

УДК 621.391.825

Н.О. Власова, А.О. Белоусов

## Параметрическая оптимизация многопроводных модальных фильтров с круговым сечением

Выполнены имитационное моделирование и оптимизация многопроводных модальных фильтров с круговым сечением. Рассмотрены 4 структуры с круговым сечением с количеством проводников 2, 3, 4, 5. Оптимизация выполнялась по амплитудному и временным критериям. В результате достигнуто полное разложение воздействующего помехового сигнала во всех структурах с максимальным ослаблением в 4,18 раза.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, радиоэлектронная аппаратура, сверхкороткий импульс, многопроводные защитные структуры, круговое сечение, параметрическая оптимизация.

Тенденция роста числа новых радиоэлектронных средств (РЭС) с каждым годом все сильнее обостряет проблему обеспечения электромагнитной совместимости [1]. Она связана, в первую очередь, с возрастающим влиянием электромагнитных помех (ЭМП) различной природы на функционирование РЭС. Отдельного внимания заслуживают кондуктивные помехи, распространяющиеся непосредственно по проводникам. В качестве опасного источника кондуктивных ЭМП может применяться сверхкороткий импульс (СКИ) с высоким уровнем напряжения и субнаносекундным временем нарастания. Ввиду короткой длительности и широкого спектра СКИ способны проникать внутрь РЭС, тем самым выводя их из строя. Несмотря на небольшую энергию СКИ, его локализация в критичных узлах устройства может привести к нарушению работы РЭС. Поэтому актуальна защита таких РЭС, в частности, устройств безопасности и управления критичным оборудованием.

Известно, что традиционные устройства защиты, включаемые на входе аппаратуры, не лишены недостатков (малая мощность, недостаточное быстродействие, паразитные параметры, малый срок службы). Однако в настоящее время для защиты от мощного СКИ применяется технология модальной фильтрации, используемая для разложения воздействующего СКИ на последовательность импульсов из-за различия задержек мод [2–4] в многопроводных линиях передачи (МПЛП). Данная технология результативно применяется в защитных устройствах, названных модальными фильтрами (МФ) [5].

Реализация таких устройств прежде ограничивалась преимущественно полосковыми структурами, тогда как реализация МФ в кабелях практически не исследована. Однако ввиду того, что высокочастотные системы передачи или измерительные приборы с использованием различных кабелей стали стандартным элементом РЭС, использование дополнительной защиты в них весьма актуально. Между тем специфика подобных структур в симметричном исполнении не позволяет обеспечить полное разложение воздействующего СКИ ввиду одинаковых электромагнитных связей между проводниками, а предварительные исследования, направленные на изучение подобных структур, ограничивались задачами

достижения полного разложения воздействующего СКИ, не прибегая к многокритериальной оптимизации [2, 6]. Цель работы – восполнить этот пробел.

### Структуры и схемы исследуемых структур

Для моделирования выбраны структуры с круговым сечением, состоящие из 2–5 проводников. Сначала построены геометрические модели (ГМ) поперечного сечения (ПС) структур. Затем вычислены матрицы погонных коэффициентов электростатической (С) и электромагнитной (L) индукций. Потери на данном этапе исследования не учитывались, поэтому матрицы погонных сопротивлений (R, для потерь в проводниках) и проводимостей (G, для потерь в диэлектриках) приняты нулевыми. Далее составлена схема для моделирования, заданы окончания и воздействие, а также вычислен временной отклик на импульсное воздействие в диапазоне параметров.

Исследовались ГМ 1 (при  $N = 2$ ), ГМ 2 (при  $N = 3$ ), ГМ 3 (при  $N = 4$ ) и ГМ 4 (при  $N = 5$ ), представленные на рис. 1 (центральный проводник является опорным), где  $\epsilon_{ri}$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды и  $r_i$  – радиус элемента поперечного сечения. Параметры были приняты следующие:  $r_1 = 0,9$  мм;  $r_2 = 1,6$  мм,  $r_3 = 3,45$  мм;  $r_4 = 0,95$  мм;  $\epsilon_{r1} = 1$ ;  $\epsilon_{r2} = 5$ ;  $\epsilon_{r3} = 10$ ;  $\epsilon_{r4} = 15$ . Для ГМ 2 значение  $r_3$  принято равным 3,45 мм, а для ГМ 4 – 3,55 мм. Эквивалентные схемы с ГМ 1–4 представлены на рис. 2.

