

Алгоритм для сравнения программно реализован и апробирован в программных продуктах MathCad и TALGAT [2]. Для этого из примера в [1] взяты следующие исходные данные:  $r_w = 0,5$  мм,  $s = 5$  мм,  $h = 50$  мм. При аналитическом вычислении индуктивностей получены значения: собственные –  $1,659 \cdot 10^{-6}$  Гн/м, взаимные –  $1,198 \cdot 10^{-6}$  Гн/м, а волновое сопротивление ДМ – 276,31 Ом. По геометрической модели поперечного сечения, построенной в TALGAT, рассчитаны собственные и взаимные индуктивности при различной сегментации до сходимости: собственные –  $1,057 \cdot 10^{-6}$  Гн/м, а взаимные –  $6,204 \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Различие для собственных индуктивностей составило около  $\pm 22\%$ , а для взаимных – около  $\pm 32\%$ . Значительное различие может быть связано с тем, что при аналитическом решении используются приближенные формулы (2), не учитывающие эффекта близости проводников при сильной связи. Поэтому в случае сильной связи проводников ДЛ может быть целесообразнее применять на аналитические формулы, а численные методы, например метод моментов, – в TALGAT. Что касается напряжения и тока вдоль линии в воздухе, то для согласованного случая без потерь их амплитуды оказываются не зависящими от частоты и координаты. Так что их вычисление оказывается тривиальным. Между тем для более общих случаев всё будет несколько сложнее. Их предполагается рассмотреть в будущем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Grassi F. Effects of undesired asymmetries and nonuniformities in differential lines / F. Grassi, P. Manfredi, X. Liuy et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – October 2017. – Vol. 59, No. 5. – P. 1613–1624.
2. НИЛ «БЭМС РЭС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://talgat.org/> (дата обращения: 20.02.2018).

#### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОГОННЫХ ЗАДЕРЖЕК МОД ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

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

В настоящее время наблюдается массовое внедрение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) практически во все отрасли жизнедеятельности человека, в том числе военную, атомную, космическую, промышленную. Как результат, возникает необходимость решения вопросов по защите РЭА от электромагнитных помех. Для защиты РЭА от сверхкороткого импульса (СКИ) предложена технология модаль-

ной фильтрации, основанная на модальном разложении воздействующего импульса на импульсы меньшей амплитуды [1]. Предложен новый подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет зеркальной симметрии модального фильтра (МФ). Выполнена оптимизация зеркально-симметричного МФ по нескольким критериям: минимизация максимальной амплитуды на выходе МФ; согласование с трактом 50 Ом и выравнивание временных интервалов между импульсами разложения [2]. Последний критерий достигается за счет вычисления матрицы погонных задержек с помощью встроенного модуля в системе TALGAT [3]. Однако представляется возможным вычисление матрицы погонных задержек другим способом – с использованием аналитических выражений. Между тем формулировка задачи в таком виде ранее не выполнялась. Цель работы – выполнить такое исследование.

В [4] представлены аналитические выражения (1)–(2) для расчета погонных задержек применительно к четырехпроводной линии передачи:

$$\gamma_{1,2} = \frac{1}{2} \left( A_{11} + A_{14} + A_{22} + A_{23} \pm \sqrt{(A_{11} + A_{14} - A_{22} - A_{23})^2 + 4(A_{12} + A_{13})(A_{21} + A_{31})} \right), \quad (1)$$

$$\gamma_{3,4} = \frac{1}{2} \left( -A_{11} + A_{14} + A_{22} - A_{23} \pm \sqrt{(A_{11} - A_{14} - A_{22} + A_{23})^2 + 4(A_{12} - A_{13})(A_{21} - A_{31})} \right), \quad (2)$$

где  $A_{ii}$  – матрица, элементы которой вычисляются с помощью умножения соответствующих элементов матриц погонных коэффициентов электростатической ( $C$ ) и электромагнитной ( $L$ ) индукций.

Выражения (1)–(2) были использованы при моделировании зеркально-симметричного МФ. Для наглядности вычисляется временной отклик на импульсное воздействие трапецеидального сигнала с общей длительностью  $t_{\Sigma} = 150$  пс и амплитудой 5 В, значения сопротивлений резисторов  $R_{\Gamma}$ ,  $R_{H}$ ,  $R$  выбраны равными 50 Ом. Допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяется только Т-волна. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались, чтобы устранить их влияние на данном этапе исследования. МФ моделировался при следующих параметрах: расстояние между проводниками  $s = 510$  мкм, ширина проводников  $w = 1600$  мкм, толщина проводников  $t = 18$  мкм, толщина диэлектрика  $h = 500$  мкм, относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_{r2} = 1$ , а диэлектрика –  $\epsilon_{r1} = 4,5$  при длине линии  $l = 1$  м. Поперечное сечение зеркально-симметричной структуры представлено на рис. 1, а, а принципиальная электрическая схема – на рис. 1, б.

