

УДК 621.372

А.Н. Сычев, С.М. Стручков

## Искажения импульсных сигналов в высокоскоростных многопроводных межсоединениях цифровых микроэлектронных устройств

Изложены новые теоретические и экспериментальные результаты исследований распространения импульсных сигналов в высокоскоростных межсоединениях вычислительной техники и систем управления. Отклик устройств во временной области получен с использованием преобразования Фурье. Подробно рассмотрены особенности модальных искажений для структур с различными параметрами. Представленные численные и экспериментальные результаты подтверждают адекватность разработанной компьютерной модели.

**Ключевые слова:** устройства вычислительной техники, цифровые микроэлектронные устройства, гауссов импульс, модальные искажения, высокоскоростные межсоединения, многопроводные связанные линии, печатная плата, интегральная микросхема.

Для современных высокоскоростных цифровых и высокочастотных аналоговых устройств необходимы как активные компоненты, так и пассивные межсоединения с весьма жесткими требованиями по параметрам. Межсоединения реализуются как отрезки многопроводных линий передачи с заданными волновыми сопротивлениями и временем задержки. В зависимости от технологии изготовления – полупроводниковой, гибридно-плёночной, печатно-полосковой – конструкции межсоединений могут иметь некоторые характерные особенности, однако основные технические решения являются весьма схожими. В качестве примера можно привести фрагмент поперечного сечения полосковой платы, содержащей пару линий с лицевой связью (рис. 1).

### Постановка задачи

Межсоединения на полосковых структурах (см., например, рис. 1) ранее исследовались рядом авторов [1–5]. В работе [1] были использованы методы преобразования Фурье, также получены временные отклики ряда отрезков связанных линий на прямоугольные импульсы. В [2] исследовались многослойные связанные микрополосковые линии и искажения в них импульсных сигналов, вызванные дисперсией и неравномерностью связи (модальные искажения). Там же было отмечено, что механизм модальных искажений в исследуемых структурах является доминирующим. В [3] дана схемная модель фазового всепропускающего фильтра, построенного на отрезке связанных линий, включённого в конфигурации С-секции; методом Фурье получен отклик фильтра на импульсное воздействие во временной области, представляющий собой последовательность разнополярных субимпульсов. Несмотря на большое количество публикаций по теме, ряд важных вопросов остаётся пока невыясненным, например: как влияет величина связи на количество субимпульсов расщепления, как влияет характер согласования межсоединения с нагрузками на соотношение амплитуд субимпульсов и др.

В данной работе для исследования механизма распространения в межсоединениях сигналов с пикосекундными фронтами и длительностями в качестве тестового используется не трапецеидальный [5] и тем более не прямоугольный импульс, а прежде всего гауссов (колоколообразный) импульс, как наиболее адекватно описывающий реальные быстропротекающие процессы. Его аналитическое представление записывается [2]

$$v(t) = A \exp \left[ -\ln(2) \left( \frac{t-t_0}{\tau} \right)^2 \right],$$

где  $A$  – амплитуда импульса;  $\tau$  – половина длительности импульса на уровне половины амплитуды;  $t_0$  – момент времени, в который величина гауссова импульса максимальна (момент отсчёта задержек,

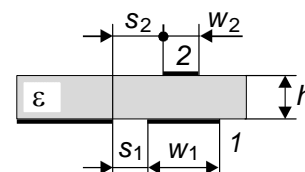


Рис. 1. Фрагмент межсоединительной структуры на полосковых линиях с лицевой связью на подвешенной подложке

т.е. центр импульса на временной оси). При моделировании и последующих экспериментальных исследованиях параметры гауссова импульса задавались следующими:  $\tau = 200$  пс,  $A = 1$  В (при моделировании) или 1,95 В (при сравнении эксперимента и расчёта).

Для того чтобы оценить предельно возможные искажения импульсного сигнала, передаваемого межсоединительной структурой, состоящей из двух линий, в конструкции последних была реализована максимально возможная электромагнитная связь путем сближения проводников по широкой «лицевой» стороне (рис. 2, а). Полная электрическая схема тестовой структуры включает отрезок связанных линий, возбуждающий генератор и согласованные нагрузки ( $Z_0 = 50$  Ом) в каждом плече (рис. 2, б).

