

УДК 621.391.825

Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов

Черникова Е. Б.

Постановка задачи: повсеместное распространение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) практически во все отрасли, в совокупности с увеличением ее конструктивной сложности, приводит к обострению проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС). В частности, актуальна защита РЭА от сверхкоротких импульсов (СКИ), воздействие которых может быть опасно для РЭА, особенно для критичной. Распространённые компоненты, используемые для защиты от импульсных перенапряжений (варисторы, разрядники, TVS-диоды), обладают рядом недостатков. Поэтому устройства на их основе часто оказываются неэффективными для защиты от импульсов с такими временными и энергетическими характеристиками, которыми обладают СКИ. В этой связи актуальна разработка новых защитных устройств. Одним из новых подходов к защите РЭА от СКИ является технология модальной фильтрации. Её идея заключается в использовании модальных искажений сигнала, возникающих из-за разности задержек мод в многопроводной линии передачи. Предложен новый подход к повышению эффективности таких устройств защиты за счет использования зеркально-симметричных структур, а именно зеркально-симметричного модального фильтра (МФ). Между тем известно использование для защиты от СКИ и меандровых линий (МЛ). Тогда возможно и их комбинированное использование. **Цель работы** – представить новое устройство защиты от СКИ на основе зеркально-симметричной МЛ. **Используемые методы:** для демонстрации возможности защиты от СКИ используется система квазистатического анализа, основанная на методе моментов. **Результаты и их новизна:** впервые предложено устройство (получено решение о выдаче патента на изобретение), представляющее собой комбинацию зеркально-симметричного МФ и защитной МЛ. **Практическая значимость:** зеркально-симметричная МЛ предназначена для защиты РЭА от СКИ, проникающих в аппаратуру кондуктивным путем (через цепи питания, сигнальные цепи). Важно отметить, что в данном устройстве временные интервалы между импульсами разложения увеличены в 2 раза по сравнению с аналогичным МФ, что позволит разложить СКИ в 2 раза большей длительности. Также такое соединение требует не 6, а лишь 2 резистора, что повышает надежность и уменьшает общую стоимость. Примечательно, что такую структуру можно использовать и при модальном резервировании, т.е. когда один виток относится к резервируемой цепи, а другой – к резервной.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, устройства защиты, сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, зеркально-симметричный модальный фильтр, зеркально-симметричная меандровая линия.

Актуальность

С увеличением темпов развития радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и ее применения в различных областях, начиная от бытовой и сервисной, заканчивая военной и космической, актуализируется проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Существует несколько причин обостре-

Библиографическая ссылка на статью:

Черникова Е. Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 280-293. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10209.

Reference for citation:

Chernikova E. B. Reflection Symmetric Meander Line Protecting against Ultrashort Pulses. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 280-293 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10209.

ния проблемы ЭМС, в числе которых повышение конструктивной сложности РЭА, увеличение общего числа одновременно работающей аппаратуры, возрастание верхних частот полезных и помеховых сигналов, увеличение мощности радиопередатчиков и др. [2]. Важной задачей ЭМС является обеспечение помехозащищенности РЭА. Это связано с тем, что одновременная работа нескольких устройств может привести к тому, что создаваемые ими электромагнитные поля начинают оказывать влияние друг на друга, создавая тем самым помехи и нарушая нормальное функционирование РЭА. Кроме того, существенна вероятность преднамеренных электромагнитных воздействий. Основными техническими методами помехозащиты РЭА являются экранирование, фильтрация и заземление. Фильтрацию применяют для исключения влияния кондуктивных помех, которые могут распространяться по всем соединениям аппаратуры [3]. Существуют кондуктивные помехи, длительность которых находится в наносекундном и субнаносекундном диапазонах. Такие помехи носят название сверхкоротких импульсов (СКИ) [4]. Защите от СКИ необходимо уделять особое внимание, так как они обладают малой длительностью, из-за чего основная энергия генератора расходуется на увеличение его амплитуды [5]. Вследствие этого СКИ способны вызвать сбой электроустановок, кабелей, аналоговых и цифровых устройств и другой аппаратуры, уровень защиты которой от импульсных перенапряжений и помех не высок. Наиболее подходящими схемотехническими средствами защиты от таких воздействий являются фильтрующие устройства на основе LC- и RC-фильтров, варисторов, разрядников и TVS-диодов.

