



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В ЛИНИЯХ СВЯЗИ С ПОТЕРЯМИ

**М. А. КОЛЕСНИКОВ<sup>1)</sup>**  
**А. А. ЧЕРЕПНЕВ<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт суперЭВМ», г. Москва

<sup>2)</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева», г. Москва

e-mail:  
Kolesnikov@super-computer.ru  
e-mail: hradio@mail.ru

В статье сформулированы основные факторы, определяющие скорость обмена между удаленными устройствами вычислительных комплексов. Анализируется точность существующих и предлагаемых моделей линий передачи с потерями.

Ключевые слова: коэффициент затухания, скин-эффект, время установления импульса, динамические потери амплитуды импульсов, переходная характеристика, параллельное (последовательное) согласование, «пачка» импульсов, система сквозного проектирования.

Быстродействие отдельных устройств растет значительно быстрее, чем производительность вычислительного комплекса в целом, что, в первую очередь связано с потерями времени на передачу сигналов между удаленными друг от друга устройствами. С ростом быстродействия элементной базы эта тенденция только усиливается, что определяет актуальность задачи моделирования трактов передачи большой протяженности.

Передача импульсных сигналов с высокой частотой следования в согласованном кабеле 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.

Возникающие в результате деформации импульса, дополнительная задержка и потеря помехозащищенности зависят от пяти основных факторов:

- геометрических размеров линии передачи;
- фронта логического сигнала;
- выходных и пороговых уровней приемо-передатчиков;
- типа передачи (однофазная, парафазная);
- типа согласования линии (последовательное, параллельное).

Применение субнаносекундной логики и особенно прецизионных, полосковых линий печатных плат, а также субминиатюрных кабелей вынуждает при проектировании трактов связи в первую очередь учитывать импульсные параметры передачи:

- время установления фронта логического перепада до порогового уровня приемного элемента;
- динамическое уменьшение амплитуды пачки импульсов;
- расширение (обужение) импульсов;
- разброс задержек сигналов в кабельном жгуте.

Например, применение миллиметрового кабеля РК50-1-24 для передачи сигналов на расстояние 20 м приводит к уменьшению темпа передачи из-за потерь электромагнитной энергии в проводниках, более, чем на 20% по сравнению с «чистой» задержкой линии ( $T = T_0 l = 5 \cdot 20 = 100 \text{ нс}$ ). Аналогичные потери происходят в прецизионных полосковых линиях шириной менее 0,3 мм в многослойных печатных платах размером 400x400 мм.



### Переходной процесс в линии передачи с потерями.

Приближенное выражение переходной характеристики согласованной линии передачи (при  $t_{\phi}=0$ ) предложено в [1] и имеет вид:

$$h(t) = \frac{u(t)}{U_{\text{лоз}}} = 1 - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}} \quad (1)$$

где:  $\operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}$  – интеграл вероятности (функция Крампа),

$$\vartheta = \frac{4t}{l^2 M^2}, M \left[ \frac{\sqrt{nc}}{M} \right] = 2.05 \frac{\alpha [\text{дБ/М}]}{\sqrt{f [\text{МГц}]}}$$

$\alpha$  – затухание гармонического сигнала в линии, рассчитанное или измеренное на частоте  $f$ ,  $U_{\text{лоз}}$  – значение логического перепада в начале линии.

При конечном фронте входного перепада напряжения переходной процесс в конце линии передачи имеет вид:

$$\begin{cases} h(t \leq t_{\phi}) = \frac{2}{\vartheta_{\phi}} A(\vartheta) \\ h(t > t_{\phi}) = \frac{2}{\vartheta_{\phi}} [A(\vartheta) - A(\vartheta - \vartheta_{\phi})] \end{cases} \quad \text{где: } \vartheta_{\phi} = \frac{4t_{\phi}}{l^2 M^2}, \quad (2)$$

$$A(\vartheta) = \left(1 + \frac{\vartheta}{2}\right) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}\right) - \sqrt{\frac{\vartheta}{\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{\vartheta}}$$

Выражения (1), (2) справедливы в ограниченном частотном диапазоне и найдены при следующих допущениях:

а) Потерями в диэлектрике можно пренебречь при передаче импульсов со спектром шириной до ~500 МГц. Влияние диэлектрика на форму импульса заметно на низких (неинформативных) уровнях переходной характеристики.

в) В нижней части спектра рабочий диапазон выражений (1), (2) ограничен двумя факторами. Предполагается, что внешняя индуктивность (контур прямой – обратный проводник), зависящая только от геометрических размеров линии, существенно больше внутренней индуктивности каждого проводника, зависящей кроме геометрических размеров также и от частоты, т.е.  $L_{\text{внут}}/L_{\text{внеш}} \ll 1$  и внутренней индуктивностью проводников можно пренебречь. Для большинства радиочастотных кабелей это условие выполняется для частот уже более (0,5-1,0) КГц.

