

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА
ДЛЯ АКТИВНОГО ПРОВОДНИКА СИММЕТРИЧНОЙ
ПСЕВДОСОГЛАСОВАННОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ
ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ
В ФОРМЕ ТРАПЕЦИИ**

Получены аналитические выражения для вычисления временного отклика на концах отрезка четырехпроводной линии передачи на основе метода модального разложения во временной области для случая псевдосогласования. Рассмотрен частный случай линии с центральной симметрией. Представлены выражения для активного проводника. Выполнено моделирование и сравнение результатов.

Известен анализ форм сигнала [1], выполненный методом модального разложения, с использованием модальных источников воздействий и коэффициентов отражения. На основании данного подхода получен алгоритм вычисления формы сигнала для двухпроводной линии [2]. Выражения для трехпроводной линии представлены в [3]. Такой подход применим и для четырехпроводной линии, по крайней мере, для ее частных случаев.

Цель работы – получить выражения для вычисления форм сигнала на концах отрезка симметричной четырехпроводной линии передачи для случая псевдосогласования, когда значения сопротивлений на концах проводников равны значению диагональных элементов матрицы Z .

Вывод выражений сделан на основе [4]. Представленные аналитические модели применимы для любой четырехпроводной линии с центральной симметрией проводников. Для активного проводника отрезка четырехпроводной линии передачи выведены выражения для вычисления форм сигнала на ближнем и дальнем концах:

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}_6(t) = & \mathbf{V}_{0a}(t) + \mathbf{V}_{0c}(t)/2 + \mathbf{V}_{0d} + [(1 + \Gamma_{Saa})/2 + (\Gamma_{Laa}\Gamma_{Sca})/2 + \\
& + (\Gamma_{Laa}\Gamma_{Sda})/2]\mathbf{V}_{0a}(t - 2T_a) + [(\Gamma_{Lba}\Gamma_{Lca}\Gamma_{Lda}\Gamma_{Sab}\Gamma_{Sac}\Gamma_{Sad}) + \\
& + \Gamma_{Lca}(1 + \Gamma_{Scc})/2 + \Gamma_{Lda}(1 + \Gamma_{Sdd})/2]\mathbf{V}_{0a}(t - (T_a + T_b + T_c + T_d)) + \\
& + [\Gamma_{Lab}(1 + \Gamma_{Saa}) + \Gamma_{Lcb}(1 + \Gamma_{Scc})/2 + \Gamma_{Ldb}(1 + \Gamma_{Sdd})/2]\mathbf{V}_{0b}(t - \\
& - (T_a + T_b + T_c + T_d)) + [\Gamma_{Lac}(1 + \Gamma_{Saa}) + \\
& + \Gamma_{Lbc}\Gamma_{Lac}\Gamma_{Ldc}\Gamma_{Scd}\Gamma_{Scb}\Gamma_{Sca}/2 + \Gamma_{Ldc}(1 + \Gamma_{Sdd})/2]\mathbf{V}_{0c}(t - \\
& - (T_a + T_b + T_c + T_d)) + [\Gamma_{Lad}(1 + \Gamma_{Saa}) + \\
& + \Gamma_{Lcd}(1 + \Gamma_{Scc})/2 + \Gamma_{Lad}\Gamma_{Lbd}\Gamma_{Lcd}\Gamma_{Sda}\Gamma_{Sdb}\Gamma_{Sdc}/2]\mathbf{V}_{0d}(t - \\
& - (T_a + T_b + T_c + T_d)) + [(\Gamma_{Lbb}\Gamma_{Sab}) + \Gamma_{Lbb}\Gamma_{Scb}/2) + \\
& + \Gamma_{Lbb}\Gamma_{Sdb}/2]\mathbf{V}_{0b}(t - 2T_b) + [(\Gamma_{Lcc}\Gamma_{Sac}) + \\
& + \Gamma_{Lcc}(1 + \Gamma_{Scc})/2 + \Gamma_{Lcc}\Gamma_{Sdc}/2]\mathbf{V}_{0c}(t - 2T_c) + [(\Gamma_{Ldd}\Gamma_{Sad}) + \\
& + (\Gamma_{Ldd}\Gamma_{Scd})/2 + \Gamma_{Ldd}(1 + \Gamma_{Sdd})/2]\mathbf{V}_{0d}(t - 2T_d);
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}_n(t) = & [(1 - \Gamma_{Laa}) + (\Gamma_{Lca})/2 + \Gamma_{Lda}/2]\mathbf{V}_{0a}(t - T_a) + \\
& + [\Gamma_{Lab} + (\Gamma_{Lcb})/2 + \Gamma_{Ldb}/2]\mathbf{V}_{0b}(t - T_b) + [\Gamma_{Lac} + (1 + \Gamma_{Lcc})/2 + \\
& + \Gamma_{Ldc}/2]\mathbf{V}_{0c}(t - T_c) + [\Gamma_{Lad} + (\Gamma_{Lcd})/2 + (1 - \Gamma_{Ldd})/2]\mathbf{V}_{0d}(t - T_d).
\end{aligned} \tag{2}$$

