

УДК 621.371.32

**З.М. Кенжегулова, Р.С. Суоровцев, Р.Р. Хажибеков**

## Сравнение временных откликов асимметричного модального фильтра, полученных разными подходами

Представлены результаты сравнения временных откликов в конце асимметричного модального фильтра, полученных разными подходами. Для этого получены временные отклики аналитическим, квазистатическим и электродинамическим подходами, а также с помощью измерений. При сравнении с результатами квазистатического подхода выявлено практически полное совпадение откликов (в пределах 2%). Максимальное отклонение при сравнении с результатами электродинамического подхода составило 8% по амплитуде и 29% по задержке импульсов разложения. Сравнение результатов, полученных аналитически и с помощью измерений макета модального фильтра, позволило выявить отклонения по амплитуде 21% для первого и 8,7% для второго импульсов соответственно и 2,2 и 3,9% по их задержкам. Несмотря на выявленные различия, аналитический подход может применяться на ранних этапах проектирования для грубой предварительной оценки.

**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс, модальный фильтр, временной отклик, аналитическая модель, измерения.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-2-53-58

В связи с высокими темпами развития радиоэлектроники и систем связи становится все более актуальным решение задач электромагнитной совместимости (ЭМС), а именно обеспечения стабильного функционирования системы в условиях воздействия электромагнитных помех [1]. Это связано с ростом восприимчивости современных электронных схем к воздействию помех разной природы. И если защита от непреднамеренных помех, как правило, решается разработчиками на ранних этапах при проектировании устройств, то возможность подавления преднамеренных помеховых воздействий зачастую даже не рассматривается [2]. Поэтому особую важность приобретает задача защиты именно от преднамеренного электромагнитного воздействия (ЭМВ), случаи которого все чаще регистрируются во всем мире, а его целью является частичная или полная дестабилизация работы системы [3]. Основными их отличиями от непреднамеренных ЭМВ являются существенно более высокие граничные частоты и уровни сигналов. Поэтому проектирование устройств защиты от преднамеренных ЭМВ является актуальным.

Для защиты от преднамеренных ЭМВ наносекундного и субнаносекундного диапазонов предложены устройства, основанные на явлении модального разложения сигнала, – модальные фильтры (МФ) [4]. Принцип защиты заключается в ослаблении сигнала помехи за счет применения особых полосковых структур, позволяющих разложить такой сверхкороткий импульс (СКИ) на импульсы меньшей амплитуды за счет сильной электромагнитной связи между проводниками устройства и различия скоростей распространения мод (составляющих сигнала) в неоднородном диэлектрическом заполнении [4]. Специфика воздействия СКИ состоит в том, что наводки от него могут восприниматься в качестве полезных сигналов и приводить к ложным срабатываниям логических элементов, нарушая тем

самым целостность цифрового сигнала. Их широкий спектр и высокая амплитуда позволяют проникать им через защитные средства и приводить к выходу устройств из строя [5] даже по цепям питания [6].

Анализ МФ выполняется во временной области (анализ временного отклика на импульсное воздействие) с помощью численных методов, которые зачастую обладают большими вычислительными затратами как памяти, так и времени [7, 8]. Кроме того, стоимость лицензии на специализированное программное обеспечение для моделирования часто очень высока [9]. Поэтому применение таких программных продуктов, особенно на ранних этапах проектирования, не всегда целесообразно. Между тем в ряде частных случаев для анализа могут успешно применяться простые аналитические модели, не требующие столь существенных вычислительных затрат, но обеспечивающие приемлемую точность даже при ряде допущений. Примечательно, что на основе аналитического подхода для анализа наведенных сигналов на концах многопроводных линий передачи из [10] в аналитическом виде получены модели для вычисления временного отклика в асимметричных модальных фильтрах [11] и меандровых линиях [12]. Проверка и апробация моделей выполнены с помощью квазистатического подхода на основе метода моментов для вычисления матриц погонных параметров и модифицированного узлового метода для вычисления временного отклика [13]. Между тем сравнение временных откликов, полученных аналитически в результате полноволнового анализа и натурального эксперимента, ранее не проводилось. Цель данной работы – выполнить такое сравнение на примере вычисления временного отклика асимметричного МФ с лицевой связью.

