

Совершенствование анализа распространения импульсных сигналов в структурах из N каскадов связанных линий

Г.Ю. Ким, А.В. Носов, Р.С. Суровцев

Томский университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, kimgeoju@gmail.com

Аннотация — Представлены результаты совершенствования анализа распространения импульсных сигналов в связанных линиях передачи на примере многокаскадных структур на основе витка меандровой линии (МЛ). Для этого получены условия разложения сверхкороткого импульса (СКИ) в многокаскадных МЛ с произвольным поперечным сечением и количеством каскадов. Их апробация выполнена на примере структур с лицевой связью из 2, 3 и 4 витков, показавших ослабление амплитуды СКИ 9,3, 24,1 и 84,9 раза соответственно. Кратко описан математический аппарат и функционал программного модуля для анализа отклика таких структур. Представлена демонстрация работы модуля. Результаты работы позволят упростить и ускорить анализ многокаскадных структур на основе связанных линий.

Ключевые слова — анализ многокаскадных структур, программный модуль, виток меандровой линии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня невозможно представить существование какой-либо из сфер современного общества без применения в ней радиоэлектронных средств (РЭС). Тенденции развития РЭС таковы, что повышаются частоты и снижаются амплитуды используемых сигналов, а также уменьшаются габариты самих устройств. Вместе с этим повышаются требования к помехозащищенности РЭС из-за роста чувствительности их элементов к различным электромагнитным воздействиям (ЭМВ), как естественным (вторичные проявления грозового разряда), так и преднамеренным (электромагнитное оружие). Применение генераторов мощных ЭМВ с целью кратковременного или полного нарушения функционирования РЭС объектов инфраструктуры (например, энергетики) представляет опасность [1]. Об этом свидетельствуют уже зарегистрированные случаи таких действий [2]. Из-за высокой амплитуды и малого времени нарастания особую опасность представляют сверхширокополосные импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов [3]. Известны устройства и подходы к защите от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) [4–6]. Но они имеют свои недостатки, основными из которых являются малые мощность, быстродействие, а также ограниченный ресурс [4]. Конденсаторы в составе фильтров подвержены электрическому пробую: диэлектрик между обкладками теряет изолирующие свойства под действием сильного электрического поля и начинает проводить ток [5]. Реальные напряжения срабатывания традиционных устройств (трехэлектродные газовые разрядники, ме-

таллоксидные варисторы и TVS-диоды) часто выше заявленных и возрастают при уменьшении фронта воздействия [6]. Поэтому актуальны поиск и совершенствование подходов к защите, которые были бы лишены этих недостатков.

Широкое распространение получили исследования устройств на основе печатных структур для защиты от ЭМВ и фильтрации сигнала [7–12]. Отдельно выделим предложенный авторами данной статьи подход к защите РЭА, основанный на использовании модальных искажений для ослабления амплитуды СКИ за счет его разложения на последовательность импульсов и последующего выравнивания их амплитуд в меандровых линиях (МЛ) [13]. В самом простом случае (в одном витке МЛ) обеспечивается ослабление СКИ в 2,4 раза [14]. Между тем за счет каскадного соединения из нескольких витков ослабление можно увеличить. Например, в микрополосковой МЛ из 2 витков с оптимальным выбором параметров ослабление составит 5,2 раза, из 3 – 8,1 раза, из 4 – 19,9 раза, а из 5 – 33,1 раза [15]. Отметим, что введение асимметрии поперечного сечения позволяет дополнительно увеличить ослабление СКИ за счет распространения дополнительных импульсов разложения [16]. Тогда в многокаскадных асимметричных устройствах ослабление может быть существенным. Для этого нужны параметрическая оптимизация устройства и обеспечение условий разложения, причем их количество и сложность возрастают вместе с ростом количества каскадов, что затрудняет синтез оптимальных структур. Отметим, что для симметричных структур предложены универсальные условия разложения [15]. Но они не учитывают распространение дополнительных импульсов, а потому неприменимы для асимметричных структур.

