

**Разработка базовой технологии моделирования линий связи печатных плат  
высокопроизводительных вычислительных комплексов**

**АННОТАЦИЯ.** Предложенная базовая технология моделирования прохождения сигналов в линиях связи МПП, которая является математической основой решения проблемы целостности (качества) сигналов в линиях передачи МПП

Показано что разработанные в материалах статьи методы, аналитические зависимости и алгоритмы моделей достаточно эффективно могут быть реализованы с помощью средств современной отечественной вычислительной техники.

*Ключевые слова и фразы:* МПП, базовая технология моделирования линии связи, сравнительный подход.

**Введение**

В настоящее время технические и эксплуатационные характеристики высокопроизводительных вычислительных комплексов во многом определяются конструкцией и технологией изготовления многослойных печатных плат (МПП). МПП являются основным несущим и коммутирующим элементом современных вычислительных комплексов. Повышение интеграции и числа выводов СБИС, увеличение тактовой частоты и требований к целостности сигналов и электромагнитной совместимости, внедрение новых технологий производства печатных плат, глобализация баз данных и диверсификация проектирования и изготовления – все это и многое другое предъявляет повышенные требования к средствам проектирования печатных плат.

Отечественная базовая технология обеспечения качества (целостности) сигналов вычислительных комплексов может быть создана с использованием отечественных средств моделирования и анализа переходных процессов в линии передачи информации на уровне МПП и должна использоваться как импортозамещающая технология. [1,2]

**Базовая технология**

В современных системах автоматизированного проектирования системных объектов, к которым можно отнести сложные технические системы (ЭВМ) и высокопроизводительные модули (ПЭВМ), используется компьютерное моделирование, что поднимает процесс проектирования на качественно новый уровень. Такие технологии содержат модуль параметрической оптимизации, в нашем случае структура МПП,

который позволяет при заданной структуре проектируемого устройства подобрать значения параметров составляющих ее элементов, при которых характеристики будут находиться в заданных разработчиком пределах. Математические и компьютерные модели, применяемые при автоматизации структурно-параметрического синтеза вычислительных комплексов, позволяют находить как структуру моделирующего объекта, в нашем случае МПП, так и параметры объекта, в первую очередь линии связи МПП.

Предлагаемая структура базовых технологий имеет вид (рис.1):



Рис. 1. Базовая технология

Базовая технология позволяет определить основные параметры линий связи для создания оценочных моделей. Методика анализа конструктивно-технологических характеристик процесса производства МПП, как составной части сквозного проектирования увеличивает количество оценочных параметров и позволяет разработать модели переходных процессов в линии связи с потерями с использованием математических преобразований Лапласа и Фурье. [1]

Возможные варианты компоновки прецизионных МПП изложены с учетом международного стандарта IPC-2251 и особенностями перехода ЭВМ на субнаносекундный диапазон и показан на рисунке 2. [3]

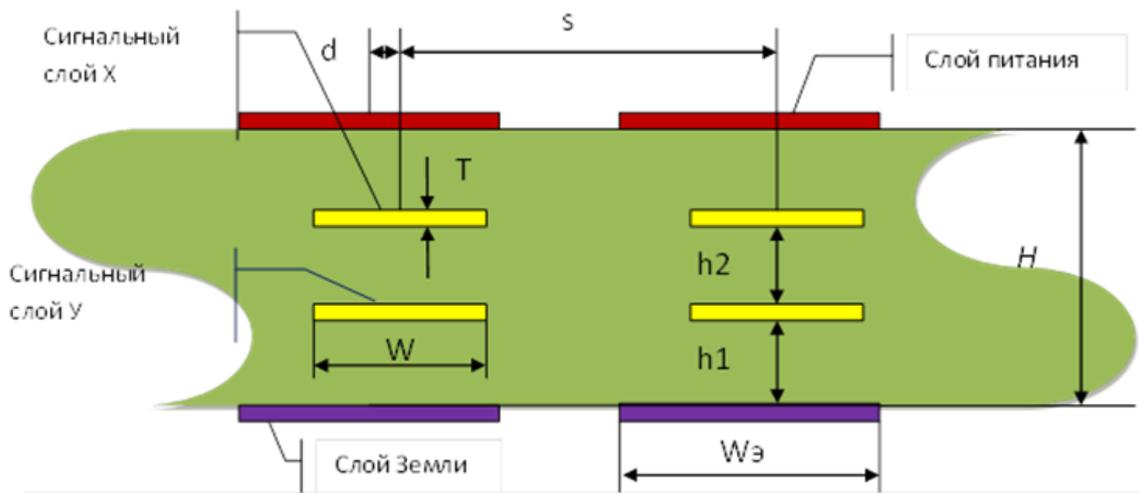


Рис. 2. Компоновка МПП.

