

УДК 621.391.825

## Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях

Жечев Е. С., Черникова Е. Б., Белоусов А. О., Газизов Т. Р.

**Постановка задачи:** при создании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) большое внимание уделяется надежности и электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за уязвимости РЭА к электромагнитным помехам. К сожалению, классические технические методы обеспечения ЭМС не всегда обеспечивают ЭМС РЭА, зачастую ухудшая при этом ее массогабаритные характеристики. Важным направлением ЭМС является защита от кондуктивных воздействий, проникающих в аппаратуру непосредственно по проводникам. Одним из наиболее опасных воздействий является мощный сверхкороткий импульс (СКИ), проникающий в устройства и способный вывести их из строя. Для защиты РЭА от СКИ применяется технология модальной фильтрации. Она подразумевает использование модальных искажений (изменений сигнала за счет разности задержек мод многопроводной линии передачи). Кроме того, предложен новый подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет использования зеркально симметричных структур, а также устройства на их основе – зеркально-симметричного модального фильтра (МФ). Выполнен ряд исследований зеркально-симметричного МФ, однако все они выполнены посредством моделирования. **Цель работы** – представить результаты натурных и вычислительных экспериментов для зеркально-симметричного МФ. Для этого необходимо разработать и изготовить макет, получить временные и частотные характеристики, а также сравнить результаты натурных и вычислительных экспериментов. **Используемые методы:** для вычислительных экспериментов используются система квазистатического, основанная на методе моментов, и система электродинамического моделирования, основанная на методе конечных элементов и методе конечных разностей во временной области; натурные эксперименты, основанные на измерениях во временной и частотной областях на изготовленном макете зеркально-симметричного МФ. **Результаты и их новизна:** впервые получены временные и частотные характеристики изготовленного зеркально-симметричного МФ. Выполнено их сравнение с результатами квазистатического и электродинамического моделирования. Впервые экспериментально показана возможность разложения СКИ в зеркально-симметричном МФ, получена согласованность результатов вычислительных и натурных экспериментов. Результаты получены благодаря использованию проверенных и хорошо зарекомендовавших себя математических методов, вычислительных алгоритмов и программных продуктов, а также благодаря проверке теории практикой как самой широко используемой и обремененной доверием. **Практическая значимость** обусловлена открывающимися возможностями создания различных модификаций устройств защиты (как на основе зеркальной симметрии, так и абсолютно новых), а также практического применения исследуемого устройства для защиты РЭА от СКИ в самых различных сферах ввиду малой массы, радиационной стойкости, надежности и улучшенных характеристик.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальная фильтрация, зеркально-симметричный модальный фильтр, временной отклик, частотный отклик, натурный эксперимент, вычислительный эксперимент.

---

### Библиографическая ссылка на статью:

Жечев Е. С., Черникова Е. Б., Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 162-179. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10208

### Reference for citation:

Zhechev Y. S., Chernikova E. B., Belousov A. O., Gazizov T. R. Experimental research of a reflection symmetric modal filter in the time and frequency domains. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 162-179. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10208 (in Russian).

## Актуальность

В настоящее время наблюдается массовое распространение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) практически по всем областям жизнедеятельности человека, в том числе космической, военной, атомной, телекоммуникационной и др. Широкая область применения РЭА ведет к возрастанию значимости обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за уязвимости РЭА к электромагнитным помехам. Невыполнение данных требований ЭМС может привести к неправильному функционированию РЭА, что может повлечь за собой различные негативные последствия, тогда как для критичных систем это недопустимо. Поэтому актуально тщательное соблюдение требований ЭМС при проектировании критичных систем. Одним из направлений ЭМС является защита от кондуктивных помех, проникающих в аппаратуру непосредственно по проводникам [1]. Особо опасным воздействием представляются сверхкороткие импульсы (СКИ) [2], которые ввиду широкого спектра и малой длительности способны проникать в самую различную РЭА и выводить ее из строя. С учетом особенностей временных и энергетических характеристик СКИ различной природы в условиях современной электромагнитной обстановки, традиционные методы ограничения и фильтрации зачастую оказываются неэффективными и недостаточными, что, в свою очередь, требует применения дополнительных мер защиты РЭА. Особенно актуальна защита устройств и систем связи, безопасности и управления критичным оборудованием. Известно, что включаемые на входе аппаратуры устройства защиты обладают рядом недостатков (малая мощность, недостаточное быстродействие, паразитные параметры, малый срок службы), затрудняющих защиту от мощных СКИ. Таким образом, эффективная защита в широком диапазоне воздействий требует сложных многоступенчатых устройств. Между тем наряду с высокими характеристиками, практика требует простоты и дешевизны, поэтому необходим поиск новых принципов совершенствования защиты РЭА от СКИ.

## Постановка задачи

Известны традиционные устройства, которые используются в качестве защиты от импульсных помех, например, ограничители напряжения, варисторы, пассивные RC- и LC-фильтры. Однако такие устройства защиты обладают рядом недостатков (низкая радиационная стойкость, малый срок службы, отказ в работе при высоких напряжениях, недостаточное быстродействие и т.д.), затрудняющих защиту от мощных СКИ. Одним из новых принципов защиты РЭА от СКИ является технология модальной фильтрации [3]. Она подразумевает использование модальных искажений (изменений сигнала за счет задержек мод многопроводной линии передачи (МПЛП) [4]) для защиты за счет последовательного модального разложения импульса в отрезках МПЛП, например, в микрополосковых и полосковых линиях. Устройства, функционирующие по принципу модальной фильтрации, называют модальными фильтрами (МФ).

Между тем предложен новый подход к совершенствованию защитных свойств таких устройств за счет использования зеркальной симметрии МФ [5]. Зеркально-симметричный МФ (рис. 1) представляет собой 5 в поперечном се-

чении одинаковых и прямоугольных проводников и диэлектрический слой, причем проводники 1 и 2 расположены на одной его стороне, два дополнительных проводника 3 и 4 расположены зеркально-симметрично относительно проводников 1 и 2 на обратной стороне диэлектрического слоя, а опорный проводник 5 расположен в диэлектрическом слое на равном расстоянии от внешних проводников [6]. Данный МФ, в общем случае, рассматривается как 4-проводная линия передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в данной структуре могут распространяться 4 моды основного типа Т-волны с соответствующими им характеристиками.