Другая проблема заключается в сложности анализа асимметричных структур. Как правило, для этого применяют численные методы, наиболее известным и разработанным среди которых является метод моментов (МоМ) [17]. Он также зарекомендовал себя и при анализе меандровых линий [18–20]. Большая часть исследований авторского коллектива выполнена в собственном программном продукте TALGAT [21], где вычисление погонных параметров связанных линий основано на МоМ, а вычисление отклика структуры на модифицированном узловом методе [22]. Между тем, в системе TALGAT нет инструментов для автоматизированной обработки результатов вычисления компонентов отклика многокаскадных асимметричных структур,

но они нужны из-за необходимости анализа большого количества импульсов разложения с учетом влияния отражений на стыках каскадов, которые затрудняют его. Например, при увеличении числа каскадов определить максимум амплитуды конкретного импульса или его задержку на основе лишь отклика становится практически невозможно. Тогда для проверки условий разложения нужна ручная подстановка известных значений переменных, что становится весьма затратным при увеличении количества каскадов. Кроме того, при таком подходе возрастает вероятность ошибки. Для решения этой задачи необходимо создать программный модуль для обработки временного отклика и инструментарий для автоматизированного анализа структур на основе связанных линий с произвольным поперечным сечением и количеством каскадов. Поэтому цель данной работы – представить математический аппарат для разложения СКИ в многокаскадных асимметричных структурах и краткое описание функционала созданного программного модуля для анализа временного отклика асимметричных структур.

II. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ РАЗЛОЖЕНИЯ СКИ В МНОГОКАСКАДНЫХ МЛ С АСИММЕТРИЧНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Сначала приведем универсальные условия полного разложения СКИ в многокаскадных МЛ с симметричным поперечным сечением (например, в МПЛ), полученные ранее [15]:

$$2l_n \tau_{on} \geq \sum_{i=n+1}^N 2l_i \tau_{ei} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N, \quad (1)$$

$$2l_n \tau_{en} \geq 2l_n \tau_{on} + \sum_{i=n+1}^N 2l_i \tau_{ei} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N, \quad (2)$$

где l – длина полувитка МЛ, τ_e и τ_o – погонные задержки четной и нечетной мод витка, t_{Σ} – общая длительность СКИ, N – количество витков. Подставляя вместо n поочередно количества каскадов от 1 до N , получим условия полного разложения СКИ в линии с симметричным поперечным сечением витка, состоящей из N каскадов. Условия (1) и (2) получены эмпирически, в результате анализа условий, сначала сформулированных отдельно, для структуры из 1, 2 и 3 витков и выявленных на их основе закономерностей [15]: задержка четной моды каждого витка должна быть не меньше суммы задержек нечетных мод всех последующих витков и общей длительности СКИ; половина задержки нечетной моды каждого витка должна быть не меньше суммы половины задержки четной моды данного витка, нечетных мод всех последующих витков и общей длительности входного импульса. Апробация условий (1) и (2) выполнена на примере структур из 4 и 5 витков [15].

Основываясь на [15], сформулируем универсальные условия разложения СКИ в МЛ с лицевой связью:

$$l_n \tau_{on} \geq l_n \tau_{en} + \sum_{i=n+1}^N 2l_i \tau_{oi} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N, \quad (3)$$

$$l_n \tau_{on} \geq l_n \tau_{en} + \sum_{i=n+1}^N 2l_i \tau_{oi} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N. \quad (4)$$

Отметим, что условия (3) и (4) применимы лишь для структур, для которых характерно, что скорость распространения четной моды больше чем нечетной (например, рассматриваемой далее МЛ с лицевой связью). Однако на практике, могут быть и обратные ситуации для асимметричных структур, тогда следует переписать (3) и (4) в виде

$$2l_n \tau_{1n} \geq \sum_{i=n+1}^N 2l_i \tau_{2i} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N, \quad (5)$$

$$l_n \tau_{2n} \geq l_n \tau_{1n} + \sum_{i=n+1}^N 2l_i \tau_{2i} + t_{\Sigma}, \quad n=1, \dots, N, \quad (6)$$

где τ_1 и τ_2 – погонные задержки быстрой и медленной мод.