### Исходные данные для моделирования

Для анализа выбрана структура полоскового МФ с лицевой связью со следующими параметрами

[14] поперечного сечения (рис. 1, а): относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\epsilon_r = 5$ , толщина подложки  $h = 790$  мкм, ширина проводников  $w = 5500$  мкм, толщина проводников  $t = 105$  мкм, расстояние между проводниками  $s = 2000$  мкм. Схема включения МФ приведена на рис. 1, б, где проводники: А – активный, П – пассивный, О – опорный. Длина МФ составляет  $l = 0,276$  м.

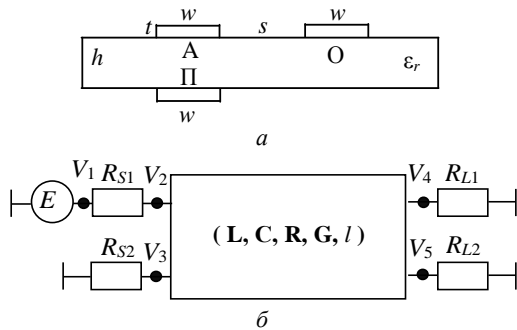


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема включения (б) МФ с лицевой связью

Матрицы погонных коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции структуры на рис. 1, а, вычисленные с помощью метода моментов [11], имеют следующий вид:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 347,075 & -330,688 \\ -330,706 & 346,762 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 570,551 & 500,879 \\ 500,879 & 576,082 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м.}$$

Аналитическая модель временного отклика в конце МФ с асимметричным поперечным сечением основана на методе модального разложения во временной области, который для пары связанных линий детально описан в [11]. Поэтому в целях экономии места здесь приведем только итоговый вид модели

$$V(t) = S_{v11} [(1 + \Gamma_{cc}) V_{0c}(t - T_c) + \Gamma_{cd} V_{0d}(t - T_d)] + S_{v12} [(1 + \Gamma_{dd}) V_{0d}(t - T_d) + \Gamma_{dc} V_{0c}(t - T_c)], \quad (1)$$

где  $S_{v11}$  и  $S_{v12}$  – элементы собственных векторов произведения матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ ;  $\Gamma_{cc}$ ,  $\Gamma_{Ldd}$ ,  $\Gamma_{Ldc}$ ,  $\Gamma_{Lcd}$  – элементы матрицы коэффициентов отражения на дальнем конце линии для синфазной и дифференциальной мод;  $T_c$  и  $T_d$  – задержки распространения синфазной и дифференциальной мод;  $V_{0c}$  и  $V_{0d}$  – модальные напряжения источников синфазной и дифференциальной мод.

### Результаты моделирования

Сначала выполнено сравнение временного отклика, вычисленного по модели (1) (далее – аналитический подход), с откликами, полученными в результате моделирования квазистатическим и электродинамическим подходами. Моделирование квазистатическим подходом основано на методе моментов для вычисления матриц погонных параметров МФ и модифицированном методе узловых потенциалов для вычисления отклика на воздействие [15]. Электродинамический подход основан на методе конечных разностей во временной области, когда в

каждой подобласти анализируемой структуры вычисляется распределение потенциала с помощью решения уравнений Максвелла с заменой дифференциальных уравнений их конечно-разностным эквивалентом. Отметим, что результаты электродинамического подхода, как правило, наиболее близки к реальной ситуации, поскольку учитывают распространение всех типов волн в структуре, отражение от неоднородностей, дисперсию и потери на излучение. Однако затраты на моделирование даже относительно простых конфигураций могут оказаться весьма велики. Поэтому точности аналитической модели (1) может быть достаточно для грубой оценки отклика на начальном этапе проектирования.

