

УДК 621.372

Аналитические модели для вычисления частотных и временных откликов линий передачи с резистивными нагрузками и учетом асимметрии проводников

Костелецкий В. П., Черникова Е. Б., Заболоцкий А. М.

Постановка задачи: при проектировании современных высокоскоростных систем широко применяют полосковые линии передачи (ЛП), которые особенно удобны в печатных и интегральных схемах. Между тем использование ЛП ведет к появлению ряда проблем, касающихся электромагнитной совместимости, которые оказывают важное влияние на общую производительность системы. К таким проблемам можно отнести перекрестные помехи и помехи, возникающие в результате отражения. Исходя из этого важны точное моделирование и анализ распространения сигнала вдоль ЛП в частотной и временной областях на начальных этапах проектирования высокоскоростных систем. Кроме того, ЛП активно применяются при разработке фильтров, ответвителей и других устройств. Например, на основе связанных ЛП созданы модальные фильтры (МФ), которые защищают оборудование от сверхкоротких импульсов (СКИ). Их разработка подразумевает вычисление частотного и временного откликов для определения характеристик фильтра. Анализ распространения сигнала в ЛП может быть выполнен с использованием моделирования численными методами. Между тем существуют аналитические подходы, которые пригодны для первоначальной оценки отклика простых конфигураций ЛП, благодаря которым возможно выполнить анализ физических явлений в ЛП и сократить время вычислений, а также использовать их для проверки результатов численного моделирования. Таким образом, возникает необходимость в разработке универсальных аналитических моделей, которые будут полезны при выполнении теоретического анализа ЛП, в том числе используемых для создания МФ. **Цель работы:** предложить аналитические модели для вычисления временных и частотных откликов двух- и четырехпроводных линий передачи. **Используемые методы:** при проверке моделей, для получения матриц электростатической и электромагнитной индукций линий передачи используется метод моментов. Сегментация границ проводников и диэлектриков при этом использовалась равномерная: 5 сегментов на длину торца проводника. Аналитические модели получены на основе модального анализа в спектральной области. Модели для временной области получены с помощью преобразования Лапласа. **Новизна:** представлены аналитические модели в виде конечных комбинаций элементарных функций для вычисления частотных и временных откликов двухпроводной ЛП, отличающиеся учетом асимметрии проводников, и четырехпроводной линии, отличающиеся учетом попарной симметрии проводников и дифференциального и синфазного режимов, а также учетом переотражений в обеих ЛП. **Результат:** использование представленных аналитических моделей позволяет получить временные и частотные отклики двух- и четырехпроводной линий передачи без значительных временных и вычислительных затрат. **Практическая значимость:** аналитические модели позволяют осуществлять анализ распространения сигнала вдоль ЛП, сократить временные и вычислительные затраты при разработке устройств защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных СКИ в асимметричном, дифференциальном и синфазном режимах.

Ключевые слова: линии передачи, модальные фильтры, аналитические модели, частотный отклик, временной отклик, синфазный режим, дифференциальный режим.

Библиографическая ссылка на статью:

Костелецкий 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. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-1-15

Reference for citation:

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, no. 3, pp. 1-15 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-1-15

Введение

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) становится все более актуальной, поскольку современные микро- и нанoeлектронные системы стремятся к быстрой передаче данных, миниатюризации и интеграции [1]. В сверхвысокочастотной (СВЧ) технике широко применяют направляющие системы, называемые полосковыми линиями передачи (ЛП), которые особенно удобны в печатных и интегральных схемах (ИС) СВЧ [2]. Резкое увеличение скорости переключения и плотности ИС приводит к возникновению проблем в ЛП, оказывающих важное влияние на общую производительность системы. В ЛП могут возникать перекрестные помехи из-за взаимных емкости и индуктивности. Кроме того, сигналы в ЛП могут искажаться из-за влияния помех отражения. В этой связи возникает необходимость в оценке распространяющегося сигнала, чтобы учитывать и корректировать возникающие проблемы еще на начальных стадиях разработки [3]. Например, перекрестные помехи являются одной из важнейших проблем при увеличении рабочей тактовой частоты, поэтому точное моделирование и анализ частотных и временных характеристик ЛП имеют большое значение для проектирования высокоскоростных ИС.

ЛП также активно применяются при разработке фильтров, ответвителей и других устройств [4]. В связанных ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением возникает явление модального разложения сверхкороткого импульса (СКИ), из-за разности погонных задержек мод. Это явление стало основой для разработки модальных фильтров (МФ), которые по сути представляют из себя многопроводные ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением, благодаря чему обеспечиваются разные фазовые скорости мод и происходит разложение входного сигнала на импульсы меньшей амплитуды, каждый со своей погонной задержкой [5]. Существуют МФ, способные защищать от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах [6]. При разработке таких МФ важно контролировать максимальную амплитуду на выходе, которой определяется основная характеристика МФ – ослабление помехи. Для этого необходимо вычислять временной отклик.

Анализ распространения сигнала в ЛП может быть выполнен с использованием электродинамического моделирования численными методами, такими как метод моментов (МоМ), метод конечных элементов (FEM) и др. Также для моделирования может быть применен квазистатический подход, при котором предполагается распространение только поперечных электромагнитных волн или Т-волн. Между тем существуют аналитические подходы, которые пригодны для первоначальной оценки отклика простых конфигураций ЛП. Между тем они способствуют лучшему пониманию физических явлений и сокращают время вычислений по сравнению с численными методами, а также используются для проверки результатов моделирования [7].