Проверка полученных условий выполнена в системе TALGAT [20]. Для анализа выбраны МЛ с лицевой связью из 2 и 3 витков. Их поперечные сечения одинаковы и представлены на рис. 1, где w – ширина проводников, t – толщина проводников, s – расстояние между проводниками, h – толщина подложки, ϵ_r – ее относительная диэлектрическая проницаемость. Схемы соединений линий представлены на рис. 2, где l_i – длина i -го полувитка. В качестве воздействия выбран импульс в форме трапеции, с э.д.с. $E=1$ В, длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс. Внутреннее сопротивление генератора $R1$ и сопротивление нагрузки $R2$ приняты по 50 Ом.

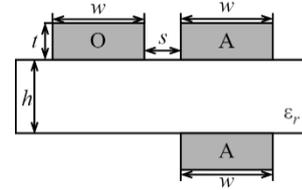


Рис. 1. Поперечное сечение витка МЛ с лицевой связью

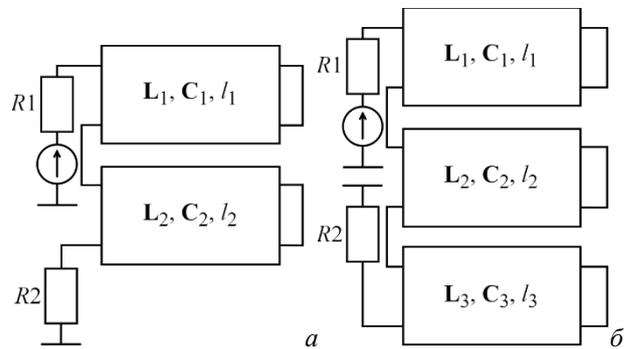


Рис. 2. Схема соединений МЛ с лицевой связью из 2 (а) и 3 (б) витков, соединенных каскадно

Параметры поперечных сечений, одинаковые для линий из 2 и 3 витков, и их l_i получены с помощью эвристического поиска по критерию одновременного выполнения условий (3) и (4) и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры поперечных сечений
и длин витков с лицевой связью

№ витка	l , мм	w , мкм	t , мкм	s , мкм	h , мкм	ϵ_r
1	80	8447	4846	2482	9118	10,6
2	640					
3	5120					

Вычисленные матрицы погонных коэффициентов электростатической (\mathbf{C}) и электромагнитной (\mathbf{L}) индукции одинаковы для всех витков:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 195,21 & -110,23 \\ -110,23 & 162,10 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 288,52 & 170,83 \\ 170,83 & 535,92 \end{bmatrix} \text{ нГн/м.}$$

Вычисленные погонные задержки, одинаковые для каждого витка: $\tau_o=8,44$ нс/м, $\tau_e=5,86$ нс/м. При подстановке значений параметров в условия (3) и (4) они выполняются с запасом. Формы сигнала на выходе МЛ из 2 и 3 витков с лицевой связью показаны на рис. 3.

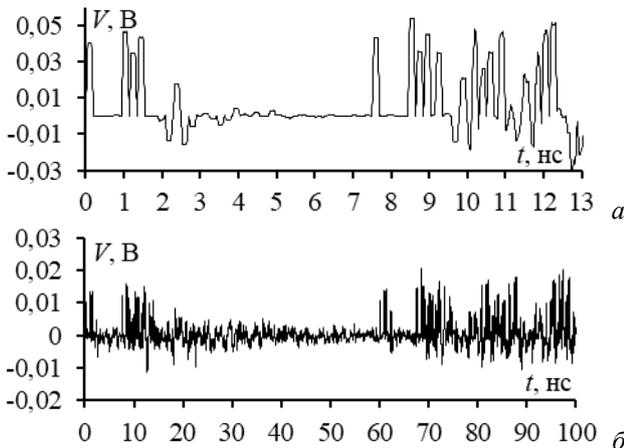


Рис. 3. Форма сигнала на выходе МЛ с лицевой связью из 2 (а) и 3 (б) витков, соединенных каскадно

