

татор локальной сети, вышли из строя сетевые адаптеры на два ПК, а оборудование, защищенное модальными фильтрами, не пострадало.

Таким образом, были получены результаты апробации МФ для защиты систем связи технического комплекса экстренно-оперативных служб МЧС России. МФ зарекомендовали себя как надежное средство в рамках дополнительной защиты, в связи с этим было принято решение по дальнейшему внедрению МФ на базе ГУ МЧС России по Томской области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов М.Н., Богословский М.М. Электромагнитный терроризм – новая угроза в информационно-энергетической среде [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=5925> (дата обращения: 21.02.2018).

2. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий: сб. статей; под ред. Т.Р. Газизова. – Томск, 2002.

3. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

#### **МИНИМИЗАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИСКАЖЕНИЙ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 2 ГГц**

***Ш.В. Куулар, студент; Р.Р. Хажибеков, магистрант***

*Научный руководитель А.М. Заболоцкий, проф., д.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, [kuular-1996@inbox.ru](mailto:kuular-1996@inbox.ru)*

В настоящее время широко применяются различные системы радиосвязи и передачи информации, которые используют волновое сопротивление 50 Ом. Оборудование этих систем подвержено воздействию кондуктивных помех. Наиболее опасной из помех является сверхкороткий импульс (СКИ). Использование известных устройств защиты для решения данной проблемы затруднено рядом противоречивых требований, например защиты как можно большего числа цепей, малой массы защитного устройства и подавления импульсов наносекундной и пикосекундной длительности. В связи с этим предложена защита от СКИ, основанная на модальной фильтрации [1]. Физический принцип такой защиты основан на эффекте разложения помехового импульса в отрезке связанной линии на моды, каждая из которых распространяется со своей задержкой. При неоднородном диэлектрическом заполнении в поперечном сечении отрезка связанной линии разность этих задержек может быть больше длительности помехового импульса, и тогда один импульс, поданный между актив-

ным и опорным проводниками в начале отрезка, разложится на два импульса в конце отрезка. Кроме возможности защиты от СКИ, модальный фильтр (МФ) должен обладать приемлемыми частотными характеристиками.

Цель работы – выполнить минимизацию высокочастотных искажений МФ в диапазоне частот до 2 ГГц.

Исследуемый МФ содержит три медных проводника: А – активный, О – опорный и П – пассивный. В этой структуре активный и пассивный проводники расположены симметрично по отношению к оси, перпендикулярной опорному и проходящей через его середину. Размеры структуры выбраны таким образом, чтобы обеспечивалось волновое сопротивление 50 Ом (ширина проводников  $w = 1200$  мкм, толщина проводников  $t = 0,105$  мкм, расстояние между проводниками  $s = 400$  мкм, толщина подложки  $h = 200$  мкм, материал подложки FR-4 с  $\epsilon_r = 4,3$ ). Построение структуры выполнено в программе TALGAT [2]. Значения сопротивлений  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 50$  Ом. Коэффициент передачи для данной структуры МФ представлен на рис. 2.

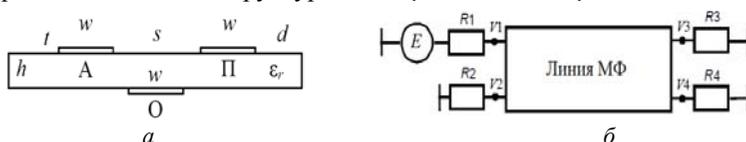


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема включения (б) МФ

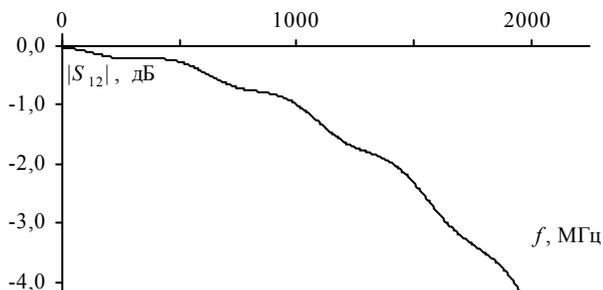


Рис. 2. Коэффициент передачи ( $S_{12}$ ) для исходной структуры МФ

Вначале была выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц. Получены следующие оптимальные параметры:  $w = 1,6$  мм,  $t = 0,105$  мм,  $s = 0,9$  мм,  $h = 0,3$  мм. Коэффициент передачи МФ, полученный на основе параметрической оптимизации эвристическим поиском, представлен на рис. 3.