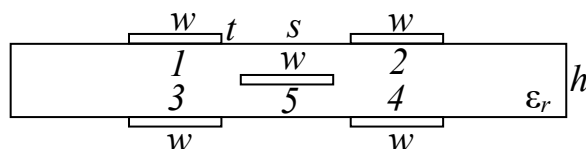


Рис. 1. Поперечное сечение исходного зеркально-симметричного МФ [5, 6]

Выполнен ряд исследований данного устройства. Представлены результаты оптимизации параметров МФ эвристическим поиском по двум критериям отдельно [7, 8] и трем критериям одновременно (минимизация максимального напряжения на выходе линии; выравнивание временных интервалов между импульсами разложения и согласование с трактом 50 Ом) [9]. Выполнено предварительное моделирование МФ при реальных параметрах с учетом потерь [10]. Вычислены матрицы погонных задержек с использованием аналитических выражений [11]. Проведен вычислительный эксперимент для подтверждения достоверности результатов, выполнено сравнение результатов квазистатического и электродинамического анализа зеркально-симметричного МФ при воздействии СКИ, без учета и с учетом потерь в проводниках и диэлектриках [12]. Представлены результаты исследования МФ в частотной области с помощью квазистатического, электродинамического и схемотехнического подходов [13]. Выполнен сравнительный анализ микрополоскового и зеркально-симметричного 4-проводных МФ [14]. Реализация исходной конфигурации зеркально-симметричного МФ [6] отказалась затруднительной, поскольку требует 3-слойную печатную плату (ПП), что не удовлетворяет стандартному технологическому процессу изготовления многослойных ПП, требующему четное количество слоев. Поэтому разработана конфигурация четырехслойного зеркально-симметричного МФ со скрытыми переходными отверстиями (СПО), соединяющими два слоя опорного проводника (ОП) вдоль линии передачи [15]. Кроме того, для упрощения и удешевления изготовления зеркально-симметричного МФ целесообразно изготовить макет без СПО [16].

Между тем анализ уже существующих исследований в этой области показывает, что ряд актуальных задач остаётся нерешенным. Одним из важных этапов исследования является выполнение натурального эксперимента, необходимого для проверки возможности защиты от СКИ с использованием зеркально-симметричного МФ. Таким образом, актуально выполнить натурные и вычис-

лительные эксперименты для зеркально-симметричного МФ и сравнить полученные характеристики. Цель данной работы – представить результаты этих исследований.

### Макет зеркально-симметричного модального фильтра

Как было отмечено ранее, исходная конфигурация зеркально-симметричного МФ [6] представляет собой 3-слойную печатную плату (рис. 1), реализация которой затруднительна, поскольку ее стек имеет 3 проводящих слоя и, тем самым, не удовлетворяет стандартному технологическому процессу изготовления многослойных печатных плат, требующему четное число слоев. Для решения данной проблемы разработана конфигурация зеркально-симметричного МФ, которую легче реализовать. Она представляет собой структуру 4-слойного исполнения, где первый и четвертый слой (внешние) – зеркально расположенная пара связанных линий, а второй и третий (внутренние) – соединенные СПО слои, образующие единую схемную землю (рис. 2). Кроме того, для упрощения и удешевления изготовления МФ разработана структура без СПО (рис. 3), которая и будет использована в качестве объекта исследования в данной работе. Параметры поперечных сечений:  $w$  – ширина проводников,  $s$  – расстояния между проводниками,  $t$  – толщина проводников,  $h$  – толщина подложки,  $h_1$  – высота металлизированного отверстия,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость подложки,  $g$  – диаметр СПО,  $\epsilon_{r1}$  – относительная диэлектрическая проницаемость препрега,  $\epsilon_{r2}$  – относительная диэлектрическая проницаемость ядра платы.

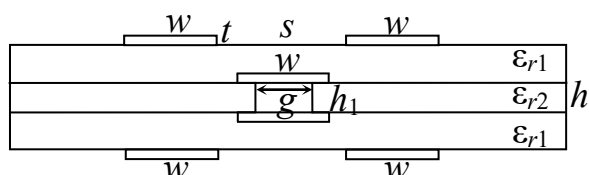


Рис. 2. Поперечное сечение четырехслойного зеркально-симметричного МФ

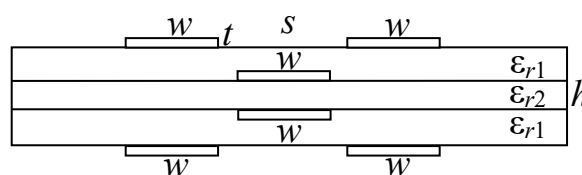


Рис. 3. Поперечное сечение четырехслойного зеркально-симметричного МФ без СПО

Выбор параметров для разработки макета осуществлялся с учетом технологических характеристик компании-изготовителя ООО «Электроконнект» г. Новосибирск: количество слоев: 1, 2, 4, 6, 8; значение  $t$  – 18, 35, 50, 70 мкм; толщина платы: от 0,5 до 3 мм; максимальный размер платы: 344×395 мм; значение  $g$  может варьироваться от 50 мкм до 950 мкм; минимальные значения  $w$  и  $s$  – 200 мкм. В качестве диэлектрических материалов для изготовления макета МФ доступны FR-4, VT-47 (FR-4 Tg 180°C), МИ 1222, ФАФ-4Д, F4BM350, HA50, T111.

В результате выбраны следующие значения:  $s=700$  мкм,  $w=1000$  мкм,  $g=200$  мкм,  $t=35$  мкм,  $h=920$  мкм,  $h_1=510$  мкм. Значения параметров  $w$ ,  $s$  получены после оптимизации по критериям: минимизация максимальной амплитуды сигнала на выходе МФ; выравнивание временных интервалов

между импульсами разложения и согласование с трактом 50 Ом. В качестве диэлектрика для изготовления макета МФ выбран материал FR-4.