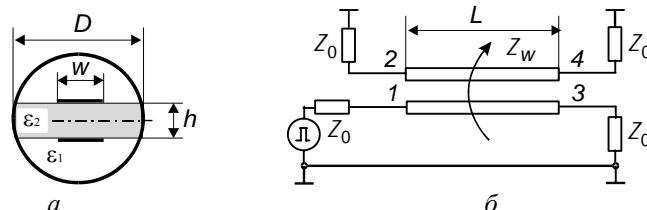


Рис. 2. Тестовая межсоединительная структура на основе линий с сильной лицевой связью на подвешенной подложке: а – поперечное сечение; б – электрическая схема

В исследуемой структуре (см. рис. 2), содержащей две связанные линии, первая (к которой подключается генератор) идентифицируется как сигнальная линия (активный проводник), а вторая – как воспринимающая линия (пассивный проводник).

При этом заметим, что отрезок из двух линий представляет собой восьмиполусник (четырёхпортовое устройство), у которого нумерация и функциональные названия плеч (пара полюсов образует плечо или порт) следующие (см. рис. 2, б): 1 – возбуждаемое входное плечо с напряжением  $U_1(0, t)$ ; 2 – смежное плечо на ближнем конце линий с напряжением  $U_2(0, t)$ ; 3 – прямое плечо на дальнем конце линий с напряжением  $U_3(L, t)$ ; 4 – диагональное плечо на дальнем конце линий с напряжением  $U_4(L, t)$ .

В описанной структуре (см. рис. 2) поддерживается два типа нормальных волн (мод) – четная и нечетная, другими словами – синфазная и противофазная (по терминологии Э.Г. Влостовского, 1967 г.). При этом синфазная волна является «быстрой», так как её поле сосредоточено в воздушной среде с малой диэлектрической проницаемостью, близкой к единице, а противофазная волна является достаточно «медленной», так как её поле сосредоточено в несущем диэлектрике с высокой проницаемостью. Величина разноса субимпульсов по времени  $\Delta t$  вследствие модальных искажений при проходе расстояния  $z$  может быть записана так [2]:

$$\Delta t = \frac{z}{c} \left| \sqrt{\varepsilon_{\text{effe}}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{effo}}} \right|,$$

где  $\varepsilon_{\text{effe}}$ ,  $\varepsilon_{\text{effo}}$  – эффективные диэлектрические проницаемости для синфазной и противофазной мод соответственно.

#### Методика анализа и её основные этапы

1. Анализ начинается с вычисления первичных, т.е. погонных параметров связанных линий (матриц погонных емкостей, индуктивностей, сопротивлений, проводимостей) для заданного или выбранного поперечного сечения межсоединения (см. рис. 2, а). Здесь применяется комбинированный метод частичных емкостей и конформных отображений [6].

2. Полученные матрицы первичных параметров используются при решении телеграфных уравнений для длинных линий в частотной области (решается алгебраическая задача на собственные значения). Тут промежуточным результатом являются вторичные, т.е. модальные параметры (волновые сопротивления, модальные диэлектрические проницаемости). Последние с учетом длины отрезка связанных линий  $z = L$  необходимы для формирования матрицы  $Y$  проводимостей цепи, из которой с учетом волновых сопротивлений подводящих линий (обычно 50 Ом) выводятся элементы волновой матрицы рассеяния  $S$ , описывающие межсоединение в частотной области [7].

3. В качестве инструмента моделирования распространения сигналов в межсоединениях во временной области  $t$  выбирается метод спектрального гармонического анализа Фурье. Пусть входной импульс  $U(0, t)$  возбуждает плечо на ближнем конце линий  $z = 0$  (см. рис. 2, б). После прохож-

дения расстояния  $z$  через цепь с передаточной характеристикой  $S(z, f)$  в частотной области  $f$  выражение для импульсного сигнала с использованием преобразования Фурье во временной области записывается

$$U(z, t) = \text{IFT} \left\{ \underbrace{S(z, f)}_{\text{ЧХ цепи}} \cdot \underbrace{\text{FT}[U(0, t)]}_{\text{Спектр сигнала}} \right\},$$

где FT и IFT – прямое и обратное преобразования Фурье соответственно. Полученные соотношения позволяют довести результат до построения временных диаграмм прохождения импульсного сигнала в любой точке межсоединения с учетом потерь и дисперсии.

Изложенная методика реализована в виде компьютерной программы PULSE, которая осуществляет моделирование широкого ряда межсоединений и протекающих в них процессов, включая передачу сигнала в прямое плечо сигнальной линии, а также учёт перекрёстных помех на ближнем и дальнем концах воспринимающей линии.

