

2. *Веселов Г.И.* Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 280 с.

3. *Кропотов В.В., Газизов Т.Т.* Конструктив блока модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T // Научная сессия ТУСУР–2016: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 мая 2016 г.: в 6 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 310–313.

4. *CST – Computer Simulation Technology* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cst.com> (дата обращения: 01.09.2016).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПО ДВУМ КРИТЕРИЯМ

*Е.Б. Черникова, студентка; А.О. Белоусов, магистрант  
Томск, ТУСУР, каф. ТУ, [chiernikova96@mail.ru](mailto:chiernikova96@mail.ru)*

Для защиты радиоэлектронной аппаратуры от мощного сверхкороткого импульса (СКИ) [1] предложена технология модальной фильтрации [2], основанная на использовании явления модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод. В [3] исследована зеркально-симметричная структура для реализации модальных фильтров (МФ). Однако оптимизация параметров для этой структуры не проводилась. Кроме того, в работе [3] использовались 8 резисторов с сопротивлением 92 Ом, по значению главной диагонали матрицы характеристического импеданса. Однако в настоящее время широко используется тракт 50 Ом. Таким образом, возникает необходимость оптимизации параметров данной структуры в тракте 50 Ом.

Цель работы – выполнить оптимизацию параметров зеркально-симметричного МФ в тракте 50 Ом.

Поперечное сечение зеркально-симметричной структуры приведено на рис. 1, а принципиальная электрическая схема – на рис. 2 а.

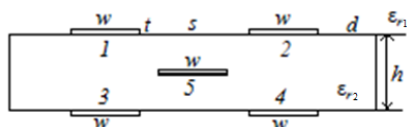


Рис. 1. Поперечное сечение зеркально-симметричной структуры

Вычисление параметров линии и форм сигнала выполнялось в программном продукте TALGAT [4]. Исходные параметры зеркально-симметричной структуры: ширина проводников  $w = 300$  мкм, расстояния между проводниками  $s = 400$  мкм, толщина проводников

$t = 105$  мкм, толщина диэлектрика  $h = 290$  мкм, относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_{r1} = 1$ , а диэлектрика –  $\epsilon_{r2} = 4,5$  при длине проводников  $l = 1$  м. Значения сопротивлений резисторов  $R_1 = R_n = R$  выбраны равными 92 Ом, а источник импульсных сигналов представлен идеальным источником ЭДС (длительности фронта, спада и плоской вершины выбраны равными по 50 пс, так что  $t_2 = 150$  пс, а амплитуда – 5 В). Формы сигналов на входе и выходе активного проводника приведены на рис. 3.

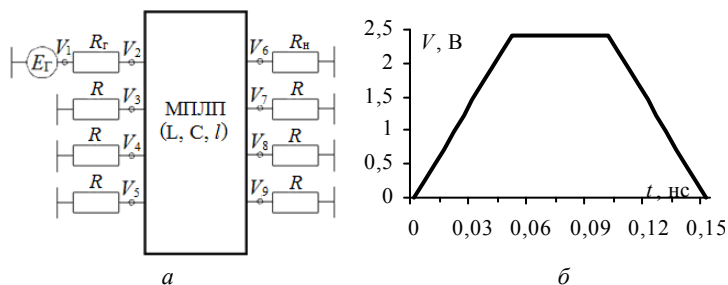


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема для моделирования (а) и форма сигнала на входе (б)

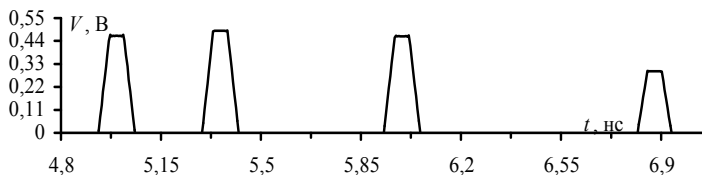


Рис. 3. Форма сигнала на выходе активного проводника при  $s = 400$  мкм,  $w = 300$  мкм

Из рис. 3 следует, что значения амплитуд импульсов на выходе активного проводника равны 0,466; 0,49; 0,466 и 0,296 В. Разности задержек соседних импульсов равны 0,3628; 0,6355 и 0,8837 нс.

Далее представлены результаты оптимизации эмпирическим поиском параметров на основе двух критериев. Оптимизация выполнялась по параметрам  $s$  и  $w$  в диапазоне 250–2000 мкм. Были выбраны значения параметров  $t = 18$  мкм,  $h = 500$  мкм, которые не менялись при оптимизации, как и значение  $\epsilon_r$ . В результате получены значения, позволяющие выравнять амплитуды импульсов разложения:  $w = 1600$  мкм,  $s = 250$  мкм, а также интервалы времени между импульсами разложения:  $w = 1600$  мкм,  $s = 500$  мкм (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что амплитуды импульсов на выходе активного проводника равны 0,622; 0,583; 0,622 и 0,58 В. В результате выравнивания амплитуд импульсов разложения увеличивается их амплитуда (по сравнению с рис. 3), что снижает коэффициент ослабления МФ. Между тем интервалы времени между импульсами выравниваются и точные разности задержек соседних импульсов равны 0,4852; 0,5191 и 0,4971 нс. Однако амплитуды импульсов почти одинаковы 0,62; 0,58; 0,61 и 0,57 В.

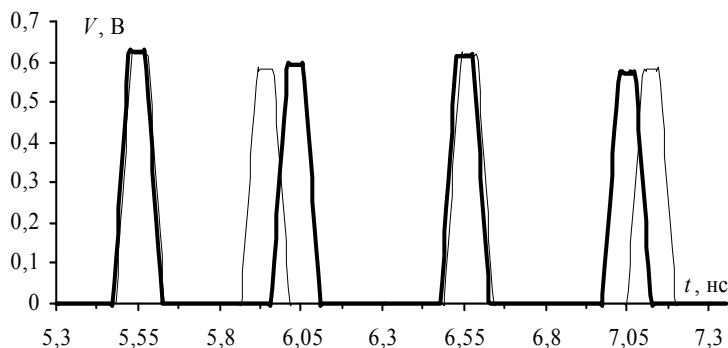


Рис. 4. Форма сигнала на выходе активного проводника при  $w = 1600$  мкм,  $s = 250$  мкм (—) и  $w = 1600$  мкм,  $s = 500$  мкм (---)

В результате при  $w = 1600$  мкм,  $s = 500$  мкм зеркально-симметричный МФ длиной  $l = 1$  м может разложить сигнал длительностью до  $t_{\Sigma} = 485$  пс при коэффициенте ослабления в 4 раза.

Математическое моделирование МФ выполнено за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки Российской Федерации. Численный эксперимент проведен за счет гранта РФФ 14-19-01232 в ТУСУРе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M.* Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – Note 41, 2014.
2. *Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R.* UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, № 4. – PP. 1136–1142.
3. *Заболоцкий А.М.* Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2015.
4. *Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. et al.* New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments // Advances in Intelligent Systems Research // Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). August 23–24, 2015, Phuket, Thailand. – PP. 293–301.