При трассировке макета принято во внимание то, что опорный проводник находится в диэлектрике между верхним и нижним слоями. Чтобы обеспечить соединение с опорным проводником, а также для установки согласующих резисторов и SMA-соединителей, установлена контактная площадка (КП) размером  $8,05 \times 10,35$  мм. В данной КП расположены 5 металлизированных отверстий диаметром 1,5 мм, соединяющих все 4 слоя МФ и 9 металлизированных отверстий диаметром 1 мм для уменьшения паразитной индуктивности (рис. 4). Для согласования проводников используются резисторы типа 1206. Для последующего монтажа резисторов на концы пассивных проводников установлены КП размером  $1,7 \times 1,25$  мм (рис. 5). Изготовленный макет 4-слойного зеркально-симметричного МФ без СПО представлен на рис. 6. Размеры макета составляют  $320 \times 21$  мм. Он согнут в меандр из 3 полувитков.

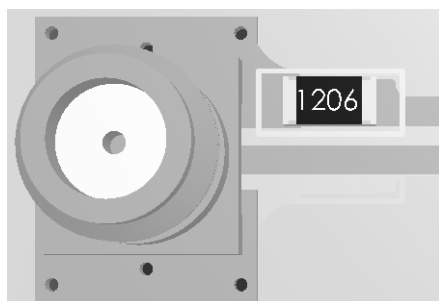


Рис. 4. КП, обеспечивающая соединение с опорным проводником

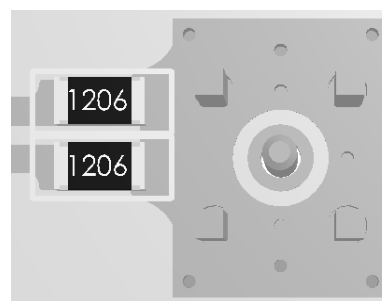


Рис. 5. КП для монтажа резисторов (нижний слой)

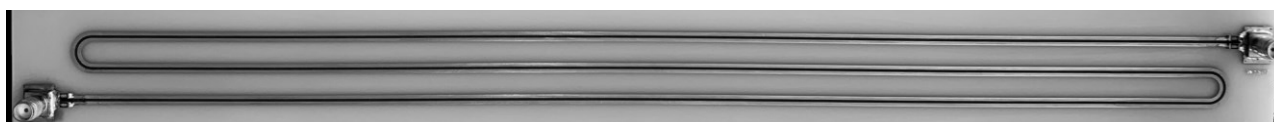


Рис. 6. Фото макета четырехслойного зеркально-симметричного МФ без СПО

### Экспериментальные исследования во временной области

Для экспериментальных исследований во временной области, использовалась установка со схемой, приведенной на рис. 8. Для требуемой точности регистрации сигналов выполнена калибровка горизонтального и вертикального трактов измерительной системы. Предел погрешности измерения мгновенных значений импульсных сигналов по амплитуде составляет  $\pm 3\%$ , а временных интервалов на заданной развертке –  $\pm 2\%$ .

Для соединения макета МФ с формирователем импульса и стробоскопическим преобразователем использовались коаксиальные переходники, показанные на рис. 7, а именно 3 (ПК2-18-01Р-03Р), 4 (ПК2-18-11Р-03Р), 5 (НУР-1111) и 6 (НУР-1112). При проведении частотного анализа использовались переходники 1 (ПК2-40-14Р-05) и 2 (ПК2-50-05-05). Суммарное время задержки четырех коаксиальных переходов составило 230 пс, а общий уровень вносимых потерь не превышает 1 дБ в частотном диапазоне до 20 ГГц.



Рис. 7. Коаксиальные переходники



Рис. 8. Схема экспериментальной установки измерений во временной области

В качестве воздействующего импульса использовался оцифрованный сигнал осциллографа вычислительного комбинированного С9-11, измеренный на согласованной нагрузке (рис. 9). Принцип работы измерительной установки основан на стробоскопическом способе регистрации повторяющихся электрических сигналов пико-, нано- и микросекундной длительностей. В качестве формирователя импульса выступает обостритель на диоде с накоплением заряда, способный выделить фронты низкочастотного сигнала генератора. Входное воздействие имеет колоколообразную форму, с амплитудой 0,249 В и длительностями фронта – 312 пс, спада – 259 пс и плоской вершины – 0 пс (по уровням 0,1–0,9). Общая длительность импульса (по уровню 0,5) составила – 257 пс. Принципиальная электрическая схема представлена на рис. 10. Значения сопротивлений ( $R$ ) взяты равными 50 Ом. Длина линии 1 м.

Для подтверждения достоверности результатов измерения выполнено моделирование, с использованием двух различных подходов: квазистатического и электродинамического. Вычисление параметров МФ и форм сигнала посредством квазистатического анализа выполнялось в программном продукте TALGAT [17]. Допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяется поперечная электромагнитная волна (Т-волна). При учете потерь вычислялись матрицы потерь в диэлектрике  $G$  и проводниках  $R$ . Для вычисления элементов матрицы  $G$  использована широко известная модель частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала FR-4 [18], а элементы матрицы  $R$

вычислены с учетом скин-эффекта, эффекта близости и потерь в проводнике по методике [19], реализованной в TALGAT [20]. При электродинамическом моделировании, при учете потерь, в качестве материала проводников используется медь (относительная магнитная проницаемость  $\mu_r=1$ , электрическая проводимость  $\sigma=5,8 \cdot 10^7$  См/м). В соответствии с технической документацией на частоте 1 МГц значение  $\epsilon_r$  препрега может варьироваться в диапазоне от 3,8 до 4,4, а значение  $\epsilon_r$  ядра не более 5,4. Таким образом, при моделировании с помощью двух подходов для препрега принято среднее значение  $\epsilon_r$  равное 4,1, а тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) 0,018, тогда как для ядра – 4,59 и 0,025 соответственно.