Для первичного анализа волновых процессов в связанных ЛП используют модальный анализ, который является частью теории линий передачи [8]. Он позволяет детально исследовать ЛП, находя причины искажения сигналов [9]. В [10] продемонстрировано решение уравнений ЛП со слабой связью в неоднородной диэлектрической среде без потерь, во временной области. В [11]

анализируется отклик на выходе многопроводных ЛП с использованием метода разложения мод во временной области. Стоит отметить, что в теории линий передачи симметричные структуры представлены довольно обстоятельно, тогда как асимметричным структурам уделено недостаточно внимания. Асимметричные ЛП сложнее и труднее для анализа, так как имеют больше параметров, поэтому им посвящено меньше публикаций, чем симметричным ЛП [12].

В [13] представлен метод анализа перекрестных наводок в межсоединениях, и приведены аналитические выражения для вычисления формы напряжений импульсов в начале и конце ЛП. Между тем данные выражения имеют ограничения, касающиеся конечных нагрузок: импеданс генератора равен нулю ($ZG=0$), а импеданс нагрузки равен волновому сопротивлению ЛП ($ZL=Z_c$). Соответственно, в данных выражениях не учитывались переотражения в ЛП, так как при таких граничных условиях их нет. Кроме того, в данных выражениях не учитывалось асимметричное расположение проводников в поперечном сечении. Таким образом, возникает необходимость в разработке более универсальных аналитических моделей, без этих ограничений. Такие модели позволят получить, без применения затратных численных методов, формы напряжений на выходе структур и определить, из каких именно составляющих формируется амплитуда импульсов, а также их задержки. Помимо этого, модели будут полезны при выполнении теоретического анализа ЛП, используемых для создания МФ. Примерами двухпроводной и четырехпроводной ЛП могут являться МФ с лицевой связью и МФ, работающий в дифференциальном и синфазном режимах, соответственно. Цель работы – получить аналитические модели для вычисления временных и частотных откликов двух- и четырехпроводных линий передачи.

Метод анализа откликов

Рассматриваемые ЛП представляют собой проводящие полоски на диэлектрической подложке. Матрицы погонных коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукций могут быть вычислены с помощью численных методов. В данной статье для получения этих матриц используется метод моментов в ПО TALGAT [14]. Сегментация границ проводников и диэлектриков при вычислении матриц использовалась равномерная: 5 сегментов на длину торца проводника. Аналитические модели получены на основе модального анализа в спектральной области. Затем характеристики во временной области получаются с помощью преобразования Лапласа [2]. Алгоритм вывода аналитической модели заключается в следующем:

1. Определение нормированной матрицы модальных напряжений S_v , матрицы коэффициентов распространения мод $ED=diag(\exp(\gamma_i))$, где $\gamma_i=\alpha_i+j\omega\beta_i$ ($i=1,2, \dots, N$), матрицы импедансов мод Z_m , векторов воздействующего напряжения со стороны генератора и нагрузок E_1 и E_2 , соответственно.
2. Определение матриц нагрузок в начале (ZG) и конце (ZL) линии, каждая из которых состоит из резистивных сопротивлений одинакового номинала на всех концах ЛП.

3. Определение матрицы нормированных модальных токов $\mathbf{Si}=\mathbf{SvZm}^{-1}$, матрицы характеристического импеданса $\mathbf{Zc}=\mathbf{SvSi}^{-1}$ и матрицы характеристического адмиттанса $\mathbf{Yc}=\mathbf{Zc}^{-1}$.
4. Решение СЛАУ:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Sv} + \mathbf{ZGSi} & \mathbf{Sv} - \mathbf{ZGSi} \\ \mathbf{Sv} - \mathbf{ZLSi} & \mathbf{Sv} + \mathbf{ZLSi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Gi0} \\ \mathbf{GrD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E1} \\ \mathbf{E2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: $\mathbf{Gi0}$ и \mathbf{GrD} – матрицы амплитуд падающей и отраженной мод.

5. Определение спектров напряжений в начале $\mathbf{V}(0)$ и конце $\mathbf{V}(x)$ ЛП, представленных как суммы падающей и отраженной волн:

$$\mathbf{V}(0) = \mathbf{Sv}(\mathbf{Gi0} + \mathbf{GrD}), \quad (2)$$

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{Sv}(\mathbf{EDGi0} + \mathbf{ED}^{-1}\mathbf{GrD}). \quad (3)$$

6. Определение форм напряжения во временной области, используя преобразование Лапласа и оператор временного сдвига.

Аналитические модели для двухпроводной линии передачи

Здесь представлены модели для вычисления частотного и временного откликов двухпроводных асимметричных ЛП при условиях, что у проводников 1 и 2 импедансы со стороны генератора равны $ZG_1=ZG_2$, а нагрузки – $ZL_1=ZL_2$. Источник э.д.с. E подключается к первому проводнику, который является активным, а второй – пассивным. Zm_e, Zm_o – импедансы четной и нечетной мод соответственно, γ_e, γ_o – коэффициенты распространения четной и нечетной мод. Для таких структур нормированная матрица модальных напряжений \mathbf{Sv} имеет вид [15, 16]

$$\mathbf{Sv} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ R_c & R_\pi \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где: R_c, R_π – модальные числа, соответствующие четному (e) и нечетному (o) режимам.

