

45. Rubinstein A. On wire-grid representation of solid metallic surfaces / A. Rubinstein, F. Rachidi, M. Rubinstein // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2005 – Vol. 47, No. 1. – PP. 192–195. DOI: 10.1109/TEMC.2004.838230.

46. Peng J. NEC and ESP codes: guidelines, limitations, and EMC applications / J. Peng, C.A. Balanis, G.C. Barber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1993. – Vol. 35, No. 2. – PP. 124–133. DOI: 10.1109/15.229428.

УДК 621.391.825

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

*А.С. Сарыглар, студент; Е.Б. Черникова, ассистент, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, aizasaryglar02@gmail.com*

Рассматривалась структура асимметричного модального фильтра (МФ) с лицевой связью и асимметрией оконечных нагрузок на пассивном проводнике, во временном отклике которого наблюдаются комбинационные импульсы. Впервые представлены результаты оптимизации параметров поперечного сечения МФ по временному критерию с учетом данных импульсов. Полученные параметры позволяют выравнять временные интервалы между всеми (в том числе комбинационными) импульсами разложения.

**Ключевые слова:** линии передачи, модальный фильтр, асимметричные структуры, временные интервалы, комбинационные импульсы.

В настоящее время разработка радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) развивается высокими темпами и находит широкое применение в самых различных сферах: наука, техника, медицина и др. Применение РЭА в различных отраслях, в том числе в системах радиосвязей, телерадиовещания и радиолокации приводит к обострению проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за уязвимости аппаратуры к электромагнитным помехам. Помехи подразделяются, в зависимости от пути распространения, на излучаемые и кондуктивные. Кондуктивные помехи опасны тем, что проникают в РЭА непосредственно по проводникам, например, по сигнальным проводникам или через цепи питания [1]. Однако существуют кондуктивные помехи, длительность которых находится в наносекундном и субнаносекундном диапазонах. Такие помехи называются сверхкороткими импульсами (СКИ) [2, 3]. Для защиты от такого рода помех разрабатываются устройства, названные модальными фильтрами (МФ).

В [4] анализируется асимметричный МФ с лицевой связью, во временном отклике которого обнаружены импульсы с задержками, не кратными погонным. В [5] получено, что такие импульсы состоят из комбинаций погонных задержек мод и называются дополнительными (комбинационными) импульсами. Однако оптимизации структур с учетом комбинационных импульсов ранее не выполнялось. Цель работы – выполнить оптимизацию асимметричного МФ с лицевой связью по критерию выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения, в том числе между комбинационными.

**Структура и схема для исследования.** Поперечное сечение асимметричного МФ с лицевой связью показано на рис. 1, а. Оптимизируемые параметры:  $w$ ,  $s$ ,  $h$ , а фиксированные:  $t = 0,105$  мм,  $\epsilon_r = 4$ . Диапазоны оптимизируемых параметров:  $w$  – от 1 до 5 мм,  $s$  – от 1 до 5 мм,  $h$  – от 0,1 до 0,5 мм. Схема соединения представлена на рис. 1, б. Результаты получены для схемы с согласованными нагрузками (значения резисторов равны среднему геометрическому значению волновых сопротивлений четной и нечетной мод) в начале и конце активного проводника, и холостого хода в начале и короткого замыкания в конце пассивного проводника.

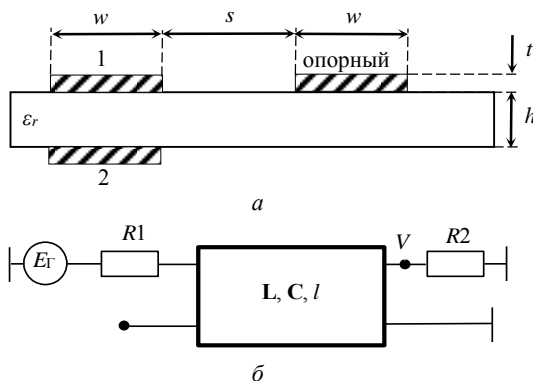


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединения (б) асимметричного МФ с лицевой связью

**Результаты оптимизации.** Оптимизация выполнялась по критерию выравнивания временных интервалов между всеми (в том числе комбинационными) импульсами разложения. Для этого использовался простой генетический алгоритм (ГА), реализованный в ПО TALGAT. В качестве целевой функции использовалось условие равенства временных интервалов в структуре с лицевой связью, которое подразумевает, что задержка четной моды была в 2 раза больше нечетной.

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 – 10, а во втором случае  $n = 20$ ;  $m = 100$ . При оптимизации выполнялось по 5 запусков ГА. В таблице представлены результаты оптимизации при  $n = 10$ ,  $m = 50$ , и при  $n = 20$ ,  $m = 100$ , а также результаты выполнения равенства интервалов и общее время расчета. Лучшие результаты выделены.