#### Численные результаты моделирования

Результаты моделирования с использованием программы PULSE для восьми характерных типов межсоединительных структур представлены в виде набора временных диаграмм на рис. 3–6. Параметры, являющиеся общими для всех типов структур, следующие: длина связанных линий  $L = 250$  мм; модальные потери  $\alpha_{re} = \alpha_{ro} = 0,5$  Нп/м; сопротивление нагрузок  $Z_0 = 50$  Ом. Для каждой из структур приводится по три диаграммы во временном диапазоне 0–10 нс при амплитуде 1 В и длительности  $2\tau = 400$  пс возбуждающего гауссова импульса  $U_1(t)$ , который для сравнения показан на каждой из диаграмм. При этом в каждой тройке графиков верхний показывает напряжение в диагональном плече 4  $U_4(t)$ , средний – в прямом плече 3  $U_3(t)$ , нижний – в смежном плече 2  $U_2(t)$  (см. рис. 2).

Вначале в уравновешенной структуре ( $\epsilon_{\text{effe}} = \epsilon_{\text{effo}}$ ) исследуется влияние величины связи (1–15 дБ) на характер отклика (см. рис. 3). Как следует из рис. 3, усиление связи с 15 до 1 дБ, даже в случае её уравновешенности, ведёт к возникновению малых гармонических субимпульсов в 3-м прямом плече с нечётно-кратными моментами их появления  $t = (3, 5, \dots) \cdot t_1$  относительно момента основного отклика  $t_1$ ; увеличивается амплитуда импульсов (основного и дополнительных) во 2-м смежном плече; при этом в 4-м диагональном плече ничего не появляется, т.е. оно остаётся развязанным.

Затем в неуравновешенной структуре ( $\epsilon_{\text{effe}} \neq \epsilon_{\text{effo}}$ ) со слабой связью (20 дБ) рассматривается, как изменение скоростей мод с изменением их режима возбуждения влияет на полярность субимпульсов (см. рис. 4). Из рис. 4 видно, что при положительной полярности возбуждающего импульса в случае, если синфазная мода является «быстрой», а противофазная – «медленной», то в четвертом (диагональном) плече «быстро-синфазный» субимпульс имеет положительную полярность, а «медленно-противофазный» – отрицательную. В противном случае полярности инвертируются, т.е. «быстро-противофазный» субимпульс становится отрицательным, а «медленно-синфазный» – положительным. Неизменным остается лишь то, что в диагональном плече противофазный субимпульс всегда отличается, а синфазный всегда совпадает с полярностью возбуждающего импульса. Верно и обратное утверждение (см. рис. 4): если в диагональном плече импульс имеет положительную полярность, то он сформирован синфазной модой, а если отрицательную, то – противофазной. Во 2-м и 3-м плечах изменение скоростей мод с изменением их режимов возбуждения никакого влияния на амплитуду и полярность импульсов не оказывает; кроме того, в 3-м прямом плече все импульсы всегда положительные, точнее – одинаковой полярности с возбуждающим импульсом.

Теперь в такой же неуравновешенной структуре ( $\epsilon_{\text{effe}} \neq \epsilon_{\text{effo}}$ ), но отличающейся сильной связью (порядка 1 дБ), обнаруживается появление дополнительных пар низкоамплитудных субимпульсов (см. рис. 5). Из рис. 5 важно не упустить то, что при сильной связи в плечах 3 и 4 (на дальнем конце в прямом и диагональном плечах), становятся заметными дополнительные низкоамплитудные пары модальных субимпульсов с нечётно-кратными (3, 5 и т.д.) задержками каждой моды, обусловленные существенной величиной связи и переотражениям от торцов. Их полярности совпадают с полярностями основной пары субимпульсов. Заметим, что в структурах со слабой связью (порядка 10–20 дБ) амплитуды кратных пар модальных субимпульсов пренебрежимо малы (см. рис. 4).

И, наконец, находится характер влияния рассогласования импеданса межсоединения (отрезка сильно связанных линий) и сопротивления нагрузок на соотношение амплитуд модальных субимпульсов (см. рис. 6).