Аналитическая модель для вычисления частотного отклика в первом $V_1(x, \omega)$ и втором $V_2(x, \omega)$ проводниках двухпроводной асимметричной структуры выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} V_{1,2}(x, \omega) = & \frac{e^{-\gamma_e x} + \rho_{Le} e^{-\gamma_e x}}{1 - \rho_{Le} \rho_{Ge} e^{-2\gamma_e x}} \frac{R_\pi}{R_\pi - R_c} P_e E(\omega) \pm \\ & \pm \frac{e^{-\gamma_o x} + \rho_{Lo} e^{-\gamma_o x}}{1 - \rho_{Go} \rho_{Lo} e^{-2\gamma_o x}} \frac{R_c}{R_c - R_\pi} P_o E(\omega), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где: } P_o = \frac{Z_o}{Z_o + ZG}, \quad P_e = \frac{Z_e}{Z_e + ZG}, \quad \rho_{Go} = \frac{ZG - Z_o}{ZG + Z_o}, \quad \rho_{Ge} = \frac{ZG - Z_e}{ZG + Z_e}, \quad \rho_{Lo} = \frac{ZL - Z_o}{ZL + Z_o},$$

$$\rho_{Le} = \frac{ZL - Z_e}{ZL + Z_e}.$$

Из (5) получена модель для вычисления S_{21} :

$$S_{21} = \frac{e^{-\gamma_e x} + \rho_{Le} e^{-\gamma_e x}}{1 - \rho_{Le} \rho_{Ge} e^{-2\gamma_e x}} \frac{R\pi}{R\pi - Rc} 2P_e + \frac{e^{-\gamma_o x} + \rho_{Lo} e^{-\gamma_o x}}{1 - \rho_{Go} \rho_{Lo} e^{-2\gamma_o x}} \frac{Rc}{Rc - R\pi} 2P_o. \quad (6)$$

Из (5) получена модель для временного отклика в первом $V_1(x, t)$ и втором $V_2(x, t)$ проводниках ЛП:

$$V_{1,2}(x, t) = (1 + \rho_{Le}) \frac{R\pi}{R\pi - Rc} P_e \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{Le} \rho_{Ge})^m E(t - (2m + 1)x\tau_e) \pm \pm (1 + \rho_{Lo}) \frac{Rc}{Rc - R\pi} P_o \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{Lo} \rho_{Go})^m E(t - (2m + 1)x\tau_o) \quad (7)$$

где: N – число переотражений, τ_e, τ_o – погонные задержки четной и нечетной мод.

Вычисление откликов показано на примере асимметричной ЛП, являющейся МФ с лицевой связью. Его поперечное сечение представлено на рис. 1, а схема соединений – на рис. 2, где V обозначено напряжение на выходе ЛП. При вычислении частотного отклика $ZG=ZL=50$ Ом, а временного $ZG=50, ZL=75$ Ом.

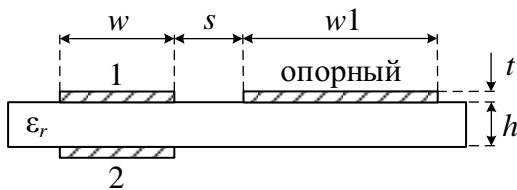


Рис. 1. Поперечное сечение асимметричной двухпроводной ЛП

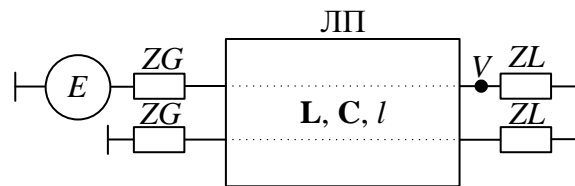


Рис. 2. Схема электрических соединений асимметричной двухпроводной ЛП

Матрицы \mathbf{L} и \mathbf{C} представлены ниже, а модальные числа для этой ЛП: $Rc = -1,037$ и $R\pi = 1$.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1,27 \cdot 10^{-9} & -1,26 \cdot 10^{-9} \\ -1,26 \cdot 10^{-9} & 1,76 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix} \text{Ф/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 4,66 \cdot 10^{-7} & 4,47 \cdot 10^{-7} \\ 4,47 \cdot 10^{-7} & 4,66 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} \text{Гн/м.}$$

Примеры частотного отклика и формы напряжения (при воздействии СКИ с э.д.с. амплитудой 1 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 0,5 нс) в конце активного проводника (на выходе) асимметричной структуры длиной $l=1$ м, вычисленные с помощью аналитических моделей, показаны на рис 3 и 4, соответственно. Для подтверждения достоверности приведенных моделей выполнено сравнение частотного отклика с откликом, полу-

ченным по модели, представленной в [17], и временного – с откликом, полученным в ПО TALGAT [18].

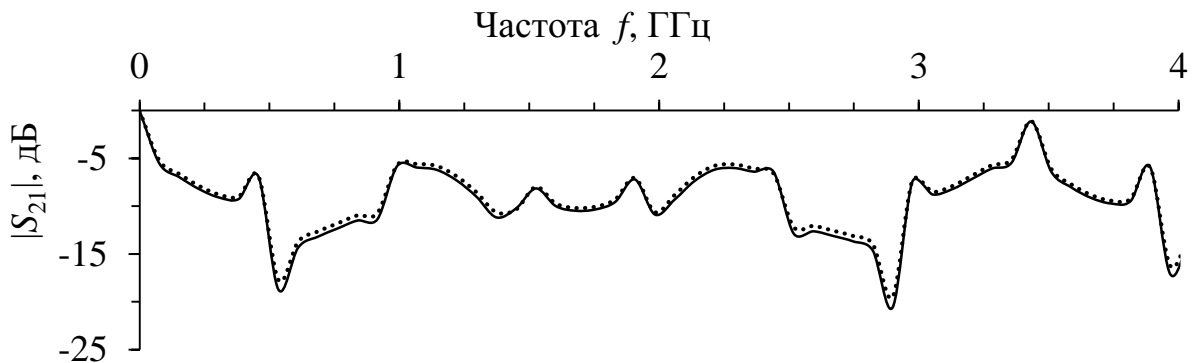


Рис. 3. Зависимости $|S_{21}|$ для асимметричной двухпроводной ЛП по аналитической модели (—) и модели из [17] (⋯)