**Результаты оптимизации асимметричного МФ с лицевой связью**

№ запуска ГА	1	2	3	4	5	Отклонение, %
	при $n = 10, m = 50$					
$w$ , мм	4,98431	5,0	4,98431	4,95294	<b>4,98431</b>	0,23
$s$ , мм	5,0	4,84314	4,93725	4,87451	<b>4,82745</b>	1,18
$h$ , мм	0,10161	0,10322	0,10161	0,10161	<b>0,1</b>	0,63
$\Delta t_1$ , нс	3,14866	3,14431	3,14817	3,14537	<b>3,14983</b>	0,06
$\Delta t_2$ , нс	3,68778	3,69867	3,68778	3,69329	<b>3,6866</b>	0,11
$\Delta t_3$ , нс	3,145	3,145	3,15	3,145	<b>3,15</b>	0,07
$\Delta t_4$ , нс	3,155	3,14	3,145	3,145	<b>3,15</b>	0,14
Время, с	4485,4	4330,63	4389,27	4625,58	<b>4567,22</b>	2,14
	при $n = 20, m = 100$					
$w$ , мм	5,0	<b>4,98431</b>	4,96863	4,96863	4,98431	0,2
$s$ , мм	4,79608	<b>4,70196</b>	4,74902	4,85882	4,96863	1,64
$h$ , мм	0,1	<b>0,1</b>	0,1016	0,1	0,1	0,51
$\Delta t_1$ , нс	3,14899	<b>3,1488</b>	3,14547	3,14894	3,15095	0,04
$\Delta t_2$ , нс	3,68631	<b>3,6866</b>	3,68803	3,68685	3,6816	0,05
$\Delta t_3$ , нс	3,15	<b>3,15</b>	3,15	3,1499	3,15	0,001
$\Delta t_4$ , нс	3,15	<b>3,15</b>	3,15	3,1501	3,15	0,001
Время, с	14307,6	<b>13912,5</b>	13933,5	14956,1	13973,1	2,34

Оптимальные параметры, при которых  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  и  $\Delta t_4$  равны при  $n = 10$ ,  $m = 50$ , – это запуск 5:  $w = 4,98431$  мм;  $s = 4,82745$  мм;  $h = 0,1$  мм, а при  $n = 20$ ,  $m = 100$  – запуск 2:  $w = 4,98431$  мм;  $s = 4,70196$  мм;  $h = 0,1$  мм. Анализ сходимости результатов при двух наборах параметров ГА показал, что оптимальные параметры могут быть получены и с малым числом особей и поколений. Это объясняется спецификой структуры и точным подбором диапазонов оптимизируемых параметров. На рис. 2 представлен временной отклик, полученный с наилучшим вариантом параметров при  $n = 20$ ,  $m = 10$ . Из него видно, что временные интервалы между всеми импульсами выравнены.

Таким образом, выполнена параметрическая оптимизация асимметричного МФ с лицевой связью по временному критерию с учетом

комбинационных импульсов. Получены параметры:  $w = 4,98431$  мм;  $s = 4,70196$  мм;  $h = 0,1$  мм, позволяющие выравнять временные интервалы между всеми импульсами разложения.

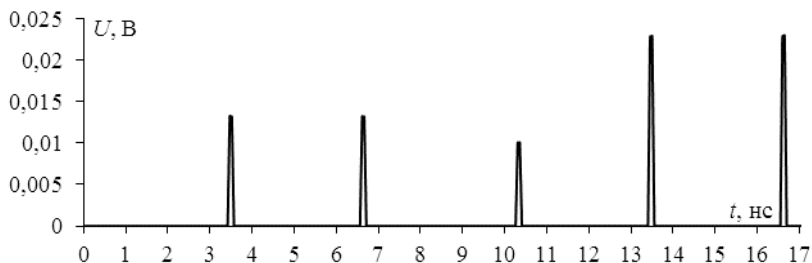


Рис. 2. Форма напряжения на выходе асимметричного МФ с лицевой связью после оптимизации при  $n=20$  и  $m=100$

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gizatullin R.M., Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / J. of Communications Technology and Electronics. – 2016. – No 5. – PP. 546–550. DOI: 10.1134/S1064226916050053.
2. Mora N. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F.Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 2014. – No. 41.
3. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing / T. Weber, R. Krzikalla, J.L. Ter Haseborg, F. Sabath // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 46. – PP. 423–430. DOI: 10.1109/TEMC.2004.831887.
4. Gazizov A.T. Time-domain response of asymmetrical modal filter without resistors to ultrashort pulse excitation / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – 2016. – PP. 85–88.
5. Belousov A.O. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, A.V. Medvedev, A.V. Novosov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2019. – Vol. 11(7), No. 883. – PP. 1–38.