

УДК 621.391.825

И.А. Иванцов, Е.С. Жечев

Многокритериальная оптимизация параметров четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра для защиты от электростатического разряда

Представлены результаты квазистатического моделирования четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра во временной области. Проведен анализ его эффективности при защите электронного оборудования от электростатического разряда (ЭСР). Выполнена оптимизация геометрических параметров исследуемой структуры с помощью генетического алгоритма. Выявлено, что при оптимальных параметрах подавление пикового выброса ЭСР достигается на меньшей длине.

Ключевые слова: электростатический разряд, зеркально-симметричный модальный фильтр, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, помехоподавляющий фильтр.

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) становится более восприимчивой к различным электромагнитным воздействиям [1]. Одной из актуальных задач электромагнитной совместимости является обеспечение защиты РЭА от кондуктивных помех малой длительности [2], а в частности, от сверхкоротких импульсов и электростатических разрядов (ЭСР) [3]. Традиционными схемотехническими средствами защиты от таких помех являются фильтры, устройства развязки, ограничители помех, разрядные устройства, а конструктивными – заземление, методы уменьшения импедансов цепей питания и зонирование. Также для подавления кондуктивных помех малой длительности применяются устройства на основе модальной фильтрации (МФ) [4, 5]. Одним из эффективных устройств на этой основе является зеркально-симметричный модальный фильтр. Выполнен ряд теоретических и экспериментальных исследований такого устройства [6–9], однако оценка эффективности подавления ЭСР не проводилась. Между тем многокритериальная оптимизация такого МФ для защиты от ЭСР актуальна, так как в перспективе такая конструкция МФ может применяться в сигнальных и силовых цепях с резервированием, где может понадобиться защита от ЭСР. Таким образом, цель данной работы – выполнить многокритериальную оптимизацию параметров четырехслойного зеркально-симметричного МФ для защиты от ЭСР.

Подходы к моделированию и оптимизации

В данной работе квазистатическое моделирование проводилось в программном комплексе TALGAT [10]. При использовании квазистатического подхода предполагается распространение только поперечных Т-волн, при этом высшие типы волн не учитываются. Таким образом, решение уравнений Максвелла сводятся к телеграфным уравнениям, что позволяет проводить данный вид анализа значительно быстрее, чем электродинамический. Точность, обеспечиваемая квазистатическим подходом, приемлема даже для решения сложных задач [11].

В данной работе при оптимизации использован генетический алгоритм (ГА) [12, 13]. Он является

алгоритмом эвристического поиска и хорошо показывает себя в задачах поиска и оптимизации. Принцип работы ГА построен на теории естественного отбора. В процессе работы ГА приводит целевую функцию к точке экстремума в заданном диапазоне параметров за счет создания новых популяций – наборов решений для целевой функции, полученных на основе наиболее удачных решений из предыдущих поколений.

В данной работе оптимизация выполнена с помощью ГА, реализованного в одном из модулей программного комплекса TALGAT. Применение моделей квазистатического анализа в процессе оптимизации с помощью ГА позволяет существенно ускорить процесс оптимизации многопроводных микрополосковых структур.

Исследуемый МФ (рис. 1) представляет собой 6 (в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных) проводников и диэлектрический слой, причем проводники 1 и 2 расположены на одной его стороне, дополнительные проводники 3 и 4 расположены зеркально-симметрично относительно проводников 1 и 2 на обратной стороне диэлектрического слоя, а опорные проводники 5 и 6 расположены в диэлектрическом слое на равном расстоянии от внешних проводников и образуют общую схемную землю. МФ в общем случае рассматривается как четырехпроводная линия передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением. Поэтому в нем распространяются 4 моды основного типа Т-волны с соответствующими им характеристиками.

Параметры поперечного сечения: $w = 1000$ мкм – ширина активного и пассивных проводников, $w_0 = 1000$ мкм – ширина опорного проводника, $s = 700$ мкм – расстояния между проводниками, $t = 35$ мкм – толщина проводников, $h = 510$ мкм – расстояние между внутренними проводниками, $H = 992$ мкм – толщина платы, $\epsilon_r = 4,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, $\text{tg}\delta = 0,025$ – тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика (приведены для частоты 1 МГц). Все сопротивления в схеме равны 50 Ом. Длина исходной структуры $l = 1$ м.

