

Аналитические модели временного отклика микрополосковой линии с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху при различных граничных условиях на их концах

А. Секенова, З. М. Кенжегулова, И. Е. Сагиева[✉], Т. Р. Газизов

Томский университет систем управления радиоэлектроники, Томск, Россия

[✉]indira_sagieva@mail.ru

Аннотация

Введение. Защита радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от различных электромагнитных помех является важным аспектом электромагнитной совместимости. Опасными среди помех для РЭА являются сверхкороткие импульсы пикосекундного и наносекундного диапазонов из-за высокого напряжения, малой длительности и широкого спектра. Одним из эффективных видов защиты является применение полосковых устройств на основе модального разложения: модальных фильтров (МФ). Для этого важно анализировать искажения временного отклика полосковых устройств. Обычно анализ выполняется численными методами, однако требуемые для этого вычислительные затраты часто высоки даже для простых конфигураций. Между тем применение несложных аналитических моделей временного отклика в ряде случаев оказывается приемлемым. На начальных этапах проектирования такие модели весьма полезны, поскольку позволяют найти предварительное решение и быстро оценить искажения отклика. В связи с этим сравнение временных откликов, полученных с помощью численных методов и аналитических моделей, важно.

Цель работы. Сравнение временных откликов, полученных в результате квазистатического анализа и с помощью предложенных аналитических моделей.

Материалы и методы. Рассмотрены аналитические модели для вычисления временных откликов, основанные на методике модального анализа. Проведено квазистатическое моделирование микрополосковой линии (МПЛ) с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху в системе TALGAT.

Результаты. Предложены аналитические модели для МПЛ с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху с учетом различных граничных условий на концах. Проверка точности и достоверности предложенных моделей выполнена сравнением временных откликов, полученных квазистатическим анализом и моделями. В результате наблюдается их совпадение.

Заключение. Показано, что МПЛ с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху может использоваться как МФ при различных граничных условиях на концах этих проводников. Модели позволяют с приемлемой точностью и быстро оценить форму и амплитуду отклика без затратного численного моделирования.

Ключевые слова: микрополосковая линия, сверхкороткий импульс, модальный фильтр, временной отклик, аналитическая модель

Для цитирования: Аналитические модели временного отклика микрополосковой линии с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху при различных граничных условиях на их концах / А. Секенова, З. М. Кенжегулова, И. Е. Сагиева, Т. Р. Газизов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 21–30. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-21-30

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ, проект FEWM-2022-0001.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; принята к публикации после рецензирования 14.07.2023; опубликована онлайн 29.11.2023



Analytical Models for the Time Response of a Microstrip Line with Two Additional Symmetrical Conductors on Top under Different Boundary Conditions at Their Ends

Aitgul Sekenova, Zarina M. Kenzhegulova, Indira Y. Sagiyeva✉, Talgat R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

✉indira_sagiyeva@mail.ru

Abstract

Introduction. Protection of radio electronic equipment (REA) against various electromagnetic interferences is an important aspect of electromagnetic capability. Among interferences for REA, ultra-short pulses of picosecond and nanosecond ranges represent the highest danger due to their high voltage, short duration, and wide spectrum. One effective protection measure consists in the use of bandpass devices based on modal decomposition, such as modal filters (MF). This requires an analysis of distortion of the temporal response of bandpass devices, which is usually carried out numerically. However, even for simple configurations, this approach is associated with high computational costs. Yet simple analytical time-response models are acceptable in some cases. In the initial design stages, such models are extremely useful in providing a preliminary solution and a rapid assessment of response distortions. Therefore, comparison of time responses obtained by numerical methods and analytical models appears an important research task.

Aim. To compare the time responses obtained by quasi-static analysis and analytical models.

Materials and methods. Analytical models for computing time responses based on a modal analysis technique were considered. A quasi-static modeling of a microstrip line (MSL) with two additional symmetrical conductors on top in the TALGAT system was carried out.

Results. Analytical models are proposed for an MSL with two additional symmetrical conductors on top taking different boundary conditions at their ends into account. The accuracy and reliability of the proposed models are verified by comparing the time responses obtained by quasi-static analysis and the proposed models. The results obtained showed good agreement.

Conclusion. It is shown that an MSL with two additional symmetrical conductors on top can be used as an MF under different boundary conditions at the ends of these conductors. The proposed models allow the shape and amplitude of the response to be estimated with acceptable accuracy, reducing time and computational costs.

Keywords: microstrip line, ultrashort pulse, modal filter, time response, analytical model

For citation: Sekenova A., Kenzhegulova Z. M., Sagiyeva I. Y., Gazizov T. R. Analytical Models for the Time Response of a Microstrip Line with Two Additional Symmetrical Conductors on Top under Different Boundary Conditions at Their Ends. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 21–30. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-21-30

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FEWM-2022-0001).

