

УДК 621.391.825

**ОПТИМИЗАЦИЯ АСИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ЛИЦЕВОЙ СВЯЗЬЮ  
ПО АМПЛИТУДНОМУ КРИТЕРИЮ С УЧЕТОМ КОМБИНАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ**

А.С. Сарыглар, Е.Б. Черникова

Научный руководитель: к.т.н. Е.Б. Черникова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

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

E-mail: [aizasaryglar02@gmail.com](mailto:aizasaryglar02@gmail.com)

**OPTIMIZATION OF ASYMMETRIC MODAL FILTER WITH BROAD-SIDE COUPLING  
BY THE AMPLITUDE CRITERION TAKING INTO ACCOUNT COMBINATIONAL PULSES**

A.S. Saryglar, E.B. Chernikova

Scientific Supervisor: PhD. E.B. Chernikova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk, Lenin str., 40, 634050

E-mail: [aizasaryglar02@gmail.com](mailto:aizasaryglar02@gmail.com)

***Abstract.** The paper presents the results of cross section parameter optimization of asymmetric modal filter with broad-side coupling. At the near end of the passive conductor of the investigated MF is open circuit, and at the far end is short circuit. The maximum amplitude in this structures is determined by the amplitude of the combinational pulses (the delays of which consist of a combination of modal delays). Therefore, the optimization was performed according to the amplitude criterion, taking into account the combinational pulses. The obtained parameters allow to minimize the maximum amplitude at the MF output.*

**Введение.** В последние годы использование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и приборов становится все более актуальным и распространенным в различных сферах. Важной проблемой, возникающей в условиях эксплуатации большого количества РЭА, становится необходимость обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Главной задачей ЭМС является обеспечение помехозащищенности РЭА. Помехи, проникающие в РЭА непосредственно по проводникам, например, через сигнальные проводники или через цепи питания, называются кондуктивными [1]. Одним из опасных видов кондуктивных помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [2]. Для защиты от воздействия СКИ разрабатываются устройства, названные модальными фильтрами (МФ).

В [3] анализируется асимметричный МФ с лицевой связью, во временном отклике которого обнаружены импульсы с задержками не кратными погонным. В [4] получено, что такие импульсы состоят из комбинаций погонных задержек мод. Однако оптимизации структур с учетом комбинационных импульсов ранее не выполнялось. Цель работы – выполнить оптимизацию асимметричного МФ с лицевой связью по критерию минимизации максимальной амплитуды с учетом комбинационных импульсов.

**Экспериментальная часть.** Поперечное сечение асимметричного МФ показано на рис. 1а. Исходные значения параметров:  $w = 15$  мм,  $t = 0,105$  мм,  $s = 15$  мм,  $h = 6$  мм,  $\epsilon_r = 4$ . Схема соединения представлена на рис. 1б. Результаты получены для схемы с согласованными нагрузками (значения резисторов равны среднему геометрическому значению волновых сопротивлений четной ( $Z_e$ ) и нечетной

( $Z_0$ ) мод) в начале и конце активного проводника, и холостой ход (XX) в начале и короткое замыкание (КЗ) в конце пассивного проводника.

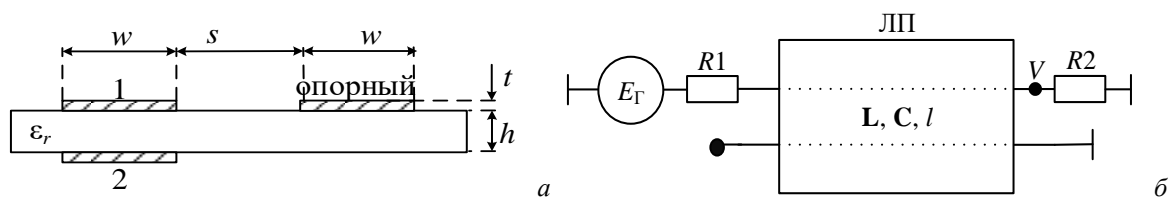


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединения (б) асимметричного МФ с лицевой связью

**Результаты.** Оптимизация выполнялась по критерию минимизации максимальной амплитуды с учетом комбинационных импульсов. Для этой цели использовался простой генетический алгоритм (ГА), реализованный в ПО TALGAT. Для достижения амплитудного критерия использовалась целевая функция, которая будет подвергаться минимизации. Оптимизация выполнялась при двух наборах параметров ГА: в первом случае число особей ( $n$ ) – 10; количество поколений ( $m$ ) – 50; коэффициент мутации – 0,1; коэффициент кроссовера – 0,5; число бит для кодирования каждого параметра – 16, а во втором случае,  $n$  – 20;  $m$  – 50. При оптимизации выполнялось 5 запусков ГА. В табл. 1 представлены результаты оптимизации при  $n=10$ ,  $m=50$ , а также значения  $U_{max}$  и общее время расчета, а в табл. 2 при  $n = 20$ ,  $m = 50$ . Диапазоны оптимизируемых параметров:  $w$  – от 1 до 5 мм;  $s$  – от 1 до 5 мм;  $h$  – от 0,1 до 0,5 мм. Лучшие результаты выделены полужирным.

