

УДК 621.391.825

И.А. Иванцов, Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов

Оптимизация параметров 8-проводного зеркально-симметричного модального фильтра квадратной конфигурации

Представлены результаты моделирования 8-проводного зеркально-симметричного модального фильтра (МФ) квадратной конфигурации. Методом эвристического поиска подобраны параметры линии, при которых число импульсов разложения равно количеству проводников. Выполнена многокритериальная оптимизация с помощью генетического алгоритма для 4 разных наборов параметров. По результатам оптимизации получены значения максимального выходного напряжения, ослабления по напряжению, разности максимальной и минимальной погонных и временных задержек. Показано, что добавление 4 пассивных проводников на торцы платы 4-проводного зеркально-симметричного МФ не удвоило коэффициент ослабления, а лишь увеличило его в 1,4 раза.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) необходимо для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), так как с каждым годом неуклонно растет плотность монтажа печатных плат (ПП), падает рабочее напряжение, повышается верхняя граничная частота спектра используемых сигналов [1]. Это повышает восприимчивость РЭА к различным воздействиям, поэтому возникает необходимость уделять особое внимание ЭМС еще на этапе проектирования. Игнорирование требований ЭМС может привести к повреждению РЭА, что влечёт за собой финансовые потери и подрыв репутации предприятия или разработчика. Одной из актуальных задач ЭМС является обеспечение защиты РЭА от кондуктивных помех малой длительности, поскольку они способны проникнуть внутрь аппаратуры и вывести ее из строя. Одним из видов кондуктивных помех, опасных для РЭА, является сверхкороткий импульс (СКИ).

Традиционными схемотехническими средствами защиты от СКИ являются фильтры, устройства развязки, ограничители помех, разрядные устройства, а конструктивными – защитные экраны и методы повышения однородности экранов, заземление и методы уменьшения импедансов цепей питания. Также для подавления кондуктивных помех малой длительности применяются устройства на основе модальной фильтрации [2]. Принцип работы этой технологии основан на различии в скорости распространения мод и дифференциальной мод в связанных линиях, которое вызывает разложение сигнала в активном и пассивном проводниках на «быструю» и «медленную» составляющие, что приводит к искажению сигнала. Подобные искажения в связанных линиях обусловлены различием задержек распространения мод и называются модальными. Используя их, модальные фильтры (МФ) уменьшают амплитуду высокочастотного сигнала за счет его разложения.

Из треугольного МФ со слабой связью, с помощью зеркальной симметрии относительно плоскости α , получен зеркально-симметричный МФ [3],

поперечное сечение которого представлено на рис. 1 (w – ширина проводника, s – расстояние между проводниками, t – высота проводника, h_1 – высота подложки, d – расстояние от проводника до края платы).

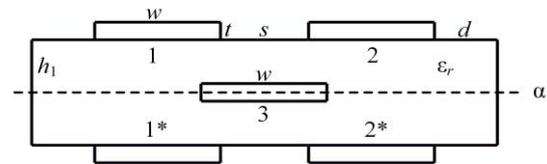


Рис. 1. Поперечное сечение зеркально-симметричного МФ

Путем введения диагональной симметрии можно получить 8-проводный МФ. Моделирование такой структуры актуально, так как она может иметь удвоенное ослабление по сравнению с исходной за счет удвоенного количества пассивных проводников. Кроме того, для достижения лучшего результата целесообразно выполнить оптимизацию по критерию минимизации максимальной амплитуды и обеспечению согласования. Цель данной работы – выполнить такое исследование.

Подходы, методы и конструкция

Для моделирования отклика выбрано воздействие СКИ в форме трапеции (рис. 2), длительностью 150 пс и амплитудой ЭДС 5 В.

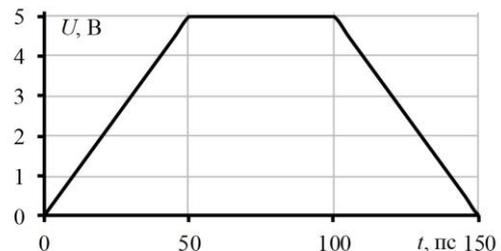


Рис. 2. Форма воздействующей ЭДС

На рис. 3 представлено поперечное сечение 8-проводного МФ (проводники 1 – активный, 2–8 – пассивные, 9 – опорный), а на рис. 4 представлена эквивалентная схема, где $R = 50$ Ом, $l = 4$ м, $E_{Г}$ – источник ЭДС.

