

УДК 621.396.6

А.Т. Газизов

Сравнение результатов измерения и моделирования временного отклика модального фильтра на воздействие сверхкороткого импульса

Представлены результаты измерения и моделирования временного отклика модального фильтра с лицевой связью на воздействие сверхкороткого импульса (СКИ). При моделировании использовано две формы воздействия: треугольная и максимально приближенная к реально воздействию СКИ. Выполнено сравнение временных откликов. Показана целесообразность точного учета формы реального импульса.

Ключевые слова: модальный фильтр, сверхкороткий импульс, связные линии.

В настоящее время важной задачей является защита от преднамеренных электромагнитных воздействий [1]. Особую опасность представляют сверхкороткие импульсы (СКИ), которые не ослабляются традиционными устройствами защиты [2]. Модальные фильтры (МФ) – это особые пассивные структуры, в которых происходит разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды вследствие разной скорости мод сигнала в связанной линии с неоднородным диэлектрическим заполнением [3]. При исследовании новых структур МФ важным этапом является сравнение результатов эксперимента и моделирования. При моделировании в качестве аппроксимации реального входного воздействия (помехового СКИ) часто используют треугольный импульс. При эксперименте входное воздействие, подаваемое с генератора, может существенно отличаться от треугольного, что может вызвать несоответствие форм сигнала на выходе МФ, полученных при моделировании и эксперименте. Цель данной работы – сравнение результатов измерения и моделирования временного отклика МФ на воздействие СКИ.

Для определенности в данной работе используется структура полоскового МФ асимметричной конструкции с лицевой связью [3], представляющая собой линию передачи с регулярным поперечным сечением (рис. 1): на подложке толщиной h и диэлектрической проницаемостью ϵ_r расположены три параллельных проводника – активный (А), опорный (О) и пассивный (П). Ширина проводников – w , толщина – t , расстояние между проводниками – s , расстояние от края структуры до проводника – d .

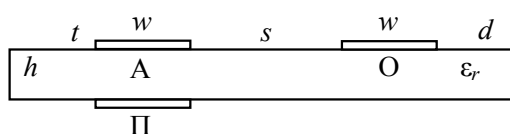


Рис. 1. Поперечное сечение МФ с лицевой связью

Схема включения МФ представлена на рис. 2: e – источник ЭДС; R_1 – внутренне сопротивление источника e ; R_3 – сопротивление нагрузки (тракта осциллографа); R_2, R_4 – нагрузочные сопротивления МФ. Также на схеме обозначены ближние и дальние концы активного (А) и пассивного (П) проводников.

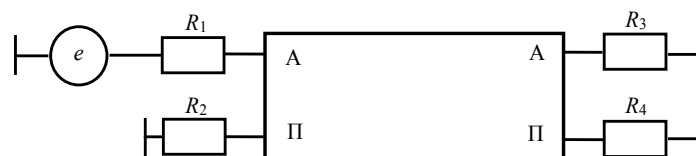


Рис. 2. Схема включения МФ

Диапазон геометрических параметров для макета МФ (рис. 3) выбран исходя из требований миниатюризации, экономической целесообразности и максимального пропускаемого тока. С помощью генетических алгоритмов посредством компьютерного моделирования в системе TALGAT [4]

найлены оптимальные значения параметров $s = 3$ мм и $w = d = 4$ мм по критерию равенства среднего геометрического характеристических импедансов четной и нечетной мод волновому сопротивлению тракта 50 Ом. Используется двусторонний фольгированный стеклотекстолит с параметрами $h = 0,18$ мм, $t = 65$ мкм, $\epsilon_r = 5$, выбранный из соображений дешевизны и общедоступности. Значения сопротивлений МФ $R_2 = R_4 = 50$ Ом выбраны из условия согласования для минимизации отражений. Длина макета выбрана равной 0,2 м (как достаточной для возможно более полного разложения воздействующего СКИ). К входу и выходу макета для стыковки с трактом припаяны SMA разъемы.