Кроме того, предполагается, что омическое сопротивление проводников прямо пропорционально корню квадратному из частоты, т.е. на постоянном токе сопротивление равно нулю. В действительности, переходной процесс стремится к единице только при последовательном согласовании. При параллельном, наиболее распространенном согласовании установившееся значение равно напряжению делителя:  $K = R_{\text{свт}} / (R_{\text{свт}} + R_{\phi})$ , где  $R_{\text{свт}}, R_{\phi}$  – соответственно согласующее и погонное сопротивление линии т.е. меньше единицы. Попытка повысить точность вычислений путем суммирования частотно зависимого сопротивления и сопротивления на постоянном токе [2] приводит к еще более существенной ошибке расчета, но уже в области высоких частот на малых уровнях переходного процесса. Экспериментальные исследования переходного процесса показали, что для большинства радиочастотных кабелей влияние сопротивления проводников на постоянном токе заметно лишь с уровней 0,95K и выше.

Таким образом, для параллельного согласования выражения (1), (2) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} h_{\text{пар}}[t, h(t) \leq 0,95] = h(t) \\ h_{\text{пар}}[t, h(t) > 0,95] = Kh(t) \end{cases} \quad (3)$$



Выражение (1), (2), (3) описывают переходной процесс на конце согласованной линии передачи с потерями при возбуждении ее перепадом напряжения с конечной длительностью фронта (рис.1). С их помощью и используя теорему запаздывания можно описать реакцию линии на импульсы, практически, любой формы.

Следовательно, выражение (1), (2), (3) могут быть использованы, как математические модели в системе сквозного проектирования САПР.

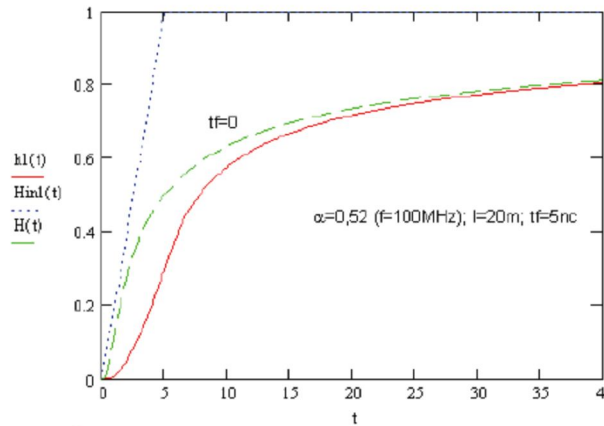


Рис. 1. Влияние фронта входного сигнала на искажение перепада напряжения на выходе согласованного кабеля РК50-0,6-23 длиной 20 м

**Динамические потери помехозащищенности**

Форма импульса длительностью  $\tau$  на конце линии (рис.2) описывается выражением:

$$\begin{cases} h_{\text{puls}}(t \leq \tau) = h(\vartheta) \\ h_{\text{puls}}(t > \tau) = h(\vartheta) - h(\vartheta - \vartheta_{\text{puls}}) \end{cases} \quad \text{где: } \vartheta_{\text{puls}} = \frac{\tau}{l^2 M^2} \quad (4)$$

Потери по амплитуде импульса длительностью  $\tau = 15$  нс, в субминиатюрном кабеле диаметром 0,6 мм составляют более 30%. При таких потерях амплитуды качественный прием информации можно осуществить только используя парафазную передачу и прием, при котором приемник срабатывает при превышении разности прямого и обратного импульсов.

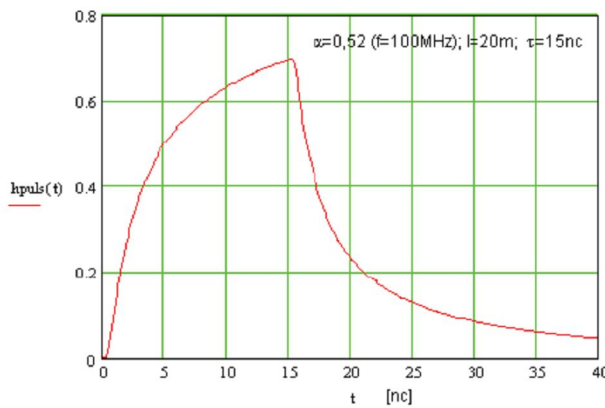


Рис. 2. Искажение одиночного импульса длительностью 15 нс на выходе согласованного кабеля РК50-0,6-23 длиной 20 м



Передача пачки импульсов, также сопровождается характерными видами искажений (рис. 3).