Из рис. 3 видно, что СКИ на выходе МЛ с лицевой связью представлен последовательностью из множества импульсов меньшей амплитуды. Так, в МЛ с лицевой связью из 2 витков количество основных импульсов разложения составило 16, а ослабление СКИ 9,3 раза (здесь и далее, относительно $E/2$), а из 3 – 64 и 24,1 раза соответственно.

III. ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ

Для анализа защитных МЛ и структур на основе связанных линий во временной области

При анализе различных конфигураций устройств защиты от СКИ, основанных на каскадном соединении нескольких витков, необходим непрерывный анализ значений задержек и амплитуд импульсов на выходе устройства. Эта задача трудоемкая и занимает много времени при ручном расчете, но ее можно автоматизировать. В системе TALGAT есть инструменты экспорта погонных параметров структур в текстовый файл.

Это дает возможность составить алгоритм вычисления задержек импульсов на выходе каждого каскада на основе универсальных условий (5) и (6) и вычисленных вторичных параметров структур (погонных задержек). На основе вычисленных задержек и длительности входного воздействия легко определить временной диапазон каждого из импульсов разложения, что дает возможность найти его максимальную амплитуду и задержку на основе отклика и позволяет выделить их на отклике графически.

Для полного разложения СКИ на выходе многослойных структур нужно, чтобы все импульсы разложения в каждом последующем каскаде пришли к его концу не ранее импульсов разложения из предыдущего витка. Таким образом, нужно обеспечить задержку каждого последующего импульса разложения больше задержки предыдущего на значение общей длительности СКИ. Для определения задержек всех импульсов разложения введем T_i – множества, состоящие из произведений погонных задержек перекрестной наводки, четной моды, дополнительного импульса и нечетной моды на удвоенную длину n -го витка. Это значит, что задержки импульсов разложения на выходе, можно определить как суммы элементов кортежей, полученных в результате декартового произведения семейства множеств $\{T_1, \dots, T_m\}$:

$$P_i = \left\{ \sum_{j=1}^m c_j \mid c_j \in C_i, i \in \{1, \dots, N\} \right\},$$

где

$$C_j \in T_j \times \dots \times T_m,$$

где P_i – задержка i -го импульса разложения, c_j – элементы кортежа C , C – кортеж, полученный при декартовом произведении множеств задержек импульсов T_i . Отсортировав множество P по возрастанию значений, получим множество задержек импульсов разложения P_s для любой структуры из N витков.

Далее, используя полученные значения задержек, взятые из TALGAT, выбирается точка, имеющая абсциссу равную значению задержки импульса, и точка с абсциссой большей на длительность входного импульсного воздействия. Так на графике «отсекается» область, в которой находится конкретный импульс разложения. Далее в данных областях выбирается максимальное по модулю значение ординаты – искомая максимальная амплитуда импульса. Отметим, что импульсы на выходе линии могут накладываться друг на друга, что может привести к росту амплитуды. Для учета этого в модуль добавлена проверка наложения временных диапазонов импульсов разложения. В случае наложения они выделяются.

Для программной реализации использовался язык программирования Python, поскольку его стандартные библиотеки включают все необходимые для разрабатываемого модуля функции, а алгоритм, написанный на нём, может быть интегрирован в систему TALGAT. Для работы в программном модуле, сначала в него

импортируется текстовый файл, содержащий данные для построения временного отклика на выходе структуры. Далее импортируются ее параметры: погонные задержки импульсов мод витка, его длина, а также указывается наличие перекрестной наводки на ближнем конце (для многокаскадных структур на основе МЛ). Импорт этих данных может быть автоматизирован и производиться прямо из системы TALGAT.