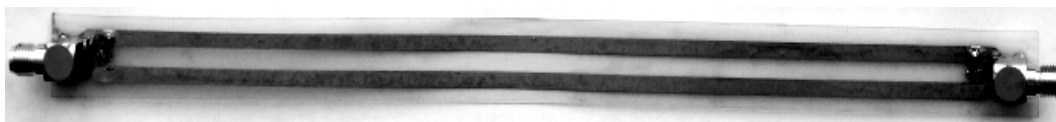


Рис. 3. Макет МФ

Для моделирования временного отклика используется квазистатический анализ, основанный на математических моделях, внедренных в систему TALGAT. В ней любая линия передачи полагается регулярной с произвольным поперечным сечением. Отрезок линии передачи с N сигнальными проводниками и одним опорным, на основе заданного поперечного сечения описывается следующими матрицами погонных параметров: электромагнитной индукции (\mathbf{L}), электростатической индукции (\mathbf{C}), сопротивления (\mathbf{R}), проводимости (\mathbf{G}). Матрицы \mathbf{L} и \mathbf{C} вычисляются методом моментов [5]. Потери в проводниках и диэлектриках определяются соответственно матрицами \mathbf{R} и \mathbf{G} с учетом их частотной зависимости. Элементы матрицы \mathbf{R} вычисляются с учетом скин-эффекта. Все проводники имеют одинаковое поперечное сечение, поэтому диагональные (r) и недиагональные (r_m) элементы матрицы \mathbf{R} связаны выражением $r = 2r_m$, где $r_m = 1/(w\sigma t) + r_s/w$, где σ – удельная проводимость меди, w и t – ширина и толщина проводника, $r_s = (\pi f \mu_0 / \sigma)^{1/2}$, где f – частота, μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость меди. Кроме того, учитывается частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости материала FR-4 согласно аналитической модели [6].

Сначала при моделировании в качестве входного воздействия используется треугольный импульс амплитудой 600 мВ и длительностью фронта и спада по 0,5 нс. Из полученной формы сигнала (рис. 4) видно, что максимальная амплитуда на выходе МФ составляет 0,1 В (произошло ослабление входного СКИ в 6 раз), а разность задержек мод (временной промежуток между двумя первыми максимумами) составляет 0,7 нс.

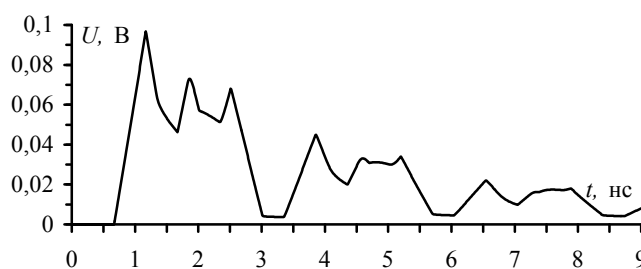


Рис. 4. Вычисленная форма сигнала на выходе МФ (треугольное воздействие)

Экспериментальное получение формы сигнала на выходе МФ проведено с помощью осциллографа вычислительного комбинированного С9-11. В качестве входного воздействия выбран импульс амплитудой 600 мВ (на нагрузке 50 Ом) длительностью 820 пс (по уровню 0,1). Данный импульс (рис. 5) близок к треугольному, но если увеличить изображение по горизонтали, то станут видны явные отклонения от треугольной формы: нелинейный вид фронта и спада, ненулевая длительность плоской вершины. (Для всех осциллограмм цена деления составляет 100 мВ и 1 нс).

Сравним формы сигнала на выходе МФ, полученные при эксперименте (рис. 6) и при моделировании с треугольным входным воздействием (см. рис. 4). Форма сигнала, полученная при моделировании с треугольным входным воздействием, отличается от экспериментальной и имеет меньшие амплитуды для всех импульсов. Ошибка в этих параметрах не превышает 10%. Несмотря на малую погрешность в определении электрических характеристик МФ, импульсы при моделировании с треугольным входным воздействием существенно отличаются по форме от экспериментальных: они перекрываются, увеличивая тем самым уровень сигнала между импульсами.

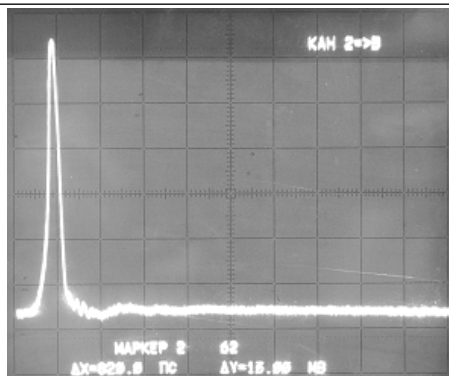


Рис. 5. Форма входного воздействия

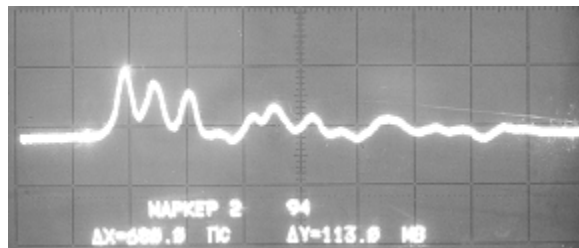


Рис. 6. Форма сигнала на выходе МФ (эксперимент)

Экспериментальная форма сигнала на выходе МФ представлена на рис. 6. Максимальная амплитуда составляет 113 мВ, разность задержек – около 0,6 нс.