Submitted 28.02.2023; accepted 14.07.2023; published online 29.11.2023

Введение. Широкое внедрение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в различные сферы жизни общества, рост плотности размещения РЭА и количества потенциальных источников помех привели к уязвимости РЭА к воздействию электромагнитных воздействий (ЭМВ) [1]. К числу таких воздействий относятся сверхкороткие импульсы (СКИ). Мощные СКИ, обладая высокой амплитудой, способны практически беспрепятственно проникать внутрь РЭА,

что, в свою очередь, может привести не просто к временному сбою, а к полному выходу РЭА из строя [2]. В связи с этим для должного функционирования РЭА необходимо разрабатывать устройства защиты [3]. Сегодня существуют разнообразные устройства: газоразрядники, варисторы, фильтры, дроссели и др. [4–6]. Одним из относительно новых устройств является модальный фильтр (МФ) на основе МПЛ, где защита от СКИ обеспечивается за

счет его модального разложения [7]. Данная технология заключается в разложении помехового сигнала большой амплитуды на серию импульсов меньшей амплитуды, гораздо менее опасных для системы относительно исходного помехового сигнала [8, 9]. Вместе с тем, для защиты от опасных ЭМВ (в том числе СКИ) необходима способность оценивать искажения формы временного отклика рассматриваемых структур. Часто такая оценка выполняется численными методами, требующими больших вычислительных затрат. Одним из них является квазистатический анализ N -проводных структур, основанный на вычислении квадратных матриц (порядка N) погонных параметров: электростатической (C) и электромагнитной (L) индукции. Для учета потерь вводятся еще две матрицы: погонных проводимостей (G) и погонных сопротивлений (R), которые вычисляются или определяются экспериментально. Погонные параметры рассчитываются при известных допущениях, которым удовлетворяет подавляющее большинство структур, поэтому квазистатический подход представляет наибольший практический интерес. Конечно, он является приближенным, но в рамках своей применимости дает достаточную для практики точность, а также отличается высокой результативностью. Другим методом является электродинамический анализ, который основан на решении уравнений Максвелла и позволяет учесть все типы волн. Он является универсальным и позволяет моделировать структуры произвольной геометрии. Однако численный метод требует довольно больших затрат, памяти и времени. В связи с этим представляет интерес применение аналитических моделей для предварительного и точного анализа СКИ, а также определения причин его искажений. Аналитические модели временного отклика МФ могут быть получены на основе метода модального анализа в связанных линиях, использованного в [10–12]. Примером применения этого метода является аналитическая модель [13] временного отклика модифицированной МПЛ с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху, имеющей свойства МФ. Показано, что амплитуды импульсов равны при коротком замыкании (КЗ) на концах дополнительных верхних

проводников [14]. Между тем проверка и апробация моделей такой структуры при других граничных условиях не проводилась. Цель данной статьи – сравнить временные отклики, полученные в результате квазистатического анализа и с использованием предложенных аналитических моделей.

Аналитические модели МПЛ с двумя симметричными проводниками сверху. Для начала приведем исходные аналитические модели [13] вычисления отклика для такой МПЛ. Исходя из модального анализа [10] в моделях используются:

- матрицы преобразования мод по напряжению (T_V) и току (T_I), вычисленные из собственных векторов произведения матриц LC и CL :

$$T_V = \begin{bmatrix} T_{Vaa} & T_{Vab} & T_{Vac} \\ T_{Vba} & T_{Vbb} & T_{Vbc} \\ T_{Vca} & T_{Vcb} & T_{Vcc} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$T_I = \begin{bmatrix} T_{Iaa} & T_{Iab} & T_{Iac} \\ T_{Iba} & T_{Ibb} & T_{Ibc} \\ T_{Ica} & T_{Icb} & T_{Icc} \end{bmatrix};$$

- вектор источника напряжения (V_S) и матрицы импедансов в начале (R_S) и в конце (R_L) линии:

$$V_S = \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R_S = \begin{bmatrix} R_{S1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{S2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{S3} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$R_L = \begin{bmatrix} R_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{L2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{L3} \end{bmatrix},$$

где V – амплитуда электродвижущей силы (ЭДС) источника;

- векторы модальных источников напряжения V_{Sm} (индексы a, b, c обозначают моды МФ) и источников изначально падающих мод:

$$V_{Sm} = T_V^{-1} V_S = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$V_{0m} = (E + R_{Sm} Z_{cm}^{-1})^{-1} V_{Sm} = \begin{bmatrix} V_{0a} \\ V_{0b} \\ V_{0c} \end{bmatrix},$$