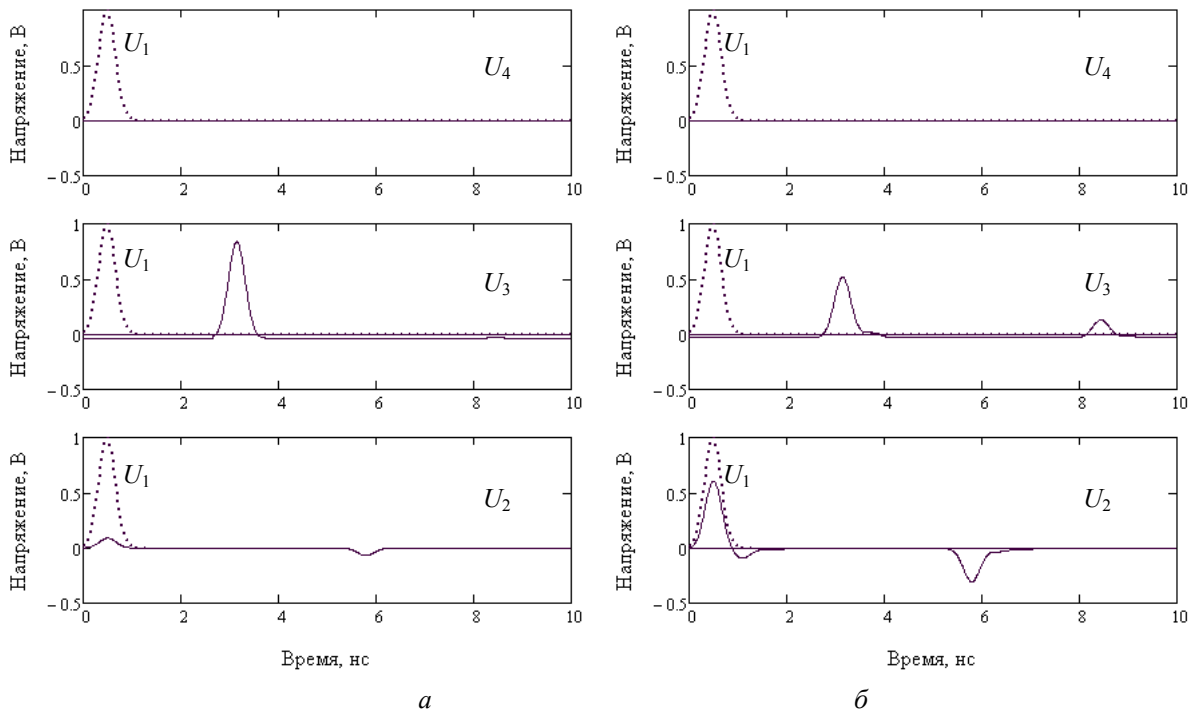


Рис. 3. Временные диаграммы прохождения импульсного сигнала в межсоединении с параметрами –  $\epsilon_{\text{effe}} = \epsilon_{\text{effo}} = 10$ ;  $Z_0 = Z_w = 50$  Ом: *a* – связь = 15 дБ; *б* – связь = 1 дБ