На рис. 4 изображено главное окно модуля. Область 1 содержит кнопки для выбора текстовых документов с данными для построения отклика и элементы для задания параметров одного или более каскадов. Область 2 содержит консоль для уведомлений о загрузке текстовых файлов, уведомлений о добавлении или удалении каскадов, их параметры, значения задержек основных импульсов разложения, амплитуды каждого из них, амплитуда на выходе линии. Область 3 предназначена для ввода длительности импульсного воздействия, а также расчета задержек импульсов и вывода отклика в область 4. Также в области 3 содержатся кнопки для включения и выключения линий, отображающих начало и конец импульсов разложения, а также переключатель, отвечающий за включение отображения дополнительных импульсов в асимметричных структурах. Область 4 нужна для демонстрации временного отклика, на котором отображается положение каждого импульса разложения на временной оси, отображаются состояние наложения импульсов друг на друга (линии зеленым цветом – основные импульсы не накладываются друг на друга, а красным – накладываются) и максимальная амплитуда каждого импульса разложения. Также область 4 содержит инструменты масштабирования, перемещения и сохранения отклика. Реализованные инструменты значительно упрощают анализ и понимание модальных искажений в многокаскадной структуре. Модуль позволяет выполнять анализ во временной области структур не только на основе МЛ, но и простых связанных линий и модальных фильтров, в том числе, соединенных каскадно.

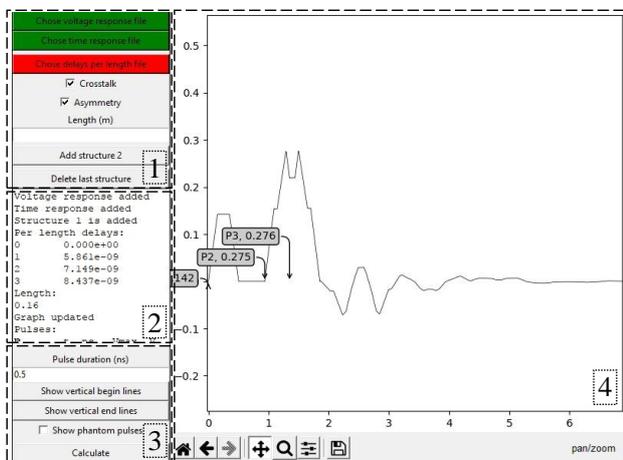


Рис. 4. Вид окна разработанного модуля

Выполнена проверка работоспособности модуля на примере МЛ с лицевой связью из 4 витков. Поперечное сечение каждого витка такое же, как на рис. 1. Па-

раметры поперечного сечения всех витков одинаковы (табл. 1), а длины $l_1 = 40960$ мм, $l_2 = 5120$ мм, $l_3 = 640$ мм, $l_4 = 80$ мм. Тогда значения τ_o и τ_e каждого витка такой МЛ такие же, как у МЛ из 2 и 3 витков. Форма сигнала на выходе МЛ из 4 витков показана на рис. 5.

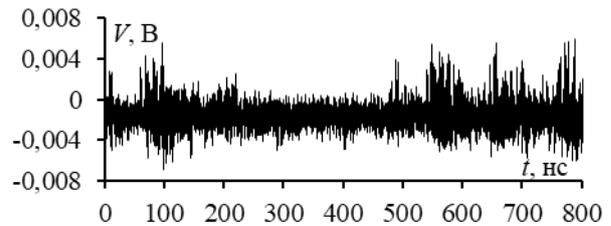


Рис. 5. Форма сигнала на выходе МЛ с лицевой связью из 4 витков, соединенных каскадно

Видно, что СКИ на выходе исследуемой структуры представлен множеством импульсов (среди них 256 основных), а их амплитуда не превышает 0,006 В. Также отклик содержит импульсы, вызванные отражениями от стыков между полувитками, витками и окончаниями. Ослабление составило 84,9 раза. Для проверки выполнения условий полного разложения СКИ в такой МЛ её параметры загружены в программный модуль. Полученные с помощью модуля результаты визуализации показаны на рис. 6.