где E – единичная матрица; R_{Sm} и R_{Lm} – матрицы модальных импедансов:

$$R_{Sm} = T_V^{-1} R_S T_I = \begin{bmatrix} R_{Saa} & R_{Sab} & R_{Sac} \\ R_{Sba} & R_{Sbb} & R_{Sbc} \\ R_{Sca} & R_{Scb} & R_{Scc} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$R_{Lm} = T_V^{-1} R_L T_I = \begin{bmatrix} R_{La a} & R_{Lab} & R_{Lac} \\ R_{Lba} & R_{Lbb} & R_{Lbc} \\ R_{Lca} & R_{Lcb} & R_{Lcc} \end{bmatrix};$$

Z_{cm} – матрица характеристического импеданса мод, коэффициенты которой определяются как

$$Z_{cmi} = \sqrt{\frac{L_{mi}}{C_{mi}}}; i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (5)$$

Здесь L_{mi} и C_{mi} – элементы диагонализированных матриц L и C ;

• матрицы коэффициентов отражения мод в начале (Γ_{Sm}) и в конце (Γ_{Lm}) линии:

$$\Gamma_{Sm} = (R_{Sm} Z_{cm}^{-1} + E)^{-1} (R_{Sm} Z_{cm}^{-1} - E) =$$

$$= \begin{bmatrix} \Gamma_{Saa} & \Gamma_{Sab} & \Gamma_{Sac} \\ \Gamma_{Sba} & \Gamma_{Sbb} & \Gamma_{Sbc} \\ \Gamma_{Sca} & \Gamma_{Scb} & \Gamma_{Scc} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\Gamma_{Lm} = (R_{Lm} Z_{cm}^{-1} + E)^{-1} (R_{Lm} Z_{cm}^{-1} - E) =$$

$$= \begin{bmatrix} \Gamma_{La a} & \Gamma_{Lab} & \Gamma_{Lac} \\ \Gamma_{Lba} & \Gamma_{Lbb} & \Gamma_{Lbc} \\ \Gamma_{Lca} & \Gamma_{Lcb} & \Gamma_{Lcc} \end{bmatrix}.$$

Из моделей (1)–(6) получим модели модальных напряжений для каждой моды в конце МФ:

$$V_a(t) = (1 + \Gamma_{aa}) V_{0a}(t - T_a) +$$

$$+ \Gamma_{ab} V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{ac} V_{0c}(t - T_c);$$

$$V_b(t) = (1 + \Gamma_{bb}) V_{0b}(t - T_b) +$$

$$+ \Gamma_{ba} V_{0a}(t - T_a) + \Gamma_{bc} V_{0c}(t - T_c);$$

$$V_c(t) = (1 + \Gamma_{cc}) V_{0c}(t - T_c) +$$

$$+ \Gamma_{cb} V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{ca} V_{0a}(t - T_a), \quad (7)$$

где T_a, T_b, T_c – задержки распространения мод.

Используя модели (1) и (7), отклики в конце МФ (узел V_6) в итоге будут определяться как

$$V_6(t) = T_{Vaa} [(1 + \Gamma_{aa}) V_{0a}(t - T_a) +$$

$$+ \Gamma_{ab} V_{0b}(t - T_b) +$$

$$+ \Gamma_{ac} V_{0c}(t - T_c)] + T_{Vab} [(1 + \Gamma_{bb}) V_{0b}(t - T_b) +$$

$$+ \Gamma_{ba} V_{0a}(t - T_a) + \Gamma_{bc} V_{0c}(t - T_c)] +$$

$$+ T_{Vac} [(1 + \Gamma_{cc}) V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{cb} V_{0b}(t - T_b) +$$

$$+ \Gamma_{ca} V_{0a}(t - T_a)]. \quad (8)$$

Следует учитывать, что симметрия поперечного сечения рассматриваемого МФ в сочетании с моделями (1) и (4) приводит к нулевым значениям коэффициентов T_{Vac} и $R_{Lac}, R_{Lbc}, R_{Lca}, R_{Lcb}$, а это, в свою очередь, приводит к тому, что коэффициенты матрицы отражений $\Gamma_{Lac}, \Gamma_{Lbc}, \Gamma_{Lca}, \Gamma_{Lcb}$ в (6) равны нулю. В результате (8) приобретает вид

$$V_6(t) = T_{Vaa} [(1 + \Gamma_{aa}) V_{0a}(t - T_a) +$$

$$+ \Gamma_{ab} V_{0b}(t - T_b)] +$$

$$+ T_{Vab} [(1 + \Gamma_{bb}) V_{0b}(t - T_b) + \Gamma_{ba} V_{0a}(t - T_a)]. \quad (9)$$

Использование (9) позволяет определить временной отклик на концах исследуемой МПЛ при разных граничных условиях.