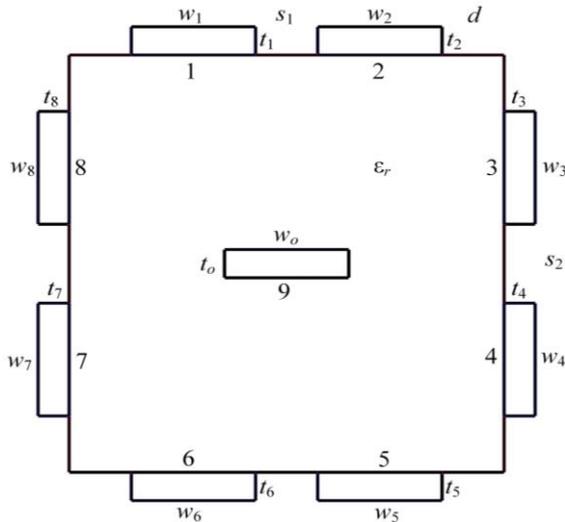


Рис. 3. Поперечное сечение 8-проводного МФ

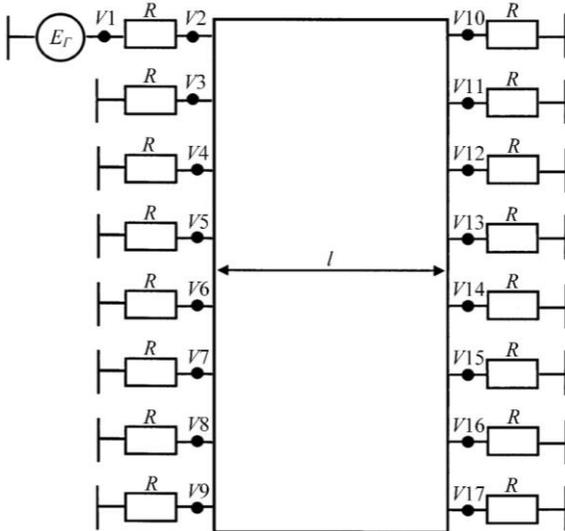


Рис. 4. Эквивалентная схема 8-проводного МФ

При моделировании используется программный комплекс TALGAT [4]. В нем реализованы квазистатические модели, позволяющие с достаточной точностью анализировать структуры проводников и диэлектриков различной сложности. При использовании квазистатического подхода предполагается распространение только поперечных Т-волн, при этом высшие типы волн не учитываются. Таким образом, решение уравнений Максвелла сводится к телеграфным уравнениям, что позволяет проводить данный вид анализа значительно быстрее, чем электродинамический [5]. Точность, обеспечиваемая этим подходом, приемлема даже для решения сложных задач.

Метод эвристического поиска (ЭП) используется в данной работе для подтверждения возможности получить на выходе 8 импульсов разложения, не прибегая к более сложным методам глобальной оптимизации. Изначально были заданы следующие (одинаковые для всех проводников) параметры: $s = 700$ мкм, $w = 1000$ мкм, $t = 18$ мкм, $d = 500$ мкм, $l = 1$ м, $\epsilon_r = 5$. Далее l и ϵ_r увеличивались шагом 1 и 5 соответственно. В итоге при $l = 4$ м, $\epsilon_r = 35$ уда-

лось получить 8 хорошо различимых на графике импульсов разложения.

Для улучшения характеристик исследуемого МФ выполнялась оптимизация с помощью генетических алгоритмов (ГА). ГА являются алгоритмами эвристического поиска и хорошо показывают себя в задачах поиска и оптимизации [6]. 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. Данный алгоритм реализован в одном из модулей программного комплекса TALGAT [7]. Применение моделей квазистатического анализа в процессе оптимизации с помощью ГА позволяет существенно ускорить процесс оптимизации многопроводных микрополосковых структур.

Целевая функция ГА имеет следующий вид [8]:

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

где f_i – целевая функция; K_i – нормировочный коэффициент; M_i – весовой коэффициент i -го критерия, при $i = 1, 2, \dots, N_c$, а N_c – число критериев оптимизации.

Нормировочный K_i коэффициент подбирается как максимальное возможное значение i -го критерия. Весовыми коэффициентами M_i задается значимость i -го критерия.

Оптимизировались параметры s, w, t по следующим критериям оптимизации:

1. Минимизация максимального выходного напряжения

$$f_1 = \max U(V10), K_1 = \max U(V2), M_1 = 0,6, \quad (21)$$

где $U(V10)$ – напряжение на выходе, $U(V2)$ – напряжение на входе.

2. Согласование линии с трактом 50 Ом

$$f_2 = |\max U(V1) - 2 \cdot \max U(V2)|, \\ K_2 = \max U(V2), M_2 = 0,4. \quad (3)$$

Все критерии взвешены, нормированы и объединены в общую целевую функцию, которая будет минимизироваться в ходе работы ГА.

