

УДК 621.372.2.052.3.018.78

И.Е. Самотин

## Ослабление импульсных сигналов в модальных фильтрах с сильной лицевой связью

Получено аналитическое выражение для равных нормированных амплитуд импульсов четной и нечетной мод на выходе модального фильтра на основе линии с лицевой связью. Проведена проверка полученного выражения посредством компьютерного моделирования. Построена зависимость нормированных амплитуд импульсов от толщины подложки линии с лицевой связью. Показано увеличение ослабления модального фильтра от 2 до 5 при усилении связи.

**Ключевые слова:** связанная линия, модальный фильтр, лицевая связь, амплитуда, импульс разложения, четная и нечетная моды.

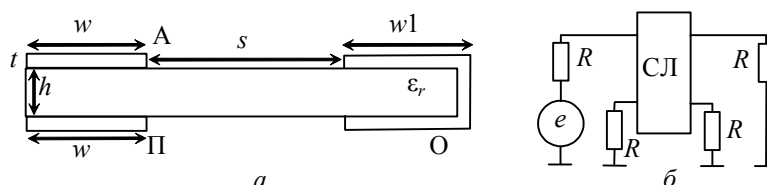
С развитием и широким распространением радиоэлектронных устройств различного назначения все острее необходимость обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС). Одним из направлений ЭМС является защита от кондуктивных воздействий. Особо опасным воздействием представляется мощный сверхкороткий импульс (СКИ), проникающий в узлы РЭА и способный вывести её из строя [1]. Быстродействующие защитные устройства обладают малыми мощностными показателями [2]. Поэтому необходим поиск новых принципов построения защитных устройств.

Один из таких принципов основан на модальном разложении импульса в отрезках связанных линий на импульсы с меньшими амплитудами [3, 4]. Показано, что соотношение амплитуд импульсов разложения сильно зависит от граничных условий на концах линий, однако выявлено, что при равных амплитудах импульсов они минимальны [5–7]. Получено условие равенства амплитуд импульсов на выходе модального фильтра [8].

Цель данной работы – получить аналитические выражения для нормированных амплитуд импульсов четной и нечетной мод в конце двух связанных линий через их волновые сопротивления, исходя из равенства амплитуд импульсов на выходе модального фильтра, и провести их проверку посредством компьютерного моделирования.

В работе [8] получено аналитическое выражение для сопротивления  $R$  (рис. 1, б), обеспечивающего равенство амплитуд импульсов разложения на выходе модального фильтра. Оно совпадает с известным условием согласования связанных линий [9].

Рис. 1. Поперечное сечение линии с лицевой связью (а) и схема включения (б)



Оно определяется как среднегеометрическое значение импедансов четной и нечетной мод

$$R = \sqrt{Z_e \cdot Z_o}. \quad (1)$$

Аналитическое выражение для нормированных (к ЭДС воздействия) амплитуд импульсов четной и нечетной мод в конце двух связанных линий [10] имеет вид

$$V_{e,o}/E = (1 + pL_{e,o})/2 \cdot P_{e,o}, \quad (2)$$

где

$$pL_{e,o} = (R - Z_{e,o})/(R + Z_{e,o}), \quad P_{e,o} = 1 + R/Z_{e,o}.$$

Подставив (1) в (2), после простых алгебраических преобразований получим аналитическое выражение для нормированных амплитуд импульсов четной и нечетной мод (они равны друг другу) через их волновые сопротивления:

$$V/E = \frac{\left(\sqrt{\frac{Z_e}{Z_o}}\right)}{\left(\sqrt{\frac{Z_e}{Z_o}} + 1\right)^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим влияние параметра  $h$  для линии с лицевой связью (так называют связь при расположении полосок друг к другу не торцами, как в микрополосковой линии, а широкой стороной друг к другу) (см. рис. 1, а) на волновые сопротивления мод, а также на амплитуды импульсов разложения и сравним результаты, полученные посредством (3) и моделирования в системе TALGAT[11]. Параметры поперечного сечения линии: ширина проводников  $w=w_1=1$  мм, разнос проводников  $s=4$  мм, толщина проводников  $t=105$  мкм, толщина подложки  $h=0,125, \dots, 4$  мм. Материал подложки – стеклотекстолит ( $\epsilon_r=5$ ).

В табл. 1 представлены полученные в системе TALGAT погонные задержки четной и нечетной мод, их разность, волновые сопротивления мод линии и корень квадратный из отношения волнового сопротивления мод.

Таблица 1

Параметры линии с лицевой связью

$h$ , мм	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$\tau_o - \tau_e$ , нс/м	$Z_o$ , Ом	$Z_e$ , Ом	$\sqrt{Z_e/Z_o}$
0,125	6,906	3,615	3,291	9,043	561,037	7,877
0,25	6,637	3,750	2,887	16,453	521,110	5,628
0,5	6,309	3,968	2,341	28,560	462,471	4,024
1	5,956	4,284	1,672	46,544	388,062	2,887
2	5,626	4,702	0,924	70,152	307,514	2,094
3	5,464	4,962	0,502	85,716	264,285	1,756
4	5,356	5,136	0,220	97,034	236,965	1,563

Амплитуды импульсов разложения, полученные в результате моделирования временного отклика на импульс с ЭДС 1 В, подаваемый между активным (А) и опорным (О) проводниками (П – пассивный), и вычисленные по полученному выражению (3), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Нормированные амплитуды импульсов разложения

$h$ , мм	0,125	0,25	0,5	1	2	3	4
Моделирование	0,1001	0,1287	0,1599	0,1917	0,2188	0,2322	0,2388
Аналитика	0,0999	0,1288	0,1594	0,1910	0,2187	0,2311	0,2379

По данным табл. 2 построены зависимости амплитуд импульсов разложения от толщины диэлектрической подложки, влияющей на силу связи в линии (рис. 2).