Результаты моделирования МПЛ при разных граничных условиях. Для исследования корректности предложенных моделей необходимо произвести моделирование. Для квазистатического анализа выбрана отечественная система TALGAT [15, 16]. Она основана на методе моментов, зарекомендовавшем себя при решении широкого круга задач электромагнитного поля. В качестве пакета электродинамического моделирования выбран Electromagnetic Professional (EMPro) [17]. Распространенными методами при моделировании в EMPro являются метод конечных элементов, позволяющий работать со структурами произвольной формы, и метод конечных разностей во временной области, использующийся для моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров и др.). На рис. 1, а показано поперечное сечение исследуемого МФ, а на рис. 1, б – эквивалентная схема его включения.

Для проверки аналитических моделей не имеет принципиального значения расположение

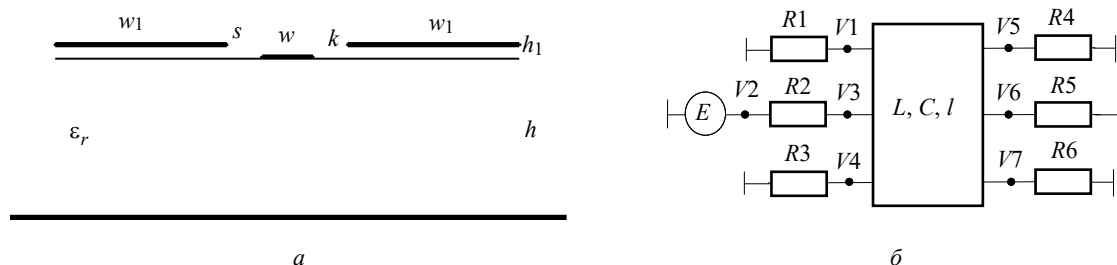


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема электрических соединений (б) МПЛ с двумя дополнительными проводниками сверху
Fig. 1. Cross section (a) and electrical connection diagram (b) of the microstrip line with two additional conductors on top

боковых проводников: сверху, на подложке или углубленно. Между тем их расположение сверху дает лучшую защиту: увеличивает интервалы между импульсами разложения воздействующего СКИ [14]. В связи с этим именно для такого МФ целесообразно выбрать параметры, обеспечивающие минимальную амплитуду выходного напряжения при различных граничных условиях.

Рассматриваемый МФ на основе МПЛ состоит из опорного проводника в виде проводящего слоя, диэлектрической подложки и сигнального проводника в виде полоски на подложке и отличается наличием двух симметричных проводников сверху, соединенных на концах с опорным проводником. Защита от СКИ достигается за счет его модального разложения. Выбором длины МФ такой, чтобы ее произведение на разность третьей и второй погонных задержек мод линии превышало длительность СКИ, обеспечивается разложение на 2 импульса меньшей амплитуды. При этом выбор высоты проводников, их ширины и расстояния между ними позволяет обеспечивать равенство амплитуд этих импульсов.

Геометрические параметры поперечного сечения (рис. 1, а) менялись: при граничном условии 50 Ом-КЗ $w = 0.21$ мм; $w_1 = 1$ мм; $k = 18$ мкм; $\epsilon_r = 4$; $s = 0.3$ мм; $h = 1$ мм; $h_1 = 0.1$ мм; при условии согласованной линии (СЛ) они отличаются тем, что $w = 0.29$ мм; $w_1 = 1.5$ мм; $\epsilon_r = 3$; $s = 0.49$ мм; при КЗ-КЗ $w = 0.3$ мм; $w_1 = 1$ мм; $\epsilon_r = 4.5$; $s = 0.49$ мм. В качестве воздействия использовался СКИ в виде трапеции с амплитудой ЭДС 5 В, временем нарастания, спада и плоской вершины по 50 пс. Длина линии $l = 1$ м. В ходе моделирования потери в проводниках и диэлектриках не учитывались. Нагрузки на дополнительных проводниках меняются, а

$R2 = R5 = 50$ Ом (рис. 1). Так при 50 Ом-КЗ принято $R1 = R3 = 50$ Ом и $R4 = R6 = 1$ мОм; при СЛ – $R1 = R3 = R4 = R6 = 50$ Ом; а при КЗ-КЗ – $R1 = R3 = R4 = R6 = 1$ мОм.

Вычисленные для рассмотренных случаев матрицы C и L представлены в табл. 1.