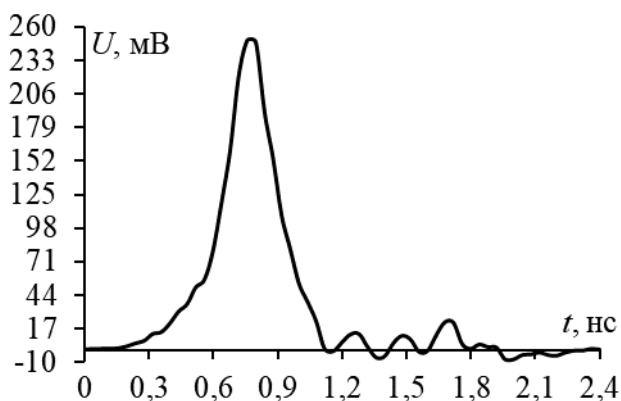


Рис. 9. Форма сигнала на входе МФ

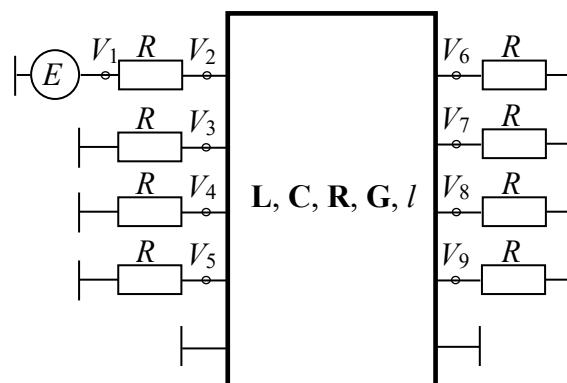


Рис. 10. Принципиальная схема зеркально-симметричного МФ

Формы напряжения на выходе зеркально-симметричного МФ, полученные в результате квазистатического и электродинамического моделирования, а также эксперимента, представлены на рис.11.

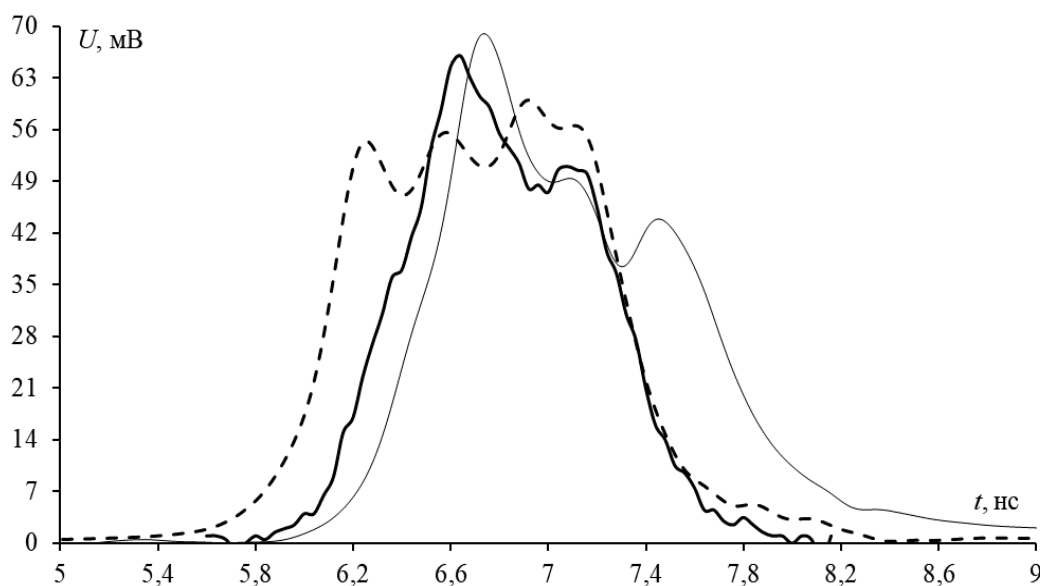


Рис. 11. Формы напряжения на выходе зеркально-симметричного МФ, полученные при эксперименте (—), электродинамическом (—) и квазистатическом (— —) моделировании

Из рис. 11 следует, что максимальная амплитуда на выходе МФ ( $U_{max}$ ), полученная в результате квазистатического моделирования, равна 59,92 мВ, электродинамического – 68,75 мВ, а эксперимента – 66 мВ. Максимальное отклонение  $U_{max}$  между экспериментом и квазистатическим моделированием равно 4,8%, экспериментом и электродинамическим моделированием – 2,04%, а квазистатическим и электродинамическим моделированием – 6,8%. Оно вычислено как

$$\delta = \left| \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \right| \times 100\%. \quad (1)$$

Точная оценка значений погонных задержек импульсов разложения затруднительны из-за частичного наложения импульсов (поскольку длительность входного воздействия больше, чем разность задержек мод МФ). Однако возможно оценить общую длительность импульсов разложения по уровню 0,5 ( $t_{д\Delta}$ ). Она составляет 1,22 нс при квазистатическом моделировании, 1,14 нс при электродинамическом и 0,96 нс при эксперименте. Максимальное отклонение между экспериментом и квазистатическим моделированием равно 11,92%, экспериментом и электродинамическим моделированием – 8,57%, а квазистатическим и электродинамическим моделированием – 3,38%. Отметим, что формы напряжений на выходе, полученные при эксперименте и в результате электродинамического моделирования, согласуются (наблюдается значительное наложение первого и второго импульсов, что приводит к увеличению максимального значения выходного напряжения, тогда как наложение третьего и четвертого импульсов выражено не так сильно). Между тем форма напряжения на выходе, полученная при квазистатическом моделировании, отличается от двух других методов значительно (наблюдается значительное наложение третьего и четвертого импульсов, что приводит к увеличению максимального значения выходного напряжения, тогда как наложение первого и второго импульсов выражено не так сильно). Кроме того, при квазистатическом моделировании наблюдается некаузальность в виде преждевременного прихода импульсного сигнала. Это объяснимо неточным учетом частотной зависимости  $\epsilon_r$  при моделировании с учетом потерь в диэлектрике. Между тем небольшое различие амплитуд и форм сигналов также вызвано неучтенным влиянием вносимого затухания коаксиальных переходов.

В результате квазистатического и электродинамического моделирования, а также эксперимента, получены значения максимального напряжения на выходе МФ 59,92, 68,75 и 66 мВ, что в 4,15, 3,62 и 3,77 раза соответственно меньше максимального напряжения входного сигнала. Между тем неполное разложение импульсного сигнала в МФ вызвано, в первую очередь, большой длительностью входного воздействия. Тем не менее, входное импульсное воздействие с длительностью 257 пс (по уровню 0,5) разложено в зеркально-симметричном МФ на последовательность импульсов с коэффициентом ослабления 3,77 раза (по результатам эксперимента). Для достижения полного разложения подобно импульсного воздействия целесообразно прибегнуть к увеличению длины МФ или параметрической оптимизации по соответствующим временным кри-



териям [21]. Также представляется возможным выбор диэлектрического материала с большим значением  $\epsilon_r$ .

