

**АПРОБАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ
ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФОРМ ТОКОВ НА ВЫХОДЕ
УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ**

Н.Р. Веремеенко, студент каф. СВЧиКР;

А.А. Бояниевский, А.С. Южаков, студенты каф. РТС

Научный руководитель Е.Б. Черникова, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

*Проект ГПО СВЧиКР-2504. Разработка аналитического
инструментария для совершенствования устройств защиты
с модальным разложением*

г. Томск, ТУСУР, nveremeenko987@mail.ru

Приведены результаты апробации аналитического выражения для расчета токов во временной области в конце активного проводника двух устройств защиты с модальным разложением на основе симметричных связанных линий передачи. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета форм токов, полученных с помощью аналитического выражения и в программе TUSUR.EMC. Получено их полное совпадение, что подтверждает возможность применения аналитики для расчета характеристик устройств защиты.

Ключевые слова: устройства защиты, линии передачи, аналитические модели, формы тока.

Одной из важных задач электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) является повышение уровня ее помехозащищенности. Для защиты РЭС от помеховых сверхкоротких импульсов (СКИ) разработаны устройства защиты на основе линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением [1]. При их проектировании критически важно контролировать не только уровни напряжений, но и распределение токов вдоль печатных проводников.

Для вычисления форм токов ранее были получены аналитические модели, которые позволяют оценить временные характеристики и амплитуду каждой составляющей, а также выполнить анализ вклада каждого параметра (коэффициентов отражения и падающей волны) в формирование итоговой амплитуды. Между тем апробация данных выражений на различных поперечных сечениях устройств защиты с модальным разложением произведена не в полной мере.

Цель работы – выполнить сравнение результатов вычисления формы токов на выходе устройств защиты на основе симметричных 2-проводных линий передачи, полученных с использованием аналитических выражений и в ПО TUSUR.EMC.

Выбраны геометрические модели устройств защиты: с сильной лицевой связью [1] и с проводниками в одной плоскости на подложке [2]. Их поперечные сечения и схема соединений приведены на рис. 1.

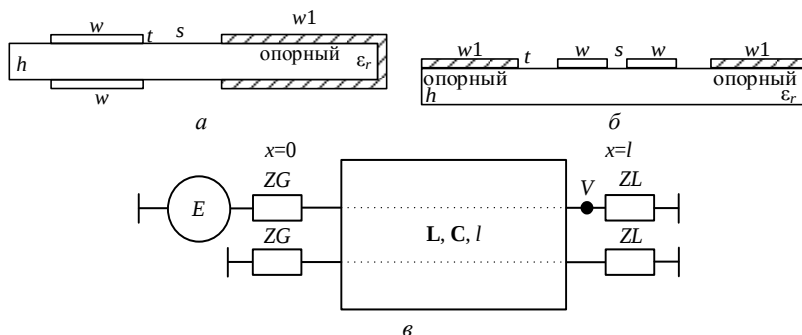


Рис. 1. Поперечные сечения исследуемых устройств защиты: с сильной лицевой связью (а), с проводниками в одной плоскости на подложке (б) и их схема соединений (в)

Токи в конце активного проводника связанной линии передачи вычисляются по аналитическому выражению, которое выглядит следующим образом:

$$I(l, t) = \frac{1}{2} P_e \frac{(1 - \rho L_e)}{Z_e} (E(t - \tau_e)) + \frac{1}{2} P_o \frac{(1 - \rho L_o)}{Z_o} (E(t - \tau_o)), \quad (1)$$

где P_e , P_o – коэффициенты падающей волны, ρL_e , ρL_o – коэффициенты отражения от конца линии, τ_e , τ_o – погонные задержки четной и нечетной мод соответственно, E – амплитуда источника ЭДС.

Выполнено моделирование формы тока на выходе исследуемых устройств с помощью выражения (1) и в программе TUSUR.EMC по алгоритмической модели из [3]. Параметры воздействия: $E=1$ В, длительности фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. Длина линий равна 1 м. Матрицы погонных коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукций приведены в таблице.

Матрицы первичных погонных параметров исследуемых устройств защиты

Поперечное сечение	Рис. 1, а	Рис. 1, б
C, пФ/м	$\begin{bmatrix} 66,5338 & -51,4818 \\ -51,4818 & 66,5338 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 51,5595 & -40,6027 \\ -40,6027 & 51,5595 \end{bmatrix}$
L, нГн/м	$\begin{bmatrix} 790,349 & 507,19 \\ 507,19 & 790,349 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 917,561 & 625,516 \\ 625,516 & 917,561 \end{bmatrix}$

Результаты вычислений представлены на рис. 2.