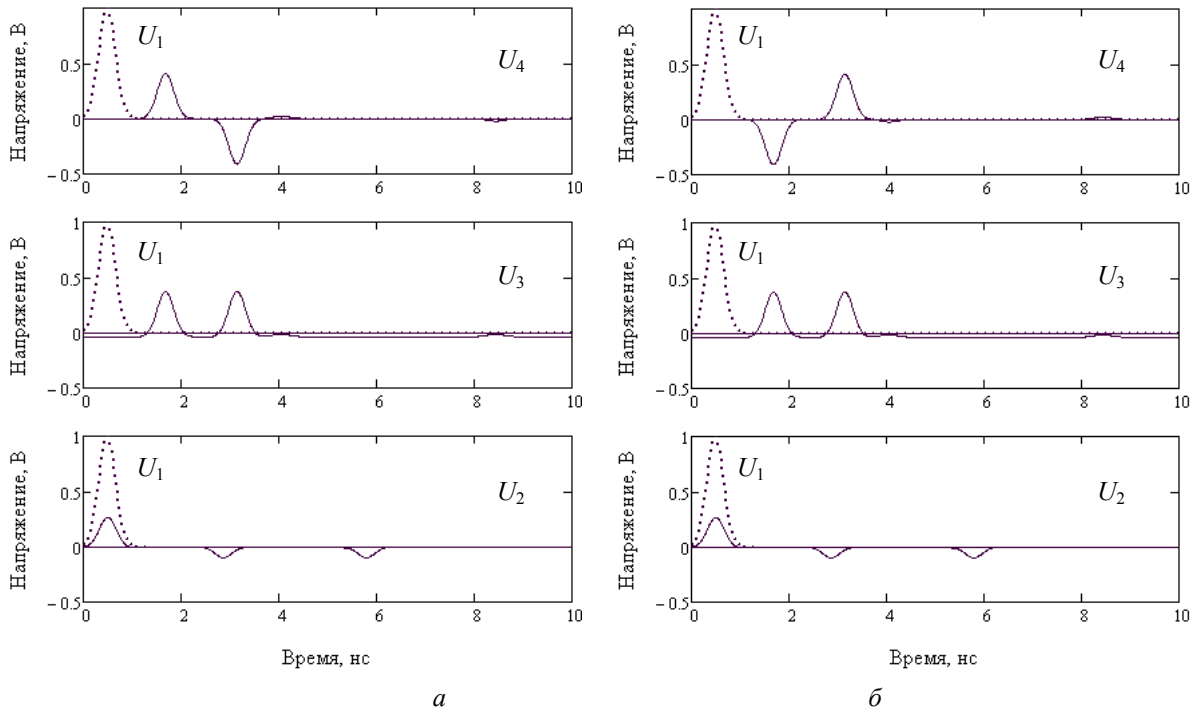


Рис. 4. Временные диаграммы прохождения импульсного сигнала в межсоединении с параметрами –  $Z_0 = Z_w = 50$  Ом; связь = 6 дБ: *a* –  $(\epsilon_{\text{effe}}; \epsilon_{\text{effo}}) = (2; 10)$ ; *б* –  $(\epsilon_{\text{effe}}; \epsilon_{\text{effo}}) = (10; 2)$

Предварительно заметим, что автором работы [4] было продемонстрировано то, что при условии равенства среднегеометрического импеданса межсоединительной структуры  $Z_w = \sqrt{Z_0 \epsilon Z_{00}}$  и сопротивления нагрузок  $Z_0$  (условие импедансного согласования в частотной области  $Z_w = Z_0$ ), амплитуды модальных субимпульсов во временной области будут одинаковыми.

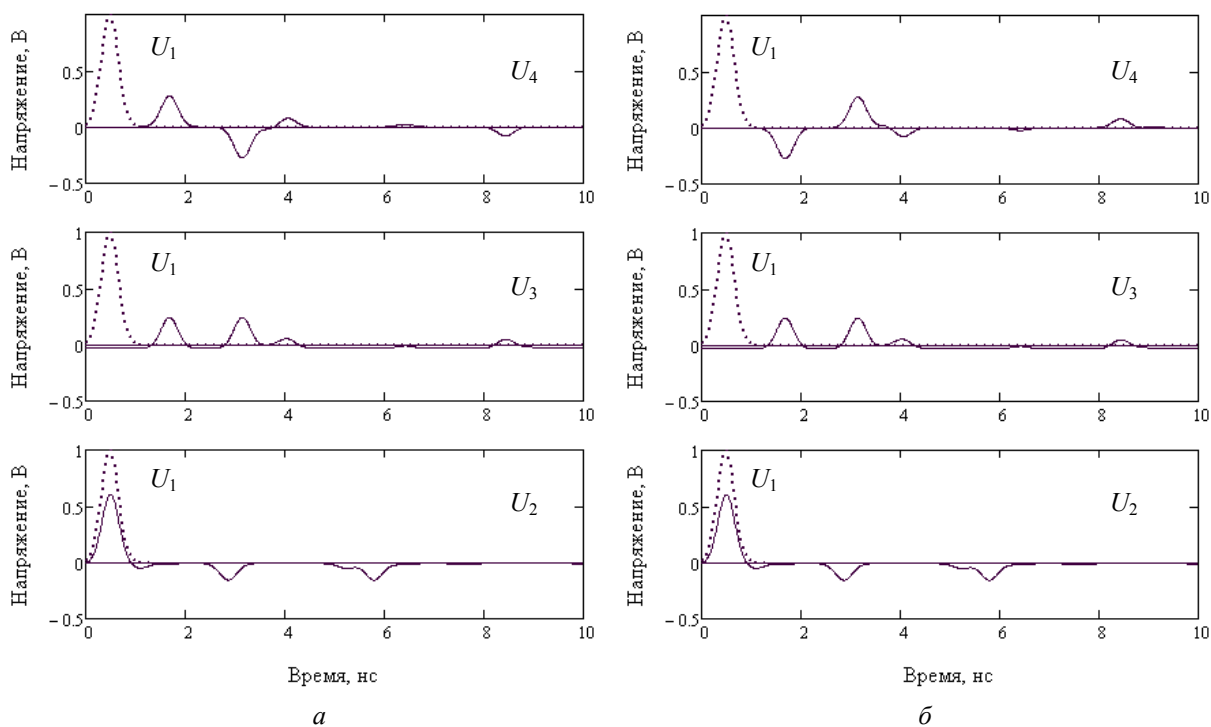


Рис. 5. Временные диаграммы прохождения импульсного сигнала в межсоединении с параметрами –  $Z_0 = Z_w = 50$  Ом; связь = 1 дБ: а –  $(\epsilon_{\text{effe}}; \epsilon_{\text{effo}}) = (2; 10)$ ; б –  $(\epsilon_{\text{effe}}; \epsilon_{\text{effo}}) = (10; 2)$

