

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

стандарту MIL-STD-461F с параметрами: пик 1 кВ, частота 1 ГГц, коэффициент затухания 10^9 . Длина МФ 1 м.

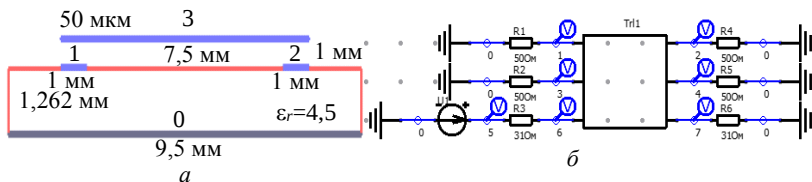


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема моделирования (б) МФ

Вычисленные в TUSUR.EMC формы ЭДС (узел V5) и напряжения в узлах V6 и V7 показаны на рис. 2, а. Как видно, амплитуда напряжения в начале МФ равна половине амплитуды ЭДС: согласование хорошее. Вычисленные погонные задержки мод: 3,9; 4,9 и 5,9 нс/м. При длине МФ 1 м составляющие мод придут к его концу с задержками 3,9; 4,9 и 5,9 нс. Однако моделирование с ростом длины (результаты которого для компактности не приводятся) показало, что амплитуда сигнала моды 2 почти нулевая. Поэтому к концу МФ приходят сигналы только мод 1 (с задержкой 3,9 нс) и 3 (с задержкой 5,9 нс). Разница задержек составляет 2 нс, а период каждого сигнала 1 нс. Поэтому сигналы мод 1 и 3 накладываются после двух периодов моды 1. Кроме того, у них разные амплитуды: 303 и 101 В (в сумме с периодом 3 моды 1) после модального разложения с учетом граничных условий.

Рассмотрим перекрёстные наводки на проводниках 1 и 2 (из-за симметрии они одинаковы) от затухающей синусоиды в проводнике 3 (см. рис. 2, б). Сильная связь с проводником 3 даёт 89 В (22,2% половины ЭДС) и -54 В (-13,5%) на ближнем конце (V1). Это значения вблизи начального момента времени.

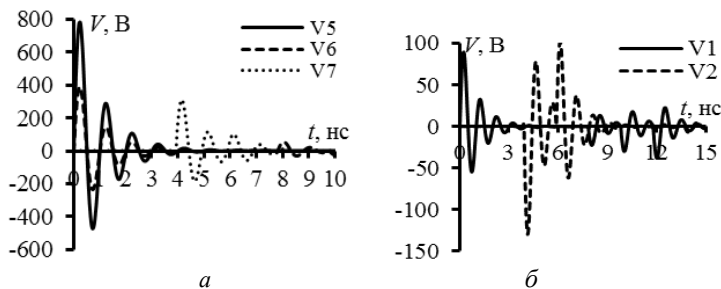


Рис. 2. Формы ЭДС (V5) и напряжения в узлах V6 и V7 (а), V1 и V2 (б)

Позже к ближнему концу линии приходят отражения сигналов мод 1 (в момент 7,8 нс), 2 (в момент 9,8 нс) и 3 (в момент 11,8 нс). Максимальные уровни их суммы составляют минус 36 В (минус 9%) и 21 В (5,2%).

На дальнем конце (V2) сигнал моды 1 начинается в момент времени 3,9 нс с импульса отрицательной полярности с уровнем -129 В ($-32,2\%$) и продолжается положительной – с уровнем 74 В ($18,5\%$). Сигнал моды 3 начинается в момент времени 5,9 нс с импульса положительной полярности с уровнем 101 В ($25,2\%$) и продолжается отрицательной с уровнем -60 В (-15%). Полярность меняется из-за изменения волновых сопротивлений мод.

Таким образом, рассмотрено воздействие затухающей синусоиды между проводниками схемной земли МФ. Примечательно, что наводки от этого сигнала можно рассматривать как сумму наводок от отдельных импульсов. Моделирование дало наводку до $-32,2\%$. Такой высокий уровень требует более тщательного исследования её рисков. Между тем учет потерь в проводниках и диэлектриках даст меньший уровень, но только на дальнем конце.

Исследование выполнено при финансовой поддержке российского научного фонда по гранту № 25-29-00139 <https://rscf.ru/project/25-29-00139/> в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванцов И.А. Модальное разложение помехи в связанной микрополосковой линии при удалении сигнальных проводников друг от друга // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 124–133.
2. Юсаф М.Д. Перекрестные наводки в модальном фильтре со связывающим проводником при воздействии сверхкороткого импульса по схемной земле // XXX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2025», Томск. – Томск: ТУСУР, 21–23 мая 2025. – С. 52–55.
3. Юсаф М.Д. Перекрестные наводки в модальном фильтре с разными граничными условиями связывающего проводника под воздействием сверхкороткого импульса / М.Д. Юсаф, Т.Р. Газизов // Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки». – Красноярск: изд-во СиБГУ, 2025. – С. 988–990.
4. Юсаф М.Д. Перекрестные наводки в модальном фильтре со связывающим проводником при воздействии электростатического разряда по схемной земле // VII Междунар. науч. конф. ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации «Шарыгинские чтения», посвященная памяти проф. Г.С. Шарыгина, Томск, 15–17 октября 2025 г. – Ч. 1. – Томск: ТУСУР, 2025. – С. 157–161.