### Результаты моделирования

Для вычисления параметров структур и получения форм сигналов использовался программный продукт TALGAT, который дает приемлемую точность и не требует высоких вычислительных затрат [7]. В качестве входного воздействия использовался источник трапециевидных импульсных сигналов с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. Таким образом, общая длительность составила 150 пс при амплитуде СКИ 5 В и длине структур (l) 1 м. На рис. 3 представлены формы напряжений на входе и выходе ГМ 1–4.

Из рис. 3 видно совпадение некоторых значений  $\tau$  (в многопроводных МФ в общем случае количество импульсов разложения равно количеству проводников), означающее одновременный приход мод к концу активного проводника.

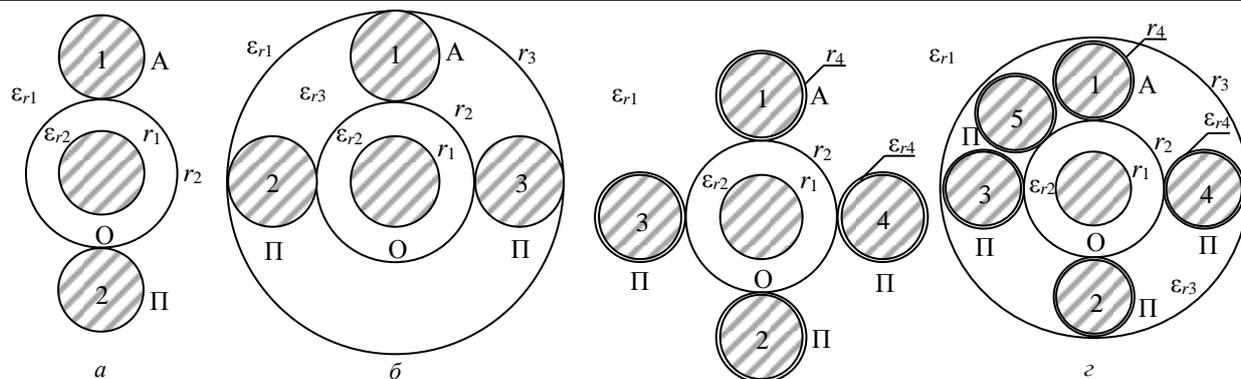


Рис. 1. ГМ 1 (а), ГМ 2 (б), ГМ 3 (в), ГМ 4 (г) до оптимизации

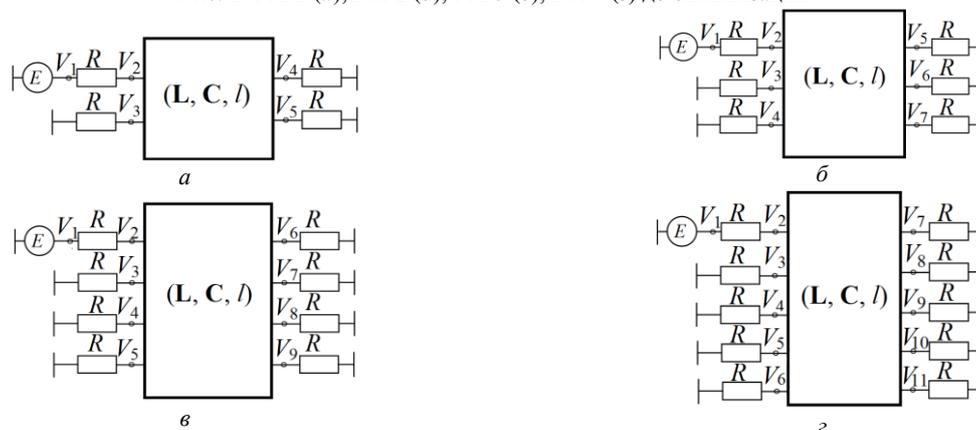


Рис. 2. Эквивалентные схемы МФ с ГМ 1 (а), ГМ 2 (б), ГМ 3 (в), ГМ 4 (г)

