

Анализ временных откликов двух- и четырехпроводных линий передачи с резистивными нагрузками по аналитическим моделям

Е.Б. Черникова, П.В. Забываева

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
chernikova96@mail.ru

Аннотация — В статье представлены результаты апробации аналитических моделей для вычисления частотных и временных откликов, учитывающих произвольные оконечные резистивные нагрузки и асимметрию поперечных сечений линий передачи (ЛП). Апробация проведена на шести структурах 2-проводной ЛП и трех структурах 4-проводной ЛП. Достоверность полученных результатов подтверждена с помощью сравнительного анализа с результатами, полученными с помощью численных методов, который показал согласованность.

Ключевые слова — радиоэлектронная аппаратура, модальный анализ, линии передачи, аналитические модели, временной отклик.

I. ВВЕДЕНИЕ

В качестве основных элементов и узлов микро- и нанoeлектронных систем широко применяют межсоединения, описываемые с помощью теории линии передачи (ЛП) [1]. ЛП являются основополагающими в каждой электронной системе, от интегральных схем (ИС) до крупных систем. Между тем использование межсоединений ведет к появлению ряда задач, касающихся ЭМС [2]. В высокопроизводительных вычислительных системах межсоединения электронных схем, которые раньше считались незначительными элементами теперь оказывают важное влияние на общую производительность. Резкое увеличение скорости переключения и плотности, повышение тактовой частоты приводит к возникновению проблем в ЛП. Например, в тех местах ЛП, где изменяется импеданс, возникают отражения. Могут возникать перекрестные помехи из-за электромагнитной связи между сигнальными проводниками с другими элементами схемы. В дифференциальных парах может возникнуть сдвиг сигнала по фазе в тех случаях, когда они согласованы неправильно. В этой связи возникает необходимость в оценке распространяющегося сигнала, чтобы учитывать и корректировать возникающие проблемы еще на начальных стадиях разработки [3]. Таким образом, точное моделирование и анализ распространения сигнала в ЛП имеет большое значение для проектирования высокоскоростных ИС и систем, широко применяемых при создании цифровых компьютеров и систем связи. Благодаря пониманию процессов в ЛП, как в частотной, так и во временной

областях, разработчики могут предсказать нежелательные эффекты, предпринять меры по их устранению и повысить надежность своих систем.

Отдельным направлением является разработка СВЧ-устройств на основе ЛП, например, ответвители, резонаторы, фильтры и др. [4]. Одни из таких устройств для защиты используют модальное разложение на импульсы меньшей амплитуды из-за разности погонных задержек мод. Они представляют из себя N -проводную связанную систему ЛП на диэлектрической подложке и служит для защиты от электромагнитных помех пико- и наносекундной длительности, распространяющихся кондуктивным путем [5]. Ослабление помехи происходит за счет ее уменьшения в результате разложения помехового импульса на импульсы меньшей амплитуды. При разработке таких устройств важно контролировать максимальную амплитуду на выходе, а также полосу пропускания фильтра. Для этого необходимо вычислять частотный и временной отклик.

Для анализа волновых процессов в межсоединениях и выявления причин искажения форм сигнала используют аналитические подходы [6]. Они способствуют лучшему пониманию физических явлений и сокращают время вычислений по сравнению с численными методами, а также используются для проверки результатов моделирования [7]. Известен подход к исследованию характеристик ЛП, называемый модальным анализом. Модальный анализ известен довольно давно, и на его основе разработан ряд аналитических моделей для вычисления характеристик ЛП [8]–[10]. Стоит отметить, что в теории линий передачи симметричные ЛП представлены довольно обстоятельно, тогда как асимметричным ЛП уделено недостаточно внимания [11]. В [12] получены аналитические модели для вычисления временных и частотных откликов 2- и 4-проводных ЛП. В них учитываются некоторые ограничения известных моделей, а именно учтено наличие произвольных резистивных нагрузок, а также асимметрии поперечного сечения ЛП. Между тем ранее не выполнялось широкой апробации данных аналитических моделей на различных поперечных сечениях ЛП. Цель данной работы – выполнить анализ временных откликов 2- и 4-проводных ЛП с резистивными нагрузками по аналитическим моделям.

II. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Аналитическая модель для вычисления частотной характеристики S_{21} 2-проводной ЛП, при условиях, что импедансы равны как со стороны генератора ($ZG_1=ZG_2=ZG_3=ZG_4$), так нагрузке ($ZL_1=ZL_2=ZL_3=ZL_4$), выглядит следующим образом [12]:

$$S_{21} = \frac{e^{-\gamma_e x} + \rho_{Le} e^{-\gamma_e x}}{1 - \rho_{Le} \rho_{Ge} e^{-2\gamma_e x}} \frac{R\pi}{R\pi - Rc} 2P_e + \frac{e^{-\gamma_o x} + \rho_{Lo} e^{-\gamma_o x}}{1 - \rho_{Go} \rho_{Lo} e^{-2\gamma_o x}} \frac{Rc}{Rc - R\pi} 2P_o, \quad (1)$$