Для заданных матриц L и C из (9) получим:
– при условии 50-КЗ

$$V6(t) = 0.761[0.331 V_{0a}(t - 5.15) + 0.71 V_{0b}(t - 4.22)] + 0.372[0.49 V_{0b}(t - 4.22) + 0.23 V_{0a}(t - 5.15)];$$

– при СЛ

$$V6(t) = 0.749[0.491 V_{0a}(t - 4.76) + 0.03 V_{0b}(t - 4.15)] + 0.629[0.99 V_{0b}(t - 4.15) + 0.01 V_{0a}(t - 4.76)];$$

– при КЗ-КЗ

Табл. 1. Матрицы C и L для МПЛ, соответствующих разным граничным условиям

Tab. 1. Matrices C and L for microstrip lines according to different boundary conditions

R	Матрицы					
	C , пФ/м			L , нГн/м		
50-КЗ	60.6	-21.2	-7.4	409.8	252.4	167.2
	-21.2	64	-21.2	252.4	547.3	252.4
	-7.4	-21.2	60.6	167.2	252.4	409.8
СЛ	64.6	-18.5	-5.8	343.9	188.6	106.8
	-18.5	54.8	-18.5	188.6	499.9	188.6
	-5.8	-18.5	64.6	106.8	188.6	343.9
КЗ-КЗ	60.3	-20.8	-5.1	414.7	230.9	141.7
	-20.8	71.7	-20.8	230.9	526.7	230.9
	-5.1	-20.8	60.3	141.7	230.9	414.7

$$V_6(t) = 0.788[0.421V_{0a}(t - 5.49) + \\ + 0.657V_{0b}(t - 4.37)] + \\ + 0.27[0.42V_{0b}(t - 4.37) + \\ + 0.69V_{0a}(t - 5.49)],$$

где t – время, нс.

Вычисленные формы напряжений в конце МПЛ, полученные в ходе квазистатического ана-

лиза и по моделям, при разных граничных условиях показаны на рис. 2. Сравнение амплитуд и задержек импульсов приведено в табл. 2.

Из рис. 2 и табл. 2 видно, что СКИ, полученный при различных подходах, в конце МФ (V_6) разложился на 2 импульса равной амплитуды. Из сравнения форм напряжений, полученных разными методами, видно, что они качественно согласуются. При этом полностью сов-

Табл. 2. Сравнение амплитуд (U) и задержек (t) импульсов, полученных при разных моделях

Tab. 2. Comparison of amplitudes (U) and delays (t) of pulses, obtained by different models

Подходы	50-КЗ				СЛ				КЗ-КЗ			
	U_1 , В	U_2 , В	t_1 , нс	t_2 , нс	U_1 , В	U_2 , В	t_1 , нс	t_2 , нс	U_1 , В	U_2 , В	t_1 , нс	t_2 , нс
Квазистатика и аналитика	1.12	1.12	4.22	4.76	1.06	1.06	4.14	5.16	1.22	1.22	4.37	5.5
Электродинамика	1.02	1.04	4.5	5.44	1.04	0.98	4.35	4.92	0.93	1.15	4.75	5.78

