

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.12>

УДК 621.391.825

## МОДАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА В 8-ПРОВОДНЫХ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ СТРУКТУРАХ

Е. Б. Черникова, Т. Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2019 г.

**Аннотация.** Рассматривается защита радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от кондуктивных помех, проникающих в РЭА непосредственно по проводникам, например, через сигнальные проводники или цепи питания. Для решения этой проблемы традиционно применяются фильтрующие устройства, подсоединяемые, как правило, к входу защищаемой аппаратуры (например, LC- и RC-фильтры, варисторы, разрядники, TVS-диоды). Однако существуют кондуктивные помехи, длительность которых находится в наносекундном и субнаносекундном диапазонах. Такие помехи носят название сверхкоротких импульсов (СКИ). В связи с тем, что повсеместно применяемые устройства защиты от помех могут оказаться не эффективными, из-за временных и энергетических характеристик СКИ, предложен новый способ, называемый модальной фильтрацией. Для получения более высоких характеристик можно изменять конфигурацию структур модальных фильтров (МФ), создавая тем самым благоприятные условия для более эффективного разложения СКИ в МФ. Показательным примером является использование структур с симметрией. Так, известен новый подход к совершенствованию технологии модальной фильтрации за счет использования 4-проводной зеркально-симметричной структуры, которая раскладывается СКИ на 4 импульса в 4 раза меньшей амплитуды. В данной работе рассматривается возможность использования симметрии для последующего деления СКИ на удвоенное число импульсов в 2 раза меньшей амплитуды. Впервые выполнено квазистатическое

моделирование временного отклика 2-х 8-проводных зеркально-симметричных структур круговой, квадратной и прямоугольной конфигураций. Показано, что данные МФ способны разложить СКИ на последовательность из 8 импульсов, однако для получения требуемого уровня ослабления необходима дополнительная оптимизация по нескольким критериям.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, устройства защиты, сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, зеркальная симметрия.

**Abstract.** Protection of radio electronic equipment (REE) against conductive interferences penetrating into REE directly through the conductors, for example, signal conductors or power circuits is in the focus of the paper. To solve this problem, filtering devices are traditionally used, which are usually connected to the input of the protected equipment (for example, LC- and RC-filters, varistors, arresters, TVS-diodes). However, there are conductive interferences, the duration of which is in the nanosecond and sub-nanosecond ranges. Such interferences are called ultrashort pulses (USPs). Due to the fact that widely used devices for protection against interference cannot be effective, because of the time and energy characteristics of the USP, a new method is proposed, called modal filtration. In order to obtain higher characteristics, it is possible to change the configuration of the modal filter (MF) structures, thus creating favorable conditions for more effective decomposition of the MF. An indicative example is the use of structures with symmetry. Thus, a new approach for improving the modal filtration technology by using a 4-conductor reflection symmetric structure, which decomposes the USP by 4 pulses of 4 times smaller amplitude is known. In this paper, we consider the possibility of using symmetry for the subsequent division of USP by a doubled number of pulses of 2 times smaller amplitude. For the first time the quasistatic simulation of time response of 2 8-conductor reflection symmetric structures of circular, square and rectangular configurations was performed. It is shown that these MFs are able to decompose the USP into a sequence of 8 pulses, but to obtain the required level of attenuation, additional optimization is required according to several criteria.

**Key words:** electromagnetic compatibility, protection devices, ultrashort pulse, modal filtration, reflection symmetry.

## Введение

В настоящее время при разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) уделяют всё большее внимание электромагнитной совместимости (ЭМС). Это связано с возрастающей сложностью конструкции самой РЭА, повышением числа электрических и электронных компонентов на все меньшей площади, увеличением верхних частот полезных и помеховых сигналов, совершенствованием возможностей генераторов преднамеренных электромагнитных воздействий, а также необходимостью учёта взаимовлияний на уровнях элементов, блоков и систем. Вследствие этого, все больше увеличивается вероятность взаимного воздействия и связанного с этим нарушения нормального функционирования аппаратуры, что является недопустимо, особенно для критичных систем.

При решении проблем ЭМС РЭА особую роль играет защита от излучаемых и кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП). Кондуктивные помехи опасны тем, что проникают в РЭА непосредственно по проводникам, например, через сигнальные проводники или через цепи питания. Одним из опасных видов кондуктивных помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [1]. Они представляют особую опасность из-за их малой длительности и широкого спектра [2, 3]. Кроме того, при воздействии СКИ на аппаратуру энергия не успевает распределиться по элементам структуры, и поэтому из-за локализации энергии в одной точке увеличивается вероятность отказа в чувствительных областях [4]. Это подтверждают и результаты экспериментальных исследований [5, 6], которые показали, что генераторы СКИ при сравнительно небольших напряженностях электромагнитного поля способны оказывать губительное воздействие на РЭА.

К наиболее распространённым методам подавления кондуктивных ЭМП, и СКИ в частности, относят фильтры, которые применяются для уменьшения

амплитуды токов или напряжений одной или нескольких фиксированных частот. Для устранения ЭМП определенной частоты используют фильтр, состоящий из параллельно или последовательно включенных конденсатора и катушки индуктивности, создающих большое сопротивление протеканию тока на выбранной частоте. Однако реальные элементы фильтра всегда отличаются от идеальных наличием паразитных составляющих.

Для защиты РЭА от импульсных перенапряжений применяют различные виды элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой, уменьшающие свое сопротивление под действием приложенного импульса напряжения. Наибольшее распространение получили 3 вида подобных элементов: газовые разрядники, варисторы и, так называемые, супрессоры, выполненные на основе лавинных диодов и часто называемые TVS-диодами [7]. Газовые разрядники – это устройства, являющиеся нелинейными резисторами, которые снижают уровень перенапряжения до значений, меньших импульсной электрической прочности защищаемых элементов [8]. Однако они имеют относительно большое время реакции на приложенный импульс напряжения, и, кроме того, их напряжение пробоя увеличивается с повышением скорости нарастания фронта импульса. Значительно чаще используются оксидно-цинковые варисторы и TVS-диоды, свободные от этих недостатков. Однако мощные TVS-диоды не дешевы, а максимальная способность поглощения энергии варистором зависит от числа срабатываний элемента во время всего срока службы, т.е. это устройство защиты не долговечно.