В работе [14] показано, что при включении начала и конца пассивного проводника МФ в режиме короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) можно добиться наибольшего ослабления СКИ. Поэтому, помимо случая подключения резисторов 50 Ом, пассивный проводник МФ также включался в режиме КЗ-ХХ. При моделировании амплитуда электродвижущей силы (ЭДС) источника составила 1 В, а длительности плоской вершины, фронта и спада импульса – по 50 пс. Моделирование выполнено без учета потерь. На рис. 2 показаны формы напряжений при  $R_{S2} = R_{L2} = 50$  Ом и  $R_{S2} = 1$  Ом (для имитации случая КЗ),  $R_{L2} = 1$  МОм (для имитации случая ХХ), вычисленные квазистатическим и электродинамическим подходами и по модели (1).

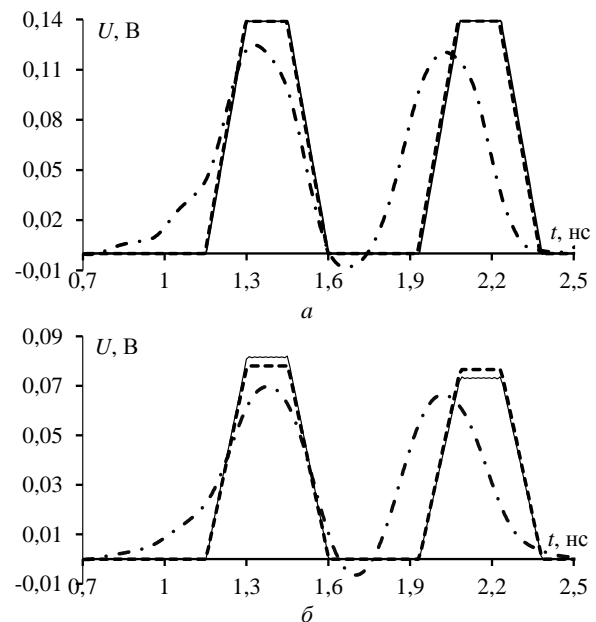


Рис. 2. Формы напряжений в конце МФ, вычисленные квазистатическим (—), электродинамическим (---) и аналитическим (-.-) подходами при  $R_{S2} = R_{L2} = 50$  Ом (а) и  $R_{S2} = \text{КЗ}$ ,  $R_{L2} = \text{ХХ}$  (б)

Как видно из рис. 2, результаты, полученные разными методами для двух рассмотренных случаев, хорошо согласуются качественно (в конце МФ наблюдаются 2 импульса мод линии), а отличие форм, вычисленных электродинамическим подходом, вызвано учетом высших типов волн. Наиболее

существенные количественные отличия наблюдаются по результатам моделирования электродинамическим подходом, что можно объяснить учетом потерь на излучение и частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика по характерному затягиванию фронта и спада импульсов. Также отметим, что для случая КЗ-XX на пассивном проводнике амплитуда первого импульса, вычисленная квазистатическим моделированием, выше, чем амплитуда, вычисленная аналитически, а для второго импульса – наоборот. Для удобства сравнения в табл. 1 сведены значения амплитуд импульсов ( $U$ ) разложения и задержек импульсов по уровню 0,5 от максимальной амплитуды ( $t$ ), полученные разными подходами. В табл. 1 также приве-

дены отклонения результатов, полученных разными методами, которые вычислены по выражению

$$\chi = \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $x_{1,2}$  – значения первой и второй сравниваемых величин.

Из табл. 1 видно, что для случая  $R_{S2} = R_{L2} = 50$  Ом максимальное отклонение между результатами аналитического, квазистатического и электродинамического подходов по амплитуде и по задержкам составило 8 и 29%, а для КЗ-XX – 8 и 20% соответственно, что можно полагать приемлемым. Необходимо отметить, что времена прихода импульсов к концу линии при аналитическом и квазистатическом подходах полностью совпадают.