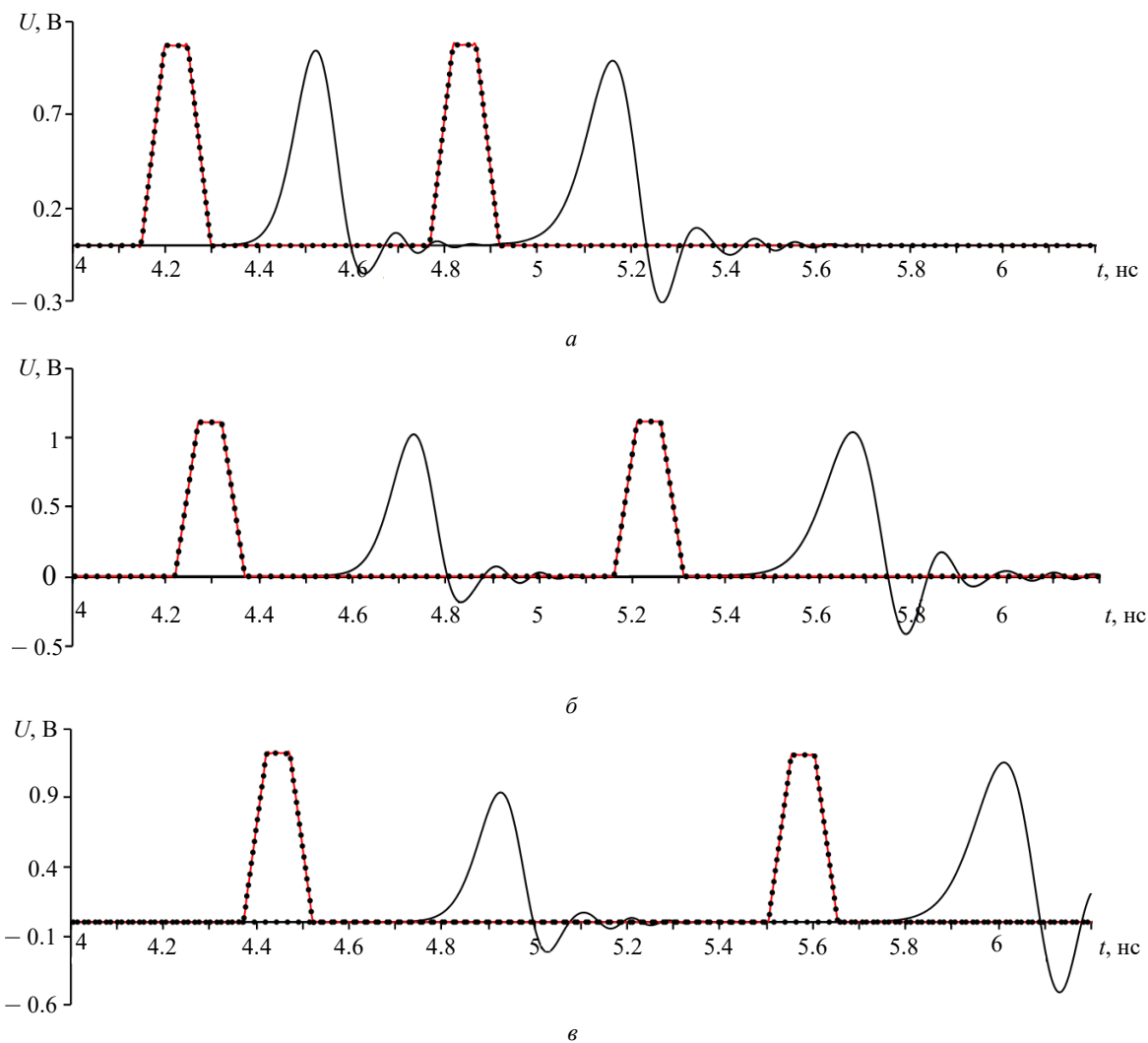


Рис. 2. Формы напряжения в конце МФ (V_6), вычисленные по квазистатической (красная линия), электродинамической (черная линия) и аналитической (пунктир) моделям для разных граничных условий: а – 50-КЗ; б – СЛ; в – КЗ-КЗ

Fig. 2. Voltage waveforms at the MF output (V_6), calculated by quasi-static (red), electrodynamic (black) and analytical (···) models for different boundary conditions: а – 50-KZ; б – СЛ; в – КЗ-KZ

падают результаты, полученные квазистатическим анализом и по предложенным аналитическим моделям. Однако видно, что результаты электродинамического анализа отличаются по форме, амплитуде и задержкам импульсов. Различия результатов, полученных численно, вызваны различием численных методов, лежащих в их основе. Кроме того, различие форм импульсов обусловлено учетом всех типов волн, краевых эффектов на концах проводников и частотной зависимости диэлектрической проницаемости при электродинамическом моделировании. Это приводит к характерному для реальных линий затягиванию фронта и спада импульса. Так, максимальные отклонения по амплитуде и задержкам составили: при 50-КЗ (рис. 2, а) – 3.7 и 6.6 %; при СЛ (рис. 2, б) – 0.9 и 2.47 %; при КЗ-КЗ (рис. 2, в) – 2.95 и 2.48 % соответственно.

Кроме того, из рис. 2, б видно, что при СЛ наблюдается наименьшая амплитуда на выходе исследуемой структуры 1.06 В. Тем самым при данном граничном условии рассматриваемый МФ

позволяет получить наилучшее (по сравнению с 50-КЗ и КЗ-КЗ) ослабление (около 2.36 раза) воздействующего СКИ.

Заключение. Рассмотрены модели для вычисления временного отклика модифицированной МПЛ с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху. Применение разработанных моделей на ранних этапах проектирования полосковых устройств защиты позволит сократить затраты времени и вычислительных ресурсов при многовариантной оптимизации, поскольку при вычислениях в диапазоне параметров нет необходимости в нахождении отклика как такового. Представлено сравнение временных откликов, полученных с помощью предложенных аналитических моделей и численными методами (в двух программных продуктах). В результате получено совпадение результатов по амплитуде, форме и задержке импульсов. Показано, что МПЛ с двумя дополнительными симметричными проводниками сверху может использоваться как МФ с определенными параметрами при различных граничных условиях.

Авторский вклад

Секенова Айтгул – сбор и/или обработка данных.

Кенжегулова Зарина Муратбековна – разработка аналитических моделей.

Сагиева Индира Ериковна – концепция, материалы.

Газизов Тальгат Рашитович – постановка задач, критическая оценка.