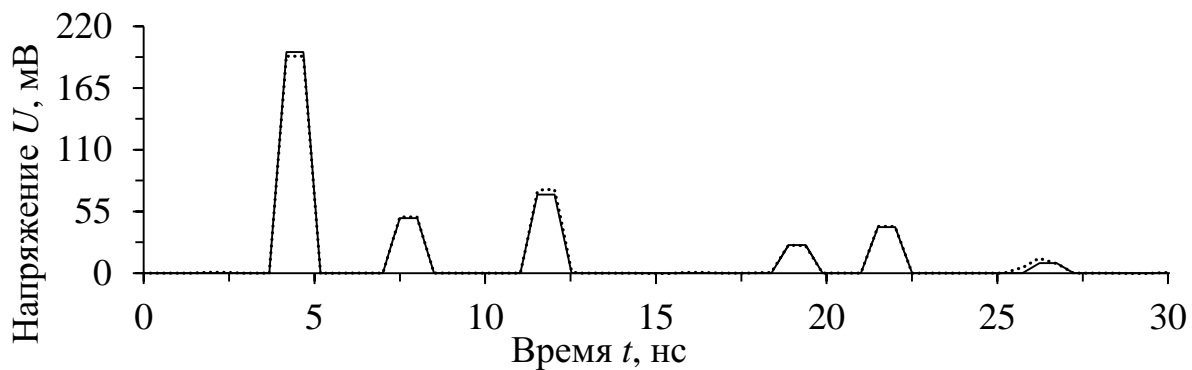


Рис. 4. Формы напряжения на выходе асимметричной двухпроводной ЛП по аналитической модели (—) и в ПО TALGAT (⋯)

Видно, что использование аналитических моделей позволяет вычислить временные отклики с учетом отражений от концов проводников. Вычисленные по модели амплитуды и задержки импульсов совпадают с результатами вычисления откликов в ПО TALGAT (максимальное отклонение амплитуды составило 0,83%). Отклонения результатов (δ) рассчитаны как

$$\delta = \left| \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \right| \cdot 100\%, \quad (8)$$

Таким образом, разработанные аналитические математические модели позволяют вычислить частотные и временные отклики асимметричных связанных ЛП. Примечательно, что при одинаковых значениях сопротивлений в начале ЛП и в конце ЛП в откликах отсутствуют составляющие с линейными комбинациями задержек мод, а остаются лишь с задержками, кратными погонным задержкам мод.

Аналитические модели для четырехпроводной линии передачи

Получены модели для вычисления частотного и временного откликов четырехпроводных ЛП с попарной симметрией проводников при условиях, что

импедансы равны как со стороны генератора ($ZG_1=ZG_2=ZG_3=ZG_4$), так нагрузки ($ZL_1=ZL_2=ZL_3=ZL_4$). Источник э.д.с. E подключается к двум проводникам (1 и 1'), которые являются активными, два оставшихся (2 и 2') – пассивными; Zm_1, Zm_2, Zm_3, Zm_4 – импедансы мод структуры, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – коэффициенты распространения мод. Для четырехпроводной ЛП нормированная матрица модальных напряжений \mathbf{Sv} имеет вид [13]:

$$\mathbf{Sv} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \eta_1 & \eta_2 & \eta_3 & \eta_4 \\ \eta_1 & \eta_2 & -\eta_3 & -\eta_4 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

где: η_i – модальные числа.

Так как предполагается, что к четырехпроводной ЛП будут подключаться два источника воздействия для задания синфазного (c) и дифференциального (d) режимов, вектор входного воздействия (\mathbf{E}) выглядит следующим образом:

$$\mathbf{E}_c = [E \ 0 \ 0 \ E]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{E}_d = [E \ 0 \ 0 \ -E]^T. \quad (11)$$

Матрица модальных напряжений вычисляется как

$$\mathbf{Vm} = \mathbf{Sv}^{-1}E, \quad (12)$$

а в соответствии с режимами воздействия будет иметь виды:

$$\mathbf{Vm}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{E\eta_4}{\eta_3 - \eta_4} \\ \frac{E\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Vm}_d = \begin{bmatrix} -\frac{E\eta_2}{\eta_1 - \eta_2} \\ \frac{E\eta_2}{\eta_1 - \eta_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

откуда видно, что для вычисления откликов в дифференциальном режиме используются моды 3 и 4, а синфазном – моды 1 и 2.

Аналитические математические модели для вычисления частотного отклика в дифференциальном и синфазном режимах на активных ($V_{d1}(x, \omega)$, $V_{c1}(x, \omega)$) и пассивных ($V_{d2}(x, \omega)$, $V_{c2}(x, \omega)$) проводниках четырехпроводной ЛП:

$$V_{d1,2}(x, \omega) = \frac{e^{-\gamma_3 x} (1 + \rho_{L3})}{1 - \rho_{G3} \rho_{L3} e^{-2\gamma_3 x}} \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} P_3 E(\omega) \pm \frac{e^{-\gamma_4 x} (1 + \rho_{L4})}{1 - \rho_{G4} \rho_{L4} e^{-2\gamma_4 x}} \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} P_4 E(\omega), \quad (14)$$

$$V_{c1,2}(x, \omega) = \frac{e^{-\gamma_1 x} (1 + \rho_{L1})}{1 - \rho_{G1} \rho_{L1} e^{-2\gamma_1 x}} \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} P_1 E(\omega) \pm \frac{e^{-\gamma_2 x} (1 + \rho_{L2})}{1 - \rho_{G2} \rho_{L2} e^{-2\gamma_2 x}} \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} P_2 E(\omega), \quad (15)$$

где: $P_i = \frac{Zm_i}{Zm_i + ZG}$, $\rho_{Li} = \frac{ZL - Zm_i}{ZL + Zm_i}$, $\rho_{Gi} = \frac{ZG - Zm_i}{ZG + Zm_i}$, $i = 1, 2, 3, 4$.