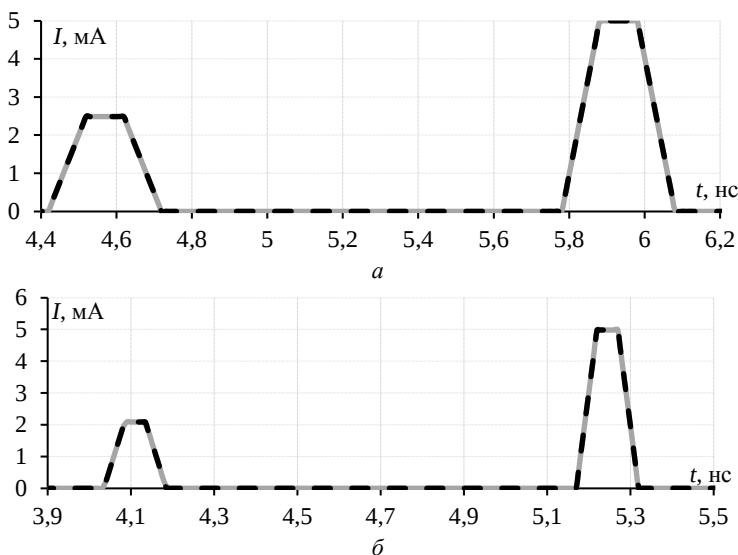


Рис. 2. Формы токов на выходе исследуемых устройств защиты: с сильной лицевой связью (*а*) и с проводниками в одной плоскости на подложке (*б*)

Из рис. 2 видно, что полученные результаты полностью совпали. На выходе структуры с сильной лицевой связью (см. рис. 2, *а*) наблюдается 2 импульса с амплитудами 2,5 и 4,9 мА и задержками 4,42 и 5,78 нс соответственно. На выходе устройства защиты с проводниками в одной плоскости на подложке наблюдается аналогичное разложение воздействия на 2 импульса (см. рис. 2, *б*). Амплитуда и задержка первого составили 2 мА и 4,035 нс соответственно, а второго – 4,9 мА и 5,17 нс. Полное совпадение результатов подтверждает достоверность аналитического выражения и возможность его использования при анализе формы тока на выходе устройств с модальным разложением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00419, <https://rscf.ru/project/25-29-00419/> в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболотский, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин. – Томск: ТУСУР, 2016. – 288 с.
2. Пат. 2 850 908 РФ, МПК H04B 15/00. Устройство защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической

подложке / Черникова Е.Б. (РФ), Газизов Т.Р. (РФ). – №2 025 118 096; заявл. 01.07.2025; опублик.: 17.11.2025, Бюл. № 32.

3. Achar R. Simulation of high-speed interconnects / R. Achar, M.S Nakhla // Proceedings of the IEEE. – May 2001. – Vol. 89, No. 5. – P. 693–728.

УДК 621.372.22

ПЕРЕКРЕСТНЫЕ НАВОДКИ ОТ ЗАТУХАЮЩЕГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В СВЯЗЫВАЮЩЕМ ПРОВОДНИКЕ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

М.Д. Юсаф, аспирант;

Е.Б. Черникова, с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, junaidyousaf761@gmail.com

Рассмотрены перекрестные наводки в запатентованном модальном фильтре со связывающим проводником от затухающего синусоидального воздействия. Квазистатический анализ в системе TUSUR.EMC показал их высокий уровень: до трети от половины амплитуды электродвижущей силы источника.

Ключевые слова: перекрестная наводка, квазистатический анализ, схемная земля, преднамеренная электромагнитная помеха, затухающая синусоида, модальный фильтр

Появление новых устройств требует исследования не только их рабочих характеристик, но и их электромагнитной совместимости. Так, воздействия на их схемную землю мало изучено, но важно исследовать его подробнее, чтобы оценить риски.

В [1] предложен новый модальный фильтр (МФ). Сильные связи между его проводниками требуют оценки перекрестных наводок в нем от воздействия по его схемной земле, например, сверхкороткого импульса (СКИ). Показан их значительный уровень на ближнем и дальнем концах [2]. Аналогично рассмотрен этот МФ с разными номиналами сопротивлений на концах активного проводника [3]. При воздействии электростатического разряда возникала перекрестная помеха большего уровня [4]. Однако важны их оценки и при других видах воздействий. Цель данной работы – исследовать перекрестные помехи при воздействии затухающей синусоиды.

Параметры поперечного сечения и схемы МФ взяты из [2] и показаны на рис. 1. Матрицы погонных параметров такие же, как в [2], как и всё моделирование. Хотя концы связывающего проводника 3 в рабочем режиме соединены со схемной землёй, здесь предполагается, что его нагрузки по 31 Ом, а в разрыв одного соединения включён источник электродвижущей силы (ЭДС) в форме затухающей синусоиды по