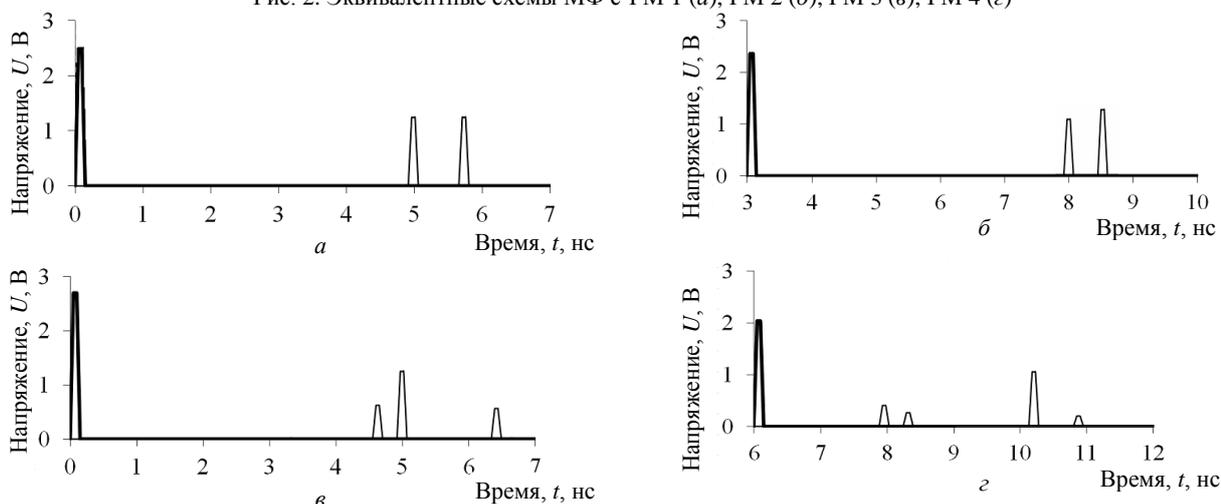


Рис. 3. Формы напряжений на входе (—) и выходе (---) схем с ГМ 1–4 до оптимизации

Очевидно, что произошло наложение импульсов и, как следствие, результирующая амплитуда выходного сигнала увеличилась (до 1,26 В для ГМ 2, 1,25 В для ГМ 3, 1,05 В для ГМ 4). Целесообразным, в данном случае, видится выполнение оптимизации.

На рис. 4 представлены ГМ 1–4 после выполнения параметрической оптимизации эвристическим поиском по амплитудному (для минимизации максимального напряжения на выходе), интервально-временному (для выравнивания интервалов времени между импульсами разложения на выходе) и диапазонно-временному (для увеличения максимальной длительности воздействующего СКИ, который будет полностью разлагаться) критериям. В результате

оптимизации ГМ 1 получены значения:  $\epsilon_{r1}=1$ ;  $\epsilon_{r2}=5$ ;  $r_1=0,9$  мм;  $r_2=1,6$  мм. Для обеспечения согласования линии с трактом значения нагрузок ( $R$ ) приняты равными 63 Ом.

В результате оптимизации ГМ 2 получены значения:  $\epsilon_{r1}=1$ ;  $\epsilon_{r2}=5$ ;  $\epsilon_{r3}=19$ ;  $r_1$  (опорный проводник и проводники 1 и 2)=0,9 мм;  $r_1$  (проводник 3)=0,89 мм;  $r_2=1,6$  мм;  $r_3=3,45$  мм. Для обеспечения согласования линии с трактом выбрано значение  $R=35$  Ом.

В результате оптимизации ГМ 3 получены значения:  $\epsilon_{r1}=1$ ;  $\epsilon_{r2}=3$ ;  $r_1$  (опорный проводник и проводники 1, 2 и 4)=0,9 мм;  $r_1$  (проводник 3)=1 мм;  $r_2=1,6$  мм;  $r_4$ =(проводники 1, 2 и 4)=0,95 мм;  $r_4$  (проводник 3)=1,1 мм;  $\epsilon_{r4}$  (проводники 1 и 3)=60;

$\epsilon_{r4}$  (проводник 2)=120;  $\epsilon_{r4}$  (проводник 4)=20. Для обеспечения согласования линии с трактом выбрано значение  $R=68$  Ом.