Известно устройство защиты электронных приборов от высоких пиковых напряжений в бортовой сети транспортного средства (ТС) с использованием электронного ключа на основе транзистора, который включается последовательно в разрыв плюсовой шины питания и работает в режиме «замкнуто»/«разомкнуто» в зависимости от значения напряжения в сети ТС и имеет малое, по сравнению с длительностью импульса, время включения/выключения, поэтому успевает отсекают короткие высоковольтные импульсы (например, длительностью менее 1 мкс) [6]. В [7] описано устройство защиты от мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов, которое может быть использовано для защиты приемопередающего радиоэлектронного оборудования за счет того, что в устройство защиты, содержащее высоковольтный газонаполненный разрядник, дополнительно введены элементы запирающей, решающей и исполнительной схем, включенных в цепь параллельно разряднику. Устройство защиты от импульсных перенапряжений [8] предназначено для повышения электро- и пожаробезопасности при появлении в электроустановках зданий грозовых импульсных перенапряжений большого уровня и содержит в себе варистор, термopредохранитель с нормально замкнутыми контактами и световой индикатор состояния варистора. В [9] описано устройство защиты от импульсных перенапряжений электротехнического и радиоэлектронного оборудования, систем связи и антенно-фидерных систем от импульсных грозовых и коммутационных перенапряжений, которое основано на газонаполненном искровом разряднике и блоке с дисками нелинейных резисторов, изготовленных из окси-

да цинка и установленных в электроизоляционном полимерном корпусе с внешними трекингозащитными ребрами. Известно устройство для защиты телекоммуникационного оборудования от избыточного напряжения на линиях связи, реагирующее на напряжение выше нормального без отключения защищаемого оборудования от линий связи [10] и содержащее первую ступень защиты на газонаполненных разрядниках, подсоединенных ко входным сигнальным выводам, и вторую ступень на подсоединенных к выходным сигнальным выводам двусторонних полупроводниковых ограничителях напряжения. Вышеописанные устройства зачастую оказываются неэффективными для защиты от импульсов с такими временными и энергетическими характеристиками, которыми обладают СКИ, из-за ряда недостатков: пробой полупроводниковых компонентов и конденсаторов в LC- и RC-фильтрах при высоком уровне напряжения, долгое время срабатывания варисторов и разрядников, паразитные параметры. В этой связи, актуальна разработка новых устройств защиты от СКИ.

Постановка задачи

Одним из новых подходов защите РЭА от СКИ является технология модальной фильтрации [11]. Основная идея её – в использовании так называемых модальных искажений сигнала, возникающих из-за разности задержек мод в N -проводной линии передачи (ЛП) с неоднородным диэлектрическим заполнением [12]. В результате помеховый импульс при прохождении отрезка ЛП раскладывается на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Для полного разложения импульса в отрезке ЛП длиной l общая длительность импульса t_{Σ} должна быть меньше минимального модуля разности задержек мод [13]:

$$t_{\Sigma} < l \min |\tau_{i+1} - \tau_i|, \quad i=1, \dots, N-1, \quad (1)$$

где τ_i – погонная задержка i -й моды отрезка ЛП.

К устройствам, работа которых основана на модальной фильтрации, относят модальные фильтры (МФ) [14-17] и защитные меандровые линии (МЛ) [18-24]. При их изготовлении используются не радиоэлектронные компоненты, а структуры из печатных проводников, расположенных на диэлектрической подложке (например, из стеклотекстолита). Такая, на первый взгляд, простая конструкция дает ряд преимуществ по сравнению с другими устройствами защиты (стойкость к воздействию радиации, многоразовое использование, работа при высоких амплитудах напряжения помехи, низкая стоимость).

Предложен новый подход к повышению характеристик таких устройств защиты за счет использования зеркальной симметрии в поперечном сечении структур [25]. Представителем таких структур является зеркально-симметричный МФ [26]. Его поперечное сечение, где w – ширина проводников, s – расстояние между проводниками, t – толщина проводников, h – толщина диэлектрика, d – расстояние от края до проводника, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки, представлено на рис. 1, а эквивалентная схема – на рис. 2.

Данное устройство состоит из трех в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных проводников на диэлектрическом слое, причем проводники 1 и 2 расположены на одной его стороне, а проводник 3 – между ними по

центру, и отличается тем, что 2 дополнительных проводника (1* и 2*) расположены зеркально-симметрично относительно проводников 1 и 2 на обратной стороне диэлектрического слоя, а проводник 3 расположен в диэлектрическом слое на равном расстоянии от внешних проводников. Значения параметров h и ϵ_r равны 1,105 мм и 5 соответственно, значения w и t равны 0,3 мм и 105 мкм, значение s равно 0,4 мм, на обоих концах устройства подключены резисторы сопротивлением (R) 92 Ом между проводниками 2, двумя дополнительными (1*, 2*) и опорным проводником 3 (схемной землей). Значение минимального модуля разности погонных задержек мод линии, умноженное на длину линии, не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада импульса, подающегося между проводниками 1 и 3.