В итоге, получены экспериментальные результаты, сопоставимые с результатами моделирования двумя подходами. Таким образом, результаты подтвердили возможность модального разложения СКИ на выходе зеркально-симметричного МФ на последовательность импульсов меньшей амплитуды.

### Экспериментальные исследования в частотной области

При проведении экспериментальных исследований в частотной области, использовалась установка, со схемой, приведенной на рис. 12.

Экспериментальные исследования частотных характеристик зеркально-симметричного МФ проводились с помощью измерителя модуля коэффициента передачи и отражения P2M-40. Принцип действия скалярного анализатора цепей P2M-40 основан на выделении высокочастотных электромагнитных волн и преобразовании их в низкочастотное напряжение, а также измерении коэффициентов передачи и отражения. Выделение и преобразование электромагнитных волн осуществляется с помощью головки детекторной Д42-50-05 и датчика КСВ ДК4-50-05Р-05Р.

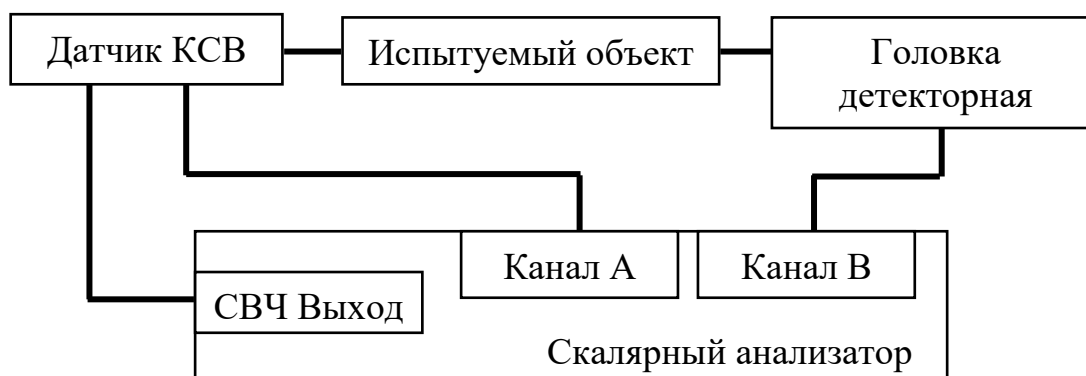


Рис. 12. Схема экспериментальной установки измерений в частотной области

Перед проведением измерений, с помощью эталонных мер выполнена калибровка канала А (коэффициент отражения) и канала В (коэффициент передачи). Предельное значение погрешности измерения составило не более 1,5 дБ. Ввиду используемых в ПП соединителей SMA, диапазон частот ограничен 10 ГГц. Для соединения макета МФ с датчиком КСВ и детекторной головкой использовались коаксиальные переходники 1 и 2 (рис. 7).

Также, аналогично исследованиям во временной области, выполнено моделирование МФ, для вычисления частотных характеристик, с помощью квазистатического и электродинамического подходов с учетом потерь. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  в диапазоне частот до 10 ГГц представлены на рис. 13.

В диапазоне частот от 0 до 1 ГГц коэффициент отражения, полученный посредством электродинамического подхода и экспериментально, не превышает минус 7 дБ. В диапазоне от 1 до 6 ГГц результаты хорошо согласуются меж-

ду собой, среднее отклонение результатов электродинамического подхода и эксперимента – 2,9 дБ. Рассогласованность результатов в диапазоне частот от 6 до 10 ГГц обусловлена неучтённой частотной зависимостью  $|S_{11}|$  соединителей SMA и коаксиальных переходов.

Частотные зависимости модуля коэффициента передачи  $|S_{21}|$  в диапазоне частот до 10 ГГц представлены на рис. 14.

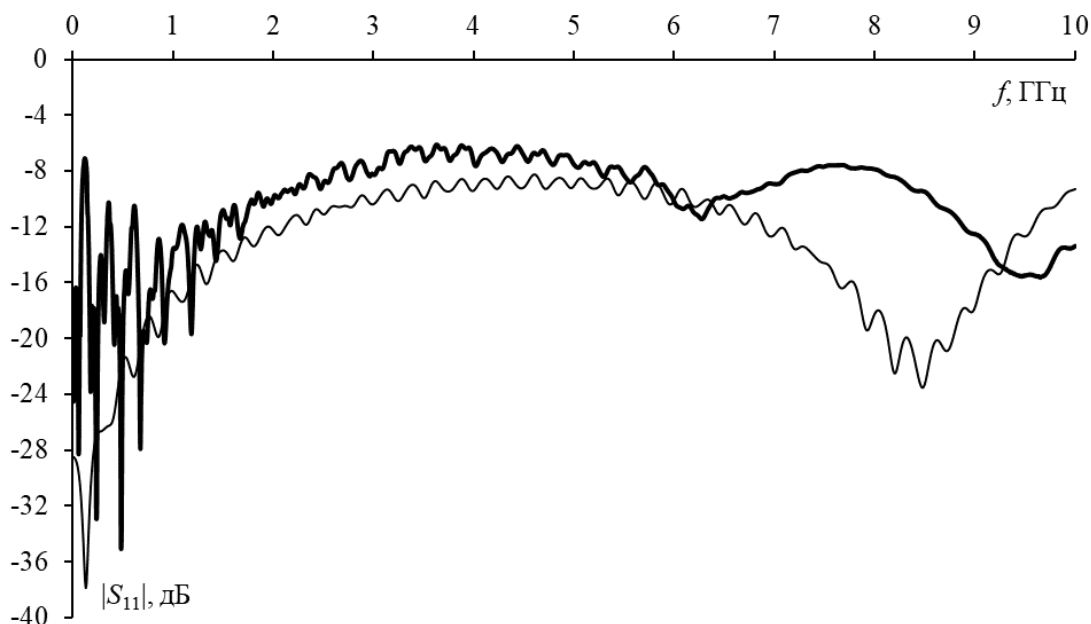


Рис. 13. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  зеркально-симметричного МФ, полученные при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (---)