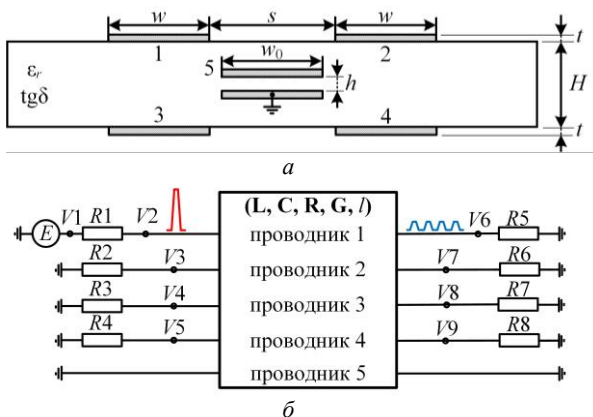


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) четырехслойного зеркально-симметричного МФ

При моделировании в качестве входного воздействия использовались: импульс тока ЭСР, соответствующий II степени жесткости стандарта МЭК 61000-4-2 [14], и сверхкороткий импульс (СКИ) общей длительностью 150 пс.

Ход исследования

МФ с указанными параметрами использовался для подавления СКИ. На рис. 2 представлены формы напряжения на активном проводнике МФ при воздействии на него СКИ и ЭСР.

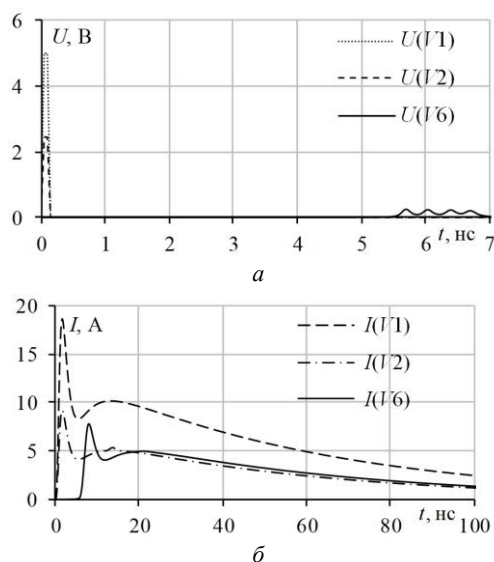


Рис. 2. Формы напряжения на активном проводнике МФ длиной 1 м при воздействии на него СКИ (а) и ЭСР (б)

Из рис. 2, а видно, что входной импульс малой длительности разложился на 4 импульса меньшей амплитуды. За счет этого обеспечивается защита РЭА от воздействия СКИ. Однако из рис. 2, б видно, что данная конфигурация МФ при $l = 1$ м не способна разложить ЭСР, так как не выполняется условие из [15]. Для полного разложения ЭСР длительностью 100 нс необходима длина МФ не менее 100 м. Массогабаритные параметры такого фильтра неприемлемы, поэтому целесообразно раскладывать только пиковый выброс ЭСР, который имеет длительность порядка 4 нс. Для этого при исходных пара-

метрах МФ необходима длина 4 м. Это подтверждают результаты моделирования (рис. 3). Однако из-за наличия потерь импульсы сливаются.