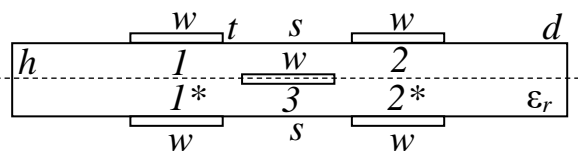


Рис. 1. Поперечное сечение зеркально-симметричного МФ

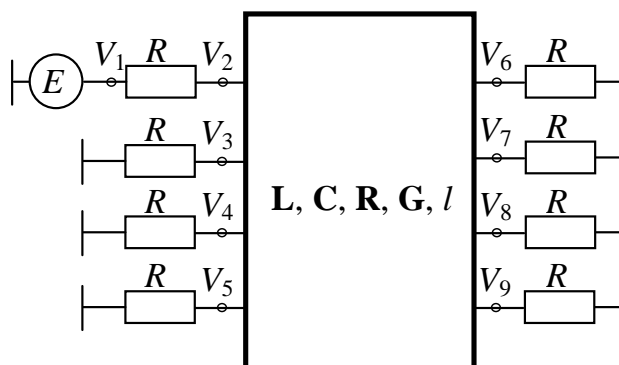


Рис. 2. Эквивалентная схема зеркально-симметричного МФ

Техническим результатом является повышенное ослабление СКИ. Он достигается за счет разложения СКИ на импульсы меньшей амплитуды и выбора параметров устройства. Недостатками устройства являются малое значение интервалов времени между импульсами разложения из-за их одного прохода вдоль линии от ее входа до выхода и необходимость резисторов на обоих концах всех проводников. Поэтому актуален поиск новых устройств защиты, устраняющий эти недостатки. Цель работы – представить новое устройство защиты от СКИ.

Подход к реализации зеркально-симметричной меандровой линии

При определенном соединении проводников на одном конце зеркально-симметричного МФ с помощью перемычек, можно создать зеркально-симметричную МЛ. Тогда получится устройство, отличающееся от исходного тем, что проводники соединены между собой попарно на одном конце [27]. Выбором параметров поперечного сечения линии, например, при ($s=510$ мкм, $w=1600$ мкм, $t=18$ мкм, $h=500$ мкм, $d=1600$ мкм, $\epsilon_r=4,5$) обеспечиваются равенство интервалов времени между вторым и пятым импульсами разложения и минимизация амплитуды сигнала на выходе линии. Значение минимального модуля разности погонных задержек мод линии, умноженное на её удвоенную длину, не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада импульса, подающегося между первым и третьим проводниками.

Поперечное сечение зеркально-симметричной МЛ идентично исходному МФ (рис. 1). Проводники 1 и 2 расположены на одной стороне диэлектрического слоя, третий (опорный) расположен между ними по центру, а проводники 1* и 2* расположены зеркально-симметрично на обратной стороне диэлектрического слоя и могут быть попарно соединены между собой на конце тремя способами: на одном слое (1-2 и 1*-2*); на разных слоях (1-1* и 2-2*); диагонально (1-2* и 2-1*).

На рис. 3 приведены эквивалентные схемы МЛ. Линия состоит из четырех (не считая опорного) проводников длиной l , по два на каждой стороне диэлектрического слоя, попарно соединенных между собой на дальнем конце перемычками тремя способами. Первый проводник соединен на одном конце с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с. E_{Γ} с внутренним сопротивлением R_{Γ} , а на другом конце соединен с защищаемой цепью, представленной на схеме эквивалентным сопротивлением R_{H} . Резисторы R подсоединены в начале и конце пассивного витка. Значения сопротивления резисторов R_{Γ} , R_{H} и R приняты равными волновому сопротивлению тракта.

