

А.О. БЕЛОУСОВ, аспирант, ТУСУР, Томск  
Е.Б. ЧЕРНИКОВА, магистрант, ТУСУР, Томск  
А.М. ЗАБОЛОЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ТУСУР, Томск

### **ТРЕХКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КАК РЕСУРС ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА**

Рассматривается параметрическая оптимизация эвристическим поиском для совершенствования защиты от сверхкороткого импульса за счет использования зеркально-симметричных модальных фильтров. Выполнена оптимизация двух параметров четырех зеркально-симметричных модальных фильтров одновременно по трем критериям для сигнала на выходе: минимизация напряжения, выравнивание временных интервалов между импульсами и согласование с трактом 50 Ом.

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) имеет не только широкие функциональные возможности, но и повышенную восприимчивость к электромагнитным помехам. Для защиты РЭА от сверхкороткого импульса (СКИ) предложена технология модальной фильтрации, основанная на явлении модального разложения импульса на импульсы меньшей амплитуды [1]. В работе [2] выполнена оптимизация параметров четырех структур зеркально-симметричного модального фильтра (МФ) отдельно по двум критериям: выравнивание амплитуд импульсов на выходе МФ и выравнивание разностей задержек импульсов разложения.

Между тем в работе [2] осталась без внимания согласованность тракта и оптимизация выполнялась по каждому из критериев отдельно, а не одновременно. Таким образом, целесообразно выполнить оптимизацию одновременно по трем критериям для использования дополнительных ресурсов улучшения характеристик зеркально-симметричного МФ.

Поперечные сечения исследуемых структур представлены на рисунке 1.

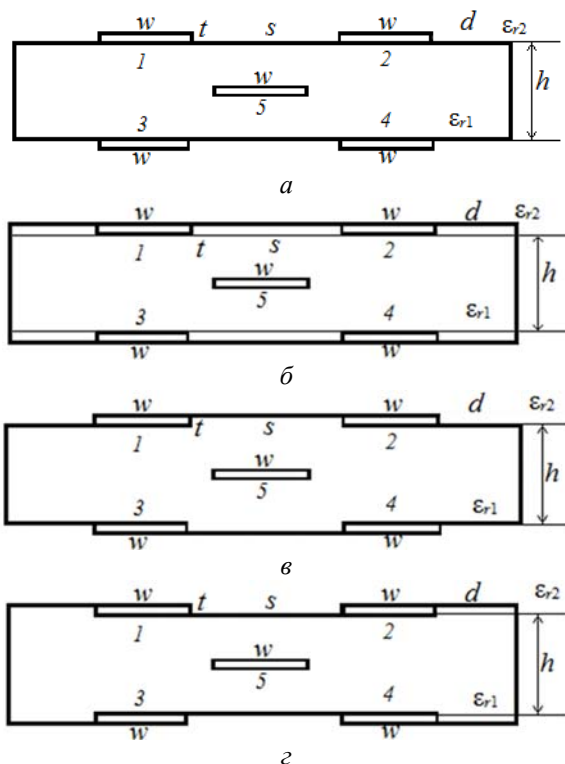
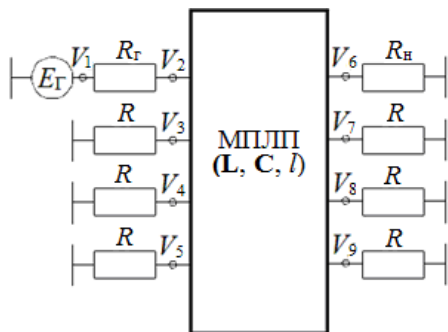


Рисунок 1. Поперечные сечения зеркально-симметричных МФ:  
1 (а); 2 (б); 3 (в); 4 (г)

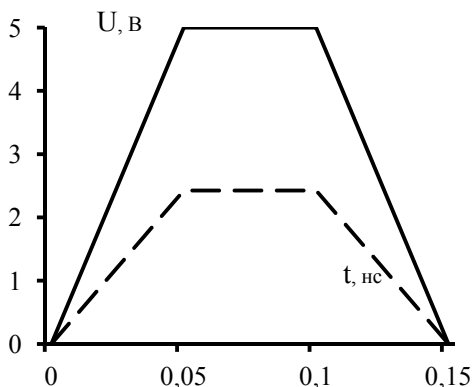
Компьютерное моделирование параметров линий и форм сигнала выполнялось в системе TALGAT [3]. Допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяется только Т-волна. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались, чтобы устранить их влияние. Принципиальная электрическая схема четырехпроводного зеркально-симметричного МФ представлена на рисунке 2,а, а форма входного сигнала – на рисунке 2,б.