Из (14) и (15) получены модели для вычисления S_{21} в дифференциальном и синфазном режимах:

$$S_{d21} = \frac{e^{-\gamma_3 x} (1 + \rho_{L3})}{1 - \rho_{G3} \rho_{L3} e^{-2\gamma_3 x}} \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} 2P_3 + \frac{e^{-\gamma_4 x} (1 + \rho_{L4})}{1 - \rho_{G4} \rho_{L4} e^{-2\gamma_4 x}} \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} 2P_4, \quad (16)$$

$$S_{c21} = \frac{e^{-\gamma_1 x} (1 + \rho_{L1})}{1 - \rho_{G1} \rho_{L1} e^{-2\gamma_1 x}} \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} 2P_1 + \frac{e^{-\gamma_2 x} (1 + \rho_{L2})}{1 - \rho_{G2} \rho_{L2} e^{-2\gamma_2 x}} \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} 2P_2. \quad (17)$$

Из (14) и (15) получены аналитические математические модели для временного отклика в дифференциальном и синфазном режимах на активных ($V_{d1}(x, t)$, $V_{c1}(x, t)$) и пассивных ($V_{d2}(x, t)$, $V_{c2}(x, t)$) проводниках:

$$V_{d1,2}(x, t) = (1 + \rho_{L3}) \frac{\eta_4}{\eta_4 - \eta_3} P_3 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L3} \rho_{G3})^m E(t - (2m + 1)x\tau_3) \pm (1 + \rho_{L2}) \frac{\eta_3}{\eta_3 - \eta_4} P_4 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L4} \rho_{G4})^m E(t - (2m + 1)x\tau_4), \quad (18)$$

$$V_{c1,2}(x, t) = (1 + \rho_{L1}) \frac{\eta_2}{\eta_2 - \eta_1} P_1 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L1} \rho_{G1})^m E(t - (2m + 1)x\tau_1) \pm (1 + \rho_{L2}) \frac{\eta_1}{\eta_1 - \eta_2} P_2 \sum_{m=0}^{N-1} (\rho_{L2} \rho_{G2})^m E(t - (2m + 1)x\tau_2). \quad (19)$$

Вычисление откликов показано на примере ЛП, которая является МФ, работающим в дифференциальном и синфазном режимах. Его поперечное сечение представлено на рис. 5, а схема соединений – на рис. 6.

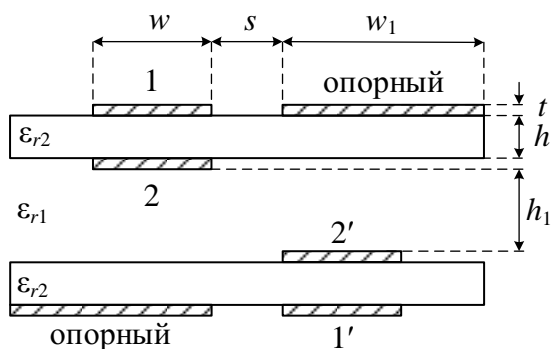


Рис. 5. Поперечное сечение МФ, работающего в дифференциальном и синфазном режимах

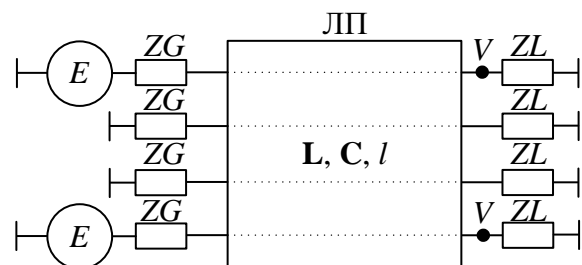


Рис. 6. Схема электрических соединений МФ, работающего в дифференциальном и синфазном режимах

Матрицы \mathbf{L} и \mathbf{C} представлены ниже, а модальные числа: $\eta_1 = 1$, $\eta_2 = -1$, $\eta_3 = -0,654$, $\eta_4 = 0,609$.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1,27 \cdot 10^{-9} & -1,25 \cdot 10^{-9} & -4,33 \cdot 10^{-13} & -5,17 \cdot 10^{-13} \\ -1,25 \cdot 10^{-9} & 1,28 \cdot 10^{-9} & -1,60 \cdot 10^{-12} & -4,33 \cdot 10^{-13} \\ -4,33 \cdot 10^{-13} & -1,60 \cdot 10^{-12} & 1,28 \cdot 10^{-9} & -1,25 \cdot 10^{-9} \\ -5,17 \cdot 10^{-13} & -4,33 \cdot 10^{-13} & -1,25 \cdot 10^{-9} & 1,27 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix} \Phi/\text{м},$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2,80 \cdot 10^{-7} & 2,57 \cdot 10^{-7} & 2,02 \cdot 10^{-8} & 1,99 \cdot 10^{-8} \\ 2,57 \cdot 10^{-7} & 2,72 \cdot 10^{-7} & 2,05 \cdot 10^{-8} & 2,02 \cdot 10^{-8} \\ 2,02 \cdot 10^{-8} & 2,05 \cdot 10^{-8} & 2,72 \cdot 10^{-7} & 2,57 \cdot 10^{-7} \\ 1,99 \cdot 10^{-8} & 2,02 \cdot 10^{-8} & 2,57 \cdot 10^{-7} & 2,80 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} \text{Гн/м}.$$

Примеры частотных откликов и формы напряжения (при воздействии СКИ) в конце (на выходе) четырехпроводной асимметричной структуры в дифференциальном и синфазном режимах, вычисленные с помощью аналитических моделей и численным методом показаны на рис. 7 - 10.