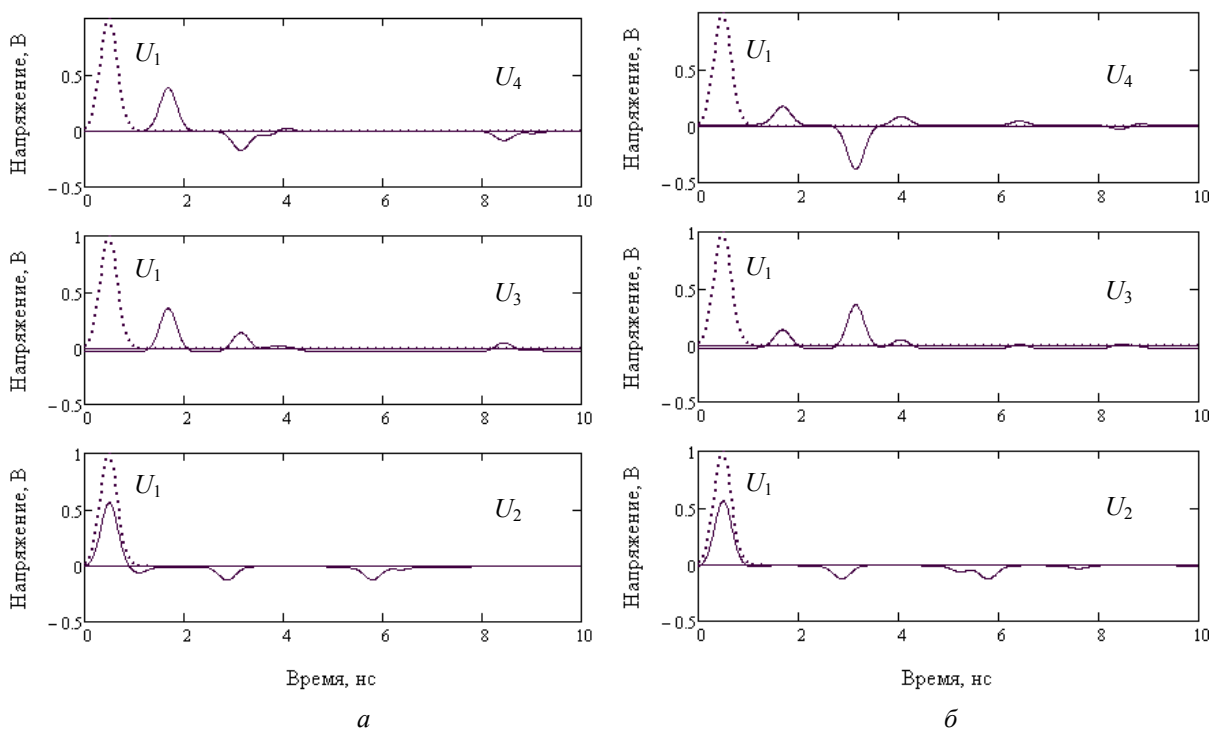


Рис. 6. Временные диаграммы прохождения импульсного сигнала в межсоединении с параметрами –  $(\epsilon_{\text{effe}}; \epsilon_{\text{effo}}) = (2; 10)$ ; связь = 1 дБ: а –  $Z_w = Z_0/2 = 25$  Ом; б –  $Z_w = 2Z_0 = 100$  Ом

Численные эксперименты на компьютерной модели в данном исследовании позволили выявить ещё одну закономерность, связывающую отношение амплитуд субимпульсов с отношением импедансов межсоединительной структуры  $Z_w$  и нагрузок  $Z_0$ , формулируемую следующим образом. Если среднегеометрический импеданс структуры выше сопротивления нагрузок  $Z_w > Z_0$ , то амплитуда

противофазного импульса в 3-м прямом плече будет выше амплитуды синфазного импульса  $A_{0o} > A_{0oe}$  (причем противофазный импульс может быть как «быстрым», так и «медленным»), в противном случае – наоборот (см. рис. 6). Верным будет и обратное утверждение; если амплитуда противофазного импульса выше амплитуды синфазного  $A_{0o} > A_{0oe}$ , то среднегеометрический импеданс структуры выше сопротивления нагрузок  $Z_w > Z_0$ , в противном случае – наоборот.

Итак, отношение амплитуд противофазного и синфазного субимпульсов в прямом плече  $A_{0o}/A_{0oe}$  приблизительно пропорционально отношению среднегеометрического импеданса отрезка связанных линий к сопротивлению нагрузок  $Z_w/Z_0$ .

#### Численные и экспериментальные результаты

Параметры тестовой полосковой структуры, взятой для компьютерного моделирования и экспериментального исследования (рис. 7), были выбраны следующими (см. рис. 2): ширина проводников  $w = 2,8$  мм; толщина платы  $h = 1$  мм; диэлектрическая проницаемость материала платы ФЛАН  $\epsilon_2 = 16$ ; диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_1 = 1$ ; диаметр цилиндрического экрана  $D = 14$  мм; длина межсоединения (отрезка связанных линий)  $L = 250$  мм.