Исходя из временных и энергетических характеристик СКИ различной природы, в условиях современной электромагнитной обстановки требуется применение дополнительных мер защиты РЭА, так как традиционные методы ограничения и фильтрации обладают рядом недостатков, таких как паразитные параметры элементов LC- и RC-фильтров, нестойкость полупроводниковых компонентов к радиации, пробой при высоких напряжениях, позднее срабатывание газоразрядных устройств, высокая стоимость и пр.

Для защиты от СКИ предложена новая технология модальной фильтрации, основанная на явлении модального разложения импульса на импульсы меньшей амплитуды из-за различия задержек мод, тогда как полезный сигнал, в своей полосе, проходит без искажений [9]. Устройства, работающие на основе данной технологии, называются модальными фильтрами (МФ). Их преимущества заключаются в простой технологии изготовления (печатных платах), стойкости к воздействию радиации, многократном использовании, работе при высоких амплитудах напряжения помехи, низкой стоимости. На рис.1а представлено поперечное сечение структуры печатного МФ [10], с треугольным расположением проводников (проводники 1 и 2 расположены на верхней стороне диэлектрической подложки, а опорный проводник 3 – на обратной). Данный МФ способен разложить СКИ на 2 импульса в 2 раза меньшей амплитуды. Предложен новый подход к повышению характеристик МФ защиты за счет использования зеркальной симметрии в поперечном сечении структур [11]. Представителем таких структур является 4-проводный зеркально-симметричный МФ [12]. Он создан на основе вышеупомянутого 2-проводного МФ (напротив проводников 1 и 2 зеркально симметрично добавлены проводники 1\* и 2\*, увеличена толщина диэлектрика  $h_1=2h+t$ , проводник 3 расположен в диэлектрике) [13]. Его поперечное сечение представлено на рис.1б. В нем, из-за конструктивного расположения проводников относительно земли, при оптимальных параметрах обеспечиваются одновременно торцевая и лицевая связи, что позволяет получить близкие значения временных интервалов с попарно выравненными амплитудами, максимальная из которых в 4 раза меньше по сравнению с амплитудой на входе (при  $U_{вх}=2,5$  В) (рис.2).

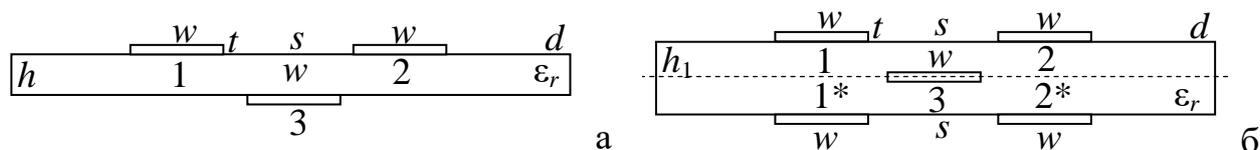


Рис.1. Поперечные сечения двухпроводного и зеркально-симметричного МФ.

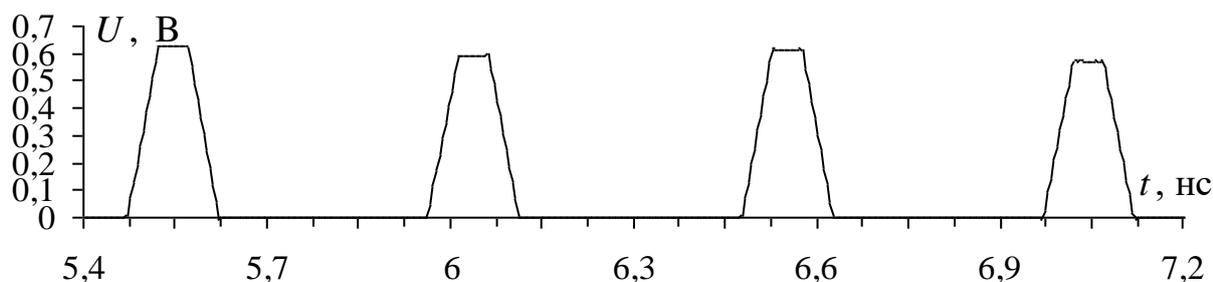


Рис.2. Форма напряжения на выходе зеркально-симметричного МФ.

На основании проведенных исследований можно предположить целесообразность использования симметрии для последующего деления СКИ на удвоенное число импульсов в 2 раза меньшей амплитуды. Цель работы – проверить данную гипотезу. Для этого рассмотрено 3 разных 8-проводных зеркально-симметричных структуры: круговая, квадратная и прямоугольная.

### 1. Структуры исследуемых 8-проводных зеркально-симметричных МФ

На начальных этапах исследования новых структур многопроводных линий передачи (МПЛП) наиболее предпочтительно использовать моделирование с помощью квазистатического подхода. При таком виде моделирования полагается распространение только поперечной Т-волны. Произвольная схема структуры представляется как обобщенная схемная модель, напряжения и токи в любой точке которой определяются телеграфными уравнениями, к которым сводятся уравнения Максвелла, для каждого отрезка МПЛП с учётом граничных условий на концах отрезков [14].