Время распространения мод в линии

$$\mathbf{T}_m = l\tau_m,$$

где l – длина линии; τ_m – погонные задержки мод. Матрица коэффициентов отражения в начале и конце линии

$$\Gamma_{vm} = (\mathbf{R}_{vm}\mathbf{Z}_{cm}^{-1} + \mathbf{E})^{-1}(\mathbf{R}_{vm}\mathbf{Z}_{cm}^{-1} - \mathbf{E})^{-1},$$

где индекс $v = S, L$ соответственно. Характеристическое сопротивление для i -й моды

$$\mathbf{Z}_{cmi} = (\mathbf{L}_{cmi}/\mathbf{C}_{cmi})^{1/2},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $\mathbf{L}_m = \mathbf{T}_V^{-1}\mathbf{L}\mathbf{T}_I$, $\mathbf{C}_m = \mathbf{T}_I^{-1}\mathbf{C}\mathbf{T}_V$ – диагональные матрицы для матриц \mathbf{L} и \mathbf{C} ; $\mathbf{R}_{vm} = \mathbf{T}_V^{-1}\mathbf{R}_v\mathbf{T}_I$ – матрица модальных сопротивлений; $\mathbf{R}_v = \mathbf{R}_S = \mathbf{R}_L$ – матрицы сопротивлений на концах проводников линии:

$$\mathbf{R}_V = \begin{bmatrix} Zc_{1,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Zc_{2,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Zc_{3,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Zc_{4,4} \end{bmatrix},$$

где $Zc_{i,i}$ – диагональные элементы матрицы характеристического импеданса.

Вектор-источник падающих волн в начале линии

$$\mathbf{V}_{0m} = (\mathbf{R}_{Sm} \mathbf{Z}_{cm}^{-1} + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{V}_{Sm},$$

где \mathbf{E} – единичная матрица; $\mathbf{V}_{Sm} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{V}_S$ – матрица модальных

источников; матрица источника напряжения $\mathbf{V}_S = \begin{bmatrix} V_S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$;

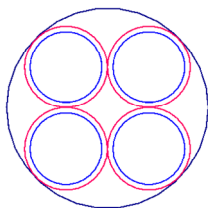
V_S – амплитуда сигнала.

Матрицы преобразования мод:

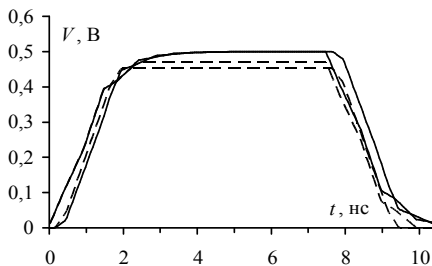
$$\mathbf{T}_V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & 0 & -1/2 \\ 1 & 0 & -1/2 & 1/2 \\ 1 & -1/2 & 0 & -1/2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_I = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 1 & 1/2 \\ 1/4 & 1 & 0 & -1/2 \\ 1/4 & 0 & -1 & 1/2 \\ 1/4 & -1 & 0 & -1/2 \end{bmatrix}.$$

Для вычисления временного отклика в качестве примера выбран симметричный четырехпроводной кабель, поперечное сечение которого представлено на рисунке *a*. Радиус кабеля (схемной земли) 1,46 мм, радиус проводника 0,52 мм, радиус диэлектрика 0,6 мм, относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon_r = 3,1$. Значения параметров сигнала взяты из [5]. Длина линии – 0,1 м, воздействие импульса в форме трапеции с амплитудой ЭДС 1 В и с длительностью вершины 6 нс, фронта – 1,5 нс, спада – 1,5 нс.

Сравнение форм сигнала на концах отрезка четырехпроводной линии передачи для случая псевдосогласованной линии, вычисленных на основе аналитических выражений и в системе TALGAT [6], представлено на рисунке *б*.



a



б

Поперечное сечение линии (*a*), формы напряжений в начале и конце активного проводника четырехпроводной линии: аналитические выражения (---); система TALGAT (—) (*б*)

Из рисунка видно, что формы сигналов активного проводника, вычисленные по выражениям (1) и (2) на ближнем и дальнем концах, отличаются по амплитуде не более чем на 10% от результата, полученного в системе TALGAT [6].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-365.2018.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Рыжова М.В. Алгоритм вычисления форм сигнала на концах отрезка двухпроводной линии передачи, основанный на методе модального разложения во временной области // Научная сессия ТУСУР-2018: междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, Россия, 16–18 мая 2018. 2018. С. 274–277.
3. Рыжова М.В. Аналитические выражения для вычисления временного отклика трехпроводной линии передачи на воздействие в форме трапеции // Электронные средства и системы управления: материалы XIV междунар. науч.-практ. конф., Томск, Россия, 28 ноября – 30 ноября. 2018.
4. Tang M., Zhai M. Research of transmission parameters of four-conductor cables for power line communication // International Conference on Computer Science and Software Engineering. 2008. P. 1306–1309.

5. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. Томск: Том. гос. ун-т, 2007. 152 с.

6. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. 2015. № 2(36). С. 45–506.

M.V. Ryzhova

Analytical models of a time response for an active conductor of a symmetric, pseudomatched four-conductor transmission line on a trapesoidal excitation

Analytical expressions are obtained for calculating the time response at the ends of a segment of a fourconductor transmission line based on the modal decomposition method in the time domain for the pseudomatched case. A special case of a line with central symmetry is considered. Expressions for an active conductor are presented. Simulation is performed and results are compared.

mariya_rijova@mail.ru