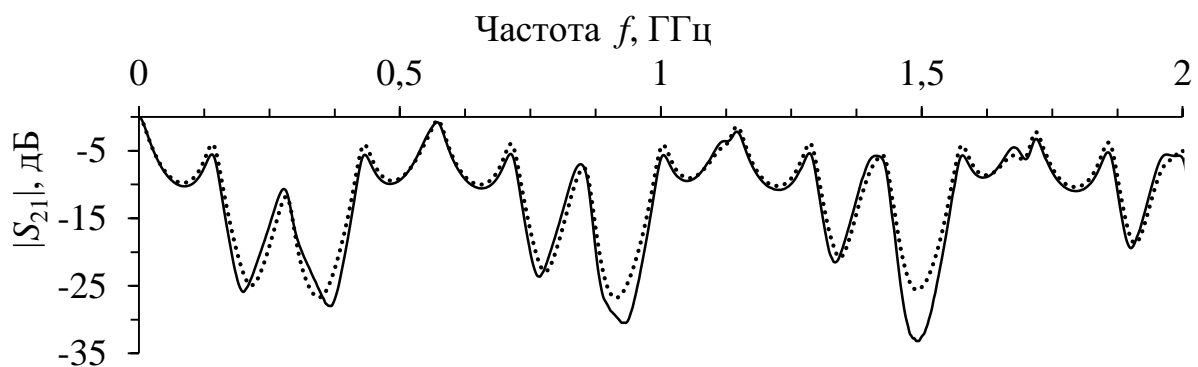


Рис. 7. Зависимости $|S_{21}|$ для четырехпроводной ЛП в дифференциальном режиме, по аналитической модели (—) и модели из [17] (⋯)

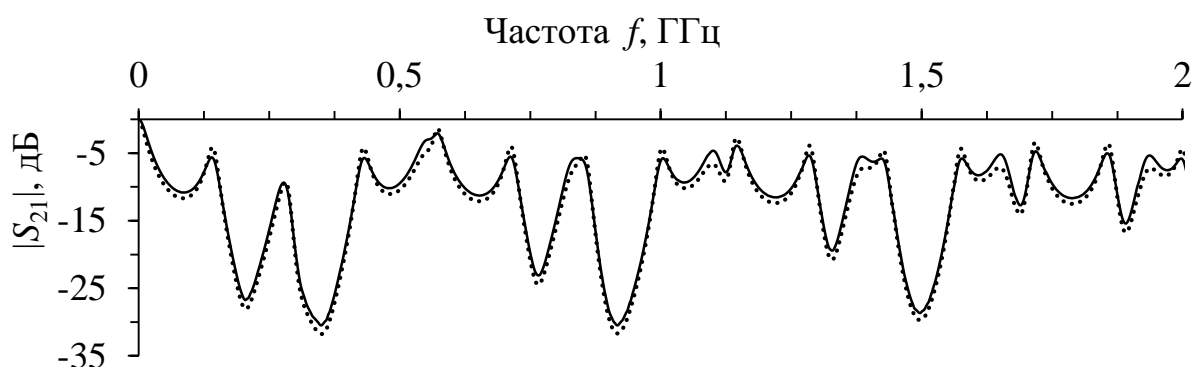


Рис. 8. Зависимости $|S_{21}|$ для четырехпроводной ЛП в синфазном режиме, по аналитической модели (—) и модели из [17] (⋯)

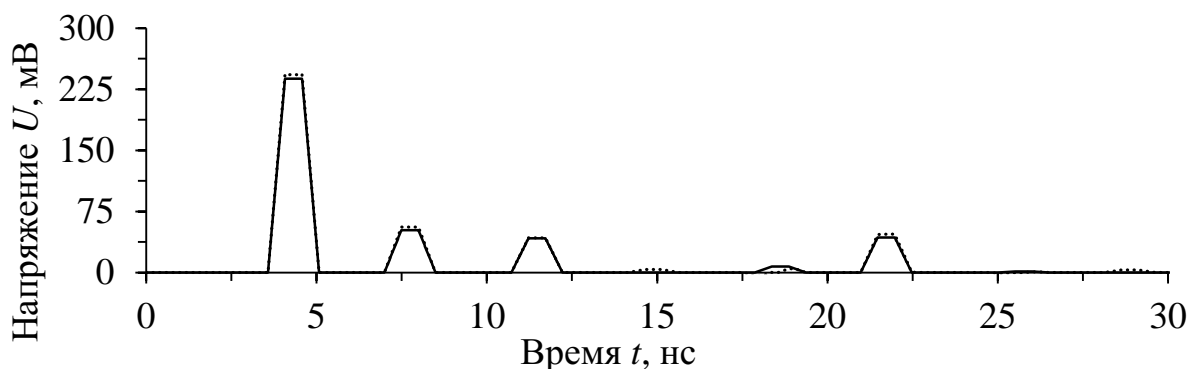


Рис. 9. Формы напряжения на выходе четырехпроводной ЛП в дифференциальном режиме, по аналитической модели (—) и в ПО TALGAT (···)