Решение телеграфных уравнений гораздо проще и менее затратно, а точность, которая обеспечивается при таком подходе, приемлема даже для решения сложных задач [15]. Данный подход реализован в программном комплексе TALGAT. Сначала вычисляются матрица погонных коэффициентов электростатической ( $\mathbf{C}$ ) и электромагнитной ( $\mathbf{L}$ ) индукций отрезка МПЛП, из которых вычисляются матрицы характеристического импеданса ( $\mathbf{Z}$ ) и вектор погонных задержек ( $\mathbf{\tau}$ ). Затем составляется схема для моделирования, и задаются нагрузки и воздействие. Наконец, вычисляются временные или частотные отклики. Матрицы погонных сопротивлений  $\mathbf{R}$  (для потерь в

проводниках) и проводимостей  $G$  (для потерь в диэлектриках) часто принимаются равными нулю и не учитываются на первых этапах исследования.

Рассматриваются 3 структуры 8-проводных зеркально-симметричных МФ: круговой, квадратной и прямоугольной конфигурации. Их поперечные сечения изображены на рис.3 (пунктиром обозначены оси симметрии). На рис.4а приведена принципиальная электрическая схема структур. Линия состоит из 8 (не считая опорного) проводников длиной  $l$ , равной 1 м. Значения всех сопротивлений  $R$  принимались равными среднеарифметическому значению элементов матрицы  $Z$  по главной диагонали. Один проводник соединен на одном конце с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником ЭДС  $E$  с амплитудой 5 В, длительностями фронта, спада и плоской вершины по 10 пс (рис.4б).

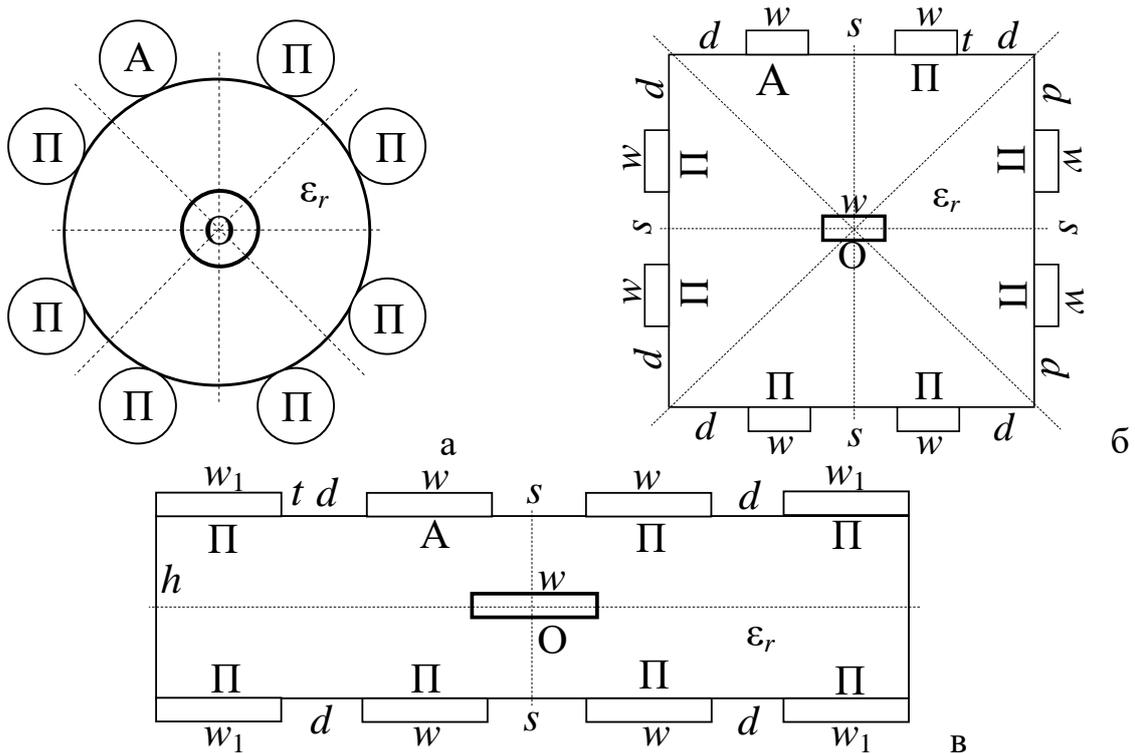


Рис.3. Поперечные сечения исследуемых структур: круговой (а), квадратной (б), прямоугольной (в).

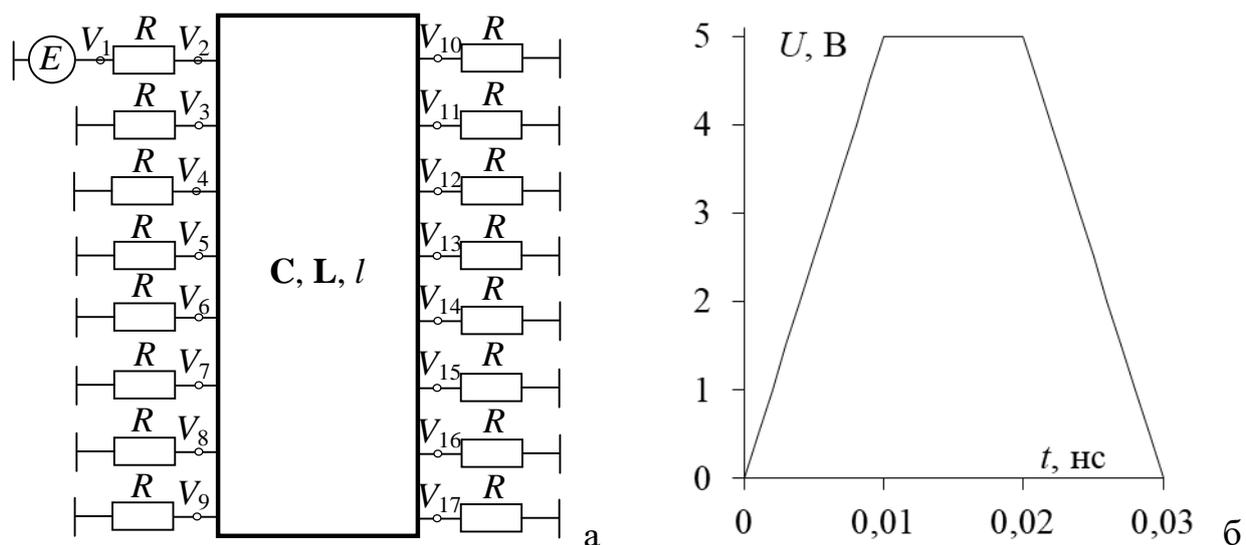


Рис.4. Эквивалентная схема исследуемых структур (а) и форм воздействующей ЭДС (—) и напряжения на входе (---) (б).