В результате оптимизации ГМ 4 получены значения:  $\epsilon_{r1}=1$ ;  $\epsilon_{r2}=70$ ;  $\epsilon_{r3}=6$ ;  $r_1$  (опорный проводник)=1,22 мм;  $r_1$  (проводники 1 и 4)=0,9 мм;  $r_1$  (проводники 2 и 3)=0,3 мм;  $r_1$  (проводник 5)=0,55 мм;  $r_2=1,9$  мм;  $r_3=4$  мм;  $r_4$  (проводник 1, 4 и 5)=0,95 мм;  $r_4$  (проводник 2)=0,92 мм;  $r_4$  (проводник 3)=0,69 мм;  $\epsilon_{r4}$  (проводник 1)=5;  $\epsilon_{r4}$  (проводник 2)=3;  $\epsilon_{r4}$  (проводник 3)=10;  $\epsilon_{r4}$  (проводник 4)=27;  $\epsilon_{r5}$  (проводник 5)=15.

Для обеспечения согласования линии с трактом выбрано значение  $R=33$  Ом.

Результаты оптимизации сведены в таблицу. Из разниц погонных задержек ( $\Delta\tau_i$ ), представленных в таблице, видно, что удалось добиться полного разложения воздействующего импульса в структурах ГМ 1–4. Между тем оптимизация ГМ 1 не выполнялась ввиду заведомо оптимальных характеристик, удовлетворяющих задаваемым критериям. Формы напряжений на входе и выходе ГМ 1–4 после оптимизации представлены на рис. 5.