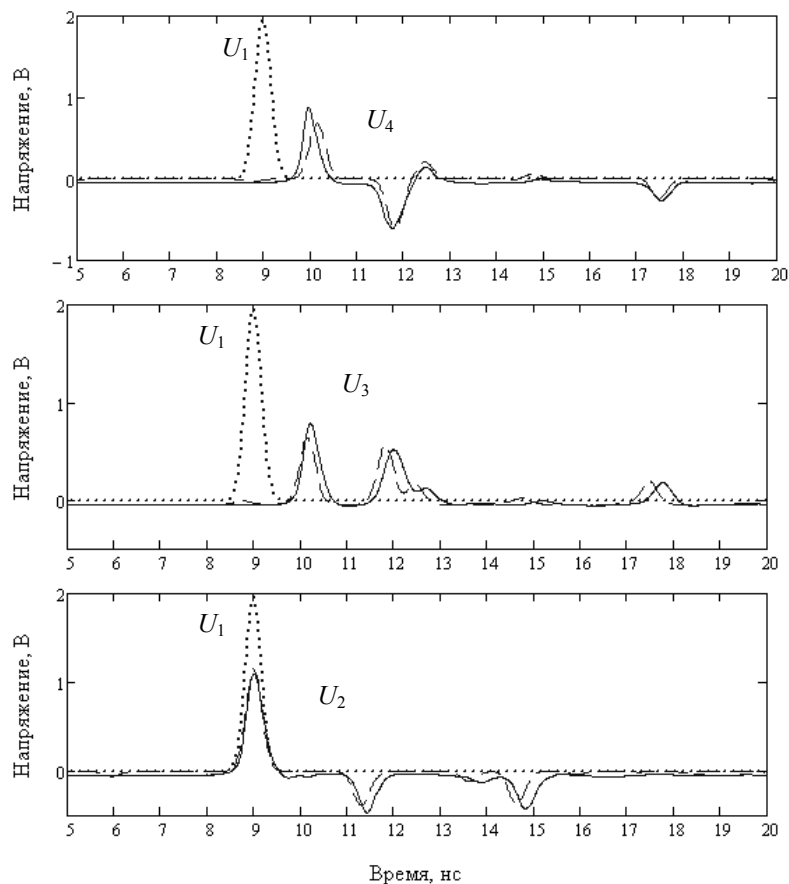


Рис. 7. Временные диаграммы прохождения импульсного сигнала в связанных линиях: --- расчёт; — эксперимент

При измерениях временных характеристик отрезка связанных линий одна пара плеч нагружалась на сосредоточенные согласованные нагрузки  $Z_0 = 50$  Ом, а к другой паре плеч подключались линии передачи, соединяющие первое плечо с источником импульсного сигнала  $U_1$  (генератором ступенчатого напряжения Г5-84, дополненного формирователем гауссова импульса  $\tau = 200$  пс,  $A = 1,95$  В), а другое – с цифровым стробоскопическим осциллографом Tectronix 11801В. Количество точек измерений в эксперименте равнялось 5120. Количество расчетных точек при моделировании с использованием преобразования Фурье – 1001.

Расчитанный с помощью компьютерной программы PULSE отклик на гауссов импульс  $U_1$  позволил найти модальные задержки и их разность, которые составили (см. рис. 7):  $t_e = 1,2$  нс;  $t_o = 2,8$  нс;  $\Delta t = |t_o - t_e| = 1,6$  нс. Эти же параметры, измеренные в эксперименте, оказались следующими (см. рис. 7):  $t_e = 1,25$  нс ( $\epsilon_{\text{effe}} = 2,2$ );  $t_o = 3,0$  нс ( $\epsilon_{\text{effo}} = 12,9$ );  $\Delta t = |t_o - t_e| = 1,75$  нс.

Таким образом, погрешность анализа во временной области для модальных задержек и их разности составляет:  $\delta t_e = -4\%$ ;  $\delta t_o = -6,7\%$ ;  $\delta \Delta t = -8,6\%$ . Учитывая сопоставимую погрешность самих измерений, можно утверждать, что достигнуто хорошее соответствие расчета и эксперимента. Очевидно, что данный эксперимент также косвенно подтверждает и другие численные результаты предварительного компьютерного моделирования, полученные с использованием этой же компьютерной программы PULSE (см. рис. 3–6).