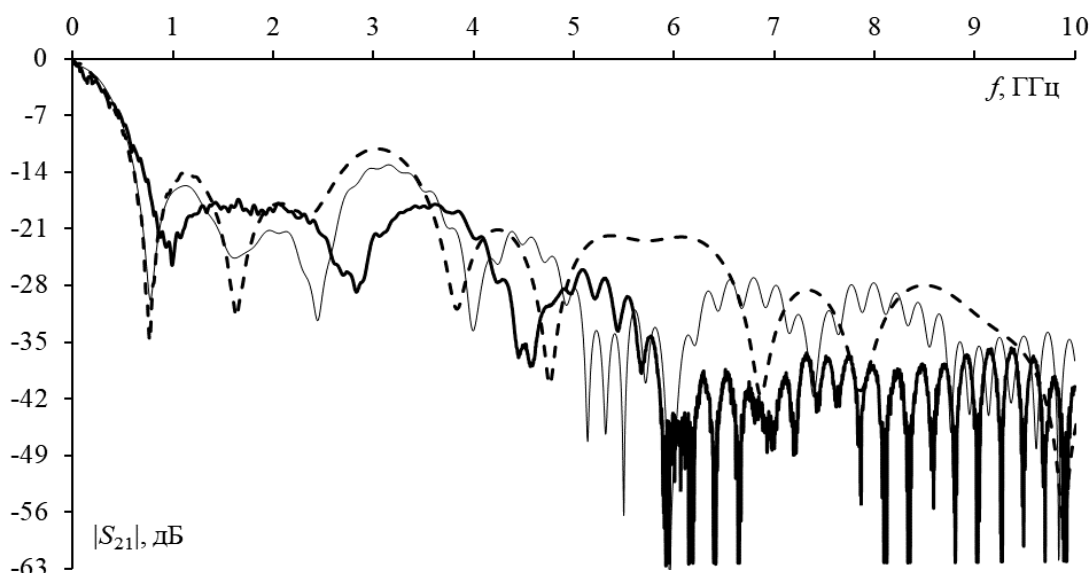


Рис. 14. Частотные зависимости  $|S_{21}|$  зеркально-симметричного МФ, полученные посредством квазистатического (— · —) и электродинамического (---) подходов, а также экспериментально (—)

Из рис. 14 следует, что полоса пропускания зеркально-симметричного МФ по уровню минус 3 дБ ( $\Delta f$ ) по результатам эксперимента составляет 0,25 ГГц, квазистатического подхода – 0,265 ГГц, а электродинамического – 0,295 ГГц. Из сравнения полученных результатов видно, что измеренные и полученные с помощью моделирования двумя подходами зависимости хорошо согласуются. Максимальные отклонения составляют: 5,3% между значениями, полученными двумя подходами, 2,91% – между квазистатическим подходом и экспериментом и 8,25% – между электродинамическим подходом и экспериментом.

По результатам эксперимента частота первого резонанса  $f_1$  составляет 0,992 ГГц (минус 25,5 дБ), при квазистатическом подходе – 0,766 ГГц (минус 34,74 дБ), а при электродинамическом – 0,763 ГГц (минус 29,18 дБ). Также видно, что резонансные частоты при моделировании двумя подходами хорошо согласуются, отличаясь лишь на 0,19%. Сравнение частоты первого резонанса  $f_1$ , полученной при эксперименте со значением, полученным при квазистатическом подходе, показало отклонение 12,8%, а со значением, полученным при электродинамическом – 13,04%. Среднее отклонение результатов квазистатического моделирования и эксперимента составляет 4,13 дБ, электродинамического моделирования и эксперимента 3,53 дБ, электродинамического и квазистатического подходов составляет 7,66 дБ.

Таким образом, представлены результаты экспериментального исследования зеркально-симметричного МФ в частотной области. Приведено сравнение результатов вычислительного и натурального экспериментов в диапазоне частот до 10 ГГц. Получена хорошая согласованность результатов вычисления полосы пропускания и приемлемая сопоставимость для частоты первого резонанса и уровней ослабления. Различия вызваны неточным учетом частотной зависимости  $\epsilon_r$  при моделировании с учетом потерь в диэлектрике, а также неучетом влияния вносимого затухания соединителей SMA.

### Выводы

Таким образом, впервые продемонстрированы экспериментальные исследования зеркально-симметричного МФ во временной и частотной областях. Выполнено экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭА от СКИ за счет его разложения на последовательность импульсов меньшей амплитуды с коэффициентом ослабления 3,77 раза (по результатам эксперимента) при контролируемой полосе пропускания полезного сигнала 250 МГц. Также выполнено сравнение натурального эксперимента с результатами моделирования посредством квазистатического и электродинамического подходов, показавшее согласованность результатов.

Результаты получены благодаря использованию проверенных и хорошо зарекомендовавших себя математических методов, вычислительных алгоритмов и программных продуктов, а также благодаря проверке теории практикой как самой широко используемой и облеченной доверием.

Полученные результаты важны для дальнейших исследований и возможности создания различных конфигураций устройств защиты на основе структур

с зеркальной симметрией. Помимо этого, открывается возможность практического применения исследуемого устройства для защиты РЭА от СКИ в самых различных сферах (от индустриальной до бортовой) ввиду малой массы, радиационной стойкости и высоких характеристик.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в организации и проведении эксперимента доктору технических наук, доценту Заболоцкому А.М.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту 8.9562.2017/8.9 и грантов Президента Российской Федерации МД-365.2018.8 и МД-2652.2019.9.

### Литература

1. Гизатуллин З. М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях: Монография. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2012. – 254 с.

2. 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.

3. 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.

4. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов // Технологии электромагнитной совместимости. 2006. № 4(19). С. 40-44.

5. Заболоцкий А. М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 2(36). С. 41-44.

6. 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. №19.

7. Черникова Е. Б., Белоусов А. О. Оптимизация параметров зеркально-симметричного модального фильтра по двум критериям // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2017» (Томск, 10–12 мая 2017). – Томск, 2017. – С. 95-97.

8. Черникова Е. Б., Белоусов А. О., Заболоцкий А. М. Параметрическая оптимизация зеркально-симметричных полосковых модальных фильтров по двум критериям // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, Россия, 4–5 мая 2017). – Красноярск, 2017. – С. 3-6.

9. Черникова Е. Б., Белоусов А. О., Заболоцкий А. М. Трехкритериальная оптимизация как ресурс для совершенствования зеркально-симметричного модального фильтра // Материалы 23-й международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-23-2017)» (Томск, 24 ноября 2017). – Томск, 2017. – С. 150-154.