## 2. Результаты для кругового МФ

Моделировался МФ с круглыми проводниками (рис.3а) радиусом 0,4 мм и диэлектриком радиусом 1,6 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_r$ ) равна 5. Такое расположение проводников (попарное сближение) и их параметры выбраны в качестве первого приближения.

Вычислены элементы  $C$ ,  $L$ ,  $Z$  и  $\tau$ :

$$C = \begin{bmatrix} 69,827 & -0,850 & -16,998 & -0,561 & -24,133 & -2,470 & -2,621 & -0,811 \\ -0,850 & 69,827 & -0,561 & -16,998 & -2,470 & -24,133 & -0,811 & -2,621 \\ -16,998 & -0,561 & 69,827 & -0,850 & -2,621 & -0,811 & -24,133 & -2,470 \\ -0,561 & -16,998 & -0,850 & 69,827 & -0,811 & -2,621 & -2,470 & -24,133 \\ -24,118 & -2,489 & -2,638 & -0,834 & 68,475 & -15,232 & -0,894 & -0,565 \\ -2,489 & -24,118 & -0,834 & -2,638 & -15,232 & 68,475 & -0,565 & -0,894 \\ -2,638 & -0,834 & -24,118 & -2,489 & -0,894 & -0,565 & 68,475 & -15,232 \\ -0,834 & -2,638 & -2,489 & -24,118 & -0,565 & -0,894 & -15,232 & 68,475 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 584 & 202 & 322 & 185 & 368 & 239 & 246 & 193 \\ 202 & 584 & 185 & 322 & 239 & 368 & 193 & 246 \\ 322 & 185 & 584 & 202 & 246 & 193 & 368 & 239 \\ 185 & 322 & 202 & 584 & 193 & 246 & 239 & 368 \\ 368 & 239 & 246 & 193 & 586 & 309 & 205 & 185 \\ 239 & 368 & 193 & 246 & 309 & 586 & 185 & 205 \\ 246 & 193 & 368 & 239 & 205 & 185 & 586 & 309 \\ 193 & 246 & 239 & 368 & 185 & 205 & 309 & 586 \end{bmatrix} \text{ нГн/м, } \tau = \begin{bmatrix} 4,279 \\ 4,329 \\ 4,339 \\ 4,455 \\ 4,645 \\ 5,027 \\ 5,059 \\ 7,097 \end{bmatrix} \text{ нс/м,}$$

$Z=$	103,091	23,447	45,569	20,73	54,146	30,017	31,196	22,138	Ом.
	23,447	103,091	20,73	45,569	30,017	54,146	22,138	31,196	
	45,584	20,624	102,786	23,515	31,213	22,156	54,098	29,994	
	20,624	45,584	23,515	102,786	22,156	31,213	29,994	54,098	
	54,199	29,986	31,264	22,207	103,349	43,211	24,079	20,686	
	29,986	54,199	22,207	31,264	43,211	103,349	20,686	24,079	
	31,179	22,122	54,079	30,054	24,103	20,722	103,436	43,273	
	22,122	31,179	30,054	54,079	20,722	24,103	43,273	103,436	

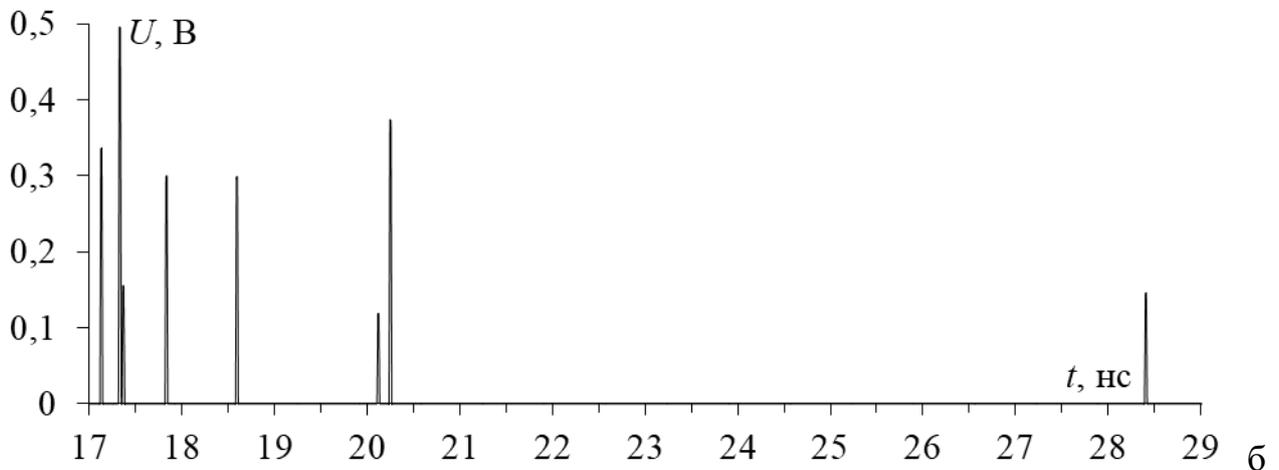
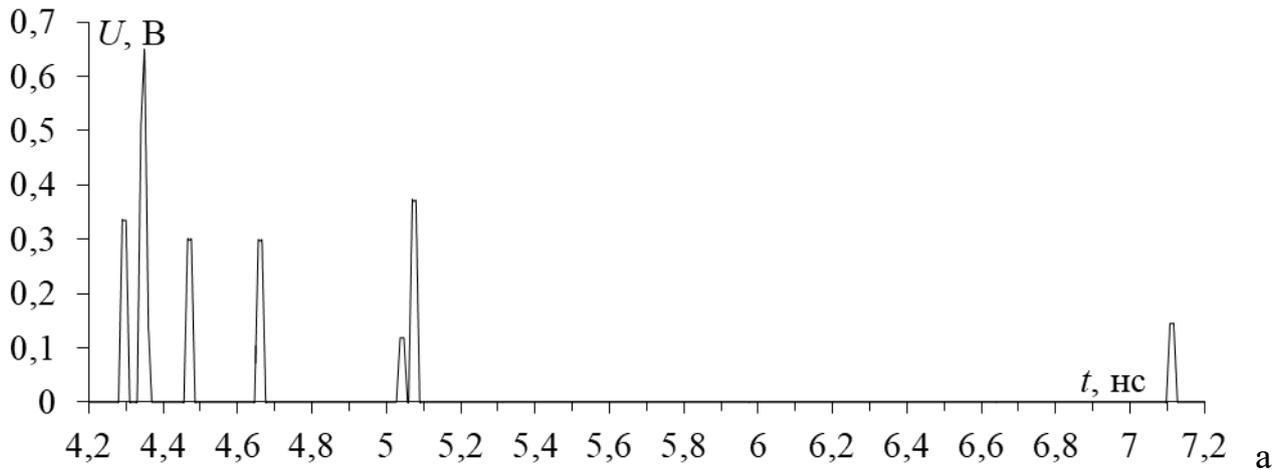