где γ_i – коэффициент распространения. P_i – коэффициент падающей волны, ρ_{Gi} и ρ_{Li} – коэффициенты отражения от генератора и нагрузки:

$$P_o = \frac{Z_o}{Z_o + ZG}, \quad P_e = \frac{Z_e}{Z_e + ZG}, \quad \rho_{Go} = \frac{ZG - Z_o}{ZG + Z_o},$$

$$\rho_{Ge} = \frac{ZG - Z_e}{ZG + Z_e}, \quad \rho_{Lo} = \frac{ZL - Z_o}{ZL + Z_o}, \quad \rho_{Le} = \frac{ZL - Z_e}{ZL + Z_e}.$$

Аналитические модели для вычисления временного отклика на выходе активного проводника 2-проводной ЛП приведены ниже:

$$V_{1,2}(x,t) = \frac{R\pi}{R\pi - Rc} P_e (1 + \rho_{Le}) E(t - x\tau_e) + \frac{Rc}{Rc - R\pi} P_o (1 + \rho_{Lo}) E(t - x\tau_o), \quad (2)$$

где τ_e , τ_o – погонные задержки четной и нечетной мод.

Для 4-проводной ЛП частотная характеристика S_{21} :

$$S_{21} = \frac{e^{-\gamma_1 x} (1 + \rho_{L1})}{1 - \rho_{G1} \rho_{L1} e^{-2\gamma_1 x}} \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} P_1 + \frac{e^{-\gamma_2 x} (1 + \rho_{L2})}{1 - \rho_{G2} \rho_{L2} e^{-2\gamma_2 x}} \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} P_2 + \frac{e^{-\gamma_3 x} (1 + \rho_{L3})}{1 - \rho_{G3} \rho_{L3} e^{-2\gamma_3 x}} \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} P_3 + \frac{e^{-\gamma_4 x} (1 + \rho_{L4})}{1 - \rho_{G4} \rho_{L4} e^{-2\gamma_4 x}} \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} P_4, \quad (3)$$

где η_i – модальные числа.

А временной отклик на выходе активного проводника:

$$V_{1,2}(x,t) = \frac{1}{2} \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} P_1 (1 + \rho_{L1}) E(t - x\tau_1) + \frac{1}{2} \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} P_2 (1 + \rho_{L2}) E(t - x\tau_2) + \frac{1}{2} \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} P_3 (1 + \rho_{L3}) E(t - x\tau_3) + \frac{1}{2} \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} P_4 (1 + \rho_{L4}) E(t - x\tau_4). \quad (4)$$

III. ДВУХПРОВОДНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Здесь представлен анализ частотных и временных откликов 2-проводных ЛП с помощью аналитических моделей. Для примера выбраны структуры с модальным разложением. Поперечные сечения шести исследуемых 2-проводных ЛП и их схема соединений, где V обозначено напряжение на выходе ЛП, приведены на рис. 1.

