

УДК 621.372

В.О. Гордеева, А.О. Белоусов

## Оптимизация конструкции модального фильтра при распространении сверхкоротких импульсов с двух направлений

Впервые рассматривается оптимизация полоскового модального фильтра (МФ) по критерию минимизации максимальной амплитуды сверхкоротких импульсов (СКИ) при их распространении с двух направлений. Это реализовано за счет использования субмодуля анимированной динамической визуализации «DynaVis», позволяющего оценить изменение формы напряжения вдоль конкретного проводника МФ. Оптимизация выполнялась с использованием генетического алгоритма с турнирным отбором на этапе селекции. Впервые ряд оптимизируемых параметров МФ задавался не диапазонами, а дискретным набором значений на этапе генерации нового поколения. При оптимизации имеют место высокие временные затраты, поскольку алгоритм просчитывает значения напряжений не в одном узле, а в нескольких, по числу подсекций (в данном случае 50), на которые делится МФ при оптимизации. В результате оптимизации удалось обеспечить наименьший уровень максимального напряжения 159,8 мВ в центральной секции МФ (узел 25 из 50) при воздействии трапециевидными СКИ с ЭДС 1000 и 717 мВ в узле 22 при воздействии СКИ, соответствующих генераторам IRA II с ЭДС 5647 мВ и SINUS-160 с ЭДС 2575 мВ. Выполнена оценка полученных результатов по ряду признаков.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, оптимизация, сверхкороткий импульс, модальный фильтр, генетический алгоритм.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2024-27-3-48-54

Современные радиоэлектронные системы (РЭС) играют важную роль в различных областях человеческой деятельности – от бытовых приборов до военной техники. Однако с увеличением функционала и разнообразия РЭС возникают проблемы, связанные с обеспечением их электромагнитной совместимости (ЭМС). Усложнение конструкций, рост верхних частот используемых сигналов, увеличение плотности монтажа и уязвимость к возникающим электромагнитным воздействиям представляют новые вызовы для обеспечения надежной работы РЭС в подобных условиях. Одной из основных проблем ЭМС является восприимчивость критичных цепей РЭС к кондуктивным помехам [1]. Их воздействие способно нарушать работу РЭС, что может привести к различным негативным последствиям [2, 3]. Это, в свою очередь, ведет к увеличению числа исследований, направленных на улучшение помехозащитных свойств различных РЭС [4–6]. Наибольший интерес, ввиду своих особенностей, представляют сверхкороткие импульсы (СКИ) [7, 8]. Они представляют собой импульсные сигналы большой амплитуды и малой длительности, способные проникать в РЭС различными способами, например, по сигнальным или питающим цепям [9, 10].

Для защиты РЭС от СКИ предложена технология модальной фильтрации. Принцип её действия заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Устройства, работающие по этому принципу, называют модальными фильтрами (МФ) [11]. Традиционно МФ реализуют в виде полосковых структур, однако явление модального разложения также возможно и в кабельных (защитных кабелях). В процессе проектирования МФ всегда важен выбор оптимального набора геометрических и электрофизических параметров разрабатываемой структуры. Для его поиска применяются раз-

личные методы и критерии оптимизации в зависимости от специфики требований к МФ [12].

Зачастую задача оптимизации МФ сводится к поиску глобального экстремума многоэкстремальной целевой функции, ввиду чего результативно применяются методы глобальной оптимизации. Преимущественно используются эволюционные и стохастические алгоритмы, такие как генетический алгоритм (ГА), эволюционные стратегии и случайный поиск (метод Монте–Карло). При настройке алгоритмов реализована возможность задания диапазонов оптимизируемых параметров в требуемых границах. Однако зачастую технологии производства печатных плат или кабельной продукции ограничены строгим набором допустимых значений геометрических параметров. Как следствие, важно обеспечить возможность оптимизации ряда параметров не в заданных диапазонах с мелким шагом (например, 500–1000 мкм с шагом 10 мкм), а заданными конкретными значениями (например, 500, 750 и 1000 мкм). Поэтому реализация задания оптимизируемых параметров МФ дискретным набором значений представляется актуальной. Наиболее значимыми критериями оптимизации МФ обычно выступают амплитудный (минимизация максимального значения напряжения на выходе МФ) и критерий согласования (согласование с электрическим трактом). Однако помимо них также существуют частотные, временные, стоимостный и массогабаритный критерии [12, 13]. Каждый из них используется в зависимости от предъявляемых требований к разрабатываемому устройству.

В то же время на практике возможно возникновение ситуаций, когда помеховые сигналы распространяются не только со стороны источника, но и в противоположном направлении. Суперпозиция прямых и отраженных сигналов может приводить к существенному увеличению амплитуды помехи в опре-

делённых участках цепи [14, 15]. Этот факт повышает риски выхода из строя компонентов и снижения общей надежности системы [16]. Поэтому целью работы является оптимизация МФ с учетом распространения помех с двух направлений для обеспечения эффективной защиты РЭС от СКИ в условиях сложной электромагнитной обстановки.

