – 149 с.

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*. – Erlagol, Russia, 2015. P. 175–177.

18. 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.

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. No. 2. P. 022059.

20. Газизов Т. Р., Куксенко С. П., Заболоцкий А. М., Квасников А. А., Иванов А. А., Белоусов А. О., Максимов А. Е., Клюкин Д. В., Алхадж Хасан А. Ф., Ким Г. Ю., Жечев Е., Осинцев А. В., Семенюк В. А., Нгуен М. Т., Комнатнов М. Е. Система компьютерного моделирования электромагнитной совместимости ТУСУР.ЭМС (TUSUR.EMC) // Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ. №2024664804. 2024.

21. 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. P. 1–39.

22. 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. P. 131–135.

23. Malygin K. P., Nosov A. V. Experimental confirmation of ultrashort pulse decomposition in folded meander microstrip lines // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2024. Vol. 66. No. 2. P. 599–605.

### 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. Tsyantenka 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. Belousov A. O. *Analiz i optimizaciya mnogoprovodnyh struktur s modal'nym razlozheniem dlya obrabotki impul'snyh signalov*. Dis. kand. tekhn. nauk. [Analysis and optimization of multiconductor structures with modal decomposition for pulse signal processing. Extended Abstract of Ph.D. Thesis]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2020. 247 p. (in Russian).

11. Surovtsev R. S. *Modal'noe razlozhenie v poloskovykh meandrovyyh liniyah dlya zashchity ra-dioelektronnykh sredstv ot konduktivnykh impul'snykh pomех subnanosekundnoj dlitel'nosti*. Dis. dokt. tekhn. nauk. [Modal decomposition in strip meander lines for protecting electronic equipment from conducted impulse interference of subnanosecond duration. Extended Abstract of D.Sc. Thesis]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2024. 366 p. (in Russian).

12. 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 Russian).

13. 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 Russian).

14. 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).

15. Nosov A. V., Belousov A. O., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition. *Journal of Physics: Conference series*, 2019, vol. 1353, no. 1, pp. 1–6.

16. Malygin K. P. *Pomehozashchitnye struktury na osnove vitka meandrovoj mikropoloskovoj linii s uluchshennymi karakteristikami*. Dis. kand. tekhn. nauk. [Anti-jamming structures based on a meander microstrip line with improved characteristics. Extended Abstract of Ph.D. Thesis]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2024. 149 p. (in Russian).

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*, Erlagol, Russia, 2015. pp. 175–177.

18. 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 MultiConference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Tomsk, Russia, 2019. pp. 0288–0292.

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, no. 2, pp. 1–6.

20. Gazizov T. R., Kuksenko S. P., Zabolockij A. M., Kvasnikov A. A., Ivanov A. A., Belousov A. O., Maksimov A. E., Klyukin D. V., Alhadzh Hasan A. F., Kim G. YU., Zhechev E., Osincev A. V., Semenyuk V. A., Nguen M. T.,

Komnatnov M. E. Sistema komp'yuternogo modelirovaniya elektromagnitnoj sovmestimosti TUSUR.EMS (TUSUR.EMC) [Computer simulation system for electromagnetic compatibility TUSUR.EMC (TUSUR.EMC)]. The Certificate on Official Registration of the Computer Program in Russia. No. 2024664804, 2024.

21. 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.

22. 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, 2022. pp. 131–135.

23. Malygin K. P., Nosov A. V. Experimental confirmation of ultrashort pulse decomposition in folded meander microstrip lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2024, vol. 66, no. 2, pp. 599–605.

Статья поступила 13 апреля 2026 г.

### Информация об авторах

*Носов Александр Вячеславович* – кандидат технических наук. Докторант. Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». 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.

*Газизов Тальгат Рашитович* – заведующий кафедрой телевидения и управления, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: Электромагнитная совместимость, устройства защиты, компьютерное моделирование. E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

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

---

## Minimizing the dimensions of two-segment protective structures based on modal filtering by managing the decomposition pulse sequence

A. V. Nosov, T. R. Gazizov

**Problem statement.** As packaging density and speed of modern radio-electronic equipment (REE) are constantly increasing, traditional means of protecting REE against ultrashort pulses (USPs) are becoming

ing ineffective due to insufficient response time, weight and size limitations, as well as low radiation resistance. Multi-turn meander lines (MLs) and modal filters (MFs) may solve this problem; however, high-permittivity coatings, such as radio-absorbing materials (RAMs), for their miniaturization can lead to the inversion of the mode propagation velocity. This makes classical modal decomposition conditions inapplicable and requires adjusting the mathematical framework more accurate design of such devices. **Purpose.** The aim of this work is to minimize the dimensions of structures consisting of two series-connected segments based on modal filtering by applying decomposition conditions that are invariant to the mode pulse arrival order and by optimizing this order. **Methods.** The main approach involves analysis, structural-parametric optimization via heuristic search, and a computational experiment in the TUSUR.EMC system. **Novelty.** For the first time, analytical expressions for invariant conditions of USP decomposition were obtained for two-wire structures consisting of two series-connected segments. These expressions are based on ordering the modes according to the extrema of per-unit-length delays, which ensures calculation accuracy when their pulse arrival order is inverted by changes in the dielectric medium. The alternative decomposition sequences were proved to provide a multiple reduction in the turn length while maintaining the USP attenuation. **Results.** It was shown that for the two-turn meander microstrip line, the optimization of the pulse arrival order in combination with RAM reduced the total physical length by a factor of 5.1 while maintaining a 4-fold USP attenuation. In the ML with broad-side coupling, the USP was decomposed into 16 main pulses, providing a 6.61-fold attenuation over a length of 334.6 mm. The hybrid structures (a series connection of an MF and an ML) demonstrated the highest protective potential, providing USP attenuation up to 6.65 times. **Practical relevance.** The proposed solutions and mathematical apparatus enable the design of compact protection devices based on modal filtering for critical REE.

**Key words:** ultrashort pulse, modal filtering, meander line, broad-side coupling, hybrid protection, invariant decomposition conditions, miniaturization.

### Information about Authors

*Alexander Vyacheslavovich Nosov* – Ph.D. in Engineering Sciences. Doctoral candidate. Senior research officer at the Research Laboratory «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: alexns2094@gmail.com

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

*Talgat Rashitovich Gazizov* – Chief of television and control department, chief of the scientific research laboratory «Safety and electromagnetic compatibility of radioelectronic aids». Tomsk State University of Controls System and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; protection devices, computer simulation. E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

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