Для оптимизации выбраны 4 разных набора геометрических параметров:

1. w_0 и $w_{1,2}, \dots, 8$ – от 200 до 1000 мкм.
2. w_0 и $w_{1,2}, \dots, 8$ – от 200 до 1000 мкм, s_1 и s_2 от 200 до 1000 мкм.
3. t_0 и $t_{1,2}, \dots, 8$ – от 18 до 70 мкм.
4. $s_1 = s_2$ – от 200 до 1000 мкм, w от 200 до 1000 мкм, t – от 18 до 70 мкм, w_0 – от 200 до 700 мкм, t_0 – от 18 до 70 мкм.

Параметры запуска ГА: число особей – 40, число поколений – 75, коэффициент мутации – 0,1, коэффициент кроссовера – 0,5.

Неизменяемые параметры равны параметрам, полученным с помощью ЭП. В связи с ограничениями вычислительного устройства и в целях разумной экономии времени оптимизация проводилась на более крупной сегментации, чем проверка ее резуль-

татов. Максимальное отклонение результатов составляет не более 5 %.

Результаты

Результаты оптимизации посредством ГА:

1. $w_0 = 801,9$ мкМ, $w_1 = 800,4$ мкМ, $w_2 = 812,9$ мкМ, $w_3 = 904,46$ мкМ, $w_4 = 999,817$ мкМ, $w_5 = 812,921$ мкМ, $w_6 = 800,439$ мкМ, $w_7 = 999,817$ мкМ, $w_8 = 904,46$ мкМ.

2. $s_1 = 908,52$ мкМ, $s_2 = 692,9$ мкМ, $w_0 = 633,98$ мкМ, $w_1 = 413,34$ мкМ, $w_2 = 491,50$ мкМ, $w_3 = 694,28$ мкМ, $w_4 = 821,36$ мкМ, $w_5 = 491,50$ мкМ, $w_6 = 413,34$ мкМ, $w_7 = 821,36$ мкМ, $w_8 = 694,28$ мкМ.

3. $t_0 = 20,033$ мкМ, $t_1 = 18,856$ мкМ, $t_2 = 69,543$ мкМ, $t_3 = 60,609$ мкМ, $t_4 = 28,895$ мкМ, $t_5 = 19,148$ мкМ, $t_6 = 48,763$ мкМ, $t_7 = 35,999$ мкМ, $t_8 = 18,488$ мкМ.

4. $s_1 = 327,82$ мкМ, $w = 397,89$ мкМ, $t = 19,571$ мкМ, $w_0 = 485,898$ мкМ, $t_0 = 61,008$ мкМ, $d = 165,832$ мкМ.

В таблице представлены значения, полученные при моделировании лучших результатов из 5 запусков для каждого набора оптимизации. На рис. 5 представлены графики зависимостей $U_{\text{вых}}(t)$ для каждого варианта оптимизации.

Значения получены при моделировании лучших результатов оптимизации

Номер опт.	$U_{\text{вых макс}}$, В	$U_{\text{вх} \rightarrow 2,5}$ В	$ U(V1) - 2 \cdot U(V2) $	$U_{\text{вх}} / U_{\text{вых макс}}$	$ \tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}} $, нс/М	$ \tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}} l$, нс
ЭП	0,507191	2,2	0,59637	4,34277	6,26083	25,0433
1	0,431414	2,27	0,466563	5,25601	6,3215	25,286
2	0,485718	2,48	0,0428379	5,10457	6,63634	26,5454
3	0,571111	2,25	0,612197	3,84287	6,45331	25,8132
4	0,468778	2,53	0,913901	4,35994	6,71833	26,8733

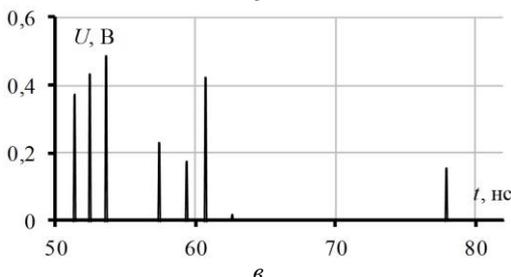
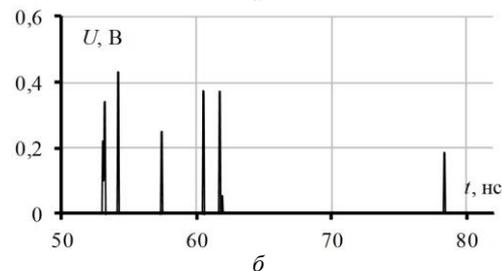
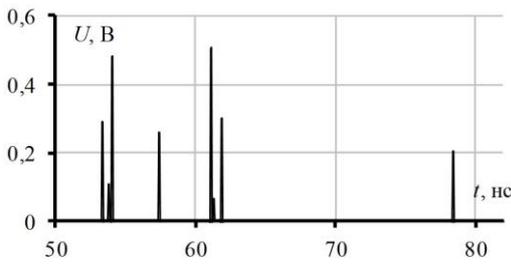