**Материалы и методы**

Моделирование и оптимизация выполнялись в системе TUSUR.EMC [17]. Допускалось, что в рассматриваемых МФ распространяются *T*-волны. Вначале строилась геометрическая модель поперечного сечения исследуемой структуры. Затем вычислялись матрицы погонных коэффициентов электростатической *C* и электромагнитной *L* индукций. На основе данных матриц вычислялись вторичные характеристики: матрица характеристических импедансов *Z<sub>C</sub>* и погонные задержки мод *τ<sub>i</sub>*. При этом матрицы погонных сопротивлений *R* (для учета потерь в проводниках) и проводимостей *G* (для учета потерь в диэлектриках) приняты равными нулю для исключения их влияния.

В качестве исследуемого выбран МФ на основе 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ). Поперечное сечение МФ представлено на рис. 1, *a*, где *w* – ширина проводников, *s<sub>1</sub>* – зазор между проводниками, *s<sub>2</sub>* – толщина проводников, *t* – толщина подложки, *d* – расстояние от края МФ до ближайших проводников, а *ε<sub>r</sub>* – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. В качестве оптимизируемых параметров выбраны *h*, *t*, *s<sub>1</sub>* и *s<sub>2</sub>* как основные, оказывающие непосредственное влияние на форму выходного напряжения. Оптимизация *s<sub>1</sub>* и *s<sub>2</sub>* выполнялась в диапазоне 75–500 мкм, а для *t* и *h* взяты значения изготовителей печатных плат: 18, 35, 50, 70, 105 и 200 мкм для *t* и 100, 150, 200, 250, 360, 510, 710, 1000, 1500 мкм для *h*. Остальные параметры МФ приняты: *w* = 1000 мкм, *d* = 3*w*, *ε<sub>r</sub>* = 4,5 и *tgδ* = 0,025.

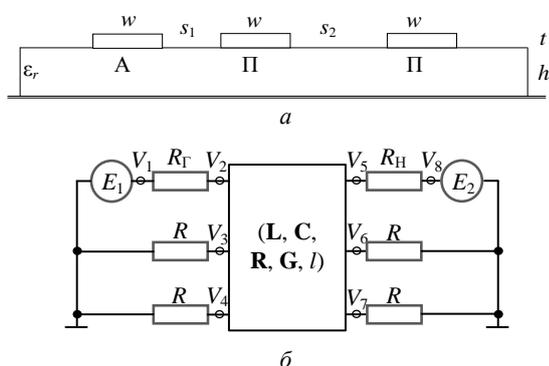


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) 3-проводного МФ на основе МПЛ

Эквивалентная схема данного МФ представлена на рис. 1, б. Длина МФ принята *l* = 0,6 м. При моделировании и оптимизации рассматривалось два случая воздействий одновременно с двух направлений: два одинаковых СКИ и два СКИ, различных по длительности, форме и амплитуде. При одинаковых использовалось воздействие трапециевидного СКИ с

ЭДС 1000 мВ и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 50 пс, так что общая длительность составила 150 пс для обоих источников *E<sub>1</sub>* и *E<sub>2</sub>*. При таком воздействии сопротивления *R<sub>Г</sub>*, *R<sub>Н</sub>* и *R* взяты по 50 Ом. При разных СКИ их параметры соответствуют сигналам с генераторов IRA II (*E<sub>1</sub>*) и SINUS-160 (*E<sub>2</sub>*) из [7]. Амплитуда ЭДС для обоих СКИ понижена в 10<sup>4</sup> раз (для упрощения анализа) и составила 5647 мВ для IRA II и 2575 мВ для SINUS-160. Формы напряжений показаны на рис. 2. Очевидно, что для источника *E<sub>1</sub>* узел *V<sub>2</sub>* является входным, а *V<sub>5</sub>* – выходным, тогда как для *E<sub>2</sub>* наоборот (*V<sub>5</sub>* – вход, *V<sub>2</sub>* – выход). *R<sub>Г</sub>* и *R* между узлами *V<sub>3</sub>/V<sub>4</sub>* и землей взяты по 50 Ом, а *R<sub>Н</sub>* и *R* между узлами *V<sub>6</sub>/V<sub>7</sub>* и землей – по 30 Ом (для случая использования МФ в рассогласованном электрическом тракте).

В случае оптимизации по амплитудному критерию при распространении помехи с двух направлений необходимо учитывать уровень напряжения в линии не только в контрольном узле (*V<sub>5</sub>* на выходе структуры), но и вдоль структуры. Система TUSUR.EMC имеет в своем функционале submodule анимированной динамической визуализации «DynaVis», основанный на алгоритме поиска в глубину GoThrough [18]. С помощью данного алгоритма программный submodule определяет путь распространения сигнала по цепи с дальнейшим отображением на экране. На вход алгоритма поступают координаты узлов *A* и *B* и число подсекций, на выходе получается список координат распространения импульса вдоль конкретного проводника МФ [19]. Submodule позволяет визуализировать изменение формы напряжения, а также выявлять его экстремумы, при прохождении через отрезки линий передачи произвольной сложности. С его помощью можно разделить линию на необходимое количество подсекций для наблюдения прохождения сигнала по линии с течением времени. Рисунок 3 визуализирует разделение МФ между узлами *V<sub>2</sub>* и *V<sub>5</sub>* на 50 подсекций. Рисунок 4 демонстрирует формы напряжений *U<sub>1</sub>* и *U<sub>2</sub>* во времени *t<sub>1</sub>* и *t<sub>2</sub>* с двух генераторов в выборочных подсекциях МФ (оптимизированного ранее по критерию минимизации максимальной амплитуды на его выходе [12]).