Author's contribution

Aitgul Sekenova, data collection and/or processing.

Zarina M. Kenzhegulova, development of analytical models.

Indira Y. Sagiyeva, concept, materials.

Talgat R. Gazizov, analysis and/or interpretation, critical review.

Список литературы

1. Zheng J., Wei G. New development of electromagnetic compatibility in the future: cognitive electromagnetic environment adaptation // 13th Global Symp. on Millimeter-Waves and Terahertz (GSMM), Nanjing, China, 17 Aug. 2021. IEEE, 2021. P. 1–3. doi: 10.1109/GSMM53250.2021.9511983
2. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л. Н. Здухов, Ю. В. Парфёнов, О. А. Тарасов, В. М. Чепелев // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 2 (65). С. 22–34.
3. Radasky W. A., Baum C. E., Wik M. W. Introduction to the special issue on high-power

electromagnetics and intentional electromagnetic interference // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. Vol. 46, iss. 3. P. 314–321. doi: 10.1109/TEMPC.2004.831899

4. Kotny J. C., Margueron X., Idir N. High frequency model of the coupled inductors used in EMI filter // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27, № 6. P. 2805–2812. doi: 10.1109/TPEL.2011.2175452

5. Yoshida T., Endo M. A Study on ESD protection characteristic difference measurement of TVS diodes by VNA // IEEE 5th Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC), Beijing, China, 2018. P. 1–4. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260474

6. Смирнов В., Шалаева А., Харитонов А. Электромагнитная совместимость в электронике. М.: Медиа КиТ, 2018. С. 34–40.
7. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Теоретические основы модальной фильтрации // Техника радиосвязи. 2014. № 3. С. 79–83.
8. 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. doi: 10.1109/TEM.2016.2548783
9. Belousov A. O., Zabolotsky A. M., Gazizov T. T. Optimization of parameters of multiconductor modal filters for protection against ultrashort pulses // 17th Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Altai, Russia, 30 June – 4 July 2016. P. 67–70. doi: 10.1109/EDM.2016.7538694
10. 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 Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2010. Vol. 52, iss. 2. P. 436–446. doi: 10.1109/temc.2010.2045759
11. Xiao F., Murano K., Kami Y. Analytical Solution of the Electromagnetic Radiation from Coupled Differential Microstrip Pairs // Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, Taiwan, 26–29 May 2015. IEEE, 2015. P. 708–711. doi: 10.1109/APEMC.2015.7175358
12. Soleimani N., Mohammad G. H. A., Mohammad H. N. Crosstalk analysis at near-end and far-end of the coupled transmission lines based on eigenvector decomposition // Intern. J. of Electronics and Communications. 2012. Vol. 12. P. 1–8. doi: 10.1016/j.aecue.2019.152944
13. Sagiyeva I. Y., Kenzhegulova Z. M., Surovtsev R. S. Analytical Models for the Time Response of a Modal Filter Having a Symmetrical Pair of Passive Conductors with Grounded Ends // IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russia, 11–13 Nov. 2022. IEEE, 2022. P. 1080–1084. doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017074.
14. Sagiyeva I. Y., Kenzhegulova Z. M., Surovtsev R. S. Modal filters based on a microstrip line with overhead conductors grounded at both ends // 22nd Intern. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. Altai, Russia. 30 June – 4 July 2021. IEEE, 2021. P. 176–179. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507610
15. Kuksenko S. P. Preliminary results of a project of the University of TUSUR on designing the distribution network space vehicles: modeling EMS. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560, № 012110. P. 1–7. doi:10.1088/1757-899X/560/1/012110
16. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости / С. П. Куксенко, А. М. Заболоцкий, А. О. Мелкозеров, Т. Р. Газизов // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 45–50.
17. PathWave EM Design (EMPro). URL: <http://scanru.ru/products/keysight-eda/products/empro/> (дата обращения 20.09.2023)

Информация об авторах

Секенова Айтгул – магистрант кафедры телевидения и управления Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Автор девяти научных публикаций. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость.

Адрес: Томский университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: aitowaas@mail.ru

Кенжегулова Зарина Муратбековна – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (ТУСУР, 2020), аспирантка кафедры телевидения и управления Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 14 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость.

Адрес: Томский университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: zarina.kenzhegulova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0984-5088>

Сагиева Индира Ериковна – кандидат технических наук (2021), доцент кафедры телевидения и управления Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 59 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость.

Адрес: Томский университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: indira_sagiyeva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7119-0583>

Газизов Тальгат Рашитович – доктор технических наук (2010), заведующий кафедрой телевидения и управления Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 482 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость.