Рис.5. Формы напряжения на выходе кругового МФ при  $l=1$  м (а) и  $l=4$  м (б).

На рис.5а показан временной отклик на выходе МФ. На полученных формах напряжения наблюдаются 7 импульсов разложения. Между тем, из значения компонент вектора  $\tau$  видно, что  $\tau_2$  и  $\tau_3$  почти совпадают, отличаясь лишь на 0,01 нс/м. Поэтому импульсы 2 и 3 пришли практически в одно время,

в связи с чем произошло их наложение с суммированием амплитуд. Для подтверждения данного предположения выполнено моделирование МФ с увеличенным значением  $l$  от 1 до 4 м (рис.5б) [17]. В результате получено 8 импульсов с максимальной амплитудой 0,495 В, что в 5 раз меньше амплитуды половины ЭДС. Тем самым подтверждается первая часть гипотезы о возможности разложения СКИ на удвоенное число импульсов, однако в отличие от 4-проводного зеркально-симметричного МФ, у которого коэффициент ослабления равен 4, исследуемый МФ не уменьшает СКИ в 8 раз. Между тем, максимальная амплитуда импульсов разложения при коэффициенте ослабления 8 должна равняться 0,3125 В. Во временном отклике (рис.5б) наблюдается 4 импульса с такой амплитудой, еще у 3-х импульсов амплитуда меньше этого значения, а максимальная лишь в 1,5 раза больше, что естественно из-за рассогласования мод и устранимо оптимизацией.

### 3. Результаты для квадратного МФ

Квадратный МФ (рис.3б) получен на основе 4-проводного зеркально-симметричного МФ (рис.1б). К нему на торцы подложки увеличенной толщины добавлены по 2 проводника с каждой стороны. Параметры поперечного сечения:  $s=100$  мкм,  $w=700$  мкм,  $d=70$  мкм,  $t=18$  мкм,  $\epsilon_r=4,5$ . Согласование МФ в данном случае достигается соблюдением условия равенства амплитуды сигнала на входе линии половине ЭДС источника сигнала [18]. Вычислены элементы  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\boldsymbol{\tau}$  и  $\mathbf{Z}$ .

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 126,91 & -36,791 & -3,030 & -0,641 & -0,434 & -0,569 & -1,730 & -63,140 \\ -36,791 & 126,91 & -63,140 & -1,730 & -0,556 & -0,434 & -0,641 & -3,030 \\ -3,030 & -63,140 & 132,435 & -31,016 & -1,730 & -0,641 & -0,469 & -0,919 \\ -0,641 & -1,730 & -31,016 & 132,435 & -63,153 & -3,030 & -0,919 & -0,469 \\ -0,434 & -0,556 & -1,730 & -63,140 & 126,91 & -36,791 & -3,030 & -0,641 \\ -0,569 & -0,434 & -0,641 & -3,030 & -36,791 & 126,91 & -63,140 & -1,728 \\ -1,730 & -0,641 & -0,469 & -0,919 & -3,030 & -63,140 & 132,435 & -31,016 \\ -63,140 & -3,030 & -0,919 & -0,469 & -0,641 & -1,732 & -31,016 & 132,435 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 500 & 292 & 201 & 153 & 149 & 161 & 190 & 292 \\ 292 & 500 & 292 & 190 & 161 & 149 & 153 & 201 \\ 201 & 292 & 465 & 253 & 190 & 153 & 138 & 154 \\ 153 & 190 & 253 & 465 & 292 & 201 & 154 & 138 \\ 149 & 161 & 190 & 292 & 500 & 292 & 201 & 153 \\ 161 & 149 & 153 & 201 & 292 & 500 & 292 & 190 \\ 190 & 153 & 138 & 154 & 201 & 292 & 465 & 253 \\ 292 & 201 & 154 & 138 & 153 & 190 & 253 & 465 \end{bmatrix} \quad \text{нГн/м, } \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 5,134 \\ 5,185 \\ 5,288 \\ 5,613 \\ 5,930 \\ 5,980 \\ 6,015 \\ 7,006 \end{bmatrix} \quad \text{нс/м,}$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 81,344 & 42,001 & 27,584 & 18,612 & 17,946 & 20,202 & 24,918 & 45,784 \\ 42,001 & 81,344 & 45,784 & 24,918 & 20,202 & 17,946 & 18,612 & 27,584 \\ 27,584 & 45,784 & 75,019 & 34,518 & 24,918 & 18,612 & 16,586 & 20,014 \\ 18,612 & 24,918 & 34,518 & 75,019 & 45,784 & 27,584 & 20,014 & 16,586 \\ 17,946 & 20,202 & 24,918 & 45,784 & 81,344 & 42,001 & 27,584 & 18,612 \\ 20,202 & 17,946 & 18,612 & 27,584 & 42,001 & 81,344 & 45,784 & 24,918 \\ 24,918 & 18,612 & 16,586 & 20,014 & 27,584 & 45,784 & 75,019 & 34,518 \\ 45,784 & 27,584 & 20,014 & 16,586 & 18,612 & 24,918 & 34,518 & 75,019 \end{bmatrix} \quad \text{Ом.}$$

