

Секция 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель – Суровцев Р.С., проф. каф. ТУ, д.т.н.;
зам. председателя – Белоусов А.О., доцент каф. ТУ, к.т.н.*

УДК 621.372.22

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕКРЁСТНЫХ НАВОДОК В УСТРОЙСТВАХ ЗАЩИТЫ С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА НА ПРОВОДНИК ЗАЗЕМЛЕНИЯ

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

Н.Р. Веремеенко, студент каф. СВЧКР

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

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

г. Томск, ТУСУР, boyanivskiy.a.124-2@e.tusur.ru

Приведены результаты аналитического вычисления перекрёстных наводок в устройствах защиты с модальным разложением, которые представлены в виде трехпроводных линий передачи при воздействии помехового сверхкороткого импульса на проводник заземления. Получено, что аналитические модели позволяют выявить вклад каждой моды в формирование выходного сигнала.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, устройство защиты, аналитические модели, перекрестные наводки, помехи, модальное разложение.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) является ключевой задачей при разработке современных радиоэлектронных средств, которая направлена на их устойчивое и бесперебойное функционирование в условиях воздействия электромагнитных помех. Одной из задач обеспечения ЭМС является защита от кондуктивных помех, среди которых особую опасность представляют сверхкороткие импульсы (СКИ).

Для защиты от СКИ предложен двухпроводной модальный фильтр (МФ) на двухсторонней печатной плате (ПП), состоящий из двух сигнальных проводников и двух проводников заземления [1]. В [2] приведены результаты оценки перекрестных наводок на сигнальные проводники при воздействии СКИ на проводник схемной земли. Так как при моделировании на проводник заземления подается воздействие, данное устройство рассматривается как трехпроводная линия передачи, на выходе которой должно наблюдаться 3 импульса разложения. Между тем результаты показали, что во временном отклике наблюдается только один импульс. Для более глубокого анализа этого необходимо применить аналитический подход, позволяющий выделить вклад каждой моды в формирование отклика. Кроме того, полезно рассмотреть структуру с другим видом связи между проводниками.

Таким образом, цель работы – выполнить аналитическое вычисление перекрестных наводок устройств защиты с модальным разложением при воздействии СКИ на проводник заземления.

На рис. 1 приведены поперечные сечения исследуемых устройств защиты: двухпроводный МФ на двухсторонней ПП (см. рис. 1, *а*) и микрополосковый МФ с торцевой связью (см. рис. 1, *б*).

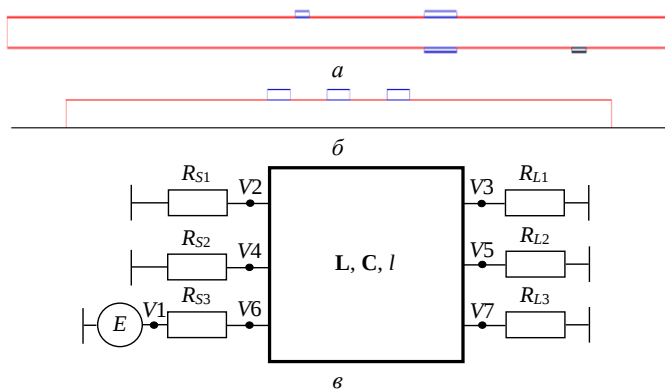


Рис. 1. Поперечные сечения устройств защиты с модальным разложением: МФ на двухсторонней ПП (*а*); микрополосковый МФ с торцевой связью (*б*) и их схема электрических соединений (*в*)

На рис. 1, в представлена схема электрических соединений, где на проводник 3 подается воздействие СКИ с амплитудой ЭДС 5 В и длительностями фронта спада и плоской вершины по 50 пс, при этом в обычном режиме он соединен на концах со схемной землей. Сопротивление резисторов $R_{Si} R_{Li} = 50$ Ом, длина МФ $l = 0,188$ и 1 м соответственно.