Результаты вычисления погонных задержек с использованием модуля системы TALGAT и при помощи аналитических выражений приведены в таблице.

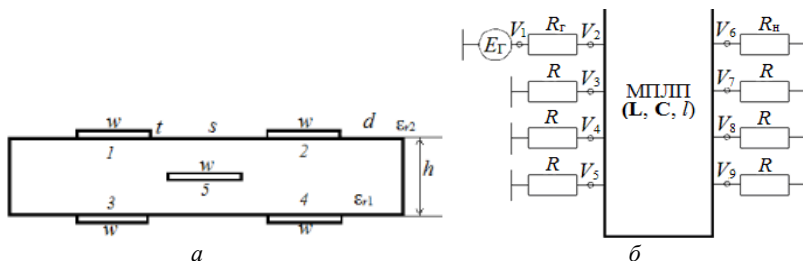


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и принципиальная электрическая схема (б) зеркально-симметричного МФ

### Сравнение результатов вычисления матрицы погонной задержки

Погонная задержка $i$ -го импульса	TALGAT, нс	Аналитические выражения, нс
1	5,46988	5,46988
2	5,95914	5,95914
3	6,47467	6,47467
4	6,96879	6,96879

Из таблицы видно, что значения погонных задержек, полученных с помощью модуля системы TALGAT и при помощи аналитических выражений, полностью совпадает.

На рис. 2 представлена форма сигнала на выходе активного проводника зеркально-симметричного МФ.

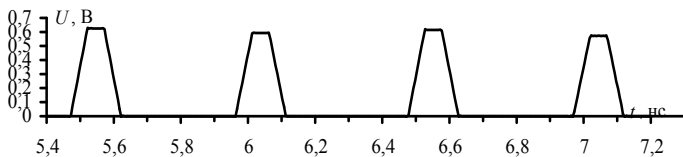


Рис. 2. Форма сигнала на выходе активного проводника

Из рис. 2 видно, что погонные задержки импульсов совпадают со значениями, приведенными в таблице. Отметим, что для зеркально-симметричного МФ можно использовать аналитические выражения в сокращенном виде (3)–(4), поскольку диагональные и взаимные элементы матрицы погонных задержек одинаковы:

$$\gamma_1 = \sqrt{(A_{11} + A_{14} + A_{12} + A_{13})}, \quad \gamma_2 = \sqrt{(A_{11} + A_{14} - A_{12} - A_{13})}, \quad (3)$$

$$\gamma_3 = \sqrt{(A_{11} - A_{14} + A_{12} - A_{13})}, \quad \gamma_4 = \sqrt{(A_{11} - A_{14} - A_{12} + A_{13})}. \quad (4)$$

Таким образом, вычислены значения погонных задержек с помощью аналитических выражений. Результаты показали возможность ускоренного (в 1,3 раза) вычисления погонных задержек импульсов, а также использования аналитических выражений для оптимизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417 X0172.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №3. – С. 79–83.
2. Белоусов А.О. Трехкритериальная оптимизация как ресурс для совершенствования зеркально-симметричного модального фильтра / А.О. Белоусов, Е.Б. Черникова, А.М. Заболоцкий // Матер. 23-й Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-23–2017)». – Томск, 24 ноября, 2017. – С. 150–154.
3. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – Т. 2, № 36. – С. 45–50.
4. You H. Crosstalk analysis of interconnection lines and packages in high-speed integrated circuits / H. You, M. Soma // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – Aug. 1990. – Vol. 37, No. 8. – P. 1019–1026.

### АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

*А.В. Демаков, инженер*

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, vandervals@inbox.ru*

Анализ распределения электромагнитного поля (ЭМП) в реверберационных камерах (РК) основывается на численных методах, которые позволяют получить общую картину электрического и магнитного полей на заданной частоте и в определенный момент времени [1, 2]. Однако использование подобных методов требует значительных вычислительных затрат из-за сложности конструкции и больших размеров камеры. На предварительном этапе разработки РК возникает необходимость в получении грубых и быстрых оценок распределения ЭМП на заданных частотах.

Цель данной работы – представить теоретические основы для разработки аналитической модели для РК с прямоугольным корпусом и механическим перемешиванием типов волн.