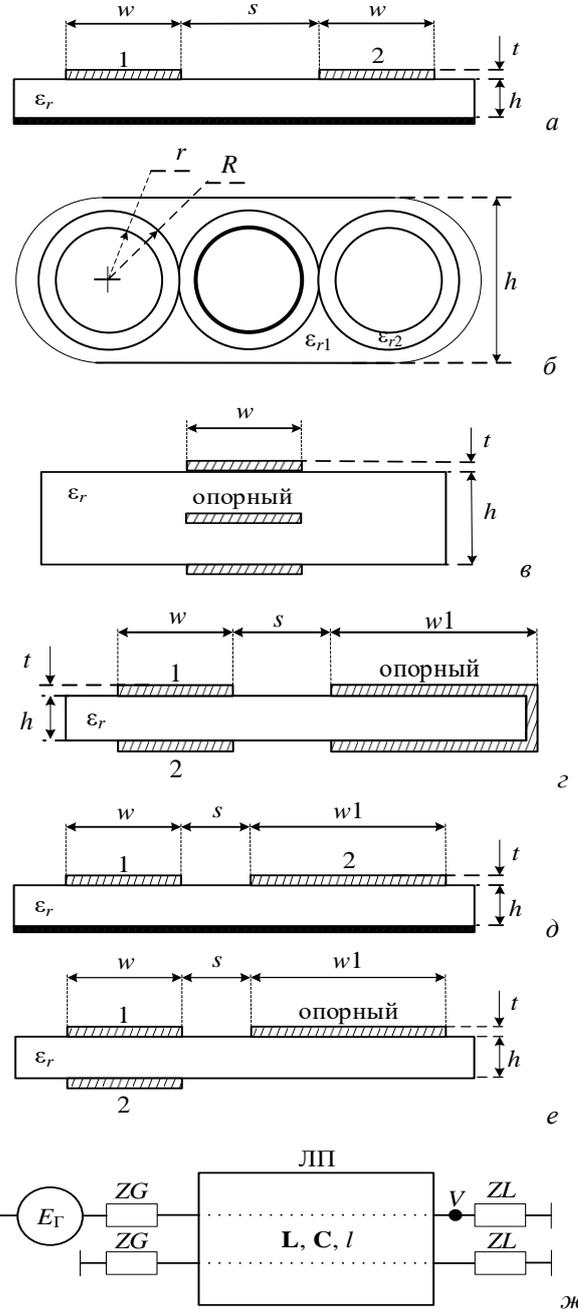


Рис. 1. Поперечные сечения 2-проводных ЛП микрополосковой (а), плоского кабеля (б), зеркально-симметричной (в), симметричной с лицевой связью (г), асимметричной микрополосковой (д), асимметричной с лицевой связью (е) ЛП и их схема электрических соединений (ж)

Для подтверждения достоверности приведены результаты сравнения полученных характеристик с результатами моделирования численными (алгоритмическими) методами, для частотного [13] и временного [14] откликов, соответственно. При вычислении частотного отклика $ZG=ZL=50$ Ом, а временного $ZG=25, ZL=75$ Ом.

Для получения матриц погонных коэффициентов электростатической (**C**) и электромагнитной (**L**)

индукций выполнялось построение геометрических моделей поперечных сечений исследуемых структур в ПО TALGAT [15]. В данном случае исследуются идеализированные структуры без учета потерь, поэтому значения элементов матриц **R** (потери в проводниках) и **G** (потери в диэлектрике) принимались равными нулю. Матрицы **C**, **L** для всех ЛПП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Матрицы **C** и **L** 2-проводных ЛПП

ЛПП	Матрицы	
	C , Ф/м	L , Гн/м
Микрополосковая	$\begin{bmatrix} 9,779 \cdot 10^{-11} & -9,551 \cdot 10^{-12} \\ -9,551 \cdot 10^{-12} & 9,779 \cdot 10^{-11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3,664 \cdot 10^{-7} & 6,863 \cdot 10^{-8} \\ 6,863 \cdot 10^{-8} & 3,664 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}$
Плоский кабель	$\begin{bmatrix} 7,389 \cdot 10^{-11} & -8,906 \cdot 10^{-12} \\ -8,906 \cdot 10^{-12} & 7,389 \cdot 10^{-11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3,963 \cdot 10^{-7} & 8,667 \cdot 10^{-8} \\ 8,667 \cdot 10^{-8} & 3,963 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}$
Зеркально-симметричная	$\begin{bmatrix} 1,320 \cdot 10^{-10} & -1,282 \cdot 10^{-11} \\ -1,282 \cdot 10^{-11} & 1,320 \cdot 10^{-10} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3,293 \cdot 10^{-7} & 6,784 \cdot 10^{-8} \\ 6,784 \cdot 10^{-8} & 3,293 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}$
Симметричная с лицевой связью	$\begin{bmatrix} 6,653 \cdot 10^{-11} & -5,148 \cdot 10^{-11} \\ -5,148 \cdot 10^{-11} & 6,653 \cdot 10^{-11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7,903 \cdot 10^{-7} & 5,071 \cdot 10^{-7} \\ 5,071 \cdot 10^{-7} & 7,903 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}$
Асимметричная микрополосковая	$\begin{bmatrix} 3,211 \cdot 10^{-10} & -1,056 \cdot 10^{-11} \\ -1,056 \cdot 10^{-11} & 5,902 \cdot 10^{-10} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,303 \cdot 10^{-7} & 7,562 \cdot 10^{-9} \\ 7,562 \cdot 10^{-9} & 7,549 \cdot 10^{-8} \end{bmatrix}$
Асимметричная с лицевой связью	$\begin{bmatrix} 1,277 \cdot 10^{-9} & -1,262 \cdot 10^{-9} \\ -1,262 \cdot 10^{-9} & 1,277 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,663 \cdot 10^{-7} & 4,473 \cdot 10^{-7} \\ 4,473 \cdot 10^{-7} & 4,669 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}$

Частотные отклики представлены на рис. 2, а временные отклики при воздействии источника ЭДС с амплитудой 1 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс, так что общая длительность входного импульса (t_2) составила 300 пс – на рис. 3.

Значения амплитуд импульсов сведены в табл. 2. Выполнено сравнение амплитуд импульсов, полученных по алгоритмической модели в ПО TALGAT и аналитически.

Отклонения результатов (δ) рассчитаны как

$$\delta = \left| \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \right| \cdot 100\% , \quad (5)$$

Вычисленные по модели амплитуды и задержки импульсов совпадают с результатами вычисления откликов в ПО TALGAT (максимальное отклонение амплитуды составило 4,3% для асимметричной микрополосковой ЛПП).