Для расчёта перекрёстных наводок в трехпроводной линии передачи используются аналитические выражения, полученные на основе подхода из [3]:

$$V_a = (1 + \Gamma_{Laa})V_{0a}(t - T_a) + \Gamma_{Lab}V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{Lac}V_{0c}(t - T_c), \quad (1)$$

$$V_b = (1 + \Gamma_{Lbb})V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{Lba}V_{0a}(t - T_a) + \Gamma_{Lbc}V_{0c}(t - T_c), \quad (2)$$

$$V_c = (1 + \Gamma_{Lcc})V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{Lca}V_{0a}(t - T_a) + \Gamma_{Lcb}V_{0b}(t - T_b), \quad (3)$$

$$V_5 = T_{V0,0}V_a + T_{V0,1}V_b + T_{V0,2}V_c, \quad (4)$$

$$V_6 = T_{V1,0}V_a + T_{V1,1}V_b + T_{V1,2}V_c, \quad (5)$$

$$V_7 = T_{V2,0}V_a + T_{V2,1}V_b + T_{V2,2}V_c, \quad (6)$$

где V_a, V_b, V_c – напряжения соответствующих мод a, b и c , $T_a = l\tau_a$ – задержка моды a , $T_b = l\tau_b$ – моды b , а $T_c = l\tau_c$ – моды c , Γ_{Lij} – коэффициенты отражения мод от конца, T_{vij} – коэффициенты матрицы преобразования мод T_v , которая вычисляется как собственные векторы матрицы произведения L и C .

Каждый вектор-столбец матрицы T_v соответствует моде с погонной задержкой из матрицы τ . Матрицы T_v и τ для МФ на двухсторонней ПП и микрополоскового МФ приведены в таблице.

Матрицы T_v и τ исследуемых устройств защиты

МФ	T_v	τ , нс/м
На двухсторонней ПП	$\begin{bmatrix} -0,709 & 0,684 & 0,476 \\ 0,709 & 0,684 & 0,476 \\ 0 & -0,249 & 0,739 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,707 & 0,524 & 0,473 \\ 0 & 0,670 & -0,742 \\ 0,707 & 0,524 & 0,473 \end{bmatrix}$
Микрополосковый	$\begin{bmatrix} 6,579 \\ 3,819 \\ 3,802 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,668 \\ 5,905 \\ 5,522 \end{bmatrix}$

Из таблицы видно, что в МФ на двухсторонней ПП распространяются две моды практически с одинаковыми погонными задержками (3,819 и 3,802 нс/м). При этом в первом столбце матрицы T_v в третьей строке коэффициент равен 0 ($T_{v31} = 0$). Это означает, что электромагнитное поле моды с погонной задержкой 6,579 нс/м сосредоточено

преимущественно между 1-м и 2-м проводниками, а на 3-м потенциал моды остается нулевым. Поскольку воздействие подается на третий проводник, данная мода физически не возбуждается в линии и не будет видна во временном отклике. В микрополосковом МФ возбуждаются все три моды. Стоит отметить, что компонента собственного вектора для второй линии в первой моде равна нулю ($T_{v21} = 0$). Это означает, что при воздействии сигнала на активный проводник перекрестная наводка на центральном проводнике формируется без участия моды с погонной задержкой 5,668 нс/м.

Выполнено вычисление форм напряжения на выходе устройств защиты, а также дальних перекрестных наводок на соседние проводники с помощью аналитических моделей (1)–(6) в ПО Mathcad. Для оценки результатов выполнено моделирование в ПО TUSUR.EMC. Результаты представлены на рис. 2.

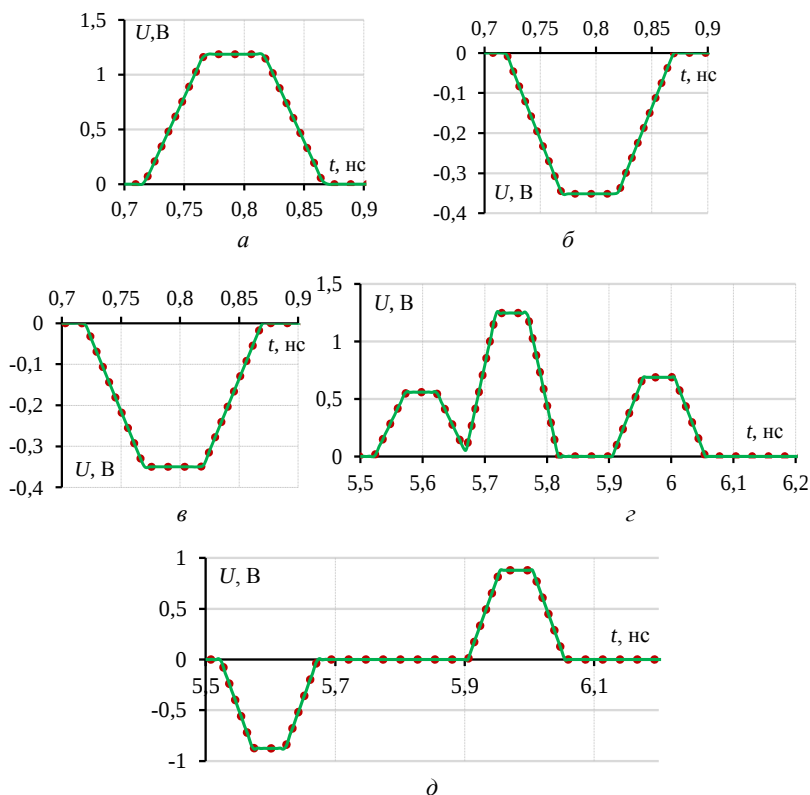


Рис. 2 (начало)