Таблица 1

Результаты оптимизации асимметричного МФ с лицевой связью при  $n = 10$ ,  $m = 50$

№ запуска ГА	$w$ , мм	$s$ , мм	$h$ , мм	$U_{max}$ , В	Время, с
1	1,92235	0,946667	0,10549	0,0580028	2598,98
2	1,80941	1,0	0,11098	0,0608248	2655,87
3	1,70353	0,868235	0,1	0,0605212	2822,49
4	1,95059	0,77098	0,1	0,058828	2883,95
<b>5</b>	<b>1,97176</b>	<b>0,968628</b>	<b>0,10549</b>	<b>0,0571607</b>	<b>3131,66</b>
Отклонение, %	4,3	8,0	3,4	2,2	5,4

Таблица 2

Результаты оптимизации асимметричного МФ с лицевой связью при  $n = 20$ ,  $m = 50$

№ запуска ГА	$w$ , мм	$s$ , мм	$h$ , мм	$U_{max}$ , В	Время, с
1	1,99294	0,971765	0,1	0,0547014	14509,8
2	2,0	0,990588	0,1	0,0545177	14225
3	1,96471	0,978039	0,1	0,0547744	14767,8
<b>4</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0543533</b>	<b>15195,1</b>
5	2,0	0,996863	0,1	0,0544178	14099,3
Отклонение, %	0,5	1,0	0	0,3	2,3

В результате, для  $n = 10$ ,  $m = 50$  оптимальные параметры, при которых значение  $U_{max}$  минимально ( $U_{max} = 57$  мВ) получены при запуске 5:  $w = 1,97176$  мм;  $s = 0,968628$  мм;  $h = 0,10549$  мм. Оптимизация с увеличенным числом особей ( $n = 20$ ,  $m = 50$ ) позволила получить более точные значения параметров, при которых  $U_{max} = 54$  мВ (запуск 4):  $w = 2$  мм;  $s = 1$  мм;  $h = 0,1$  мм. В итоге, получено, что увеличение числа особей и поколений позволило получить наилучший вариант, при котором значение  $U_{max}$  на выходе

МФ минимальна. Стоит отметить, что значение  $U_{max}$  определяется амплитудой комбинационных импульсов. На рис. 2 представлен временной отклик, полученный с наилучшим вариантом параметров.

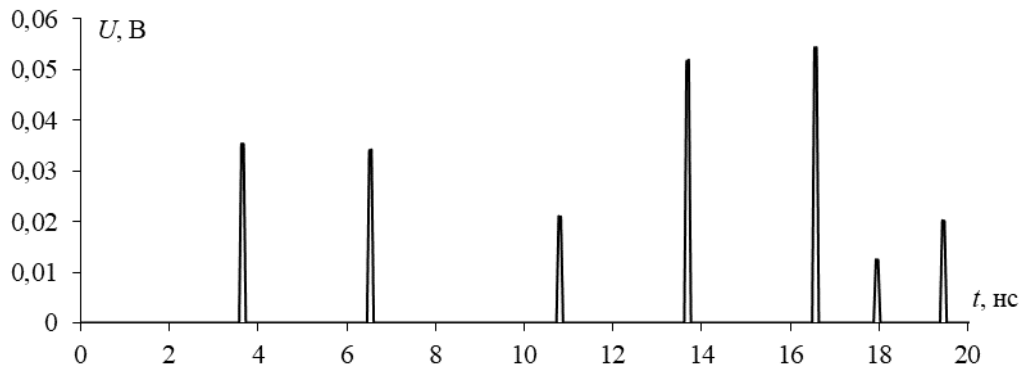


Рис. 2. Форма напряжения на выходе асимметричного МФ с лицевой связью с оптимизированными параметрами

Таким образом, выполнена параметрическая оптимизация асимметричного МФ с лицевой связью по амплитудному критерию с учетом комбинационных импульсов. В результате, получены параметры  $w=2,0$  мм;  $s=1,0$  мм;  $h=0,1$  мм, позволяющие минимизировать максимальную амплитуду на выходе МФ с учетом комбинационных импульсов до 54 мВ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00424. <https://rscf.ru/project/19-19-00424/> в ТУСУРе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gizatullin, Z.M., Gizatullin, R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // J. of Communications Technology and Electronics. – 2016. - № 5. – P. 546-550. doi: 10.1134/S1064226916050053.
2. Mora, N., Vega, F., Lugin, G., Rachidi, F., Rubinstein, M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – 2014. – № 41. – P.1-93.
3. Gazizov, A.T., Zabolotsky, A.M., Gazizov, T.T. Time-domain response of asymmetrical modal filter without resistors to ultrashort pulse excitation // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – 2016. – P. 85-88.
4. Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A., Medvedev A.V., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration // Symmetry. – 2019. – Vol. 11(7), № 883. – P. 1-38