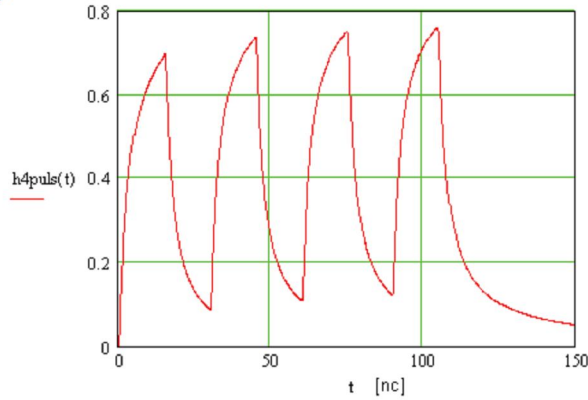


Рис. 3. Искажение «пачки» из 4-х импульсов длительностью 15 нс и скважность 2 на выходе согласованного кабеля РК50-0,6-23 длиной 20 м

В «пачке» из 4-х импульсов наблюдается автосмещение последних импульсов к среднему уровню, а в наихудших условиях с т. з. помехозащищенности оказывается первый импульс.

Представленные примеры иллюстрируют важность предварительного моделирования трактов передачи на этапе электронного проектирования вычислительных комплексов.

#### Инженерные модели экспресс оценки временных искажений

В инженерной практике разработчику чаще всего важно прогнозировать потери передачи по времени.

Выразить параметр времени из выражений (1), (2), (3) не представляется возможным. Для этой цели разложим функции  $\text{erf}(1/v)$  и  $\exp(-1/v)$  в знакпеременный ряд и ограничимся первыми членами разложения:

$$\tilde{h}(\tau) \cong 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi v}}, \quad \tilde{A}(\vartheta) \cong 1 + \frac{\vartheta}{2} - 2 \sqrt{\frac{\vartheta}{\pi}}$$

Точность приближения в рабочем диапазоне уровней (0,4-1,0) не хуже 10% (рис.4), что вполне приемлемо для инженерных оценок.

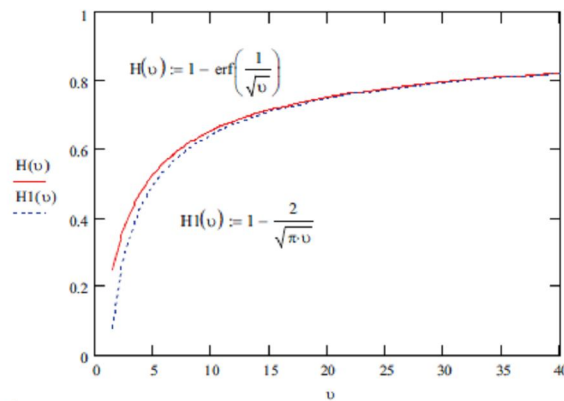


Рис. 4. Обобщенная переходная характеристика рассчитанная точно и приближенно



Полученные таким образом приближенные выражения переходных функций (5, 6) содержат только алгебраические функции, что дает возможность рассчитать время установления переходной характеристики кабеля до любого наперед заданного уровня  $N$ :

$$t_{уст.N} = 1,34 \left[ \frac{\alpha l}{(1-N)} \right]^2$$

С учетом фронта задержку сигнала на уровне  $N$  можно рассчитать по формуле:

$$t_N = t_{уст.N} \left( 1 + \frac{t_{\phi}}{4t_{уст.N}} \right)^2$$

Необходимый для моделирования такой параметр линии передачи, как затухание подробно описан в технической литературе, а также приводится в технических условиях на промышленные кабели. Однако, приводимый в ТУ параметр  $\alpha$  сильно завышен и дает только верхнюю оценку.

Описанные модели позволяют прогнозировать форму, амплитуду и время установления сигналов на выходе согласованной линии передачи при возбуждении ее импульсами с конечной длительностью фронта.

В заключении отметим, что все приводимые в работе соотношения тщательно проверены экспериментально.

#### Литература

1. Жекулин Л.А. «Неустановившиеся процессы в коаксиальном кабеле». «Известия» АН СССР, №9, стр. 1242, М., 1946.
2. Yao F. "Analysis of signal transmission on high-speed logic circuits" – "IEEE Trans.", v. EC-12, №4, 1963.

## MODELLING OF THE FORM OF PULSE SIGNALS IN COMMUNICATION LINES WITH LOSSES

**M. A. KOLESNIKOV<sup>1)</sup>**  
**A. A. CHEREPNEV<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> JSC «НИ superIBM», Moscow

<sup>2)</sup> JSC «Scientific Research  
Institute of computing  
systems n.a. M.A. Karcev»,  
Moscow

e-mail:  
Kolesnikov@super-computer.ru  
e-mail: hradio@mail.ru

The summary: In clause the major factors determining speed of an exchange between removed devices of computer complexes are formulated. The accuracy of existing and offered models of lines of transfer with losses is analyzed.

Key words: factor of attenuation, скин-effect, time of an establishment of a pulse, dynamic losses of amplitude of pulses, transitive characteristic parallel (consecutive) coordination, "pack" of pulses, system of through designing.