Затем была выполнена оптимизация с помощью метода доверительных интервалов в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц. Величина доверительного интервала – 70% от исходного значения. В результате получены следующие значения геометрических параметров:  $w = 1,7$  мм,  $s = 0,9$  мм,  $h = 0,1$  мм. Коэффициент передачи МФ, полученный после оптимизации методом доверительных интервалов, представлен на рис. 4.

Значения коэффициентов передачи для исходной и полученных структур сведены в таблицу.

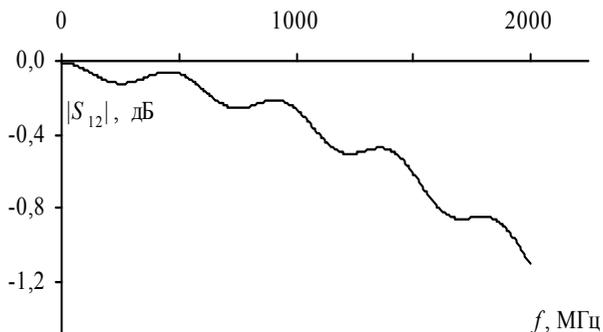


Рис. 3. Коэффициент передачи ( $S_{12}$ ) МФ, полученный на основе параметрической оптимизации эвристическим поиском

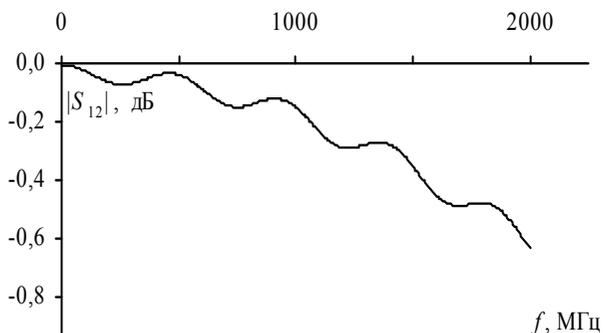


Рис. 4. Коэффициент передачи ( $S_{12}$ ) МФ, полученный после оптимизации методом доверительных интервалов

Таким образом, получено, что на основе параметрической оптимизации эвристическим поиском значения  $S_{12}$  на частотах до 1 ГГц уменьшились на 8% по сравнению с исходной структурой МФ, а от 1 до 2 ГГц – на 32%. Оптимизация методом доверительных интервалов позволила уменьшить значения  $S_{12}$  на частотах до 1 ГГц на 9% по

сравнению с исходной структурой МФ, а от 1 до 2 ГГц – на 35%. Следовательно, высокочастотные искажения МФ в диапазоне частот до 2 ГГц менее 1 дБ.

**Значения коэффициента передачи (МФ)**

Способ оптимизации	Коэффициент передачи ( $S_{12}$ ), дБ		
	Частотный диапазон, ГГц		
	0	1	2
Исходная структура (рис. 2)	0	-0,98	-4,4
Оптимизация эвристическим поиском (рис. 3)	0	-0,26	-1,06
Оптимизация с помощью метода доверительных интервалов (рис. 4)	0	-0,15	-0,63

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации № 14.256.18.356 МД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Газизов Т.Р., Долганов Е.С., Заболоцкий А.М. Модальный фильтр как устройство защиты бортовых вычислителей и блоков управления космических аппаратов от электростатического разряда. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 43 с.
2. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – Т. 2, № 36. – С. 45–50.

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСОМ С АПЕРТУРОЙ

*А.А. Квасников, магистрант*

*Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, aleksejkvasnikov@gmail.com*

Одним из конструкторских средств обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) является экранирование. При проектировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) применяют экранирование пластиной или корпусом [1]. Их эффективность экранирования (ЭЭ) может быть вычислена с помощью различных аналитических и численных методов. Аналитические методы целесообразно использовать на начальных этапах разработки РЭА для предварительной оценки ЭЭ корпусом. Так, известны методы, которые пригодны для пред-