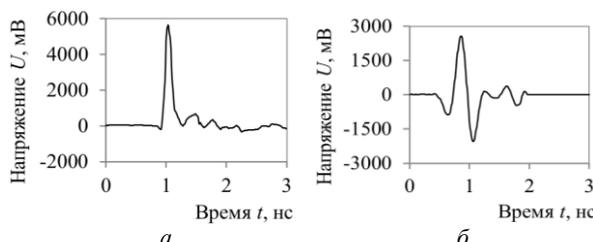


Рис. 2. Формы сигналов с IRA II (а) и SINUS-160 (б) [7]

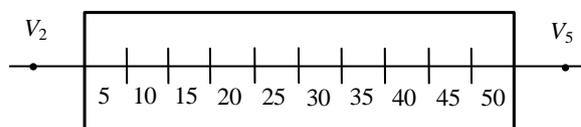


Рис. 3. Разделение линии между узлами *V<sub>2</sub>* и *V<sub>5</sub>* на 50 подсекций с помощью «DynaVis»

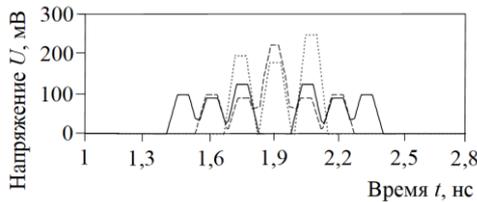


Рис. 4. Формы напряжения в подсекциях 21 и 29 (—); 23 и 27 (- -); 25 (· · ·)

Из рис. 4 видно, что подсекции 21 и 29 включают в себя по 3 импульса (результат модального разложения), распространяющихся с двух сторон МФ. Поскольку воздействующие с двух сторон импульсы и сопротивления на концах линии одинаковы, то и формы сигналов, проходящих по линии, также одинаковы. В данном случае сигналы начинают частично накладываться друг на друга, начиная с подсекций 22–28, и сливаются в середине линии (подсекция 25), приводя к более высоким уровням напряжения импульсов мод. Однако при различных видах воздействий с двух направлений возможно смещение максимального значения напряжения (при суперпозиции сигналов) в соседние подсекции. С учетом этого при оптимизации важно учитывать все подсекции МФ, в которых распространяются помехи.

Критерий минимизации амплитуды с учетом распространения СКИ с двух направлений формируется на основе амплитудного при условии, что максимальная амплитуда  $U(t)$  минимизируется вдоль линии передачи, разделенной на  $n$  подсекций.

$$\max(U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $n$  – число подсекций.

Оптимизация выполнялась с использованием ГА с турнирным отбором на этапе селекции на языке Python. Как отмечалось ранее, оптимизируемые параметры  $h$  и  $t$  задавались списком конкретных значений, а  $s_1$  и  $s_2$  – диапазоном значений. Задание оптимизируемых параметров дискретным набором значений реализовано за счет введения дополнительного условия на этапе создания популяции. Если диапазон оптимизируемых параметров задан списком, то выбор выполняется из значений, входящих в список. Если диапазон указан как «кортеж» из двух значений (верхняя и нижняя границы поиска), то выполняется выбор из значений в данном диапазоне. Коэффициент мутации ГА брался 0,1 (или 10%), а коэффициент кроссовера определялся случайным выбором точки разрыва внутри длины генома родителей (одноточечный кроссовер). Количество особей для турнира – 3. При этом оптимизация выполнялась с последовательным увеличением числа вычислений  $N_{it}$ : 50 (5 особей и 10 поколений), 100 (10 особей и 10 поколений) и 1 000 (10 особей и 100 поколений). Для каждого значения  $N_{it}$  выполнялось по 5 запусков.

Результаты оптимизации по сформулированному критерию сравнивались между собой по итоговым значениям оптимизированных параметров и ряду характеристик. Отклонение ( $\Delta$ ) рассчитывалось как

$$\Delta = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_1 + X_2} \right| \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $X_1$  – максимальное и  $X_2$  – минимальное значения.

#### Результаты оптимизации

Результаты оптимизации сведены в табл. 1, где  $N$  – номер запуска,  $N_{it}$  – число итераций (особей/поколений) на запуск,  $T$  – затрачиваемое на запуск время,  $U_{max}$  – максимальное напряжение в МФ с учетом его разделения на 50 подсекций (полуциркульным выделен оптимальный набор параметров).