Таблица 1

Амплитуды ( $U$ ), задержки импульсов ( $t$ ) на выходе МФ и их отклонения, полученные электродинамическим, квазистатическим и аналитическим подходами

Подход	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$t_1$ , нс	$t_2$ , нс
$R_{S2} = R_{L2} = 50$ Ом				
Электродинамический (1)	0,122	0,119	0,77	1,75
Квазистатический (2)	0,139	0,139	1,41	1,93
Аналитический (3)	0,139	0,139	1,41	1,93
$\chi$ , %	(1) и (2)– 6,5 (1) и (3)– 6,5 (2) и (3)– 0	(1) и (2)– 8 (1) и (3)– 8 (2) и (3)– 0	(1) и (2)– 29 (1) и (3)– 29 (2) и (3)– 0	(1) и (2)– 4,9 (1) и (3)– 4,9 (2) и (3)– 0
$R_{S2} = \text{КЗ}, R_{L2} = \text{XX}$				
Электродинамический (1)	0,069	0,065	0,77	1,78
Квазистатический (2)	0,081	0,073	1,15	1,93
Аналитический (3)	0,078	0,076	1,15	1,93
$\chi$ , %	(1) и (2)– 8 (1) и (3)– 6 (2) и (3)– 1,8	(1) и (2)– 5,8 (1) и (3)– 7,8 (2) и (3)– 2	(1) и (2)– 20 (1) и (3)– 20 (2) и (3)– 0	(1) и (2)– 4 (1) и (3)– 4 (2) и (3)– 0

### Результаты натурального эксперимента

Несмотря на выявленные отклонения результатов вычисления временного отклика в конце МФ от результатов электродинамического подхода, предлагаемые модели оказались достаточно точными для предварительной оценки. На следующем этапе уже важно сравнение результатов, полученных аналитически, с результатами натуральных измерений. Для этого изготовлен макет МФ (с параметрами, как для линии на рис. 1), вид которого показан на рис. 3 [12].

Для уменьшения габаритов макета проводники выполнены в форме меандра, малое число витков которого не должно существенно влиять на частотные и временные характеристики МФ. В качестве основы макета использован фольгированный стеклотекстолит, а габариты макета составили 105×45 мм. Измерения выполнены на базе комбинированного осциллографа С9-11 с измерительным трактом 50 Ом. Для включения макета МФ применялись коаксиальные переходники (HYR-1111, HYR-1112, ПК2-18-01P-03P, ПК2-18-11P-03P), которые могли внести искажения и дополнительную задержку. На рис. 4 показана форма воздействующего импульса, оцифрованного с экрана осциллографа и измеренного на согласованной нагрузке. Максимальная ампли-

туда сигнала составила 713 мВ при длительности 0,3 нс по уровню 0,5 от амплитуды ЭДС [12].

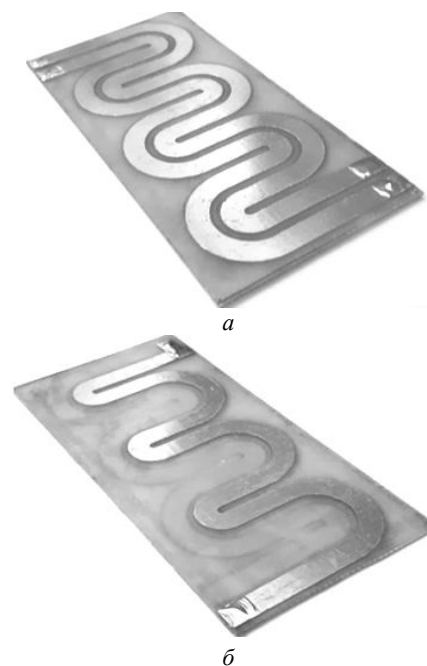


Рис. 3. Изготовленный макет: вид сверху (а) и снизу (б)

Отметим, что форма на рис. 4, но удвоенная по амплитуде использована в качестве ЭДС источника воздействия для аналитического вычисления временного отклика.