Значения амплитуд для 2-проводных ЛПП

Таблица 2

ЛПП	U_i , В	TALGAT	Аналитика
Микрополосковая	1	0,40	0,40
	2	0,38	0,38
Плоский кабель	1	0,39	0,39
	2	0,36	0,36
Зеркально-симметричная	1	0,40	0,40
	2	0,39	0,39
Симметричная с лицевой связью	1	0,19	0,19
	2	0,40	0,40
Асимметричная микрополосковая	1	0,52	0,53
	2	0,26	0,25
Асимметричная с лицевой связью	1	0,33	0,34
	2	0,16	0,17

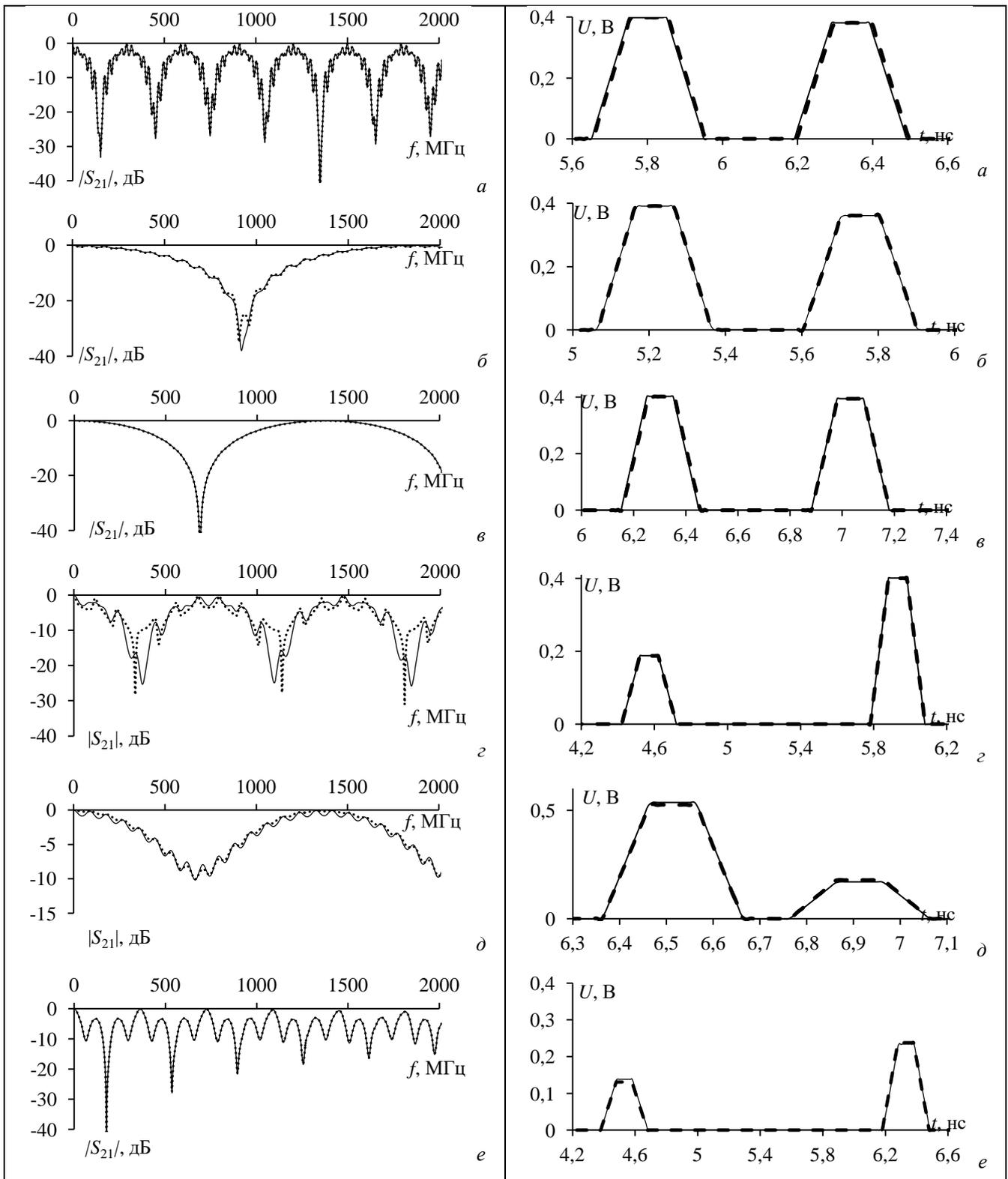


Рис. 2. Зависимости $|S_{21}|$ для 2-проводных микрополосковой (а), плоского кабеля (б), зеркально-симметричной (в), симметричной с лицевой связью (г), асимметричной микрополосковой (д), асимметричной с лицевой связью (е) ЛП по аналитической модели (—) и модели из [13] (···)

Рис. 3. Формы напряжения на выходе 2-проводных микрополосковой (а), плоского кабеля (б), зеркально-симметричной (в), симметричной с лицевой связью (г), асимметричной микрополосковой (д), асимметричной с лицевой связью (е) ЛП по аналитической модели (—) и модели из [14] (···)

IV. ЧЕТЫРЕХПРОВОДНАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ

Здесь представлен анализ частотных и временных откликов 4-проводных ЛП с помощью аналитических моделей. Поперечные сечения трех исследуемых 4-проводных ЛП и их схема соединений, где V обозначено напряжение на выходе ЛП, приведены на рис. 4. Импедансы равны как со стороны генератора ($ZG_1=ZG_2=ZG_3=ZG_4$), так нагрузки ($ZL_1=ZL_2=ZL_3=ZL_4$).