Таблица 1

Результаты оптимизации конструкции МФ при одинаковых воздействиях с двух направлений						
$N$	$h$ , МКМ	$t$ , МКМ	$s_1$ , МКМ	$s_2$ , МКМ	$U_{max}$ , мВ	$T$ , с
$N_{it} = 5/10$						
1	200	70	286,8	436,3	320,3	545
2	100	35	148,1	230	262,6	553
3	100	18	216,8	311,5	303,8	484
4	200	200	235,1	236,6	312,2	502
5	150	35	285	444,6	353	502
$\Delta$ , %	33,3	84,5	31,9	31,8	14,7	5,65
$N_{it} = 10/10$						
1	100	18	123,1	481,3	242,9	689
2	200	70	149,9	237,8	255	636
3	100	35	80,5	106,5	213,8	828
4	150	70	126,7	335,4	212,8	842
5	100	105	231,8	197,1	277,1	728
$\Delta$ , %	33,3	70,7	48,4	63,8	13,1	13,9
$N_{it} = 10/100$						
1	100	200	119	307	167	7866
2	100	200	108	261,6	162,4	7880
<b>3</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>78,3</b>	<b>191,4</b>	<b>159,8</b>	<b>7521</b>
4	100	200	75,8	208	162,6	7277
5	100	200	154	176,9	193	6974
$\Delta$ , %	0	0	34	26,9	9,4	6,1

На рис. 5 приведены формы напряжений в подсекции 25 до (при распространении СКИ только со стороны источника  $E_1$  и минимизации максимального напряжения в узле  $V_3$ ) и после (с учетом распространения СКИ со стороны источников  $E_1$  и  $E_2$ ) оптимизации МФ по амплитудному критерию. Для случая, когда СКИ распространялся только со стороны  $E_1$ , взят результат, ранее полученный посредством оптимизации ГА при 5 000 вычислениях по амплитудному критерию с параметрами:  $h = 990,6$  мкм,  $t = 191,4$  мкм,  $s_1 = 10$  мкм,  $s_2 = 55,5$  мкм [12]. Рисунок 6 показывает формы напряжений на выходе МФ до (в узле  $V_3$  для генератора  $E_1$ ) и после (в узлах  $V_2$  для  $E_2$  и в  $V_3$  для  $E_1$ ) оптимизации. На рис. 7 представлено поперечное сечение с оптимальным набором параметров, полученное при одинаковых воздействиях с двух направлений.

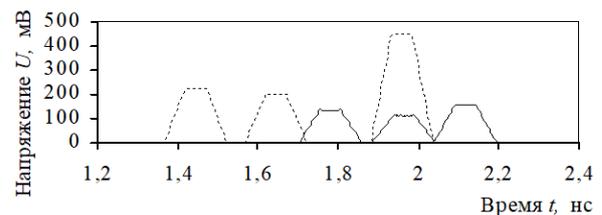


Рис. 5. Формы напряжений в подсекции 25 до (· · ·) и после (—) оптимизации

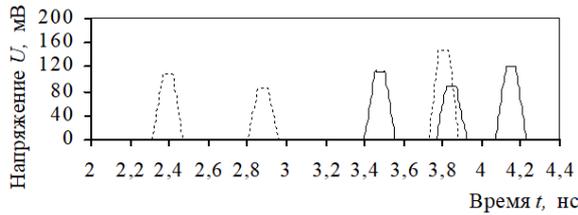


Рис. 6. Формы напряжений в узле  $V_5$  до (...) и в узлах  $V_2$  и  $V_5$  после (—) оптимизации



Рис. 7. Поперечное сечение МФ с оптимальным набором параметров при одинаковых воздействиях с двух направлений

Из табл. 1 и рис. 5 видно, что наименьший уровень напряжения в линии (в подсекции 25, где происходит суперпозиция трех импульсов разложения, распространяющихся с двух направлений) после оптимизации составил  $U_{max} = 159,8$  мВ, тогда как до оптимизации  $U_{max} = 451,7$  мВ (в 2,8 раза больше). Также табл. 1 демонстрирует закономерное уменьшение максимального напряжения и его среднего отклонения с ростом числа вычислений. Так, среднее значение полученного максимального напряжения в линии составило 308,6 мВ при  $N_{it} = 5/10$  ( $\Delta = 14,7\%$ ), 240,3 мВ при  $N_{it} = 10/10$  ( $\Delta = 13,1\%$ ) и 169 мВ при  $N_{it} = 10/100$  ( $\Delta = 9,4\%$ ). Уменьшение  $\Delta$  с 14,7 до 9,4% показывает улучшение сходимости. Среднее время вычислений при  $N_{it}=10/100$  составило 7 503 с, а при  $N_{it} = 5/10 - 517$  с.

Из рис. 6 видно, что ослабление воздействующих помех также достижимо в крайних узлах МФ ( $V_2$  и  $V_5$ ). При этом различимы три импульса разложения: для случая до оптимизации это импульсы, пришедшие на выход МФ (узел  $V_5$ ), а после – в узлы  $V_2$  и  $V_5$  (ввиду идентичного воздействия с двух направлений). Примечательно, что до оптимизации МФ максимальное напряжение на выходе МФ (узел  $V_5$ ) составило 146 мВ, а после – 122 мВ (в узлах  $V_2$  и  $V_5$ ).