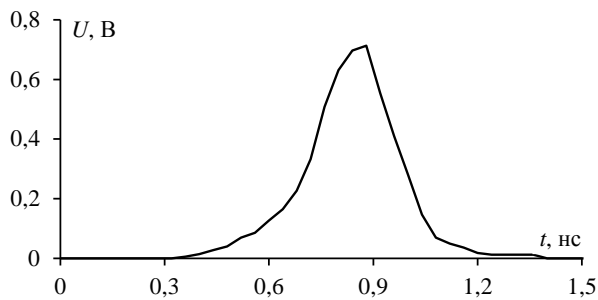


Рис. 4. Форма напряжения воздействующего импульса

На рис. 5 приведены результаты аналитического вычисления и измерения формы напряжения на выходе макета МФ. Видно, что результаты измерений и аналитического вычисления временного отклика макета МФ хорошо согласуются лишь качественно: для двух подходов на выходе макета наблюдаются два импульса разложения. Более раннее начало сигнала при измерениях объяснимо сильной боковой связью между проводниками. Также отметим, что при аналитическом вычислении отклика амплитуда первого импульса выше, чем второго, а при измерениях – наоборот. Максимальная амплитуда сигнала на выходе МФ в результате вычислений и измерений составила 0,118 и 0,125 В соответственно.

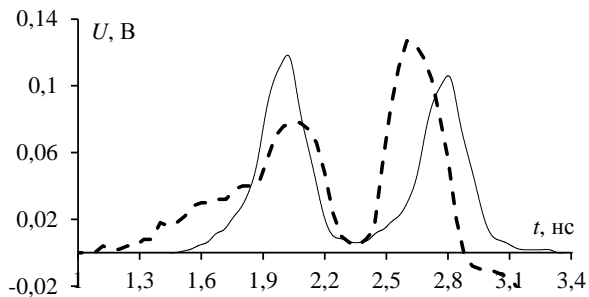


Рис. 5. Вычисленная аналитическим подходом (—) и измеренная (---) форма напряжения сигнала на выходе активного проводника МФ

Для наглядности в табл. 2 сведены амплитуды ( $U$ ) и задержки по уровню 0,5 от максимальной амплитуды ( $t$ ) импульсов разложения в конце МФ, полученные разными подходами, а также их отклонения, вычисленные по выражению (2).

Таблица 2  
Амплитуды ( $U$ ), задержки импульсов ( $t$ ) на выходе МФ и их отклонения, полученные в результате измерения и вычисления аналитическим подходом

Параметры	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$t_1$ , нс	$t_2$ , нс
Измерения	0,077	0,125	1,96	2,6
Модель (1)	0,118	0,105	2,05	2,81
$\chi$ , %	21	8,7	2,2	3,9

Из табл. 2 видно, что максимальное отклонение между результатами измерений и вычислений по

амплитуде первого и второго импульсов составило 21 и 8,7% соответственно, а по задержке – 2,2 и 3,9%. Таким образом, можно говорить, что точность аналитических моделей для вычисления временного отклика в конце асимметричного МФ можно считать приемлемой, как минимум, для предварительного вычисления отклика и оценки ослабления амплитуды СКИ.

### Заключение

Представлено сравнение временного отклика, вычисленного с помощью аналитических моделей, квазистатическим и электродинамическим подходами, на примере идеализированного воздействия в виде трапеции для двух режимов согласования пассивного проводника МФ с трактом. В результате выявлено практически полное совпадение результатов по амплитуде (в пределах 2%) и полное совпадение по задержке импульсов, вычисленных с помощью аналитических моделей и квазистатическим подходом. Максимальное отклонение при сравнении результатов, полученных с помощью моделей и электродинамическим подходом, по амплитуде и задержке составило 8 и 29% при окончаниях на концах пассивного проводника по 50 Ом и 8 и 20% для режима КЗ-ХХ. Различия результатов объясняются разными численными методами, использованными для анализа. Выполнено сравнение результатов измерений макета МФ и вычислений аналитическим методом с использованием оцифрованного с экрана осциллографа воздействия. Максимальное отклонение между результатами составило 21 и 8,7% по амплитуде первого и второго импульсов соответственно и 2,2 и 3,9% по их задержкам. В результате проделанной работы можно говорить о приемлемой точности аналитических моделей для вычисления временного отклика в конце асимметричного МФ, как минимум, для предварительного вычисления отклика и оценки ослабления амплитуды СКИ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 21-79-00161.