Линия задержки является прецизионным инструментом выравнивания сигналов, что предполагает реализацию печатных линий в многослойных платах (МПП) в виде прецизионных полосковых структур, как на открытых внешних слоях, так и закрытых, во внутренних слоях, что является предметом исследования материалов статьи. Количественная степень искажения задержанного сигнала определяют значение первичных и вторичных параметров связанных линией связи, расчетные соотношения, которых необходимо знать для заполнения математических моделей переходных процессов переменными значениями. Определены основные параметры для зигзагообразной линии задержки. Топология зигзагообразной линии задержки характеризуется наличием одного или нескольких «изломов» на пути прохождения сигналов с поворотом на  $360^0$ . [4] Три топологии линии одинаковой длины, но с различной задержкой показаны на рисунке 3.

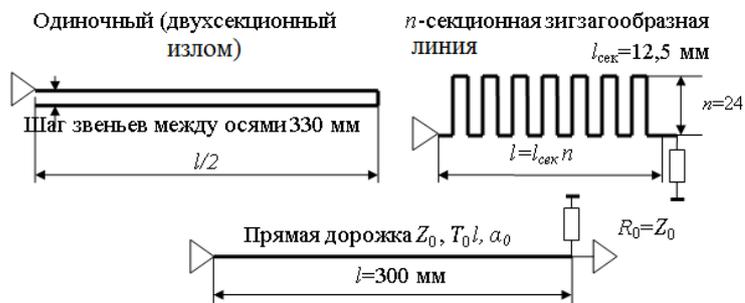


Рис. 3. Три топологии линии одинаковой длины.

Электромагнитная связь между звеньями определяет форму и степень искажения сигналов.

Количественные характеристики искажения задержанного сигнала определяют значения первичных и вторичных электрических параметров связанных линий, расчетные соотношения, которых необходимо знать для наполнения математических моделей переходных процессов переменными. Первичные электрические параметры линий связи: погонная емкость линии –  $C_0$ ; внешняя, погонная индуктивность линии –  $L_0$ ; внутренняя частотозависимая индуктивность проводников –  $L_f$ ; погонное активное сопротивление линии на постоянном токе –  $R_0$ ; частотнозависимое поверхностное сопротивление линии –  $R_f$ ; погонная проводимость линии –  $G_0$ ; взаимная емкость связанных линий –  $C_m$ ; взаимная индуктивность связанных линий –  $L_m$ ; взаимная проводимость связанных линий –  $G_m$ .

Вторичные электрические параметры линий связи: волновое сопротивление линии передачи на высоких частотах –  $Z_0$ ; собственная задержка линии передачи на высоких частотах –  $T_0$ ; коэффициент затухания гармонического сигнала на частоте  $f$  –  $\alpha_0$ ; коэффициент емкостной связи линий –  $K_c$ ; коэффициент индуктивной связи линий –  $K_l$ .

Анализ электрических параметров различных структур МПП проводится для закрытой, симметричной и ассиметричной полосковых структур. Полученные результаты анализа дают возможность разработать модели переходных процессов.

### **Разработка модели переходных процессов в линиях передачи с использованием математических методов (амплитудная и частотная модели во временной области).**

Показана целесообразность использование структурно-параметрического синтеза для построения математических моделей. При этом в структурно-параметрическом синтезе изменяются как параметры линии связи (МПП), так и их структура в виде разных топологий линий связи и задержек МПП. При этом математические функциональные модели представляют собой алгоритм вычисления выходных сигналов  $Y_t$  линий связи МПП по известным входным сигналам  $X_t$  и импульсных параметров характеристик фильтра исследуемой структуры. Такая модель является динамической и отражает поведение ее с использованием параметров времени. Исходными данными являются алгоритмы функционирования входных процессов с линиями связи с потерями и использование морфологических таблиц, которые представляют результаты морфологического анализа и используются для решения задач структурного синтеза с элементами алгоритмизации. Передача импульсных сигналов с высокой частотой следования в согласованной печатной линии сопровождается «затягиванием» фронтов и уменьшением амплитуды импульсов. Причем, фронт логического сигнала на конце линии связи становится существенно нелинейным, в первую очередь, из-за частотной зависимости коэффициента затухания, определяемой скин-эффектом.