На рис.6 показана форма напряжения на выходе квадратного МФ. Из рис. 6 видно, что данный МФ способен разложить СКИ на 8 импульсов с коэффициентом ослабления 4,78 ( $U_{max}=0,523$  В). Между тем, большую амплитуду имеют лишь импульсы 3 и 5.

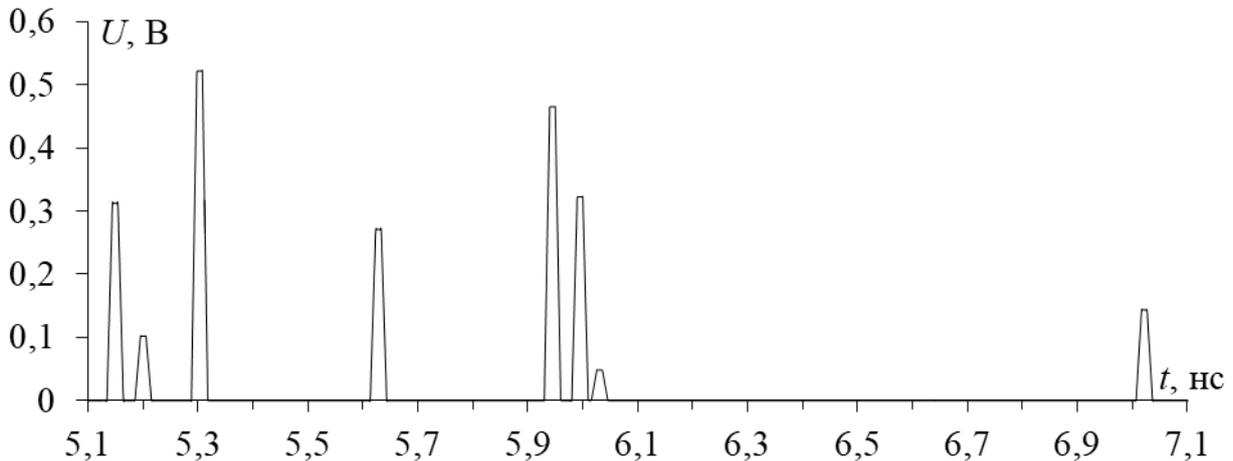


Рис.6. Форма напряжения на выходе квадратного МФ при  $l=1$  м.

#### 4. Результаты для прямоугольного МФ

Прямоугольный МФ (рис.3в) получен на основе зеркально-симметричного МФ (рис.1б) с оптимальными параметрами ( $s=510$  мкм,  $w=1600$  мкм,  $t=18$  мкм,  $h=500$  мкм,  $\epsilon_r=4,5$ ), к которому на края печатной платы на расстоянии  $d$  от

проводников добавлены по 2 новых проводника с каждой стороны. Моделирование выполнялось при далеком ( $d=3000$  мкм) и близком ( $d=200$  мкм) расположении новых проводников. Их ширина также менялась: в первом случае  $w_1=1000$  мкм, а во втором –  $w_1=2000$  мкм. На рис. 7 показан временной отклик, полученный при моделировании первого случая.

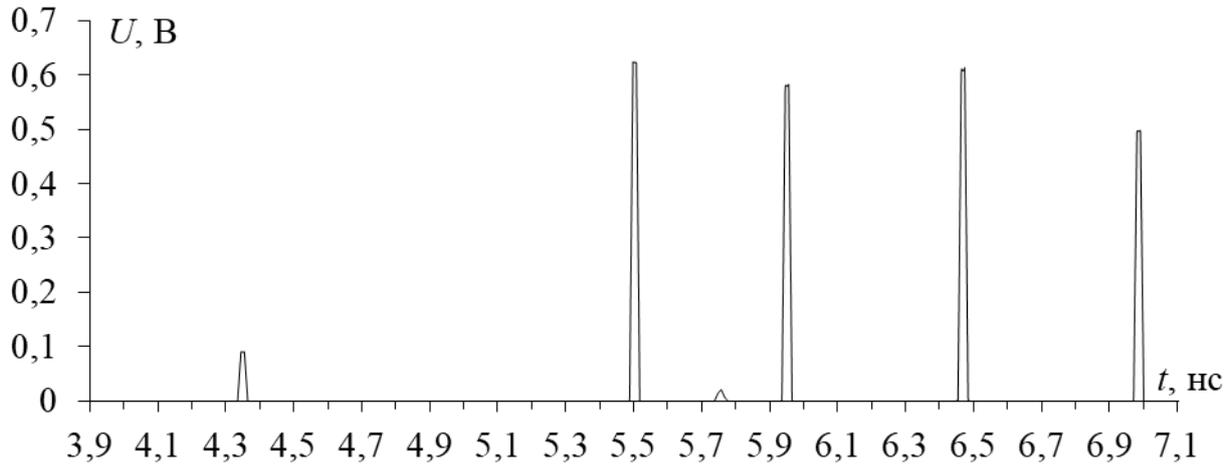


Рис.7. Форма напряжения на выходе прямоугольного МФ при  $d=3000$  и  $w_1=1000$  мкм.