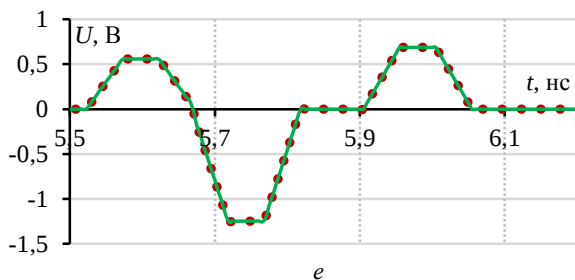


Рис. 2 (окончание). Формы напряжения на выходе (а) и перекрестных наводок в узлах V_5 (б) и V_6 (в) МФ на двухсторонней ПП и на выходе (г) и перекрестных наводок в узлах V_5 (д) и V_6 (е) микрополоскового МФ, полученных с помощью Mathcad (.....) и TUSUR.EMC (—)

Из рис. 2, а–в видно, что на выход МФ на двухсторонней ПП из-за отсутствия возбуждения моды с погонной задержкой 6,579 нс/м приходит только 1 импульс с задержкой 0,71 нс, который является результатом наложения двух быстрых мод.

Анализ перекрестных наводок в узлах V_5 и V_6 показывает, что форма сигналов на них идентична и определяется суперпозицией тех же мод, что и в активном проводнике. Из рис. 2 г–е видно, что на выход микрополоскового МФ приходит 3 импульса разложения, при этом перекрестная наводка на втором проводнике состоит из двух импульсов, а на первом проводнике – из трех импульсов чередующейся полярности, что полностью согласуется с теоретическим анализом матрицы T_v .

Таким образом, моделирование полностью подтверждает данные, полученные аналитически. В дальнейшем планируется выполнить подробный анализ амплитуд и форм распространяющихся мод в МФ с помощью аналитического инструментария.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Samoilichenko M.A. Experimental study of electrical characteristics of a modal filter on a double-sided PCB / M.A. Samoilichenko, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2023. – Vol. 68, No. 11. – P. 1356–1364.

2. Юсаф М.Д. Перекрестные наводки в двухпроводном модальном фильтре на двухсторонней печатной плате при воздействии сверхкороткого импульса по схемной земле / М.Д. Юсаф, Т.Р. Газизов // VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте». – Омск, 10, 11 апреля 2025. – С. 366–371.

3. Park S.W. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain / S.W. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52. – P. 436–446.

УДК 621.391.825

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ПРОВОДНИКАМИ В ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

Н.Т. Динь, аспирант

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, зав. каф. ТУ, д.т.н., проф.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, dinhnamtuts2@gmail.com*

Представлены результаты анализа нового устройства защиты от сверхкоротких импульсов. Выявлены максимумы в зависимостях коэффициента ослабления A и разности погонных задержек мод $|\Delta\tau|$ от параметров поперечного сечения. Показано, что можно улучшить эти характеристики оптимизацией толщины подложки и ширины сигнальных проводников. Уменьшение толщины проводников дает рост $|\Delta\tau|$, но слабо уменьшает A .

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, печатная плата, модальное резервирование.

При разработке печатных плат радиоэлектронной аппаратуры необходимо обеспечивать электромагнитную совместимость и надежность. Хотя резервирование повышает надежность [1], оно не защищает от сверхкоротких импульсов (СКИ). Для решения этой задачи в [2] предложено модальное резервирование (МР), объединяющее холодное резервирование и модальную фильтрацию [3]. После первого патента на устройство с МР [4] вышло много работ и патентов. Самый свежий из них – устройство защиты от СКИ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке [5]. Оно почти не исследовано. Для оптимизации его параметров надо рассмотреть их влияние на A и $|\Delta\tau|$. Цель работы – выполнить их многовариантный анализ.

На рис. 1, a представлено поперечное сечение устройства, где w – ширина сигнальных проводников, w_1 – ширина опорных проводников, s – расстояние между сигнальными проводниками, d – расстояние между сигнальными и опорными проводниками, t – толщина проводников, h – толщина подложки, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.