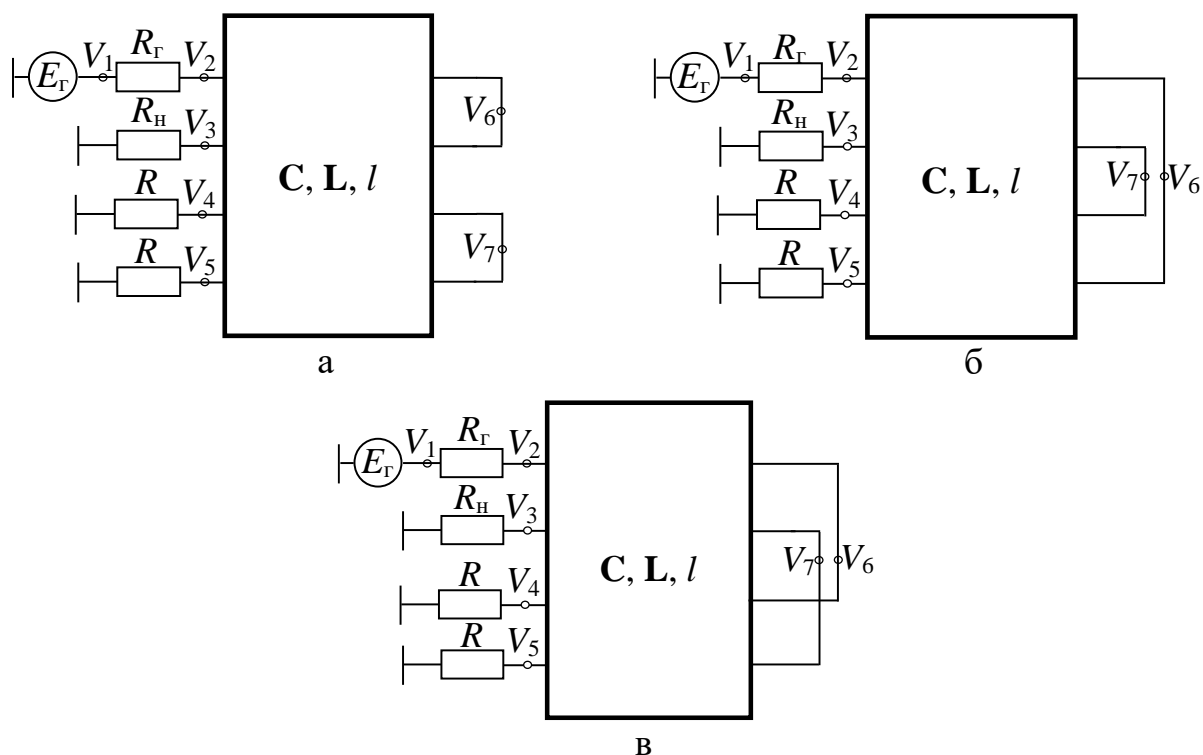


Рис. 3. Эквивалентные схемы зеркально-симметричной МЛ с попарными соединениями проводников: а) на одном слое (1-2 и 1*-2*); б) на разных слоях (1-1* и 2-2*); в) диагонально (1-2* и 2-1*)

Результаты моделирования

Выполнено моделирование с помощью квазистатического подхода, реализованного в программном комплексе TALGAT [28]. Воздействующий СКИ имеет форму трапеции с э.д.с. 5 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. На рис. 4 показаны формы выходного напряжения для трех

схем зеркально-симметричной МЛ при $l=1$ м. Амплитуды импульсов, их задержки и временные интервалы между ними сведены в таблицу 1.