Из рис.7 следует, на выходе прямоугольного МФ получены 4 импульса с почти такими же значениями максимальной амплитуды (0,653 В) и временных интервалов ( $\approx 0,45$  нс/м), как у зеркально-симметричного МФ (0,625 В и 0,5 нс/м соответственно). Однако из вектора погонных задержек (таблица 1) видно, что точное число импульсов должны быть 8. Между тем, отчетливо выражены только 4 импульса, соответствующие  $\tau_3, \tau_6, \tau_7, \tau_8$ . Значения  $\tau_4$  и  $\tau_5$  совпали, что привело к наложению импульсов с уменьшением результирующей амплитуды. Импульсы с  $\tau_1$  и  $\tau_2$  имеют малую амплитуду и не влияют на результирующий уровень ослабления.

Таблица 1

$\tau_i$ [нс/м]	1	2	3	4	5	6	7	8
Значение	4,00	4,33	5,48	5,73	5,74	5,93	6,45	6,97

Ниже приведены элементы **C**, **L**,  **$\tau$**  и **Z** для  $d=200$  мкм и  $w_1=2000$  мкм. На рис.8 показана форма напряжения на выходе МФ. Значения всех сопротивлений  $R$  приняты равными 50 Ом.

$$C = \begin{bmatrix} 157,037 & -10,800 & -27,299 & -0,140 & -33,142 & -1,369 & -8,842 & -0,482 \\ -10,800 & 157,037 & -0,140 & -27,299 & -1,369 & -33,142 & -0,482 & -8,842 \\ -27,299 & -0,140 & 157,037 & -10,800 & -8,842 & -0,482 & -33,142 & -1,369 \\ -0,140 & -27,299 & -10,800 & 157,037 & -0,482 & -8,842 & -1,369 & -33,142 \\ -32,872 & -1,213 & -8,674 & -0,324 & 123,975 & -1,370 & -76,968 & -0,880 \\ -1,213 & -32,872 & -0,324 & -8,674 & -1,370 & 123,975 & -0,880 & -76,968 \\ -8,674 & -0,324 & -32,872 & -1,213 & -76,968 & -0,880 & 123,975 & -1,370 \\ -0,324 & -8,674 & -1,213 & -32,872 & -0,880 & -76,968 & -1,370 & 123,975 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 331 & 105 & 121 & 76 & 222 & 117 & 178 & 107 \\ 105 & 331 & 76 & 121 & 117 & 222 & 107 & 178 \\ 121 & 076 & 331 & 105 & 178 & 107 & 222 & 117 \\ 76 & 121 & 105 & 331 & 107 & 178 & 117 & 222 \\ 224 & 119 & 180 & 109 & 532 & 158 & 346 & 154 \\ 119 & 224 & 109 & 180 & 158 & 532 & 154 & 346 \\ 180 & 109 & 224 & 119 & 346 & 154 & 532 & 158 \\ 109 & 180 & 119 & 224 & 154 & 346 & 158 & 532 \end{bmatrix} \text{ нГн/м, } \tau = \begin{bmatrix} 4,612 \\ 5,028 \\ 5,526 \\ 5,701 \\ 5,796 \\ 6,156 \\ 6,586 \\ 6,972 \end{bmatrix} \text{ нс/м,}$$

$$Z = \begin{bmatrix} 52,261 & 11,940 & 18,231 & 8,580 & 34,294 & 13,758 & 28,651 & 12,821 \\ 11,940 & 52,261 & 8,580 & 18,231 & 13,758 & 34,294 & 12,821 & 28,651 \\ 18,231 & 8,580 & 52,261 & 11,940 & 28,651 & 12,821 & 34,294 & 13,758 \\ 8,580 & 18,231 & 11,940 & 52,261 & 12,821 & 28,651 & 13,758 & 34,294 \\ 34,298 & 13,794 & 28,663 & 12,858 & 96,015 & 19,759 & 65,367 & 19,377 \\ 13,794 & 34,298 & 12,858 & 28,663 & 19,759 & 96,015 & 19,377 & 65,367 \\ 28,663 & 12,858 & 34,298 & 13,794 & 65,367 & 19,377 & 96,015 & 19,759 \\ 12,858 & 28,663 & 13,794 & 34,298 & 19,377 & 65,367 & 19,759 & 96,015 \end{bmatrix} \text{ Ом.}$$