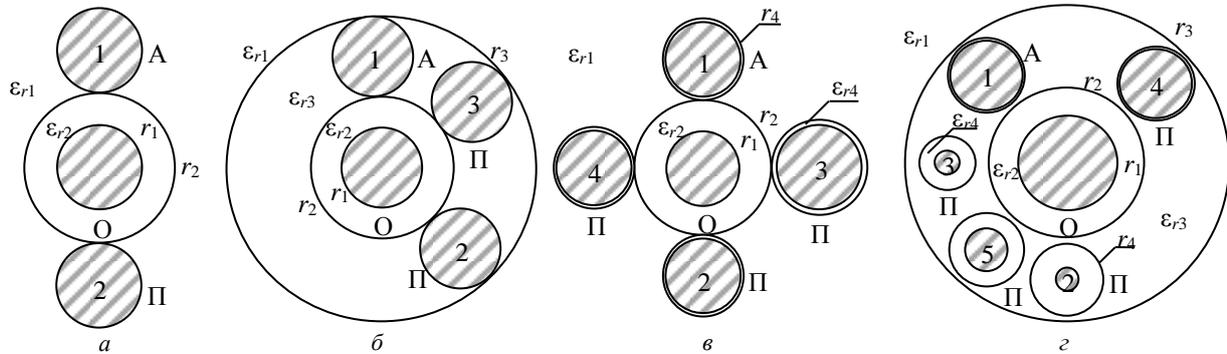


Рис. 4. ГМ 1 (а), ГМ 2 (б), ГМ 3 (в), ГМ 4 (г) после оптимизации

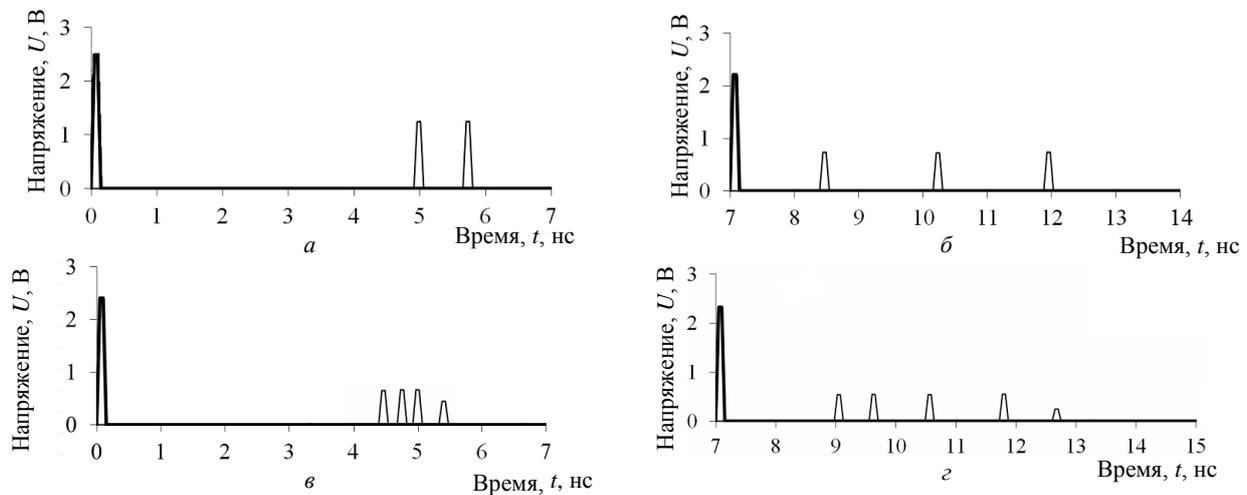


Рис. 5. Формы напряжений на входе (—) и выходе (---) схем с ГМ 1–4 после оптимизации

Характеристики форм сигнала на выходе ГМ 1–4 после оптимизации

ГМ	$U_{вх}, В$	Амплитуды импульсов разложения, В					Разница погонных задержек $\Delta\tau$ , нс/м			
		$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$\Delta\tau_1$	$\Delta\tau_2$	$\Delta\tau_3$	$\Delta\tau_4$
1	2,49	1,24	1,25				0,6			
2	2,2	0,73	0,72	0,73			1,6	1,58		
3	2,4	0,65	0,66	0,67	0,45		0,14	0,09	0,26	
4	2,3	0,54	0,54	0,54	0,55	0,25	0,43	0,78	1,08	0,75

Минимальные значения  $\Delta\tau_i$ , полученные в результате моделирования ГМ 1–4, составляют 0,6; 1,58; 0,09 и 0,43 нс/м соответственно. Максимальная амплитуда импульсов разложения составляет 1,25; 0,73; 0,67 и 0,55 В для ГМ 1–4, соответственно (что в 2; 3,01; 3,58 и 4,18 раза меньше амплитуды напряжения на входе).

Эти результаты показывают, что общая длительность воздействующего СКИ (с учетом частичного наложения спада и фронта соседних импульсов разложения) может быть увеличена до 0,744; 1,73; 0,249 и 0,58 нс для ГМ 1–4 соответственно с тем же коэффициентом ослабления.

**Заключение**

Таким образом, выполнены моделирование и параметрическая оптимизация многопроводных МФ с круговым сечением. Исследованы 4 различные ГМ таких структур. Для обеспечения полного разложения СКИ на выходе выполнена параметрическая оптимизация по амплитудному и двум временным критериям. В результате при моделировании без учета потерь, показана возможность ослабления в 2; 3,01; 3,58 и 4,18 раза при общей длительности входного СКИ, увеличенной до 0,744; 1,73; 0,249 и 0,58 нс для ГМ 1–4 соответственно.

При оптимизации ГМ 1–4 основное внимание уделялось установлению разной и индивидуальной связи между активными и пассивными проводниками. За счет этого достигнуто полное разложение воздействующего СКИ во всех ГМ.

Перспективным видится дальнейшее проведение натурного эксперимента.

Математическое моделирование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90075. Оптимизация выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-2652.2019.9.

**Литература**

1. Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – Vol. 61, No. 5. – P. 546–550. – 2016.
2. Belousov A.O. Complete ultrashort pulse decomposition in modal filters with circular symmetry / A.O. Belousov and T.T. Gazizov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/862/5/052050/pdf>. – 2020. – Vol. 862, No. 5. – P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/862/5/052050.
3. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2004. – Т. 11, № 11. – С. 18–22.
4. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2003, 151 с.
5. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // *Технологии электромагнитной совместимости*. – 2006. – № 4(19). – С. 40–44.
6. Белоусов А.О. Модальное разложение сверхкороткого импульса в многопроводной линии передачи с круговой симметрией / А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий / *Матер. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления»*. – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С. 14–18.
7. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012110.

**Власова Наталья Олеговна**

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-842-94-22  
Эл. почта: ostrolistaya97@mail.ru

**Белоусов Антон Олегович**

М.н.с. НИЛ БЭМС РЭС, аспирант, ассистент каф. ТУ ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-0154-8014  
Тел.: +7-923-440-86-02  
Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com