Обеспечим максимальное соответствие входного воздействия при моделировании реальному. Для этого входное воздействие с осциллографа оцифровано и задано в качестве пользовательского источника сигнала в системе TALGAT (шаг дискретизации по времени – 10 пс, число учитываемых гармоник – 2^{12}). Форма сигнала на выходе МФ, полученная при моделировании с реальным входным воздействием в системе TALGAT с помощью квазистатического анализа, а также оцифрованная экспериментальная форма сигнала представлены на рис. 7. Видно, что форма сигнала при моделировании приобрела вид, более близкий к экспериментальной кривой. Однако несоответствие в амплитудах импульсов и опережение по времени остались.

На рис. 7 также представлена форма сигнала на выходе МФ, вычисленная посредством электродинамического анализа в CST MWS. Видно, что формы сигнала, полученные при электродинамическом и квазистатическом анализе, согласуются по времени: различие в задержках распространения импульсов четной и нечетной мод становится существенным только после третьего импульса. Вместе с тем амплитуды импульсов на выходе МФ для различных видов анализа отличаются значительно, что объяснимо различием учета потерь. Отличие экспериментального результата от результатов моделирования может быть связано с меньшим значением ϵ_r реального материала подложки, чем используемых при моделировании. Кроме того, влияют неоднородности соединителей и их посадочных мест, не учитываемые в моделировании.

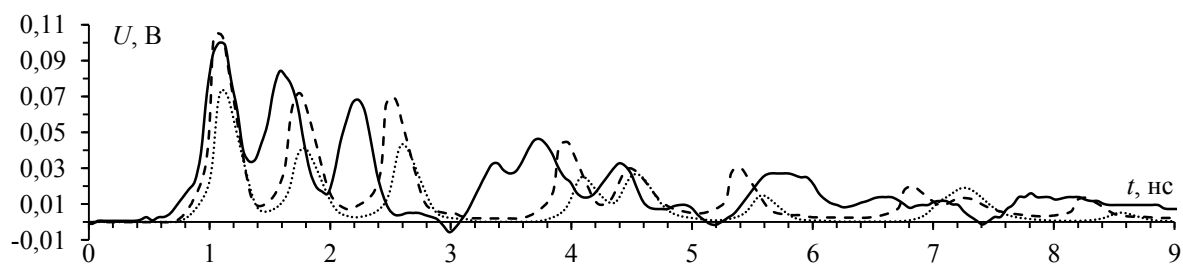


Рис. 7. Форма сигнала на выходе МФ при эксперименте (—) и моделировании с реальной формой СКИ: квазистатический (- - -) и электродинамический (····) анализы

Таким образом, в данной работе для МФ асимметричной структуры с лицевой связью представлены выходные формы сигнала: полученная при моделировании с треугольной формой входного воздействия; полученная экспериментально с воздействием СКИ генератора; полученная при моделировании с формой входного воздействия, максимально приближенной к экспериментальной. Для реального воздействия представлены результаты квазистатического и электродинамического моделирования. Проведено сравнение результатов моделирования между собой и с экспериментальным результатом. Показано, что задание входного воздействия, максимально приближенного к экспериментальному, позволяет получить более точную форму выходного сигнала при моделировании. В то же время выявлено, что основные электрические характеристики временного отклика МФ (максимальная амплитуда и разность задержек) в моделированиях совпадают. Таким образом, использование треугольного входного воздействия в предварительных исследованиях является оправданным и может применяться для определения основных характеристик МФ. Однако при анализе соответ-

вия временных откликов, полученных при моделировании и эксперименте, следует использовать моделирование с точным заданием входного воздействия.

Автор благодарен рецензентам за ценные замечания к статье.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе.

Литература

1. ГОСТ Р 56103–2014. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Организация и содержание работ по защите от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
2. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.
3. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2013. – 150 с.
4. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости «TALGAT» / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
5. Gazizov T.R. Analytic expressions for Mom calculation of capacitance matrix of two dimensional system of conductors and dielectrics having arbitrary oriented boundaries // Proc. of the 2001 IEEE EMC Symp. – P. 151–155. – doi: 10.1109/ISEMC.2001.95057.
6. Djordjevic A.R. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality / A.R. Djordjevic, V.D. Likar-Smiljanic, T.K. Sarkar // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2001. – Vol. 43, № 4. – P. 662–667.

Газизов Александр Тальгатович

Лаборат-исследователь каф. ТУ ТУСУРа, студент НИТПУ

Тел.: +7-913-100-06-28

Эл. почта: gazizov@tpu.ru

Gazizov A.T.

Comparison of measurement and simulation results of time response of modal filter to ultrashort pulse impact

The results of measurement and simulation of the time response of the modal filter to ultrashort pulse impact are presented. In simulation two forms of impact are used: triangle; as close to the real ultrashort impact. The comparison of time responses is carried out. The efficiency of the accurate accounting of the real shape of the pulse is shown.

Keywords: modal filter, ultrashort pulse, coupled lines.