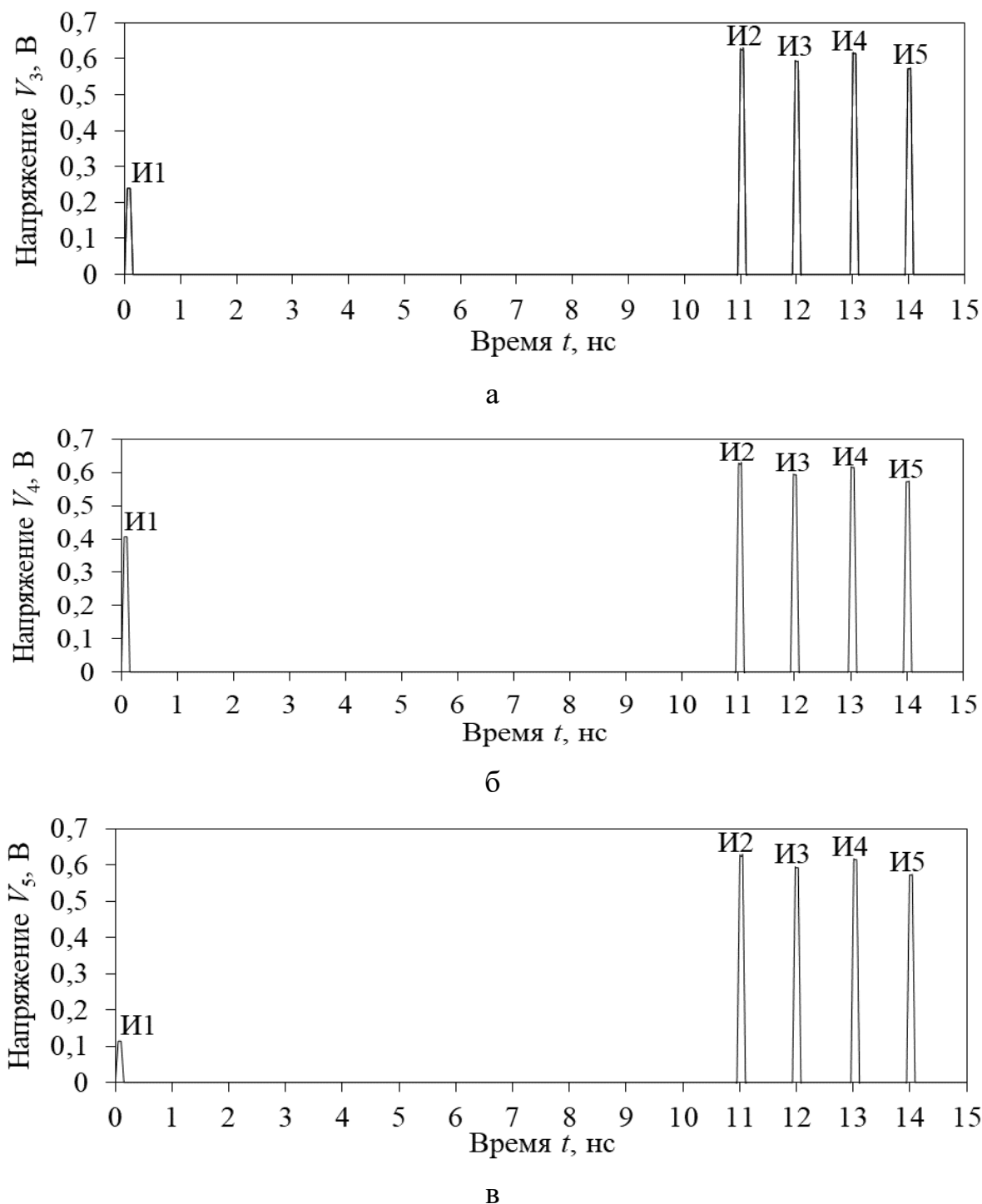


Рис. 4. Формы напряжения в конце зеркально-симметричной МЛ с попарными соединениями проводников: а) на одном слое; б) на разных слоях; в) диагонально

Из анализа результатов моделирования зеркально-симметричной МЛ из двух отдельных витков следует, что данная линия способна разложить СКИ, на 4 импульса с задержками $2l\tau_1, 2l\tau_2, 2l\tau_3, 2l\tau_4$, которые испытывают 2 прохода вдоль МЛ от входа до выхода. Импульс с нулевой задержкой является пере-

крестной наводкой на ближнем конце линии. Амплитуды импульсов разложения попарно равны (U_1 и U_3 ; U_2 и U_4). Максимальная (U_1) равна 0,63 В, т.е. около 25% от половины э.д.с.

Таблица 1 – Параметры импульсов для трех эквивалентных схем зеркально-симметричной МЛ

Параметр	Схема 1	Схема 2	Схема 3
U_0 , В	0,239	0,406	0,114
U_1 , В	0,630	0,630	0,630
U_2 , В	0,595	0,595	0,595
U_3 , В	0,617	0,617	0,617
U_4 , В	0,572	0,572	0,572
$2\tau_1$, нс	10,951	10,951	10,951
$2\tau_2$, нс	11,929	11,929	11,929
$2\tau_3$, нс	12,959	12,959	12,959
$2\tau_4$, нс	13,940	13,940	13,940
Δt_1 , нс	0,977	0,977	0,977
Δt_2 , нс	1,030	1,030	1,030
Δt_3 , нс	0,981	0,981	0,981

Кроме того, в зеркально-симметричной МЛ наблюдаются близкие значения интервалов времени между импульсами разложения. Однако их значения увеличены в 2 раза по сравнению с зеркально-симметричным МФ, что позволяет разложить СКИ в 2 раза большей длительности.

Параметры поперечного сечения и длина МЛ обеспечивают условие

$$t_{\Sigma} < 2l \min / \Delta \tau_i, \quad i=1, 2, 3. \quad (2)$$

Выполнение условия (2) обеспечивает разложение исходного импульса на импульсы мод. Минимальное значение разности задержек импульсов составляет 0,977 нс, следовательно, полное разложение СКИ длительностью t_{Σ} в отрезке данной линии передачи длиной l возможно при условии

$$t_{\Sigma} / l < 0,977 \text{ нс/м}. \quad (3)$$

Учитывая условия (2) и (3), при указанных значениях параметров МЛ максимальная длительность полностью разлагаемого сигнала t_{Σ} при длине линии 1 м будет около 1 нс.

Таким образом, показан технический результат, на достижение которого направлена запатентованная линия – увеличенное значение интервалов времени между импульсами разложения при отсутствии резисторов на одном конце линии.

Выводы

Таким образом, для защиты РЭА от СКИ предложена комбинация зеркально-симметричного МФ и защитной МЛ: зеркально-симметричная МЛ. Принцип её работы основан на технологии модальной фильтрации, который отличается от известных защитных средств отсутствием радиоэлектронных компонентов. Вместо этого используются особые структуры отрезков ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением. Они способны разложить СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды, именно за счет разно-

сти задержек мод, тогда как аналоги поглощают или отражают опасный импульс. Из-за того, что в предлагаемом устройстве не используются компоненты, обычно применяемые в устройствах защиты от импульсных перенапряжений (варисторы, разрядники, TVS-диоды), оно обладает рядом достоинств: стойкость к воздействию радиации, отсутствие паразитных параметров, многоразовое использование, функционирование при высоких напряжениях, низкая стоимость изготовления.