Кроме того, из табл. 1 видно, что параметры  $h$  и  $t$ , задаваемые дискретным набором значений, не выходят за рамки заданных значений в процессе оптимизации. Так, параметр  $h$  уже при  $N_{it} = 10/100$  стремится к 100 мкм, тогда как  $t -$  к 200 мкм. В то же время при меньшем числе вычислений параметры принимают оптимальные значения в диапазоне 100–200 мкм для  $h$  и 18–200 мкм для  $t$ . Увеличение сходимости также подтверждается нулевым значением  $\Delta$  параметров  $h$  и  $t$  для максимального количества вычислений, в то время как при  $N_{it} = 5/10 \Delta = 33,3\%$  для  $h$  и 84,5% для  $t$ . Наибольший разброс оптимизированных значений соответствует параметрам  $s_1$  и  $s_2$  (34 и 26,9% соответственно) при  $N_{it} = 10/100$ . Для  $s_1$  оптимум получен в диапазоне 75,8–154 мкм, а для  $s_1 -$  в диапазоне 176,9–307 мкм.

В табл. 2 представлены результаты оптимизации МФ при воздействии двух разных СКИ (полужирным выделен оптимальный набор параметров). На рис. 8 приведены формы максимальных напряжений до

(соответствует подсекции 24) и после (соответствует подсекции 22) оптимизации МФ. Рисунок 9 демонстрирует формы напряжений на выходе МФ до (в узле  $V_5$  для генератора  $E_1$ ) и после (в узлах  $V_2$  для  $E_2$  и в  $V_5$  для  $E_1$ ) оптимизации. На рис. 10 представлено поперечное сечение с оптимальным набором параметров, полученное при разных воздействиях с двух направлений.

Таблица 2

Результаты оптимизации конструкции МФ при разных воздействиях с двух направлений

$N$	$h$ , МКМ	$t$ , МКМ	$s_1$ , МКМ	$s_2$ , МКМ	$U_{max}$ , МВ	$T$ , с
$N_{it} = 5/10$						
1	200	105	117,2	316,3	999	266
2	100	105	204,2	432,8	1164	282
3	100	200	204,2	370,5	809	291
4	200	105	364	345,2	1764	285
5	100	200	257,9	332	1101	289
$\Delta$ , %	33,3	31,1	51,3	15,6	37,1	4,5
$N_{it} = 10/10$						
1	150	200	168,2	277	818	382
2	150	105	139,5	294,1	906	400
3	150	200	107,6	326,6	914	426
4	150	200	115,2	332,2	917	384
5	150	105	177,7	271,9	886	431
$\Delta$ , %	0	31,1	24,6	10	5,7	6
$N_{it} = 10/100$						
1	100	200	107,8	209,9	729	5425
2	100	200	150,1	221,3	740	5436
3	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>109,8</b>	<b>210,7</b>	<b>717</b>	<b>5454</b>
4	100	200	97,1	209,8	733	5483
5	150	200	103,9	165,7	727	5330
$\Delta$ , %	20	0	21,4	14,4	1,6	1,4

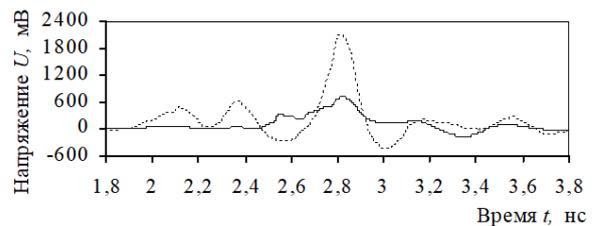


Рис. 8. Формы напряжений в подсекции 24 до (...) и в подсекции 22 после (—) оптимизации

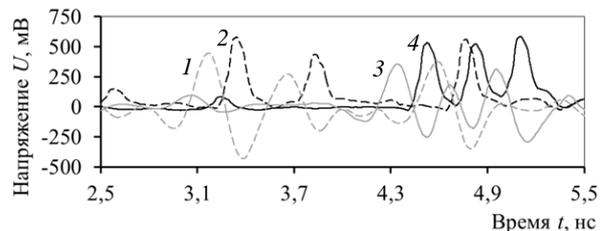


Рис. 9. Формы напряжений в узлах  $V_2$  и  $V_5$  до (1 и 3) и после (2 и 4) оптимизации



Рис. 10. Поперечное сечение МФ с оптимальным набором параметров при разных воздействиях с двух направлений

Из табл. 2 и рис. 8 видно, что из-за различия  $R$  на концах МФ (50 и 30 Ом), а также двух различных

воздействующих СКИ суперпозиция импульсов с наибольшей амплитудой смещается из подсекции 25 в 24 (до оптимизации) и 22 (после оптимизации). Так, наименьший уровень напряжения в МФ составил 2 102 мВ до оптимизации по критерию (1) и 717 мВ после (в 2,9 раза меньше). Результат получен при  $N_{it} = 10/100$ . Минимизация напряжения в МФ достигается в том числе за счет суперпозиции напряжений разной полярности, как видно из рис. 8.