Адрес: Томский университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: talgat@tu.tusur.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>

References

1. Zheng J., Wei G. New Development of Electromagnetic Compatibility in the Future: Cognitive Electromagnetic Environment Adaptation. 13th Global Symp. on Millimeter-Waves and Terahertz (GSMM). Nanjing, China, 17 Aug. 2021. IEEE, 2021, pp. 1–3. doi: 10.1109/GSMM53250.2021.9511983
2. Zdukhov L. N., Parfenov Yu. V., Tarasov O. A., Chepelev V. M. Three Possible Mechanisms for the Failure of Electronic Devices as a Result of Electromagnetic Interference. *Tekhnologii elektromagnitnoy otrazheniya* [Electromagnetic Compatibility Technologies]. 2018, no. 2 (65), pp. 22–34. (In Russ.)
3. Radasky W. A., Baum C. E., Wik M. W. Introduction to the Special Issue on High-Power Electromagnetics and Intentional Electromagnetic Interference. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004, vol. 46, iss. 3, pp. 314–321. doi: 10.1109/TEMPC.2004.831899
4. Kotny J. C., Margueron X., Idir N. High Frequency Model of the Coupled Inductors Used in EMI Filter. IEEE Transactions on Power Electronics. 2012, vol. 27, no. 6, pp. 2805–2812. doi: 10.1109/TPEL.2011.2175452
5. Yoshida T., Endo M. A Study on ESD Protection Characteristic Difference Measurement of TVS Diodes by VNA. IEEE 5th Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC), Beijing, China, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260474
6. Smirnov V., Shalayeva A., Kharitonov A. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektronike* [Electromagnetic Compatibility in Electronics]. Moscow, Media KiT, 2018, pp. 34–40. (In Russ.)
7. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. Theoretical Foundations of Modal Filtering. *Tekhnika radiosvyazi* [Radio Communications Technology]. 2014, no. 3, pp. 79–83. (In Russ.)
8. 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. doi: 10.1109/TEMPC.2016.2548783
9. Belousov A. O., Zabolotsky A. M., Gazizov T. T. Optimization of Parameters of Multiconductor Modal Filters for Protection Against Ultrashort Pulses. 17th Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2016, pp. 67–70. doi: 10.1109/EDM.2016.7538694
10. 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 Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2010, vol. 52, iss. 2, pp. 436–446. doi: 10.1109/temc.2010.2045759
11. Xiao F., Murano K., Kami Y. Analytical Solution of the Electromagnetic Radiation from Coupled Differential Microstrip Pairs. Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, Taiwan, 26–29 May 2015. IEEE, 2015, pp. 708–711. doi: 10.1109/APEMC.2015.7175358
12. Soleimani N., Mohammad G. H. A., Mohammad H. N. Crosstalk Analysis at Near-End and Far-End of the Coupled Transmission Lines Based on Eigenvector Decomposition. Intern. J. of Electronics and Communications. 2012, vol. 12, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.aeue.2019.152944
13. Sagiyeva I. Y., Kenzhegulova Z. M., Surovtsev R. S. Analytical Models for the Time Response of a Modal Filter Having a Symmetrical Pair of Passive Conductors with Grounded Ends. IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russia, 11–13 Nov. 2022. IEEE, 2022, pp. 1080–1084. doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017074
14. Sagiyeva I. Y., Kenzhegulova Z. M., Surovtsev R. S. Modal Filters Based on a Microstrip Line with Overhead Conductors Grounded at Both Ends. 22nd Intern. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2021. IEEE, 2021, pp. 176–179. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507610
15. Kuksenko S. P. Preliminary Results of a Project of the University of TUSUR on Designing the Distribution Network Space Vehicles: Modeling EMS. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1–7. doi:10.1088/1757-899X/560/1/012110
16. Kuksenko S. P., Zabolotsky A. M., Melkozorov A. O., Gazizov T. R. New Features of Electromagnetic Compatibility in TALGAT Simulation Software. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Papers from Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. 2015, no. 2, pp. 45–50. (In Russ.)
17. PathWave EM Design (EMPro). Available at: <http://scanru.ru/products/keysight-eda/products/empro/> (accessed 20.09.2023)

Information about the authors

Sekenova Aitgul, Master's student of the Department of Television and Control at Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility. Address: Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia. E-mail: aitowaas@mail.ru

Zarina M. Kenzhegulova, Postgraduate student of the Department of Television and Control at Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 14 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility.

Address: Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia.
E-mail: zarina.kenzhegulova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0984-5088>

Indira Y. Sagiyeva, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Docent of the Department of Television and Control at Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 59 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility.

Address: Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia.
E-mail: indira_sagiyeva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7119-0583>

Talgat R. Gazizov, Dr Sci. (Eng.) (2010), Head of the Department of Television and Control at Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 482 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility.

Address: Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia.
E-mail: talgat@tu.tusur.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>