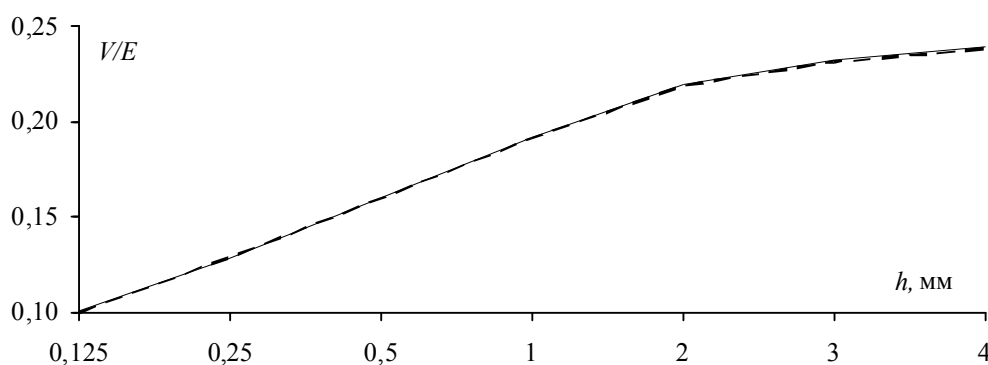


Рис. 2. Зависимость амплитуд импульсов разложения от толщины диэлектрической подложки (— — моделирование, - - - аналитика)

Из табл. 2 и рис. 2 видно, что значения нормированных амплитуд импульсов разложения, полученные по аналитическому выражению и в процессе моделирования временного отклика, практически совпадают. Небольшое отличие связано с ошибками округления при вычислении временного отклика.

Таким образом, выбор меньших толщин диэлектрика в данной структуре позволяет получить импульсы разложения на выходе модального фильтра с меньшими амплитудами, т.е. получить больший коэффициент деления опасного импульса путем усиления связи. Например, ослабление (отношение напряжений в начале и конце линии) импульса в 2 раза при слабой связи может достичь 5 при сильной. По полученному аналитическому выражению (3), зная значения волновых сопротивлений четной и нечетной мод структу-

ры, можно быстро и точно определить ослабление опасного импульса в данной связанной линии, не вычисляя временной отклик. Использование этого при оптимизации существенно уменьшит её время.

Автор благодарен Т.Р. Газизову за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в соответствии с договором № 2148 от 05.07.2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

#### Литература

1. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев и др. // Технологии ЭМС (Москва). – 2006. – №3 (18). – С. 36–45.
2. Responses of telecom protection to three IEC waveforms / M.A. Messier, K.S. Smith, W.A. Radasky, M.J. Madrid // Proc. of the 15th Int. Zurich Sump. on Electromagnetic Compatibility. Zurich, Feb. 18–20, 2003. – Zurich, Switzerland, 2003. – P. 127–132.
3. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы (Москва). – 2004. – Т. 11, № 11. – С. 18–22.
4. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС (Москва). – 2006. – №4 (19). – С. 40–44.
5. Самотин И.Е. Распространение короткого импульса в плоских кабелях силового питания при различных граничных условиях на концах пассивного проводника / И.Е. Самотин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов «НПЦ «Полюс» (г. Томск), 10–11 апреля 2008 г. – Томск: ОАО «НПЦ «Полюс», 2008. – С. 67–69.
6. Самотин И.Е. Разложение короткого импульса в отрезках кабеля силового питания при различных граничных условиях на концах пассивного проводника / И.Е. Самотин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Матер. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». Томск, 29–30 сентября 2008 г. – Томск: В-Спектр, 2009. – С. 23–26.
7. Заболоцкий А.М. Защита от короткого импульса в линиях передачи с различными граничными условиями / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин // 16-е Туполевские чтения: матер. междунар. молодёжной науч. конф. (Казань), 28–29 мая 2008 г. – Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. – С. 243–245.
8. Самотин И.Е. Условие выравнивания амплитуд импульсов на выходе модального фильтра // Технологии ЭМС (Москва). – 2010. – № 4(35). – С. 31–34.
9. Jones E.M. Coupled-Strip-Transmission-Line Filters and Directional Couplers / E.M. Jones, J.T. Bolljahn. – IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1956. – №4. – P. 75–81.
10. You H. Crosstalk Analysis of Interconnection Lines and Packages in High-Speed Integrated Circuits / H. You, M.Soma // IEEE Trans. on Circuits and Systems. – 1990. – № 8. – P. 1019–1026.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009614871. TALGAT2008 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов и др. – М.: Роспатент, 08.09.2009. – Бюл. – №4. – С. 313.

---

#### Самотин Иван Евгеньевич

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: iesam\_84@mail.ru

Samotin I.E.

#### Damping of pulse signals in modal filters with high face coupling

An analytical expression for equal normalized magnitudes of even and odd mode pulses at the output of modal filter based on the face coupled lines is derived. The expression derived is verified in the course of computer simulation. Dependence of normalized magnitudes of pulses on thickness of substrate with the face coupling is found. The increase of modal filter damping factor from 2 to 5 while increasing the coupling is shown.

**Keywords:** coupled line, modal filter, face coupling, magnitude, decomposed pulse, even and odd modes.