Таблица 2 по аналогии с табл. 1 демонстрирует уменьшение максимального напряжения и его среднего отклонения с ростом числа вычислений. Среднее значение  $U_{max}$  в линии составило 1 167,4 мВ при  $N_{it} = 5/10$  ( $\Delta = 37,1\%$ ), 888,2 мВ при  $N_{it} = 10/10$  ( $\Delta = 5,7\%$ ) и 729,2 мВ при  $N_{it} = 10/100$  ( $\Delta = 1,6\%$ ). Уменьшение  $\Delta$  с 37,1 до 1,6% показывает улучшение сходимости. Среднее время вычислений при  $N_{it} = 10/100$  составило 5 425 с, а при  $N_{it} = 5/10$  – 282,6 с. Кроме того, заметно сохранение тенденции сходимости значений параметров  $h$  и  $t$ , аналогично с табл. 1. Также улучшается сходимость  $s_1$  (от 51,3% при  $N_{it} = 5/10$  до 21,4% при  $N_{it} = 10/100$ ). Для параметра  $s_2$  отмечается изменение диапазонов полученных результатов с увеличением  $N_{it}$  (316–433 мкм при  $N_{it} = 5/10$ , 271–333 мкм при  $N_{it} = 10/10$ , 165–222 мкм при  $N_{it} = 10/100$ ).

Из рис. 9 заметно, что минимальные значения выходных напряжений получены благодаря выравниванию импульсов мод. Так, для узла  $V_2$  (источник  $E_2$ )  $U_{max} = 446$  мВ при  $U_{bx} = 1 147$  мВ до оптимизации и  $U_{max} = 354$  мВ при  $U_{bx} = 807$  мВ после. Так, ослабление МФ составило 2,57 до и 2,28 после оптимизации (отклонение меньше 6%). Для узла  $V_5$  (источник  $E_1$ )  $U_{max} = 579$  мВ при  $U_{bx} = 2 008$  мВ до оптимизации и  $U_{max} = 585$  мВ при  $U_{bx} = 1 507$  мВ после. Ослабление составило 3,47 до и 2,57 после оптимизации (отклонение меньше 15%). Примечательно, что оптимизация по критерию минимизации максимального напряжения в МФ (с учетом 50 подсекций) также позволила получить близкие (с оптимизацией при распространении СКИ только со стороны источника  $E_1$  и минимизации максимального напряжения в узле  $V_5$ ) значения напряжений на выходе МФ.

### Заключение

Таким образом, впервые выполнена оптимизация полоскового МФ по критерию минимизации максимальной амплитуды СКИ при их распространении с двух направлений. Учет данного критерия целесообразен при распространении: помеховых сигналов, напрямую с источников или наведенных, с двух направлений, прямых и отраженных (от неоднородностей, несогласованного окончания или элементов линии передачи) помеховых сигналов и др. Оптимизируемые параметры впервые задавались не диапазонами, а дискретным набором значений за счет введения дополнительного условия на этапе создания популяции.

Показано, что воздействие одинаковых (по форме, амплитуде и длительностям) импульсов одновременно с двух направлений наиболее опасно,

поскольку создает устойчивую стоячую волну, способную значительно увеличить амплитуду сигнала (ввиду суперпозиции мод) в определенных подсекциях цепи. Однако в этом случае проще оценить место локализации суперпозиции подобных воздействий. В то же время воздействие разных (по форме, амплитуде и длительностям) импульсов может привести к смещению пиков амплитуды по длине линии передачи, что затрудняет определение мест локализации суперпозиции мод и требует при первых оценках выполнения вычислительного эксперимента для точной оценки.

Между тем возможно частичное или полное компенсирование мод в линии передачи при одновременных разных воздействиях с двух направлений. Так, при разделении МФ на 50 подсекций и одинаковых СКИ, воздействующих с двух направлений, получено минимальное значение напряжения в подсекции 25 (где происходит суперпозиция импульсов, распространяющихся с двух направлений) в 2,8 раза меньше по сравнению с результатами оптимизации по амплитудному критерию при распространении СКИ с одного направления.

При воздействии двух разных СКИ с двух направлений суперпозиция импульсов смещается из подсекции 25 в 24 (до оптимизации) и 22 (после оптимизации). В этом случае минимальное значение напряжения после оптимизации по результатам данной работы в 2,9 раза меньше, чем при учете распространения СКИ только со стороны источника  $E_1$ . Кроме того, из форм выходных напряжений видно, что результаты оптимизации при распространении СКИ с двух направлений также близки к результатам оптимизации при распространении СКИ только со стороны источника  $E_1$  (отклонение ослаблений СКИ в худшем случае не превышает 15%).

Таблицы 1, 2 демонстрируют уменьшение среднего значения  $U_{max}$  с увеличением  $N_{it}$  (от 5/10 к 10/100) в 1,84 и 1,6 раза при одинаковых и разных СКИ с двух направлений соответственно. Кроме этого, увеличивается сходимость ЦФ, что подтверждает уменьшение результатов (полученных для  $N_{it} = 5/10$  по отношению к  $N_{it} = 10/100$ )  $\Delta$  в 1,53 и 23,18 раза для исследуемых случаев, соответственно. В обоих случаях алгоритм нашел оптимальное решение при  $h = 100$  мкм и  $t = 200$  мкм, разница между оптимальными значениями  $s_1$  составила 16,75%, а между значениями  $s_2$  – 4,8%.