10. Черникова Е. Б., Белоусов А. О., Заболоцкий А. М. Моделирование и разработка макета зеркально-симметричного модального фильтра // Материалы 13-й международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 29 ноября-1 декабря, 2017). – Томск, 2017. – С. 5-7.

11. Черникова Е. Б., Белоусов А. О. Аналитические выражения для вычисления погонных задержек мод зеркально-симметричного модального фильтра // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018» (Томск, 16–18 мая 2018). – Томск, 2018. – С. 240-243.

12. Belousov A. O., Chernikova E. B., Khazhibekov R. R., Zabolotsky A. M. Quasi-static and electrodynamic simulation of reflection symmetric modal filter time response on ultra-short pulse excitation // Journal of physics: conference series. 2018. Vol. 1015. № 3. P. 1-5.

13. Chernikova E. B., Belousov A. O., Gazizov T. R. Research of frequency characteristics of a reflection symmetric modal filter // Proceeding of 2018 IEEE Siberian symposium on data science and engineering (Novosibirsk, 30–31 October, 2018) – Novosibirsk, 2018. – P. 74-78.

14. Chernikova E. B., Belousov A. O., Zabolotsky A. M. Comparative analysis of microstrip and reflection symmetric four-conductor modal filters // Proceeding of international Siberian conference on control and communications (Tomsk, 18–20 April, 2019) – Tomsk, 2019. – P. 1-4 (принята к публикации).

15. Zhechev, Y. S., Chernikova E. B., Belousov A. O. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter // Proc. of 20th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (Erlagol, June 29–July 3, 2019). – Erlagol, 2019. – P. 1-4.

16. Жечев Е. С. Влияние перемычек в опорном проводнике на характеристики зеркально-симметричного модального фильтра // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019» (Томск, 22–24 мая 2019). – Томск, 22–24 мая 2019. – С. 1-4.

17. Куксенко С. П., Заболоцкий А. М., Мелкозеров А. О., Газизов Т. Р. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 2(36). С. 45-50.

18. Djordjevic A. R., Biljic R. M., Likar-Smiljanic V. D., Sarkar T. K. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. 2001. Vol. 43. № 4. P. 662-666.

19. Matthaei G. L., Chinn G. C. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines // *Microwave Symposium Digest*. 1992. P. 1353-1354.

20. Мусабаев Р. Р. Алгоритм вычисления матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи // *Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2017»* (Томск, 10–12 мая 2017). – Томск, 2017. – С. 68-71.

21. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filter // *Complexity*. 2018. № 2018. P. 1-15.

### References

1. 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).

2. 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.

3. 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.

4. 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).

5. Zabolotsky A. M. Application of Reflective Symmetry for Modal Filtration Improvement. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 41-44 (in Russian).

6. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Kuksenko S. P. Chetyrekhprovodnaya zerkal'no-simmetrichnaya struktura, zashchishchayushchaya ot sverhkorotkih impul'sov [Four-Way Mirror-Symmetrically Structure, Protecting from Ultrashort Impulses]. Patent Russia, no 2624465, 2017.

7. Chernikova E. B., Belousov A. O. Optimizaciya parametrov zerkal'no-simmetrichnogo modal'nogo fil'tra po dvum kriteriyam [Optimization of the Parameters of the Reflection Symmetric Modal Filter by Two Criteria]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchennyh "Nauchnaya sessiya TUSUR-2017"* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Scientific Session TUSUR-2017"], Tomsk, Russia, 2017, pp. 95-97 (in Russian).

8. Chernikova E. B., Belousov A. O., Zabolotsky A. M. Parametricheskaya optimizaciya zerkal'no-simmetrichnyh poloskovykh modal'nyh fil'trov po dvum kriteriyam [Parametric Optimization of Reflection Symmetric Strip Modal Filters by Two Criteria]. *Materialy vsrossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Sovremennye problemy radioelektroniki"* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference "Modern problems of radio electronics"], Krasnoyarsk, Russia, 2017, pp. 3-6 (in Russian).

9. Belousov A. O., Chernikova E. B., Zabolotsky A. M. Trekhkriterial'naya optimizaciya kak resurs dlya sovershenstvovaniya zerkal'no-simmetrichnogo modal'nogo fil'tra [Threecriteria Optimization as a Resource for Improving of a Reflection Symmetric Modal Filter]. *Materialy 23-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri (Sibresurs-23-2017)"* [Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference "Natural and Intellectual Resources of Siberia (Sibresurs-23-2017)"], 2017, pp. 150-154 (in Russian).

10. Chernikova E. B., Belousov A. O., Zabolotsky A. M. Simulation and Development of the Model of Reflection Symmetric Modal Filter. *Materialy 13-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya"* [Proceedings of the 13th International Scientific-Practical Conference "Electronic tools and control systems"], Tomsk, Russia, 2017, pp. 5-7 (in Russian).

11. Chernikova E. B., Belousov A. O. Analiticheskie vyrazheniya dlya vychisleniya pogonnykh zaderzhek mod zerkal'no-simmetrichnogo modal'nogo fil'tra [Analytical Expressions for Calculating the Per-unit-length Delays of the Modes of a Reflection Symmetric Modal Filter]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Nauchnaya sessiya TUSUR-2018"* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Scientific Session TUSUR-2018"], Tomsk, Russia, 2018, pp. 240-243 (in Russian).

12. Belousov A. O., Chernikova E. B., Khazhibekov R. R., Zabolotsky A. M. Quasi-static and Electrodynamics Simulation of Reflection Symmetric Modal Filter Time Response on Ultra-Short Pulse Excitation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 3, pp. 1-5.

13. Chernikova E. B., Belousov A. O., Gazizov T. R. Research of Frequency Characteristics of a Reflection Symmetric Modal Filter. *Proceeding of 2018 IEEE Siberian Symposium on Data Science and Engineering*, Novosibirsk, 30–31 October, 2018, pp. 74-78.

14. Chernikova E. B., Belousov A. O., Zabolotsky A. M. Comparative Analysis of Microstrip and Reflection Symmetric Four-Conductor Modal Filters. *Proceeding of International Siberian Conference on Control and Communications*, Tomsk, 18–20 April, 2019), pp. 1-4.