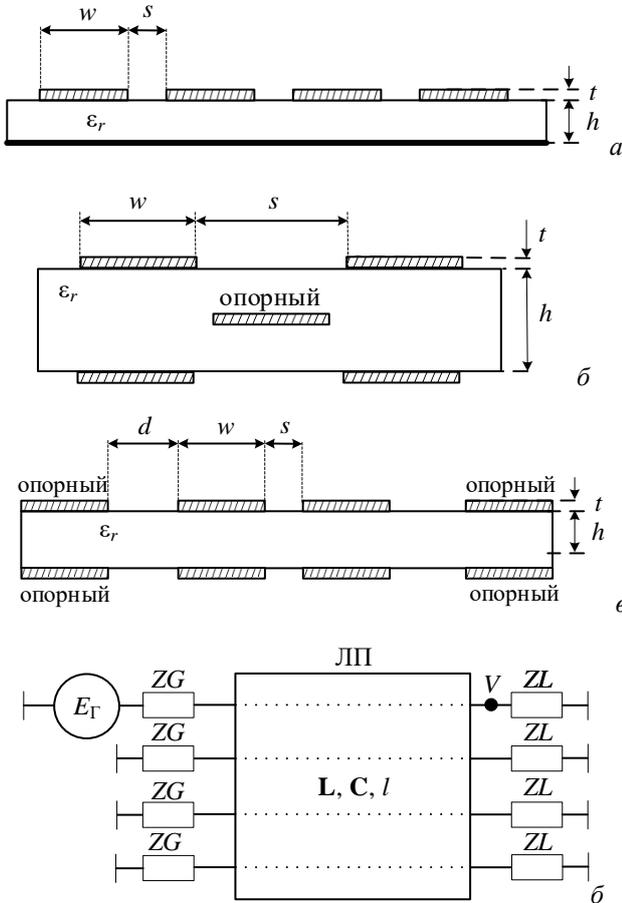


Рис. 4. Поперечные сечения 4-проводных микрополосковой (а), зеркально-симметричной (б), с боковыми полигонами (в) ЛП и схема электрических соединений (г)

Матрицы L и C для микрополосковой ЛП приведены ниже.

$$C = \begin{bmatrix} 2,267 \cdot 10^{-10} & -1,988 \cdot 10^{-11} & -8,147 \cdot 10^{-13} & -3,575 \cdot 10^{-13} \\ -1,989 \cdot 10^{-11} & 2,320 \cdot 10^{-10} & -1,980 \cdot 10^{-11} & -8,172 \cdot 10^{-13} \\ -8,172 \cdot 10^{-13} & -1,980 \cdot 10^{-11} & 2,320 \cdot 10^{-10} & -1,989 \cdot 10^{-11} \\ -3,575 \cdot 10^{-13} & -8,147 \cdot 10^{-13} & -1,988 \cdot 10^{-11} & 2,267 \cdot 10^{-10} \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 2,090 \cdot 10^{-7} & 3,763 \cdot 10^{-8} & 1,012 \cdot 10^{-8} & 3,944 \cdot 10^{-9} \\ 3,763 \cdot 10^{-8} & 2,045 \cdot 10^{-7} & 3,682 \cdot 10^{-8} & 1,012 \cdot 10^{-8} \\ 1,012 \cdot 10^{-8} & 3,682 \cdot 10^{-8} & 2,045 \cdot 10^{-7} & 3,763 \cdot 10^{-8} \\ 3,944 \cdot 10^{-9} & 1,012 \cdot 10^{-8} & 3,763 \cdot 10^{-8} & 2,090 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}.$$

Матрицы L и C для зеркально-симметричной ЛП приведены ниже.