Между тем оптимизация, учитывающая разделение МФ на ряд подсекций, затратна по времени. Так, при анализе напряжений в одном узле за 1 000 вычислений (10 особей и 100 поколений) ГА тратит в среднем 3 232 с [12], а при данном подходе (в худшем случае) – 7 880 с (в 2,4 раза дольше) при том же числе вычислений. По этой причине необходимо подходить ответственно к выбору числа подсекций, поскольку большое число замедлит процесс расчетов, а малое – даст низкую точность. Тем не менее в результате подобного подхода удалось не только минимизировать амплитуду СКИ, распространяющихся с двух направ-

лений, в центральных подсекциях МФ, но также обеспечить эффективное ослабление помех, пришедших в конец (узлы  $V_2$  для  $E_2$  и  $V_5$  для  $E_1$ ) МФ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00578, <https://rscf.ru/project/24-29-00578/>.

#### Литература

1. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях. – Казань: Издательство Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 254 с.
2. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference / F. Hamamah, W.W. Ahmad, C. Gomes, M.M. Isa M. Homam // IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). – 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.
3. Alnamir H. Study of Low Frequency Electromagnetic Interference Problems in Hospital Environment // 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). – 2019. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ATEE.2019.8724736.
4. New electromagnetic protection devices based on filtering / Y. Fei, H. Haoquan, L. Ruiming, L. Lutong, L. Zhipeng // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). – 2017. – P. 1–3. DOI: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.
5. Transparent and hard TiO<sub>2</sub>/Au electromagnetic shielding antireflection coatings on aircraft canopy PMMA organic glass / G. Gao, Y. Huang, S. Zeng, K. Li, Y. Zhang, J. Zhu // Applied Surface Science. – 2024. – Vol. 658. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.159830.
6. M'ziou N. Electromagnetic compatibility problems of indirect lightning stroke on Overhead Power Lines // Mathematics and Computers in Simulation. – 2020. – Vol. 167. – P. 429–442. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.04.007.
7. Mora N. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 8 July 2014. – No. 41. – 92 p.
8. Ultra-Short Pulse Generation From Optical Parametric Oscillators With a Cavity-Length Detuning / J. Zhang, C. Ning, J. Heng, S. Yu, Z. Zhang // IEEE Photonics Technology Letters. – 2022. – Vol. 34, No 5. – P. 263–266. DOI: 10.1109/LPT.2022.3149528.
9. Gaynutdinov R. Studies of Electromagnetic Disturbances in Coupling Path by Application of Intentional Ultrashort Electromagnetic Pulses / R. Gaynutdinov, S. Chermoshentsev // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2019. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949973.
10. Wu Y. Research on Matrix Description of Electromagnetic Interference Between Cables / Y. Wu, X. Xu, T. Jiang // 2021 IEEE 9th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). – 2021. – P. 82–84. DOI: 10.1109/ICCSNT53786.2021.9615463.
11. 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, No 4. – P. 1136–1142. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
12. Белоусов А.О. Оптимизация помехозащитных структур с модальным разложением / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева. – Томск: Изд-во ТУСУРа. – 2023. – 136 с.
13. Белоусов А.О. Оптимизация модального фильтра на основе микрополосковой линии по частотным крите-

риям / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева, Г.Ю. Ким // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 4. – С. 219–242. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242.

14. Optical Reflection Interference Equalization for Single-Wavelength Bidirectional WDM-PON Transmission System / S. Shibita, D. Hisano, K. Maruta, Y. Nakayama, K. Mishina, A. Maruta // IEEE Photonics Journal. – 2021. – Vol. 13, No. 1. – P. 1–15. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3045049.

15. Rapp L. Performance Impact of Signal Reflections in a Single-Fiber Bidirectional System / L. Rapp, F. Azendorf, M. Eiselt // IEEE Photonics Technology Letters. – 2021. – Vol. 33, No. 24. – P. 1411–1414. DOI: 10.1109/LPT.2021.3125524.

16. Ion Electric Propulsion System Electric Breakdown Problems: Causes, Impacts and Protection Strategies / Z. Peng, Z. Li, F. Song, Y. Zhang, H. Xi, F. Liu // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 97340–97352. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312719.

17. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, А.В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Ключкин, А. Алхадж Хасан, А.Е. Максимов, А.В. Осинцев // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9–1 (119). – С. 170–178.

18. Алгоритм DFS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e-maxx.ru/algo/dfs>, свободный (дата обращения: 12.08.2024).

19. Газизов Р.Р. Функции локализации и визуализации токов и напряжений в системе TALGAT / Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин // Современное технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Т. 1. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016. – С. 100–103.

#### Гордеева Виктория Олеговна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-5732-6480  
Тел.: +7-996-938-69-67  
Эл. почта: vikki.gern@gmail.com

#### Белоусов Антон Олегович

Канд. техн. наук, докторант каф. ТУ ТУСУРа, науч. сот. центра экспертизы и испытаний Сахалинского государственного университета Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-0154-8014  
Тел.: +7-923-440-86-02  
Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

Gordeyeva V.O., Belousov A.O.