### Заключение

Теоретически и экспериментально показано, что при функционировании высокоскоростных межсоединений в вычислительной технике и системах управления, созданных на современной конструктивно-технологической базе, существует реальная опасность деградации и расщепления полезных импульсных сигналов на несколько субимпульсных пачек (количество субимпульсов в пачке равно количеству связанных линий), имеющих для случая двух связанных линий погонные задержки порядка 4,8 нс/м; 11,2 нс/м и разностную задержку, достигающую 6,4 нс/м, что в ряде случаев при существенной амплитуде может вызывать ложные срабатывания устройств и сбой синхронизации. Вследствие того, что разнос субимпульсов может ощутимо превышать задержку основного «быстрого» субимпульса, это весьма ужесточает требования как к значениям диэлектрических проницаемостей материалов, так и к геометрической длине межсоединений (связанных линий).

Продемонстрировано, что при сильной связи (1...2 дБ) как в неуравновешенной ( $\epsilon_{\text{effe}} \neq \epsilon_{\text{effo}}$ ), так и в уравновешенной ( $\epsilon_{\text{effe}} = \epsilon_{\text{effo}}$ ) структурах в отклике прямого плеча появляются нечётно-кратные по времени низкоамплитудные гармонические субимпульсы  $t = (3, 5, \dots) t_1$ , сопутствующие каждой основной моде.

Отмечено, что в прямом плече полярность всех субимпульсов всегда совпадает с полярностью возбуждающего импульса входного плеча. При этом в диагональном плече противофазный субимпульс всегда отличается, а синфазный всегда совпадает с полярностью возбуждающего импульса.

Впервые показано, что при усилении связи (около 1 дБ) в отклике прямого плеча отношение амплитуд основных субимпульсов противофазной и синфазной мод  $A_{0o}/A_{0e}$  становится приближённо пропорциональным отношению среднегеометрического импеданса связанных линий к сопротивлению нагрузок  $Z_w/Z_0$  (при равенстве последних  $Z_w = Z_0$  получается известное равенство  $A_{0o}=A_{0e}$ ).

Таким образом, проектирование высокоскоростных межсоединений для печатных плат и интегральных микросхем необходимо выполнять с учетом новых особенностей механизма модальных искажений, изложенных в данной статье.

Авторы выражают благодарность А.Г. Лошилову и Т.Х. Бибикову за помощь в проведении импульсных измерений.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки РФ по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. «Проведение поисковых НИР по направлению «Микроэлектроника» в рамках мероприятия 1.2.1».

### Литература

1. Красноперкин В.М. Импульсные сигналы в связанных линиях передачи / В.М. Красноперкин, Г.С. Самохин, Р.А. Силин // Электронная техника. – Сер. Электроника СВЧ. – Вып. 7 (355). – 1983. – С. 3–8.
2. Gilb J.P. Pulse distortion on multilayer coupled microstrip lines / J.P. Gilb, С.А. Balanis // IEEE Trans. – 1989. – Vol. MTT-37, № 10. – P. 1620–1628.
3. Семёнов Э.В. Особенности импульсных последовательностей, формируемых фазовыми фильтрами на основе С-секций с периодической характеристикой группового времени запаздывания / Э.В. Семёнов, А.Н. Маничкин, Н.Д. Малютин // Радиотехника. – 2006. – № 6. – С. 27-30.
4. Самотин И.Е. Условие выравнивания амплитуд импульсов на выходе модального фильтра // Технологии ЭМС. – 2010. – № 4 (35). – С. 31–34.
5. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТГУ, 2007. – 152 с.
6. Сычёв А.Н. Комбинированный метод частичных емкостей и конформных отображений для анализа многомодовых полосковых структур. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 138 с.
7. Сычёв А.Н. Управляемые СВЧ-устройства на многомодовых полосковых структурах. – Томск: Том. гос. ун-т, 2001. – 318 с.

**Сычѳв Александр Николаевич**

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, профессор каф. компьютерных систем  
в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-44-68  
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

**Стручков Сергей Михайлович**

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа  
Эл. почта: struchkov.sm@gmail.com

Sychev A.N., Struchkov S.M.

**Distortion of pulsed signals in high-speed multi-conductor interconnections of digital microelectronic circuits**

In this paper we present new theoretical and experimental results on propagation of pulsed signals in the high-speed digital interconnections of computer and control systems. The circuit responses in time domain are obtained using the Fourier transform. We investigated in detail modal distortions of the several structures with different parameters. The represented numerical and experimental results confirm the adequacy of the developed computer model.

**Keywords:** computer circuits, digital microelectronics circuits, Gaussian pulse, modal distortions, high-speed interconnections, multi-conductor coupled lines, printed circuit board, integrated circuit.

---