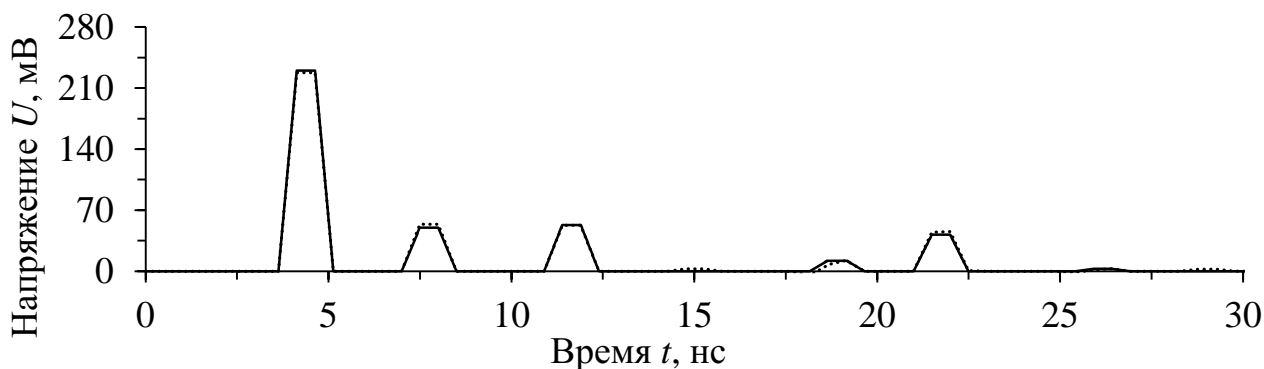


Рис. 10. Формы напряжения на выходе четырехпроводной ЛП в синфазном режиме, по аналитической модели (—) и в ПО TALGAT (···)

Видно, что использование аналитических моделей позволяет вычислить $|S_{21}|$ и временные отклики с учетом отражений от концов проводников. Вычисленные с помощью аналитических моделей задержки импульсов совпадают с результатами вычисления откликов в ПО TALGAT, а максимальное отклонение амплитуды (δ) в дифференциальном и синфазном режимах составило 2,66% и 2,47%, соответственно. Таким образом, разработанные аналитические модели позволяют вычислить частотные и временные отклики асимметричных четырехпроводных ЛП в дифференциальном и синфазном режимах.

Выводы

Таким образом, представлены аналитические математические модели, позволяющие вычислить частотные и временные отклики на выходе двухпроводных и четырехпроводных ЛП. Модели отличаются тем, что позволяет получить отклики в ЛП с произвольными линейными оконечными сопротивлениями (резистивными нагрузками). Кроме того, она учитывают асимметричное расположение проводников в поперечном сечении ЛП: для двухпроводной ЛП поперечное сечение может быть произвольным, а в четырехпроводной ЛП накладывается ограничение в виде попарной симметрии проводников и учета режима работы (дифференциальный и синфазный).

Вычисление частотных и временных откликов апробировано на МФ с лицевой связью и МФ, работающем в дифференциальном и синфазном режимах,

которые являются двухпроводной и четырехпроводной ЛП, соответственно. Получены частотные отклики по разработанным моделям. Их сравнение с откликами, полученным по модели из [17], показали согласованность. Формы напряжения, полученные по моделям и в ПО TALGAT также показали согласованность: в двухпроводной ЛП значение δ составило 0,83%, а в четырехпроводной в дифференциальном и синфазном режимах – 2,6% и 2,47%, соответственно.

Данные модели позволяют выполнить анализ волновых процессов в ЛП и устройствах на их основе, оценить амплитуды и задержки импульсов. Кроме того, модели позволяют быстро и точно оценивать характеристики ЛП с неизменными параметрами поперечного сечения, при изменении сопротивлений на концах ЛП и формы и воздействия параметров без применения затратных численных методов.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2022-0001 Министерства науки и высшего образования России.

Литература

1. Kučera M., Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment // Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering (DEMISEE). – Papradno, 2016. – P. 104-109.
2. Paul C. R. Analysis of multiconductor transmission lines. 2nd ed. – Wiley-IEEE Press, 2008. – 821 p.
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: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 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. Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 130-141.
7. Куксенко С. П. Электромагнитная совместимость: моделирование / под ред. Т.Р. Газизова. – Томск: В-Спектр, 2018. – 188 с.
8. Paul C. R. On uniform multimode transmission lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1973. № 8. P. 556-558.
9. Hall S. H., Heck H. L. Advanced signal integrity for high-speed digital designs. – Wiley-IEEE Press, 2009. – 680 p.
10. 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.

11. 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.
12. Сычев А. Н., Рудый Н. Ю. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком // *Доклады ТУСУР*. 2018. Т. 21. № 4-1. С. 7-15.
13. 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.
14. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 560. №. 012110. P. 1-7.
15. Tripathi V. K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1975. Vol. 23. No. 9. P. 734-739.
16. Влостовский Е. Г. К теории связанных линий передачи // *Радиотехника*. 1967. Т. 22. № 4. С. 28-35.
17. Djordjevic A. R., Sarkar T. K. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1987. Vol. 35. No. 10. P. 898-908.
18. Achar R., Nakhla M. S. Simulation of high-speed interconnects // *Proceedings of the IEEE*. 2001. Vol. 89. № 5. P. 693-728.