#### Optimization of modal filter design for ultrashort pulses propagation from two directions

The article is the first to consider the optimization of a strip modal filter (MF) using the criterion of minimizing the maximum amplitude of ultrashort pulses (USPs) in case of two direction propagation. The authors have implemented this by using the animated dynamic visualization submodule «DynaVis», that allows to estimate the change in the signal shape alongside the specific MF conductor. The optimization was performed using a genetic algorithm with tournament elimination at the selection stage. For the first time, during optimization, we spe-

cified a number of optimized parameters not by ranges, but by a discrete set of values at the stage of generating a new generation. The optimization process entails high computational time costs because the algorithm calculates voltage values at multiple nodes corresponding to the number of subsections (50 in this case) into which the MF is divided during optimization. As a result, the optimization achieved the lowest maximum voltage level of 159.8 mV in the central section of the MF (node 25 out of 50) under the excitation of trapezoidal USPs with an EMF of 1000 mV from sources  $E_1$  and  $E_2$ , and the 717 mV at node 22 under the excitation of USPs corresponding to IRA II with an EMF of 5647 mV ( $E_1$ ) and SINUS-160 with an EMF of 2575 mV ( $E_2$ ) generators. The obtained results were evaluated according to several criteria.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, optimization, ultra-short pulse, modal filter, genetic algorithm.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2024-27-3-48-54

### References

- Gizatullin Z.M. *Pomekhoustoichivost' sredstv vy-chislitel'noi tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnykh elektromagnitnykh vozdeystviyakh* [Immunity of computing equipment inside buildings to broadband electromagnetic influences]. Kazan, Publishing House of Kazan State Technical University, 2012, 254 p.
- Hamamah F., Ahmad W.W., Gomes C., Isa M.M., Homam M. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference. *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.
- Alnamir H. Study of Low Frequency Electromagnetic Interference Problems in Hospital Environment. *11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ATEE.2019.8724736.
- Fei Y., Haoquan H., Ruiming L., Lutong L., Zhipeng L. New electromagnetic protection devices based on filtering. *IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, 2017, pp. 1–3. DOI: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.
- Gao G., Huang Y., Zeng S., Li K., Zhang Y., Zhu J. Transparent and hard TiO<sub>2</sub>/Au electromagnetic shielding anti-reflection coatings on aircraft canopy PMMA organic glass. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 658, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.159830.
- M'ziou N. Electromagnetic compatibility problems of indirect lightning stroke on Overhead Power Lines. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, vol. 167, pp. 429–442. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.04.007.
- Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System and Assessment Notes*. Note 41, 2014, 92 p.
- Zhang J., Ning C., Heng J., Yu S., Zhang Z. Ultra-Short Pulse Generation From Optical Parametric Oscillators With a Cavity-Length Detuning. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 263–266. DOI: 10.1109/LPT.2022.3149528.
- Gaynutdinov R., Chermoshentsev S. Studies of Electromagnetic Disturbances in Coupling Path by Application of Intentional Ultrashort Electromagnetic Pulses. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949973.
- Wu Y., Xu X., Jiang T. Research on Matrix Description of Electromagnetic Interference Between Cables. *IEEE 9th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 2021, pp. 82–84. DOI: 10.1109/ICCSNT53786.2021.9615463.
- 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. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
- Belousov A.O., Gordeyeva V.O. Optimizatsiya pomekhozashchitnykh struktur s modal'nym razlozheniem [Optimization of protective structures with modal decomposition]. Tomsk, Publishing office of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2023, 136 p.
- Belousov A.O., Gordeyeva V.O., Kim G.Yu. [Optimization of a modal filter based on a microstrip line according to frequency criteria]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 219–242 (in Russ.). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242.
- Shibita S., Hisano D., Maruta K., Nakayama Y., Mishina K., Maruta A. Optical Reflection Interference Equalization for Single-Wavelength Bidirectional WDM-PON Transmission System. *IEEE Photonics Journal*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3045049.
- Rapp L., Azendorf F., Eiselt M. Performance Impact of Signal Reflections in a Single-Fiber Bidirectional System. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, vol. 33, no. 24, pp. 1411–1414. DOI: 10.1109/LPT.2021.3125524.
- Peng Z., Li Z., Song F., Zhang Y., Xi H., Liu F. Ion Electric Propulsion System Electric Breakdown Problems: Causes, Impacts and Protection Strategies. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 97340–97352. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312719.
- Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Kvasnikov A.A., Demakov A.V., Ivanov A.A., Klyukin D.V., Alkhadz Hasan A., Maksimov A.E., Osintsev A.V. [Development of software for modeling radio-electronic means taking into account electromagnetic compatibility at TUSUR]. *Nanoindustry*, 2023, vol. 16, no. S9–1(119), pp. 170–178.
- DFS Algorithm. Available at: <http://e-maxx.ru/ algo/dfs>, free (accessed: August 12, 2024) (in Russ.).
- Gazizov R.R., Lezhnin E.V. [Functions of localization and visualization of currents and voltages in the TALGAT system]. *Modern technologies in science and education – STNO-2016 [text]: collection of works of the intern. Sci.-tech. and sci.-method. conf.*, in 4 volumes. vol. 1, under the general editorship of O.V. Milovzorov, Ryazan, Ryazan State Radiotechnical University, 2016, pp. 100–103.

### Viktoriya O. Gordeyeva

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-5732-6480  
Phone: +7-996-938-69-67  
Email: vikki.gern@gmail.com

### Anton O. Belousov

Candidate of Sciences in Engineering, Doctoral Student, Department of Television and Control, TUSUR  
Researcher, Center for Expertise and Testing at Sakhalin State University.  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-0154-8014  
Phone: +7-923-440-86-02  
Email: ant1lafleur@gmail.com