$$C = \begin{bmatrix} 1,352 \cdot 10^{-10} & -1,335 \cdot 10^{-11} & -4,290 \cdot 10^{-11} & -2,253 \cdot 10^{-12} \\ -1,335 \cdot 10^{-11} & 1,352 \cdot 10^{-10} & -2,253 \cdot 10^{-12} & -4,290 \cdot 10^{-11} \\ -4,290 \cdot 10^{-11} & -2,253 \cdot 10^{-12} & 1,352 \cdot 10^{-10} & -1,335 \cdot 10^{-11} \\ -2,253 \cdot 10^{-12} & -4,290 \cdot 10^{-11} & -1,335 \cdot 10^{-11} & 1,352 \cdot 10^{-10} \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 3,378 \cdot 10^{-7} & 1,048 \cdot 10^{-7} & 1,180 \cdot 10^{-7} & 7,309 \cdot 10^{-8} \\ 1,048 \cdot 10^{-7} & 3,378 \cdot 10^{-7} & 7,309 \cdot 10^{-8} & 1,180 \cdot 10^{-7} \\ 1,180 \cdot 10^{-7} & 7,309 \cdot 10^{-8} & 3,378 \cdot 10^{-7} & 1,048 \cdot 10^{-7} \\ 7,309 \cdot 10^{-8} & 1,180 \cdot 10^{-7} & 1,048 \cdot 10^{-7} & 3,378 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}.$$

Матрицы L и C для ЛП с боковыми полигонами приведены ниже.

$$C = \begin{bmatrix} 1,088 \cdot 10^{-10} & -1,919 \cdot 10^{-11} & -6,539 \cdot 10^{-11} & -8,373 \cdot 10^{-12} \\ -1,919 \cdot 10^{-11} & 1,088 \cdot 10^{-10} & -8,373 \cdot 10^{-12} & -6,539 \cdot 10^{-11} \\ -6,539 \cdot 10^{-11} & -8,373 \cdot 10^{-12} & 1,088 \cdot 10^{-10} & -1,919 \cdot 10^{-11} \\ -8,373 \cdot 10^{-12} & -6,539 \cdot 10^{-11} & -1,919 \cdot 10^{-11} & 1,088 \cdot 10^{-10} \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 5,104 \cdot 10^{-7} & 2,460 \cdot 10^{-7} & 2,905 \cdot 10^{-7} & 2,144 \cdot 10^{-7} \\ 2,460 \cdot 10^{-7} & 5,104 \cdot 10^{-7} & 2,144 \cdot 10^{-7} & 2,905 \cdot 10^{-7} \\ 2,905 \cdot 10^{-7} & 2,144 \cdot 10^{-7} & 5,104 \cdot 10^{-7} & 2,460 \cdot 10^{-7} \\ 2,144 \cdot 10^{-7} & 2,905 \cdot 10^{-7} & 2,460 \cdot 10^{-7} & 5,104 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}.$$

Частотные отклики представлены на рис. 5, а временные отклики при воздействии источника ЭДС с амплитудой 1 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс, так что t_{Σ} составило 150 пс – на рис. 6.

Значения амплитуд импульсов сведены в табл. 3. Выполнено сравнение амплитуд импульсов, полученных по алгоритмической модели в ПО TALGAT и аналитически.

Таким образом, выполнен анализ временных откликов трех поперечных сечений 4-проводных ЛП. Получены значения амплитуд импульсов на выходе ЛП с помощью аналитических выражений и по алгоритмической модели. Максимальное отклонение составляет 0,8% для значения U_4 микрополосковой ЛП.