В отличие от ранее известных защитных устройств с модальным разложением, в частности, от зеркально-симметричного МФ (наиболее близкого к предлагаемому), зеркально-симметричная МЛ из двух отдельных витков, в которой проводники соединены между собой попарно на одном конце, показала улучшение характеристик, а именно удвоенные интервалы времени между импульсами разложения, что позволит разложить СКИ в 2 раза большей длительности. Также такое соединение требует лишь 2 резистора, а не 6, что повышает надежность и уменьшает общую стоимость.

Предложенная структура делает актуальными следующие исследования:

1. Оптимизация параметров поперечного сечения по критерию минимизации амплитуды выходного напряжения, за счет выравнивания амплитуд импульсов, не только 2-5, но и 1, аналогично выравниванию амплитуд импульсов 2-3 и 1 в витке МЛ, показанному в работе [29].
2. Оптимизация аналогично п. 1, но по критерию максимизации длительности полностью разлагаемого СКИ, за счет выравнивания интервалов времени не только между импульсами 2-5, но и 1-2, аналогично выравниванию интервалов импульсов 1-3 в витке МЛ, показанному в работе [30].
3. Многокритериальная оптимизация по п. 1, 2 и другим критериям, например, стоимостному и массогабаритному.
4. Использование такой структуры при модальном резервировании [31], т.е. когда один виток относится к резервируемой цепи, а другой – к резервной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00424).

Литература

1. Kučera M., Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment. Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE). 2016. P. 1–6.
2. Ефанов В. И., Тихомиров А. А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 228 с.
3. Гизатуллин З. М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях:

Монография. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2012. – 254 с.

4. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. 8 July 2014. Note 41.

5. Mojert C. UWB and EMP susceptiblity of microprocessors and networks // Proc. of the 14th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility (Zurich, Switzerland, 20–22 February 2001). – Zurich, Switzerland, 2001. P. 47–52.

6. Аркатов В. С., Аркатов Ю. В., Балуев Н. Н., Воробьев С. А., Разгонов А. П., Жадан В. И., Щербина Е. Г., Шалягин Д. В. Устройство электропитания и защиты устройств и систем от кондуктивных электромагнитных помех // Патент на полезную модель RU 104393 U1, опубл. 10.05.2011, бюл. №11.

7. Попов П. В., Пониматкин В. Е., Привалов А. А., Катанович А. А. Устройство защиты от мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов // Патент на полезную модель RU 110539 U1, опубл. 20.11.2011, бюл. №32.

8. Шварц Г. К., Грунский Г. И., Новиков О. В. Устройство защиты от импульсных перенапряжений // Патент на полезную модель RU 56733 U1, опубл. 10.09.2006, бюл. №16.

9. Борисов А. А., Громов О. И., Курьяков Е. В., Савчук Н. А., Хромов В. В. Устройство защиты от импульсных перенапряжений // Патент на полезную модель RU 174488 U1, опубл. 17.10.2017, бюл. №29.

10. Иванов Ю. Е. Устройство защиты оборудования от перенапряжений // Патент на изобретение RU 2190916 C1, опубл. 10.10.2002, бюл. № 28.

11. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136-1142.

12. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection // Proc. of the 18th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility (Munich, Germany, 24–28 September 2007) – Munich, Germany, 2007. P. 273–276.

13. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 4. С. 40–44.

14. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Бевзенко И. Г., Самотин И. Е., Орлов П. Е., Мелкозеров А. О., Газизов Т. Т., Куксенко С. П., Костарев И. С. Модальный фильтр // Патент на полезную модель RU 79355 U1, опубл. 27.12.2008, бюл. № 36.

15. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Бевзенко И. Г., Самотин И. Е., Орлов П. Е., Мелкозеров А. О., Газизов Т. Т., Куксенко С. П., Костарев И. С. Устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов // Патент на изобретение RU 2431897 C1, опубл. 20.10.2011, бюл. № 29.

16. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Орлов П. Е. Устройство защиты от импульсных сигналов с выравниванием амплитуд разложенных импульсов // Патент на изобретение RU 2588603 C1, опубл. 10.07.2016, бюл. № 19.

17. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Орлов П. Е. Устройство защиты от импульсных сигналов с заданным уровнем их ослабления // Патент на изобретение RU 2588014 С1, опубл. 27.06.2016, бюл. № 18.

18. Суровцев Р. С., Газизов Т. Р., Носов А. В., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2597940 С1, опубл. 20.09.2016, бюл. № 26.

19. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П. Меандровая линия задержки с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2606709 С1, опубл. 10.01.2017, бюл. № 1.

20. Суровцев Р. С., Газизов Т. Р., Носов А. В., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2600098 С1, опубл. 20.10.2016, бюл. № 29.

21. Суровцев Р. С., Газизов Т. Р., Носов А. В., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П. Меандровая линия задержки из двух витков с разными разносами, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2606776 С1, опубл. 10.01.2017, бюл. № 1.

22. Суровцев Р. С., Газизов Т. Р., Носов А. В., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П. Меандровая микрополосковая линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2607252 С1, опубл. 10.01.2017, бюл. № 1.