Исследованы искажения импульсных сигналов в линиях связи МПП с потерями. Предложены модели переходных процессов с использованием амплитудного и частотного методов. Предпочтение отдано частотному моделированию с использованием метода Фурье, который позволяет решить задачу оптимального выделения аддитивных компонент сигналов (фильтрации) и синтеза сигналов, обладающих максимальной/минимальной концентрацией энергии в заданном наборе частотных интервалов. Программная реализация моделей входит в отечественный САПР ТороR.

Представлены сравнительный анализ и оценка современных импортных и отечественных САПР (таблица 1).

### Сравнительный анализ и оценка современных САПР, включая ТороR

Таблица 1

№ п.п	Наименование параметра, критерия	Mentor Graphics Expedition	Mentor Graphics PADS	ТороR
Электрические параметры линии связи МПП (первичные параметры)				
1	погонная емкость линии – $C_0$	+	+	+
2	внешняя, погонная индуктивность линии – $L_0$	+	+	+
3	внутренняя частотозависимая индуктивность проводников – $L_f$	+	+	+
4	погонное, активное сопротивление линии на постоянном токе – $R_0$	+	+	+
5	частотозависимое, поверхностное сопротивление линии – $R_f$	+	+	+
6	погонная проводимость линии – $G_0$	+	+	+
7	взаимная емкость связанных линий – $C_m$	+	+	+
8	взаимная индуктивность связанных линий – $L_m$	+	+	+
9	взаимная проводимость связанных линий – $G_m$	+	+	+
Электрические параметры линии связи МПП (вторичные параметры с количественной оценкой)				

10	волновое сопротивление линии передачи на высоких частотах – $Z_0$	-	-	+
11	собственная задержка линии передачи на высоких частотах – $T_0$	-	-	+
12	коэффициент затухания гармонического сигнала – $K_f$	-	-	+
13	коэффициент емкостной связи линий - $K_c$	-	-	+
14	коэффициент индуктивной связи линий - $K_l$	-	-	+
Факторы, влияющие на задержку и потерю помехозащищенности				
15	геометрические размеры линии передачи	+	+	+
16	Фронт логического сигнала	+	+	+
17	Выходной и пороговый уровни примо-передатчиков	+	+	+
18	Тип передачи (однофазная, парафазная)	+	+	+
19	Тип согласования линии (последовательное, параллельное)	+	+	+
Импульсные параметры передачи				
20	Время установления фронта логического перепада до порогового уровня приемного элемента	+	+	+
21	Динамическое уменьшение амплитуды пачки импульсов	-	-	+
22	Расширение импульсов	+	+	+
23	Разброс задержек сигналов в серийном производстве МПП	+	+	+
Использование моделей переходных процессов в линиях передач				
24	Амплитудная модель во временной области, учитывающая переходные	-	-	+

	процессы в линиях передач с потерями			
25	Частотная модель с использованием методов Фурье	+	+	+

По перечисленным параметрам САПР ТороR превосходит своих конкурентов и поэтому считается наиболее предпочтительной с точки зрения поддерживаемого функционала для моделирования линий связи МПП, в то время как САПР Mentor Graphics Expedition и САПР Mentor Graphics PADS по рассматриваемым критериям считаются между собой равноценными и обе уступают САПР ТороR.

### Заключение

Материалы статьи содержат новое решение актуальной научной задачи – разработка базовой технологии моделирования линий связи печатных плат для высокопроизводительных вычислительных комплексов в рамках программы импортозамещения.

### Список литературы

1. **Сорокин С.А.** Актуальные проблемы моделирования печатных проводников многослойной печатной платы при разработке отечественного САПР / Чудинов С.М. // Радиопромышленность, 2015/03. - с. 220-236.
2. **Сорокин С.А.** Методика допускового анализа прецизионных печатных плат / Чудинов С.М. // Радиопромышленность, 2015/03. - с. 237-241.
3. **Барнс Дж.** «Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами» Пер.с англ. М. Мир 1990 г. - 217 с.
4. **Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Орлов П.Е.** Влияние длины и числа витков на задержку в микрополосковой меандровой линии. «Инфокоммуникационные технологии» Том 12 № 4, 2014 г.

*Об авторах:*



#### **Станислав Михайлович Чудинов**

Доктор технических наук, профессор, научный консультант генерального директора АО «НИИВК им. М.А. Карцева». Специалист по созданию вычислительных систем. Дважды лауреат Государственной премии СССР. Имеет государственные награды и почетные звания: «Заслуженный деятель науки РФ», «Заслуженный Конструктор РФ» и др.

*e-mail:*

*chud35@yandex.ru*



#### **Сорокин Сергей Александрович**

Главный конструктор АО «НИИВК им. М.А. Карцева». Специалист в области вычислительной техники и разработчик отечественных САПР.

*e-mail:*

*sorokin@prosoft.ru*