### Литература

1. Гурина Л.А. Электромагнитные помехи и методы защиты от них: учеб. пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006. – С. 3–4.
2. ГОСТ Р 56103–2014. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Организация и содержание работ по защите от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
3. Петкау О. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петкау, А. Тарабцев, А. Дерябин и др. // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – № 2 (6). – С. 74–76.
4. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболотский // Технологии ЭМС. – 2006. – № 4. – С. 40–44.
5. Gazizov T.R. New approach to EMC protection / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of the 18-th Int. Zurich Symp. on EMC. – Munich, 2007. – P. 273–276.

6. Здухов Л.Н. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Л.Н. Парфёнов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2(65). – С. 22–34.

7. Гизатуллин З.М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 5. – С. 546–550.

8. Ramahi O.M. Full-wave analysis of delay lines / O.M. Ramahi, B. Archambeault // Proc. of the 12-th Int. Zurich Symp. on EMC. – 2001. – P. 537–539.

9. Bhobe A.U. Meander delay line challenge problems: a comparison using FDTD, FEM and MoM / A.U. Bhobe, C. Lolloway, M. Picket-May // Proc. of the 12-th Int. Zurich Symp. on EMC. – 2001. – P. 805–810.

10. Su C., Ke H., Hubing T. Overview of electromagnetic modeling software / C. Su, H. Ke, T. Hubing // 25th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics. – 2009. – P. 736–741.

11. Park S.W. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain / S.W. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52. – P. 436–446.

12. Sagiyeva I.Y. Modal filters based on a microstrip line with overhead conductors grounded at both ends / I.Y. Sagiyeva, Z.M. Kenzhegulova, T.R. Gazizov, R.S. Surovtsev // 22nd International conference of young professionals in electron devices and materials, Altai (Russia). – 2021. – P. 176–179.

13. Кенжегулова З.М. Аналитические модели для вычисления временного отклика витка меандровой линии с асимметричным поперечным сечением / З.М. Кенжегулова, Р.С. Суровцев // Электронные средства и системы управления: матер. XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТУСУР, 2020. – С. 286–289.

14. Developing a modal filter prototype to protect spacecraft busbar against ultrashort pulses / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky, Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // Journal of physics: conference series. – 2019. – № 560. – P. 1–6.

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. – 2019. – Vol. 560, № 012110. – P. 1–7.

#### Кенжегулова Зарина Муратбековна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-896-31-02  
Эл. почта: zarina.kenzhegulova@mail.ru

#### Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-6609-0449  
Тел.: +7-913-858-16-12  
Эл. почта: surovtsvr@gmail.com

#### Хажибеков Роман Русланович

Инженер ООО «Русское электротехническое общество», группа компаний «НПК Морвязьавтоматика» Кибальчича ул., 26, г. Санкт-Петербург, Россия, 192174  
Тел.: +7-952-897-23-80  
Эл. почта: r300994@mail.ru

Kenzhegulova Z.M., Surovtsev R.S., Khazhibekov R.R.

#### Comparison of time responses of an asymmetric modal filter obtained in different ways

The results of comparing the time responses at the end of the asymmetric MF obtained by different approaches are presented. For this purpose, time responses were obtained by analytical, quasi-static and electrodynamic approaches, as well as by measurements. When compared with the results of the quasi-static approach, almost complete coincidence of responses was revealed (within 2%). The maximum deviation when compared with the results of the electrodynamic approach was 8% in amplitude and 29% in the delay of the decomposition pulses. A comparison of the results obtained analytically and using measurements of the MF layout revealed deviations in amplitude of 21% for the first and 8.7% for the second pulses, respectively, and 2.2 and 3.9% for their delays.