References

1. Kučera M, Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment. *Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering (DEMISEE)*. Papradno, 2016, pp. 104-109.
2. Paul C. R. *Analysis of multiconductor transmission lines. 2nd ed.* Wiley-IEEE Press, 2008. 821 p.
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, no. 3, pp. 62-66.
4. Sychjov A. N. *Upravlyaemye SVCH ustrojstva na mnogomodovyh poloskovykh strukturah* [Controllable microwave circuits based on multimode stripline structures]. Tomsk, National Research Tomsk State University Publ., 2001. 318 p. (in Russian).
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, no. 4, pp. 1136-1142.
6. Kosteletskii V. P., Zabolotsky A. M. Stripline Structure Protecting Against Ultrashort Pulses in Differential and Common Modes. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 2, pp. 130-141 (in Russian).

7. Kuksenko S. P. *Elektromagnitnaya sovmestimost': modelirovanie* [Electromagnetic compatibility: simulation]. Tomsk, V-Spektr Publ., 2018. 188 p. (in Russian).
8. Paul C. R. On uniform multimode transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1973, no. 8, pp. 556-558.
9. Hall S. H., Heck H. L. *Advanced signal integrity for high-speed digital designs*. Wiley-IEEE Press Publ., 2009. 680 p.
10. Paul C. R. Solution of the transmission-line equations under the weak-coupling assumption. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, vol. 44, pp. 413-423.
11. 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, pp. 436-446.
12. Sychev A. N., Rudyy N. Ju. Parameters of asymmetric coupled lines with inhomogeneous dielectrics. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4-1, pp. 7-15 (in Russian).
13. You H., Soma M. Crosstalk analysis of interconnection lines and packages in high-speed integrated circuits. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 1990, vol. 37, no. 8, pp. 1019-1026.
14. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1-7.
15. Tripathi V. K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1975, vol. 23, no. 9, pp. 734-739.
16. Vlostovskiy E. G. Theory of coupled transmission lines. *Telecommunication and Radio Engineering*, 1967, vol. 21. pp. 87-93.
17. Djordjevic A. R., Sarkar T. K. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1987, vol. 35, no. 10, pp. 898-908.
18. Achar R., Nakhla M. S. Simulation of high-speed interconnects. *Proceedings of the IEEE*, 2001, vol. 89, no 5, pp. 693-728.

Статья поступила 10 июня 2022 г.

Информация об авторах

Костелецкий Валерий Павлович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальная фильтрация. E-mail: kosteletskiy.vp@gmail.com

Черникова Евгения Борисовна – кандидат технических наук, аспирант кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник научно-

исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, модальная фильтрация, аналитические модели. E-mail: chernikova96@mail.ru

Заболоцкий Александр Михайлович – доктор технических наук, доцент. Заведующий лабораторией фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; численные методы, модальная фильтрация. E-mail: zabolotsky_am@mail.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Analytical Models for Calculating the Frequency and Time Response of Transmission Lines with Resistive Loads and Conductor Asymmetry

V. P. Kosteletskii, E. B. Chernikova, A. M. Zabolotsky

Problem statement: In the development of modern high-speed systems, striped transmission lines (TL) are widely used, which are particularly useful in printed circuitry and integrated circuits. However, the use of TL leads to a number of electromagnetic capability issues which have an important impact on overall system performance. Such issues include crosstalk and interference due to reflection. Hence, accurate modelling and analysis of signal propagation along the TL in the frequency and time domain in the initial stages of high-speed system design is important. In addition, TL are widely used in the design of filters, taps and other devices. For example, modal filters (MF), which protect equipment from ultra-short pulses (USP), are based on coupled TL. Their development involves calculating the frequency and time response to determine the characteristics of the filter. Signal propagation analysis in TL can be performed using numerical methods simulations. However, there are analytical approaches that are suitable for initial response estimation of simple TL configurations, due to which it is possible to perform analysis of physical phenomena in TL and reduce computation time, as well as to use them for verification of numerical simulation results. Thus, there is a need to develop universal analytical models that will be useful in performing theoretical analysis of TL, including those used to create MF. **Purpose of work:** to propose analytical models for calculating the time and frequency response of two-wire and four-wire transmission lines. **Methods used:** for model verification, the method of moments is used to obtain the electrostatic and electromagnetic induction matrices of transmission lines. Segmentation of conductor and dielectric boundaries in this case was used using uniform: 5 segments per conductor edge length. Analytical models have been obtained on the basis of modal analysis in spectral domain. Models for the time domain are obtained using the Laplace transform. **Novelty:** analytical models in the form of finite combinations of elementary functions are presented for calculation of frequency and time responses of two-wire TL, differed by taking into account asymmetry of conductors, and four-wire line, differed by taking into account pair symmetry of conductors and differential and common modes, and also taking into account reflection in both TL. **Result:** using the shown analytical models, the time and frequency responses of the two-wire and four-wire transmission lines can be obtained with no significant time and computational effort. **Practical relevance:** analytical models allow analysis of signal propagation along TL, reduce time and computational effort when developing protection devices of radio-electronic means against conductive USP in asymmetric, differential and common modes.

Key words: transmission lines, modal filters, analytical models, frequency response, time response, common mode, differential mode.

Information about Authors

Valerii Pavlovich Kosteletskii – Doctoral Student. Research Assistant of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices, modal filtration. E-mail: kosteletskiy.vp@gmail.com

Evgeniya Borisovna Chernikova – Ph.D. of Engineering Sciences, a graduate student at the Department of Television and Control, junior research fellow of the Research laboratory of fundamental research on electromagnetic compatibility of Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices, analytical models. E-mail: chernikova96@mail.ru

Alexandr Mikhailovich Zabolotsky – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Head of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; numerical methods, modal filtration. E-mail: zabolotsky_am@mail.ru.

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.