Оптимизировались расстояние между проводниками  $s$  и ширина проводников  $w$  в диапазоне 200–2000 мкм. Толщина фольги  $t=18$  мкм и толщина диэлектрика  $h=500$  мкм не менялись при оптимизации, так же как и значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r=4,5$ . Длина линии  $l=1$  м. Значения сопротивле-

ний резисторов  $R_{Г}$ ,  $R_{Н}$ ,  $R$  выбраны равными 50 Ом, а источник импульсных сигналов представлен идеальным источником ЭДС с общей длительностью воздействующего импульса  $t_{\Sigma} = 150$  пс и амплитудой 5 В (см. рисунок 2,б).



а



б

Рисунок 2. Принципиальная электрическая схема для моделирования (а) и формы исходной ЭДС (—) и сигнала на входе МФ (---) (б)

Оптимизация проводилась по трем критериям: минимизация максимального напряжения  $\max(U)$  на выходе МФ, выравнивание временных интервалов между импульсами разложения  $\Delta\tau_i$ , обеспечение согласования с трактом 50 Ом. Для достижения согласования использовалось условие равенства амплитуды

сигнала в начале линии  $V_2$  половине ЭДС источника сигнала  $V_1$  [4]. Данное условие выполнялось для всех четырех зеркально-симметричных МФ. Результаты оптимизации представлены на рисунке 3 и в таблице.

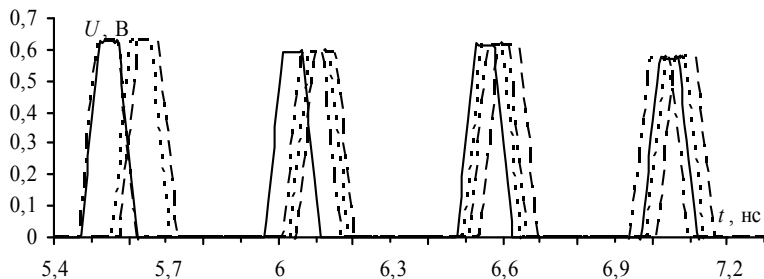


Рисунок 3. Формы сигналов на выходе структур:  
1 (—); 2 (---); 3 (···); 4 (- · - · -)

#### Результаты трехкритериальной оптимизации

Структура	$w$ , мкм	$s$ , мкм	$\max(U)$ , В	$\Delta\tau_{is}$ , нс/м
1	1600	510	0,625	0,49; 0,49; 0,49
2	1600	488	0,625	0,47; 0,49; 0,47
3	1600	567	0,625	0,48; 0,46; 0,47
4	1600	580	0,625	0,43; 0,49; 0,54

Из таблицы видно, что в процессе оптимизации наилучшие результаты удалось достичь в структуре 1, поскольку в ней удовлетворяются все три критерия оптимизации: получены выравненные временные интервалы между импульсами разложения, а также минимально возможный уровень напряжения в конце активного проводника при согласовании МФ. Таким образом, данный зеркально-симметричный МФ может разложить СКИ длительностью до 150 пс с коэффициентом ослабления 4 раза.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.*

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Теоретические основы модальной фильтрации // Техника радиосвязи. 2014. № 3. С. 79–83.

2. Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Заболоцкий А.М. Параметрическая оптимизация зеркально-симметричных полосковых модальных фильтров по двум критериям // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, Россия, 4–5 мая 2017 г. С. 3–6.

3. 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.

4. Belousov A.O., Gazizov T.T., Gazizov T.R. Multicriteria optimization of four-conductor modal filter by genetic algorithms // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Russia, Novosibirsk. Sep 18 – Sep 22 2017. P. 445–448.

A.O. Belousov, E.B. Chernikova, A.M. Zabolotsky

#### **Three-criteria simultaneous optimization as a resource for improving of a reflection symmetric modal filter**

The parametric optimization by heuristical search for improvement of the protection against ultrashort pulse using reflection symmetric modal filters is considered. The optimization of two parameters of four reflection symmetric modal filters are optimized simultaneously according to three criteria for the output signal: minimizing the output voltage; equalize time intervals between the output pulses and alignment with 50  $\Omega$  path.

ant1lafleur@gmail.com