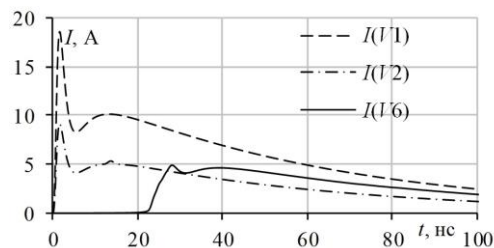


Рис. 3. Формы напряжения на активном проводнике МФ длиной 4 м при воздействии на него ЭСР

При оптимизации с помощью ГА можно уменьшить длину линии, необходимую для подавления пикового выброса ЭСР. Целевая функция ГА представляет собой сумму взвешенных и нормированных критериев и имеет вид [16]

$$F = \sum_i M_i \frac{f_i}{K_i} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Выбраны следующие критерии оптимизации:

1. Минимизация максимального выходного напряжения

$$f_1 = \max U(V6), \quad (2)$$

$$K_1 = \max U(V2). \quad (3)$$

2. Выравнивание задержек между импульсами разложения

$$f_2 = \max |\tau_i - (\tau_{\min} + (i - 1)\Delta)|, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r \max}} - 1}{c}. \quad (5)$$

3. Согласование линии с трактом 50 Ом

$$f_3 = |\max U(V1) - 2\max U(V2)|, \quad (6)$$

$$K_3 = \max U(V1). \quad (7)$$

Оптимизация проводится в 2 набора параметров, где первый набор параметров: s – от 200 до 2000 мкм, w – от 200 до 2000 мкм; второй набор параметров: s – от 200 до 2000 мкм, w – от 200 до 2000 мкм, w_0 – от 200 до 2000 мкм.

Заданы следующие параметры ГА: число особей – 40, число поколений – 150, коэффициент мутации – 0,1, коэффициент кроссовера – 0,5. При данном числе особей и поколений максимальное расхождение целевой функции составляет 0,16%.

Результаты

Для каждого набора параметров проведено пять запусков ГА и выбран лучший результат. Результаты оптимизации по первому и второму набору параметров сведены в табл. 1 и 2 соответственно. Для каждого набора представлены следующие значения: максимальное выходное напряжение, среднеарифметическое значение элементов матрицы характеристического импеданса по главной диагонали, ослабление по напряжению, разность максимальной и минимальной погонных задержек, умноженных на l .

На рис. 4 представлены формы тока на выходе исходной и оптимизируемых конфигураций четырехслойного 3-С МФ при $l = 4$ м, а также зависимость I_{\max} от l .

Таблица 1

Результаты оптимизации по s, w						
№	s , МКМ	w , МКМ	Z , Ом	U_{\max} , В	I_{\max} , А	$ \tau_{\max} - \tau_{\min} $, нс
1	245	681	50,41	229,84	4,55	5,59
2	231	671	50,44	229,61	4,55	5,65
3	245	677	50,61	229,80	4,54	5,60
4	215	658	50,54	229,31	4,53	5,75
5	203	649	50,59	229,07	4,52	5,80

Таблица 2

Результаты оптимизации по s, w, w_0							
№	s , МКМ	w , МКМ	w_0 , МКМ	Z , Ом	U_{\max} , В	I_{\max} , А	$ \tau_{\max} - \tau_{\min} $, нс
1	486	726	901	50,07	232,12	4,63	4,36
2	368	517	928	50,34	231,14	4,59	4,29
3	374	788	771	49,82	231,19	4,64	5,02
4	435	867	787	50,11	230,25	4,61	4,89
5	305	829	685	49,91	232,59	4,64	5,51

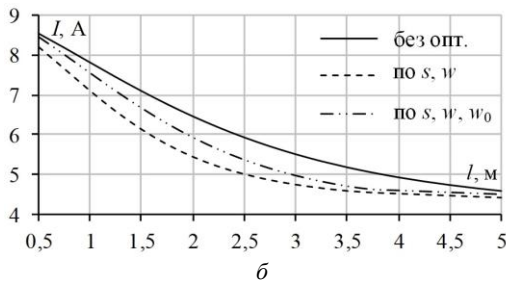
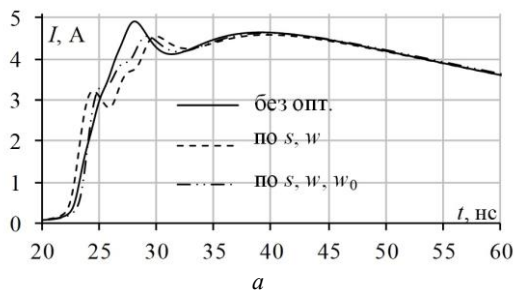