23. Газизов Т. Р., Суровцев Р. С., Носов А. В., Куксенко С. П., Газизов Т. Т. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью // Патент на изобретение RU 2637484 С1, опубл. 04.12.2017, бюл. № 34.

24. Газизов Т. Р., Суровцев Р. С., Носов А. В., Куксенко С. П., Газизов Т. Т. Усовершенствованная линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью // Патент на изобретение RU 2656834 С2, опубл. 06.06.2018, бюл. № 16.

25. Chernikova E. V., Belousov A. O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses // *Symmetry*. 2019. Vol. 11 (7). № 883. P. 1–25.

26. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р., Куксенко С. П. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение RU 2624465 С2, опубл. 04.07.2017, бюл. № 7.

27. Белоусов А. О., Газизов Т. Р., Черникова Е. Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов // Заявка №2019140186, заявлен 09.12.2019. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2019140186 (дата обращения 10.06.2020).

28. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 560. № 012110. P. 1–7.

29. 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, Altai, June 29 – July 3, 2015. P. 175–177.

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

31. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144.

References

1. Kučera M., Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment. *Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)*, 2016, pp. 1–6.

2. Efanov V. I., Tihomirov A. A. *Elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnyh sredstv i system. Uchebnoe posobie* [Electromagnetic compatibility of electronic devices and systems. Tutorial]. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2012. 228 p. (in Russian).

3. Gizatullin Z. M. *Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnyh elektromagnitnyh vozdeystviyah. Monografija* [The Immunity of Computer Equipment inside Buildings with Broadband Electromagnetic Effects. Monography]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2012. 254 p. (in Russian).

4. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System and Assessment Notes*, 8 July 2014, note 41.

5. Mojert C. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. *Proc. of the 14th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility*. Zurich, Switzerland, 2001, pp. 47–52.

6. Arkatov V. S., Arkatov Y. V., Baluev N. N., Vorob'ev S. A., Razgonov A. P., Zhadan V. I., Shcherbina E. G., Shalyagin D. V. Device for power supply and protection of devices and systems from conducted electromagnetic interference. Patent Russia, no. RU 104393 U1. Publish. 10.05.2011, bul. no. 11 (in Russian).

7. Popov P. V., Ponimatkin V. E., Privalov A. A., Katanovich A. A. Device for protection against powerful ultrashort electromagnetic pulse. Patent Russia, no. RU 110539 U1. Publish. 20.11.2011, bul. no. 32 (in Russian).

8. Shvarc G K., Grunskij G. I., Novikov O. V. Surge Protection Device. Patent Russia, no. RU 56733 U1. Publish. 10.09.2006, bul. no. 16 (in Russian).

9. Borisov A. A., Gromov O. I., Kur'yakov E. V., Savchuk N. A., Hromov V. V. Surge Protection Device. Patent Russia, no. RU 174488 U1. Publish. 17.10.2017, bul. no. 29 (in Russian).

10. Ivanov Yu. E. Equipment surge protective device. Patent Russia, no. RU 2190916 C1. Publish. 10.10.2002, bul. no. 28. (in Russian).

11. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no 4, pp. 1136-1142.

12. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection. *Proc. of the 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Munich, Germany, 2007, pp. 273–276.

13. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M. Modal'noe razlozhenie impul'sa v otrezkah svyazannyh linij kak novyj princip zashchity ot korotkih impul'sov [Modal Pulse Decomposition in Segments of Coupling Lines as a New Principle of Protection Against Short Pulses]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 40-44 (in Russian).

14. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Bevzenko I. G., Samotin I. E., Orlov P. E., Melkozerov A. O., Gazizov T. T., Kuksenko S. P., Kostarev I. S. Modal filter. Patent Russia, no. RU 79355 U1. Publish. 27.12.2008, bul. no. 36 (in Russian).

15. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Bevzenko I. G., Samotin I. E., Orlov P. E., Melkozerov A. O., Gazizov T. T., Kuksenko S. P., Kostarev I. S. Device to disturb equipment operation due to decomposition and recovery of pulses. Patent Russia, no. RU 2431897 C1. Publish. 20.10.2011, bul. no. 29. (in Russian).

16. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Orlov P. E. Device for protection from pulsed signals with levelling amplitudes of decomposed pulses. Patent Russia, no. RU 2588603 C1. Publish. 10.07.2016, bul. no. 19. (in Russian).

17. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Orlov P. E. Device for protection from pulsed signals with given level of attenuation thereof. Patent Russia, no. RU 2588014 C1. Publish. 27.06.2016, bul. no. 18. (in Russian).

18. Surovcev R. S., Gazizov T. R., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. Delay line protecting from ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 259794 C1. Publish. 20.09.2016, bul. no. 26. (in Russian).

19. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. Meander delay line with face connection, which protects from ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 2606709 C1. Publish. 10.01.2017, bul. no. 1. (in Russian).

20. Surovcev R. S., Gazizov T. R., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. Meander delay line of two coils, which protects from ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 2600098 C1. Publish. 20.10.2016, bul. no. 29. (in Russian).

21. Surovcev R. S., Gazizov T. R., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. Meander delay line of two coils with different separations protecting from ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 2606776 C1. Publish. 10.01.2017, bul. no. 1. (in Russian).

22. Surovcev R. S., Gazizov T. R., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. Meander micro-strip delay line, protecting against ultrashort pulses. Patent Russia, no. RU 2607252 C1. Publish. 10.01.2017, bul. no. 1. (in Russian).

23. Gazizov T. R., Surovcev R. S., Nosov A. V., Kuksenko S. P., Gazizov T. T. Delay line protecting from ultrashort pulses with increased duration. Patent Russia, no. RU 2637484 C1. Publish. 04.12.2017, bul. no. 34. (in Russian).

24. Gazizov T. R., Surovcev R. S., Nosov A. V., Kuksenko S. P., Gazizov T. T. Improved delay line, protecting against short-term pulses with the increased duration. Patent Russia, no. RU 2656834 C2. Publish. 06.06.2018, bul. no. 16. (in Russian).

25. Chernikova E. B., Belousov A. O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses. *Symmetry*, 2019, vol. 11 (7), no. 883, pp. 1–25.

26. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Kuksenko S. P. Four-way mirror-symmetrically structure, protecting from ultrashort impulses. Patent Russia, no. RU 2624465 C2. Publish. 04.07.2017, bul. no. 7. (in Russian).

27. Belousov A. O., Gazizov T. R., Chernikova E. B. Reflection symmetric meander line protecting against ultrashort pulses. Application №2019140186. Date of filing 09.12.2019. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2019140186 (accessed 10.06.2020). (in Russian).

28. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1–7.

29. 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, Altai, June 29 – July 3, 2015, pp. 175–177.

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

31. Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R. Analysis of reservation methods based on modal filtration. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 117-144 (in Russian).

Статья поступила 16 июня 2020 г.

Информация об авторе

Черникова Евгения Борисовна – аспирант кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры, проектирование защитных устройств на основе модальной фильтрации, в частности, изучение зеркальной симметрии модальных фильтров и меандровых линий. E-mail: chiernikova96@mail.ru

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

Reflection Symmetric Meander Line Protecting against Ultrashort Pulses

E. B. Chernikova

Problem Statement: ubiquitous proliferation of radio-electronic equipment (REE) in almost all industries, together with an increase in its structural complexity, leads to exacerbation of the problem of electromagnetic compatibility (EMC). In particular, the problem of protecting REE against ultrashort pulses (USPs), the excitation of which can be dangerous for REE, especially for critical, is relevant. Prevalent components used for surge voltage protection (varistors, surge arresters, TVS diodes) have a number of disadvantages. Therefore, devices based on them often turn out to be ineffective for protecting REE against pulses with such time and energy characteristics as USPs have. In this regard, the development of new protective devices is relevant. One of the new approaches to protecting REE against USPs is a modal filtration technology. Its idea is to use modal signal distortions appearing due to the difference in modal delays of a multiconductor transmission line. A new approach is proposed to increase the efficiency of such protection devices through the use of reflection symmetric structures, namely, a reflection symmetric modal filter (MF). Meanwhile, meander lines (ML) are also known to be used for protection against USPs. Therefore, their combined use is possible. **Purpose of the work** is to introduce a new device for protection against USP based on a reflection symmetric ML. **Methods used:** the system of quasistatic analysis based on the method of moments is used to demonstrate the possibility of protecting REE against USPs. **Results and their novelty:** for the first time, a combination of a reflection symmetric MF and protective ML is implemented in the proposed device (a decision was obtained to grant a patent for an invention). **Practical relevance:** the reflection symmetric ML is designed to protect REE against USPs penetrating into the equipment conductively (through power circuits, signal circuits). It is important to note that in this device, the time intervals between decomposition pulses are twice as large as in similar MFs, which allows for the decomposition of a USP which is 2 times longer. Also, such a connection requires not 6, but only 2 resistors, which increases reliability and reduces the total cost of the device. It is noteworthy that the structure can also be used with modal redundancy, i.e. when one turn refers to the reserved circuit, and the other to the reserving one.

Key words: electromagnetic compatibility, protection devices, ultrashort pulse, modal filtration, reflection symmetric modal filter, reflection symmetric meander line.

Information about Author

Evgeniya Borisovna Chernikova – graduate student at the Department of Television and Control, junior research fellow of the Research laboratory of fundamental research on electromagnetic compatibility. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment, design of protection devices based on modal filtration, in particular, the research of reflection symmetry of modal filters and meander lines. E-mail: chiernikova96@mail.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.