Рис. 5 (начало)

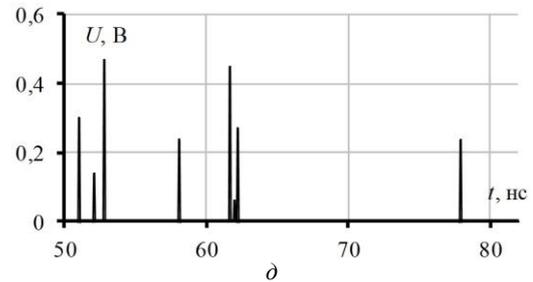
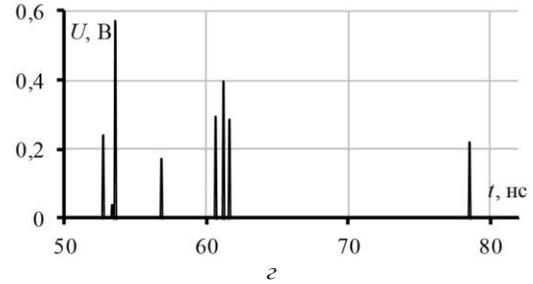


Рис. 5 (продолжение). $U_{\text{вых}}(t)$ для оптимизации посредством ЭП (а), ГА с наборами параметров 1 (б), 2 (в), 3 (г), 4 (д)

Заключение

Таким образом, представлены результаты моделирования 8-проводного зеркально-симметричного МФ квадратной конфигурации. Методом ЭП подобраны параметры линий, при которых число импульсов разложения равно количеству проводников. Проведена оптимизация с помощью ГА. В ходе работы ГА минимизировалась целевая функция, которая является суммой двух критериев: максимальное выходное напряжение и минимальный модуль разности напряжений в узле V1 и удвоенного напряжения в узле V2. Каждый критерий нормирован и помножен на весовой коэффициент. Оптимизация проведена для 4 разных наборов параметров, для каждого выполнено 5 запусков ГА, выбран лучший результат. По результатам оптимизации получены значения максимального выходного напряжения, ослабления по напряжению, разницы максимальной и минимальной погонных и временных задержек, получены графики зависимости $U_{\text{вых}}(t)$.

Наилучшие результаты, а именно $U_{\text{вых макс}} = 0,431$ В, показала оптимизация со следующим набором параметров: $w_0 = 801,95$ мкМ, $w_1 = 800,43$ мкМ, $w_2 = 812,92$ мкМ, $w_3 = 904,46$ мкМ, $w_4 = 999,81$ мкМ, $w_5 = 812,92$ мкМ, $w_6 = 800,43$ мкМ, $w_7 = 999,81$ мкМ, $w_8 = 904,46$ мкМ.

Удвоение ослабления при добавлении 4 пассивных проводников на торцы платы не получено, однако ослабление такого 8-проводного МФ в 1,4 раза больше, чем коэффициент ослабления 4-проводного зеркально-симметричного МФ.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 19-37-51017).

Литература

1. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соко-

лов, О.В. Михеев и др. // Технологии ЭМС. – 2006. – № 3 (18). – С. 36–45.

2. Газизов А.Т., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Измерение и моделирование временного отклика печатных модальных фильтров с лицевой связью // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 292–298.

3. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Куксенко С.П. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов. – 2017.

4. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

5. Kuksenko S.P. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / Kuksenko S.P., T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, R.R. Ahunov, R.S. Surovtsev, V.K. Salov, Eg.V Lezhnin // 2015 International Conference on Modeling, Simulation and Applied Mathematics. – Atlantis Press, 2015.

6. Back T. Evolutionary algorithms in theory and practice. – New-York: Oxford University Press, 1996. – 314 p.

7. Газизов Т.Т. Методы глобальной оптимизации: учебное пособие. – Томск: В-Спектр, 2017. – 24 с.

8. 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.

Иванцов Илья Александрович

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ)

Томского университета

систем управления и радиотехники (ТУСУР)

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

Тел.: +7-913-846-27-45

Эл. почта: wertygo123@outlook.com

Черникова Евгения Борисовна

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа

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

ORCID: 0000-0003-1964-7616

Тел.: +7-923-407-47-23

Эл. почта: chiernikova96@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