15. Zhechev, Y. S., Chernikova E. B., Belousov A. O. Research of the New Structure of Reflection Symmetric Modal Filter. *Proceeding of 20th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, June 29–July 3, 2019), pp. 1-4 (to be published).

16. Zhechev, Y. S. Vliyanie peremychek v opornom provodnike na harakteristiki zerkal'no-simmetrichnogo modal'nogo fil'tra [Influence of The Jumpers in the Reference Conductor on the Characteristics of the Reflection Symmetric Modal Filter]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Nauchnaya sessiya TUSUR-2019"* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Scientific Session TUSUR-2019"], Tomsk, Russia, 2019, pp. 1-4 (in Russian).

17. Kuksenko S. P., Zabolotsky A. M., Melkozerov A. O., Gazizov T. R. New Features of Electromagnetic Compatibility in TALGAT Simulation Software. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 45-50 (in Russian).

18. Djordjevich A. R., Biljic R. M., Likar-Smiljanic V. D., Sarkar T. K. Wideband Frequency-domain Characterization of FR-4 and Time-domain Causality. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2001, vol. 43, no. 4, pp. 662-666.

19. Matthaei G. L., Chinn G. C. Approximate Calculation of the High-Frequency Resistance Matrix for Multiple Coupled Lines. *Microwave Symposium Digest*, 1992, pp. 1353-1354.

20. Musabaev R. R. Algoritm vychisleniya matricy pogonnyh soprotivlenij mnogoprovodnoj linii peredachi [Algorithm for Calculating the Matrix of Per-unit-length Resistances of a Multi-Conductor Transmission Line]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Nauchnaya sessiya TUSUR-2017"* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Scientific Session TUSUR-2017"], Tomsk, Russia, 2017, pp. 68-71 (in Russian).

21. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic Approach to Optimization for Protection against Intentional Ultrashort Pulses based on Multiconductor Modal Filter. *Complexity*, 2018, no. 2018, pp. 1-15.

Статья поступила 1 июня 2019 г.

### Информация об авторах

*Жечев Евгений Сергеевич* – аспирант кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе, модальная фильтрация, а также поиск уязвимостей электронных схем и приборов. E-mail: zhechev75@mail.ru

*Черникова Евгения Борисовна* – магистрант кафедры телевидения и управления. Инженер научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств», Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область



научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры, проектирование защитных устройств на основе модальной фильтрации, в частности, изучение зеркальной симметрии модального фильтра. E-mail: [chiernikova96@mail.ru](mailto:chiernikova96@mail.ru)

*Белусов Антон Олегович* – аспирант кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, проектирование защитных устройств на основе модальной фильтрации, оптимизация защитных устройств. E-mail: [ant1lafleur@gmail.com](mailto:ant1lafleur@gmail.com)

*Газизов Тальгат Рашитович* – доктор технических наук, доцент. Заведующий кафедрой телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, численные методы. E-mail: [talgat@tu.tusur.ru](mailto:talgat@tu.tusur.ru)  
Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40.

---

## Experimental research of a reflection symmetric modal filter in the time and frequency domains

Y. S. Zhechev, E. B. Chernikova, A. O. Belousov, T. R. Gazizov

**Statement of problem:** when creating radio-electronic equipment (REE), much attention is paid to reliability and electromagnetic compatibility (EMC) because of the vulnerability of REE to electromagnetic interference. Unfortunately, classical technical methods of EMC providing do not always provide EMC of electronic devices, often worsening its weight and size characteristics. Important direction of the EMC research area is protection against conducted interference which considered the most harmful one, as it can penetrate into devices directly through conductors. One of the most dangerous excitation seems to be a powerful ultrashort pulse (USP), penetrating into devices and capable of disabling them. For REE protection from USP one can apply modal filtration technology. It implies the use of modal distortions (signal changes due to the difference in the mode delay of a multi-conductor transmission line). In addition, a new approach to the improvement of modal filtration through the use of the reflection symmetric structures, as well as a device based on them – a reflection symmetric modal filter (MF), has been proposed. A number of reflection symmetric MF researches have been carried out, but all of them have been carried out only through simulation. **The aim of the work** is to present the results of full-scale and computational experiments for the reflection symmetric MF. To reach the aim of the work it is necessary to develop and produce a layout, then we need to obtain time and frequency characteristics, and also compare the results of full-scale and computational experiments **Used methods:** for computational experiments we used the quasistatic simulation system based on a method of moments and the electrodynamic simulation system based on a finite element method and a finite difference method in the time domain. We used measurements which had been obtained on a fabricated printed circuit board of the reflection symmetric MF in the time and frequency domains for full-scale experiment. **Results and their novelty:** the time and frequency characteristics of the manufactured reflection symmetric MF were obtained for the first time. Their comparison with the results of quasistatic and electrodynamic simulation was performed. For the first time the possibility of USP decomposition in the reflection symmetric MF was shown experimentally, and consistency of the results of computational and full-scale experiments was obtained. The results were received through the use of proven and well-reputed mathematical methods, computational algorithms and software products, as well as through the verification of theory by practice as the most widely used and trusted method. **The practical significance** consists in the opening possibilities of creating various protection devices modifications (both on the basis of reflection symmetry and

*absolutely new ones), as well as the practical application of the device under study to protect REE against USP in various fields due to low mass, radiation resistance, reliability and improved characteristics.*

**Key words:** *electromagnetic compatibility, protective devices, modal filtration, reflection symmetric modal filter, time response, frequency response, full-scale experiment, computational experiment.*

### Information about Authors

*Yevgeniy Sergeevich Zhechev* – graduate student at the Department of Television and Control, junior research fellow of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities». Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility in the fuel and energy complex, modal filtration, and the search for vulnerabilities in electronic circuits and devices. E-mail: zhechev75@mail.ru

*Evgeniya Borisovna Chernikova* – master's degree student at the Department of Television and Control. Engineer of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities». Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility of radioelectronic equipment, design of protective devices based on modal filtering, in particular, the research of reflection symmetric structures. E-mail: chiernikova96@mail.ru

*Anton Olegovich Belousov* – graduate student at the Department of Television and Control, junior research fellow of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities». Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, design of protective devices based on modal filtering, optimization of protective devices. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

*Tal'gat Rashitovich Gazizov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Associate Professor. Head of the Department of Television and Control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, numerical methods. E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.