**Keywords:** measurements, ultrashort pulse, modal filter, time response, analytical model.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-2-53-58

#### References

1. Gurina L.A. *Elektromagnitnyye pomexi i metody zashchity ot nikh: Uchebnoye posobiye* [Electromagnetic interference and methods of protection against them: manual]. Blagoveshchensk, Amur State University, 2006, pp. 3–4 (in Russ.).

2. GOST R 56103–2014. *Automated systems in a protected design. Organization and content of work on protection from intentional force electromagnetic impacts*. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (in Russ.).

3. Petkau O., Tarabtsev A., Deryabin A. [Protection of objects of the fuel and energy complex from threats of electromagnetic impact]. *Safety of Objects of the Fuel and Energy Complex*, 2014, no. 2 (6), pp. 74–76 (in Russ.).

4. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Modal decomposition of a pulse in segments of coupling lines as a new principle of protection against short pulses. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2006, no. 4, pp. 40–44 (in Russ.).

5. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection // *Proceedings of the 18th International Zurich Symposium on EMC*, Munich, 2007, pp. 273–276.

6. Zdukhov L.N., Parfenov L.N., Tarasov O.A., Chepelev V.M. Three possible mechanisms for the occurrence of failures of electronic devices as a result of electromagnetic exposure. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 2, no. 65, pp. 22–34 (in Russ.).

7. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of noise immunity of computer equipment under electromagnetic influences on the power supply network. *Radio Engineering and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 546–550 (in Russ.).

8. Ramahi O. M., Archambo B. Full wave analysis of the delay lines. *Proceedings of EMC*, 2001, pp. 537–539.

9. Phobe A. U., Lalloway K., Picket-May M. Problems problem solving with strip lines: a comparison using FDTD, FEM, and MOM. *International EMC Symposium*, 2001, pp. 805–810.

10. Su C., Ke H., Hubing T. Overview of electromagnetic modeling software. *25th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics*, 2009, pp. 736–741.

11. Park S.V., Xiao F., Kami Yu. Analytical approach to the characterization of crosstalk of multi-wire transmission lines using the method of mode decomposition in the time domain, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 52, pp. 436–446.

12. Sagieva I.Yu., Kenzhegulova Z.M., Gazizov T.R., Surovtsev R.S. Modal filters based on a microstrip line with air conductors grounded at both ends. *International Conference of Young Specialists in the Field of Electronic Devices and Materials, Altai (Russia)*, 2021, pp.176–179.

13. Kenzhegulova Z.M., Surovtsev R.S. *Analiticheskiye modeli dlya vychisleniya vremennogo otklika vitka meandrovoy linii s asimmetrichnym poperechnym secheniyem* [Analytical models for the time response calculating of a turn of a meander line with asymmetric cross-section]. *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Electronic tools and control systems. *Proceedings of XVI the International Scientific-practical Conference*. Tomsk, V-Spectrum, 2020, pp. 286–289.

14. Khazhibekov R.R., Zabolotsky A.M., Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Gazizov T.R. Developing a modal filter prototype to protect spacecraft busbar against ultrashort pulses. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, № 560, pp. 1–6.

15. Kuksenko S.P. Preliminary results of a project of the University of TUSUR on designing the distribution network space vehicles: modeling EMC. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1–7.

**Zarina M. Kenzhegulova**

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-896-31-02  
Email: zarina.kenzhegulova@mail.ru

**Roman S. Surovtsev**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor, Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-6609-0449  
Phone: +7-913-858-16-12  
Email: surovtssevs@gmail.com

**Roman R. Khazhibekov**

Engineer of LLC «Russian Electrotechnical Society», group of companies «NPK Morsvyazavtomatika»  
26, Kibalchicha st., Saint-Petersburg, Russia, 192174  
Phone: +7-952-897-23-80  
Email: r300994@mail.ru