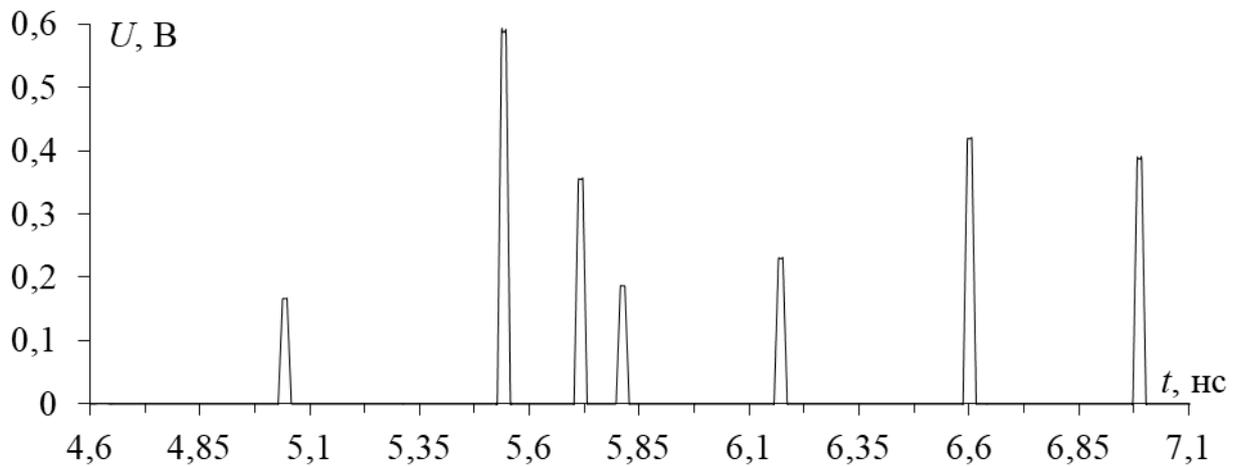


Рис.8. Форма напряжения на выходе прямоугольного МФ при  $d=200$  и  $w_1=2000$  мкм.

Как видно, прямоугольный МФ длиной 1 м способен разложить СКИ на 8 импульсов (импульс с  $\tau_1$  очень мал по амплитуде) с коэффициентом ослабления 4,22 раза ( $U_{max}=0,592$  В). При этом можно получить более равномерные интервалы между импульсами. Рост амплитуд некоторых импульсов можно уменьшить оптимизацией.

### **Заключение**

Таким образом, рассмотрена возможность разложения СКИ в 3-х разных структурах 8-проводного зеркально-симметричного МФ: круглой, квадратной и прямоугольной. Показано, что на выходе исследуемых МФ наблюдается последовательность 8 импульсов с коэффициентами ослабления в 5, 4,78 и 4,22 раз соответственно. Между тем требуемого уровня ослабления (в 8 раз) не удалось добиться только лишь переходом от 4-х к 8-и проводникам. Но очевидно, что это можно сделать оптимизацией.

В дальнейшем планируется оптимизировать данные структуры по критериям минимизации амплитуды напряжения на выходе, а также обеспечения согласования. Ввиду особенности разложения СКИ в зеркально-симметричных структурах полагается, что это возможно, в первую очередь, путем выравнивания амплитуд импульсов на выходе МФ.

Несмотря на предварительный характер выполненного моделирования, оно имеет важное методологическое значение, поскольку позволило сделать выводы, выявляющие новые подходы к совершенствованию МФ за счет симметрии, в продолжение двух крупных работ [[11](#), [19](#)]:

1. Переход от 4-х к 8-и проводникам МФ с использованием симметрии позволяет улучшить характеристики МФ, но не дает наилучшие результаты сразу, из-за резкого увеличения числа мод, каждая из которых имеет свою специфику, определяемую диэлектрическим заполнением и значениями параметров.

2. Характеристики МФ, содержащего 8 проводников и имеющего 4 оси симметрии, могут быть хуже, чем имеющего 2 оси, из-за совпадения значений погонных задержек мод и суммирования импульсов.

3. Анализ результатов преобразования каждого проводника в 2 проводника с последовательным изменением параметров может дать понимание направлений совершенствования характеристик.

4. При анализе результатов полезна оценка значений не только погонных задержек, определяющих различимость отдельных импульсов в отклике, но и волновых сопротивлений мод, поскольку они, при заданных окончаниях линии, определяют коэффициенты отражения и передачи на её концах, а значит, и амплитуды импульсов.

Характеристики не полностью симметричных МФ зависят от выбора проводника, на который подается воздействие, а значит, естественно выбрать оптимальный.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2020-0039 Минобрнауки России.

### Литература

1. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. 2014. № 41. 92 p.
2. Weber T., Krzikalla, R., Ter Haseborg, J. L., Sabath, F. Linear and nonlinear filters suppressing // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. Vol. 46, P.423–430.
3. Mojert C. UWB and EMP susceptiblity of microprocessors and networks // Proc. of the 14th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility. Zurich, Switzerland, 2001. P.47–52.
4. Егоров А.Б., Сотников А.М., Рыбалко И.Ф. Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2012. №29. С.49–54.

5. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты // М.: ООО «Группа ИДТ». 2009. 478 с.
6. Воскобович В.В., Мырова Л.О. Воздействие сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения на персональные компьютеры // Сб. докл. Российской научно-техн. конф. по ЭМС. 2004. С.383–392.
7. Гуревич В. Дешевые варисторы или дорогие TVS-диоды // Сборник «Электромагнитная совместимость в электронике». 2019. С.10–16.
8. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике // М.: Издательский центр «Академия», 2010. 224 с.
9. 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.
10. Самотин И.Е. Условие выравнивания амплитуд импульсов на выходе модального фильтра // Технологии ЭМС. 2010. № 4(35). С.31–34.
11. 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). № 883. P.1–25.
12. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Доклады ТУСУР. 2015. №2(36). С.41–44.
13. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Куксенко С.П. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов. Патент №2624465 РФ. Оpubл. 04.07.2017, Бюл. №19.
14. Jackson J.D. Classical electrodynamics // New York: John Wiley & Sons. 1962. 641 p.
15. Orlov P.E., Buichkin E.N. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal reservation // 18th International

Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Erlagol, Altai. June 29–July 3, 2017. P.54–58.

16. 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.
17. Chernikova E.B., Belousov A.O. Method for detecting additional pulses in the time response of structures with modal decomposition // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). 2019. P.0245–0249.
18. Belousov A.O. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. 2018. № 2018. P.1–15.
19. 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. 2019. Vol. 11(7). № 883. P. 1–38.

**Для цитирования:**

Черникова Е.Б., Газизов Т.Р. Модальное разложение сверхкороткого импульса в 8-проводных зеркально-симметричных структурах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.12>