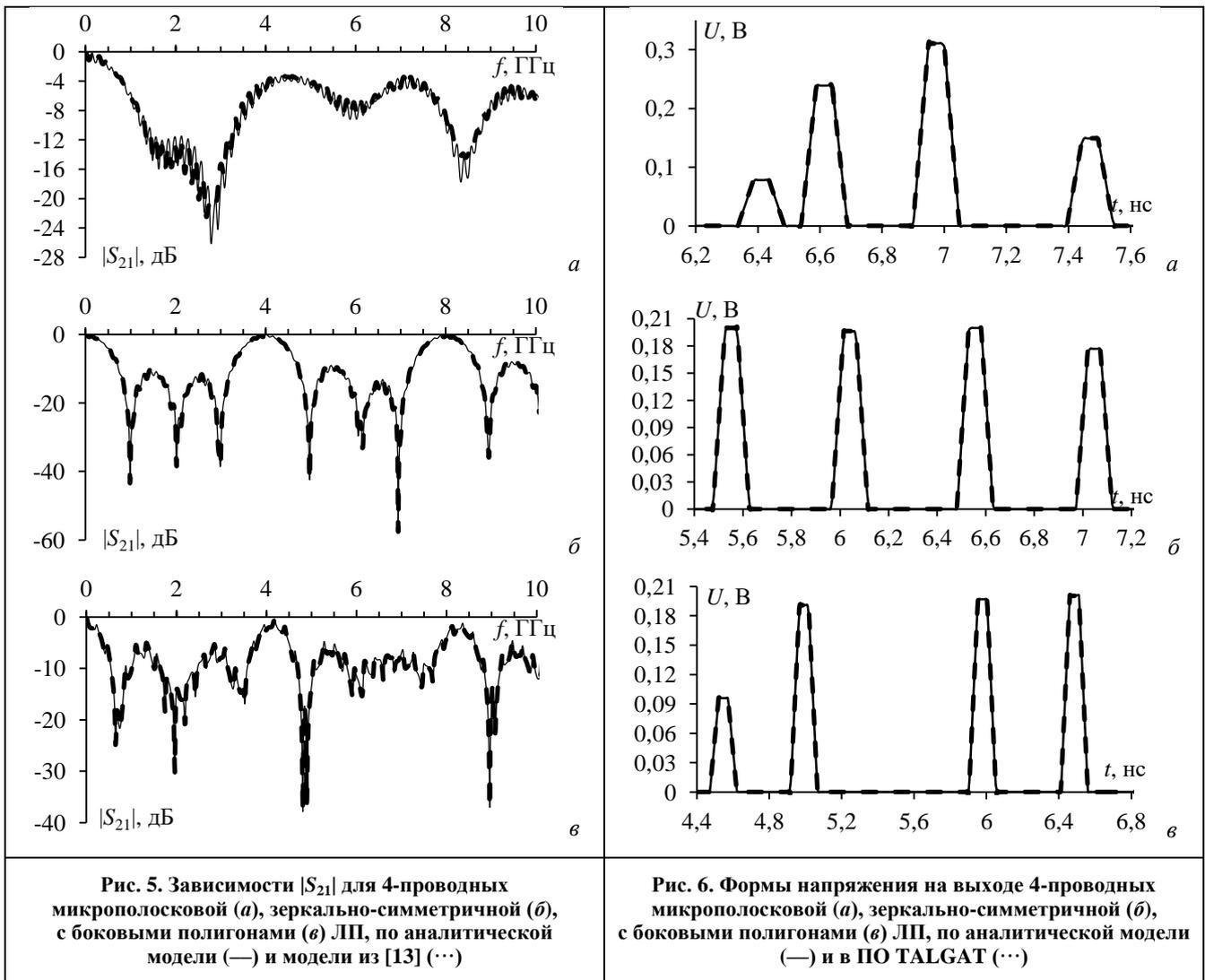


Рис. 5. Зависимости $|S_{21}|$ для 4-проводных микрополосковой (а), зеркально-симметричной (б), с боковыми полигонами (в) ЛП, по аналитической модели (—) и модели из [13] (---)

Рис. 6. Формы напряжения на выходе 4-проводных микрополосковой (а), зеркально-симметричной (б), с боковыми полигонами (в) ЛП, по аналитической модели (—) и в ПО TALGAT (---)

Таблица 3

Значения амплитуд для 4-проводных ЛП

ЛП	U_i , В	TALGAT	Аналитика
Микрополосковая	1	0,077	0,077
	2	0,239	0,239
	3	0,310	0,310
	4	0,149	0,149
Зеркально-симметричная	1	0,199	0,199
	2	0,196	0,196
	3	0,200	0,200
	4	0,177	0,177
С боковыми полигонами	1	0,096	0,096
	2	0,191	0,191
	3	0,197	0,197
	4	0,200	0,200

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлены результаты апробации аналитических моделей для вычисления временных и частотных откликов на примере защитных полосковых структур с модальным

разложением. Выполнен анализ временных откликов шести поперечных сечений 2-проводных ЛП при $ZG=25$ Ом и $ZL=75$ Ом. Получены значения амплитуд импульсов на выходе ЛП с помощью аналитической и алгоритмической моделей. Максимальные отклонения в значениях амплитуд получены для асимметричных ЛП. Так, для значения U_2 во временном отклике микрополосковой асимметричной ЛП составляет 4,3%, а для U_1 во временном отклике асимметричной ЛП с лицевой связью составляет 4%. Отклонения связаны с округлением расчетов при вычислении нормированной матрицы Sv и при дальнейших вычислениях с ней. Так как в симметричных ЛП матрица Sv является единичной, погрешностей в расчетах нет, и, как следствие, отклонения равны нулю.

Выполнен анализ временных откликов трех поперечных сечений 4-проводных ЛП при $ZG=25$ Ом и $ZL=75$ Ом. Получены значения амплитуд импульсов на выходе ЛП с помощью аналитических выражений и по алгоритмической модели. Максимальное отклонение составляет 0,8% для значения U_4 микрополосковой ЛП.

Сравнительный анализ результатов, полученных двумя способами, показал полную согласованность, что говорит о корректности аналитических моделей и достоверности результатов, полученных с их помощью. Использование данных аналитических выражений позволяет провести точную оценку характеристик ЛП при изменении резистивных нагрузок за короткий промежуток времени без использования затратных численных методов.