Рис. 4. Формы тока на выходе исходной и оптимизированных конфигураций МФ при $l = 4$ м (а), а также зависимость I_{\max} от l (б)

В табл. 3 для каждого набора параметров представлена длина, достаточная для подавления пика ЭСР. Из результатов видно, что оптимизированные конфигурации обеспечивают разложение пикового выброса ЭСР при меньшей длине в сравнении с исходной конфигурацией. Так, при $l = 2,5$ м I_{\max} не превышает 5 А для конфигурации, оптимизированной по s и w . При этом аналогичный результат исходная конфигурация показывает лишь при $l = 3,9$ м.

Таблица 3

Длина МФ, для подавления пикового выброса ЭСР				
Вид опт.	l , м	U_{\max} , В	I_{\max} , А	$ \tau_{\max} - \tau_{\min} $, нс/м
По s, w	2,75	245,2	4,86	3,99
По s, w, w_0	3,25	242,4	4,81	3,48

Заключение

Таким образом, в работе выполнена многокритериальная оптимизация параметров четырехслойного зеркально-симметричного МФ по критериям:

разложения ЭСР, согласования волнового сопротивления, выравнивания интервалов между импульсами разложения. В ходе исследования выяснено, что в таких МФ с допустимыми размерами есть возможность разложить только пиковый выброс ЭСР. Для оптимизации без изменения материалов диэлектриков минимальная длина, достаточная для разложения пикового выброса ЭСР, составляет 2,75 м (соответствует оптимизации по s, w). В дальнейшем, после проведения многокритериальной оптимизации с большим количеством оптимизируемых параметров, планируется провести электродинамическое моделирование, изготовление прототипа 3-С МФ, а также экспериментальные исследования во временной и частотной областях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90098.

Литература

- Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
- Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие. – ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.
- Гизатуллин З.М. Электромагнитная совместимость электронных средств при воздействии электростатического разряда: учеб. пособие / З.М. Гизатуллин, С.Ф. Черемонцев. – Казань: Изд-во КГУ, 2006. – 102 с.
- Gazizov A.T. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotskii, T.R. Gazizov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2018. – Vol. 63, № 3. – P. 270–276.
- Белюсов А.О., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37).
- Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белюсов А.О., Газизов Т.Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2.
- Жечев Е.С. Влияние перемычек в опорном проводнике на характеристики зеркально-симметричного модального фильтра // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР. – 2019. – Т. 1, № 1-1. – С. 279–281.
- Zhechev Y.S., Chernikova E.B., Belousov A.O. Research of the New Structure of Reflection Symmetric Modal Filter // 2019 20-th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2019. – P. 108–112.
- Синельников А.А., Чуб А.В., Жечев Е.С. Квазистатическое моделирование четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра при изменении граничных условий на концах пассивных проводников // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР. – 2019. – Т. 1, № 1-1. – С. 266–269.
- 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. – Vol. 560, № 012110. – P. 1–7.
- Orlov P.E. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal res-

ervation / P.E. Orlov, E.N. Buichkin // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Altai, June 29–July 3. – 2017. – P. 54–58.

12. Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Заболоцкий А.М. Параметрическая оптимизация зеркально-симметричных полосковых модальных фильтров по двум критериям // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск. – 2017. – С. 4–5.

13. Belousov A.O., Gazizov T.R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. – 2018. – Vol. 2018.

14. IEC 61000-4 2003. Electromagnetic Compatibility (EMC). – Part 4: Testing and measurement techniques. – Section 2: Electrostatic discharge immunity test.

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

16. Белоусов А.О., Черникова Е.Б., Заболоцкий А.М. Трехкритериальная оптимизация как ресурс для совершенствования зеркально-симметричного модального фильтра // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-23–2017). – 2017. – С. 150–154.

Иванцов Илья Александрович

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-913-846-27-45

Эл. почта: wertygo123@outlook.com

Жечев Евгений Сергеевич

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>

Эл. почта: zhechev75@gmail.com