Данные аналитические модели можно использовать в области проектирования печатных плат и ИС в части решения задач, связанных с ЭМС. С их помощью можно оценивать уровень перекрестных помех на ближнем и дальнем концах ЛП, анализировать целостность сигналов, которая может быть нарушена из-за помех отражения, контролировать изменение импеданса и его влияние на сигнал.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00187 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов 2-е изд. М.: Горячая линия-Телеком, 2003, с. 558.
- [2] Kučera M, Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment / Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering (DEMISEE). 2016. P. 1–6.
- [3] Radasky W.A., Hoad R. Recent developments in high power EM (HPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse and intentional electromagnetic interference (IEMI) // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020. Vol. 2. № 3. P. 62–66.
- [4] Сычѳв А.Н. Управляемые СВЧ устройства на многомодовых полосковых структурах / Под. ред. Н.Д. Малютина. Томск: Том. гос. ун-т, 2001. – 318 с.
- [5] Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142.
- [6] Paul C.R. On uniform multimode transmission lines // IEEE Trans. microwave theory tech. 1973. № 8. P. 556–558.
- [7] Куксенко С.П. Электромагнитная совместимость: моделирование / под ред. Т.П. Газизова. Томск: В-Спектр, 2018. 188 с.
- [8] Paul C.R. Solution of the transmission-line equations under the weak-coupling assumption // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2002. Vol.44. P. 413–423.
- [9] Park S.W., Xiao F., Kami Y. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2010. Vol. 52. P. 436–446.
- [10] You H., Soma M. Crosstalk analysis of interconnection lines and packages in high-speed integrated circuits // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. 1990. Vol. 37. № 8. P. 1019–1026.
- [11] Сычѳв А.Н., Рудый Н.Ю. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21. №4–1. С. 7–15.
- [12] Костелцкий В.П., Черникова Е.Б., Заболоцкий А.М. Аналитические модели для вычисления частотных и временных откликов линий передачи с резистивными нагрузками и учетом асимметрии проводников // Системы управления, связи и безопасности. 2022. №3. С. 1–15.
- [13] Djordjevic A.R., Sarkar T.K. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1987. Vol. MTT-35. P. 898–908.
- [14] Achar R., Nakhla M.S. Simulation of high-speed interconnects // Proceedings of the IEEE. 2001. Vol. 89, № 5. P. 693– 728.
- [15] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 560. №. 012110. P. 1–7.

Time Response Analysis of Two-Conductor and Four-Conductor Transmission Lines with Resistive Loads by Analytical Models

E.B. Chernikova, P.V. Zybyvaeva

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
chiernikova96@mail.ru

Abstract — The paper presents the results of testing analytical models for calculating frequency and time responses taking into account arbitrary resistive loads and asymmetry of the transmission line (TL) cross sections. Validation was conducted on six structures of 2-conductor TLs and three structures of 4-conductor TLs. The validity of the results was confirmed by comparative analysis with the results obtained by numerical methods, which showed consistency. The validity of the results was confirmed by a comparative analysis with the results obtained by numerical methods, which showed consistency.

Keywords — electronic equipment, modal analysis, transmission lines, analytical models, time response.

REFERENCES

- [1] Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов 2-е изд. М.: Горячая линия-Телеком, 2003, с. 558.
- [2] Kučera M, Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment / Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering (DEMISEE). 2016. P. 1–6.
- [3] Radasky W.A., Hoad R. Recent developments in high power EM (HPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse and intentional electromagnetic interference (IEMI) // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020. Vol. 2. № 3. P. 62–66.
- [4] Sychev A.N. Upravlyaemye SVCH ustrojstva na mnogomodovyh poloskovykh strukturah (Controllable microwave circuits based on multimode stripline structures) / Pod. red. N.D. Malyutina. Tomsk: Tom. gos. un-t, 2001. – 318 s.
- [5] Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142.
- [6] Paul C.R. On uniform multimode transmission lines // IEEE Trans. microwave theory tech. 1973. № 8. P. 556–558.
- [7] Kuksenko S.P. Elektromagnitnaya sovmestimost': modelirovanie (Electromagnetic compatibility: simulation) / pod red. T.R. Gazizova. Tomsk: V-Spektr, 2018. 188 s.
- [8] Paul C.R. Solution of the transmission-line equations under the weak-coupling assumption // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2002. Vol.44. P. 413–423.
- [9] Park S.W., Xiao F., Kami Y. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2010. Vol. 52. P. 436–446.
- [10] You H., Soma M. Crosstalk analysis of interconnection lines and packages in high-speed integrated circuits // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. 1990. Vol. 37. № 8. P. 1019–1026.
- [11] Sychev A.N., Rudyj N.YU. Parametry nesimmetrichnyh svyazannyh linij s neodnorodnym dielektrikom (Parameters of asymmetric coupled lines with inhomogeneous dielectrics) // Doklady TUSUR. 2018. T. 21. №4–1. S. 7–15.
- [12] Kosteletskii V.P., Chernikova E.B., Zabolotsky A.M. Analytical models for calculating the frequency and time response of transmission lines with resistive loads and conductor asymmetry // Systems of Control, Communication and Security. 2022. №.3. S. 1-15.
- [13] Djordjevic A.R., Sarkar T.K. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1987. Vol. MTT-35. P. 898–908.
- [14] Achar R., Nakhla M.S. Simulation of high-speed interconnects // Proceedings of the IEEE. 2001. Vol. 89, № 5. P. 693–728.
- [15] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 560. №. 012110. P. 1–7.