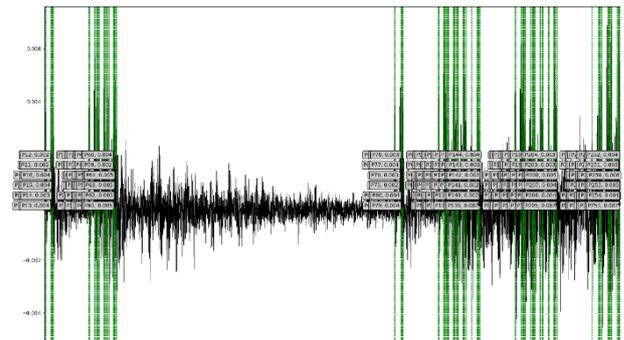


Рис. 6. Визуализация автоматизированного анализа формы сигнала на выходе МЛ с лицевой связью из 4 витков, соединенных каскадно

Видно, что все вертикальные линии, указывающие на начало и конец импульсов разложения, зеленого цвета. Это означает, что в структуре обеспечено полное разложение СКИ на ее выходе. При наложении импульсов, вместо зеленых линий отображаются красные, как показано на рис. 7.

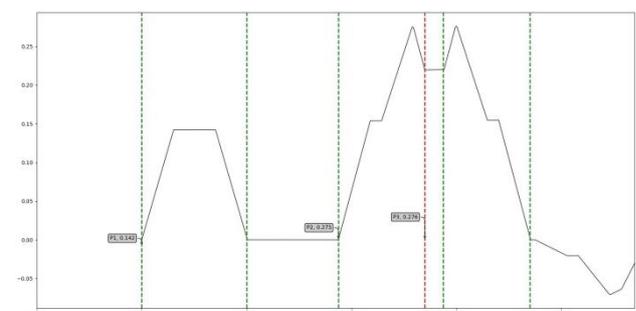


Рис. 7. Индикация наложения импульсов разложения в окне визуализации программного модуля

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы универсальные условия полного разложения СКИ в многокаскадных МЛ с произвольным, в том числе асимметричным, поперечным сечением, из произвольного количества каскадов. Апробация условий выполнена на нескольких примерах многокаскадных структур с лицевым типом связи. В МЛ из 2 витков количество основных импульсов разложения составило 16, а ослабление СКИ 9,3 раза, из 3 витков – 64 и 24,1 раза соответственно, из 4 витков – 256 и 84,9 раза соответственно. Кратко представлены математический аппарат (в который вошли условия) и функциональные возможности нового программного модуля системы TALGAT, предназначенного для удобства анализа отклика многокаскадных структур. Представлена демонстрация работы модуля на примере структуры из 4 витков с лицевой связью. Представленные результаты позволяют существенно упростить и ускорить анализ многокаскадных структур на основе МЛ, модальных фильтров или простых связанных линий. Продолжением данной работы является совершенствование разработанного модуля.

ПОДДЕРЖКА

Разработка математического аппарата поддержана грантом РФФ №21-79-00161 в ТУСУРе, а программно-модуля – проектом FEWM-2022-0001 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фоминич Э.Н., Владимиров Д.Р. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем. Военный инженер. 2016. № 2 (2). С. 10–17.
- [2] Петкау О., Тарабцев А., Дерябин А., Ларионов С., Чванов В. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия. Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. 2014. № 2 (6). С. 74–76.
- [3] Mojert C. et al. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. Proc. of the 14th Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich, Switzerland. 2001. 20–22. P. 47–52.
- [4] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. № 5. P. 546–550.
- [5] Колдунов А.С. Радиоловительская азбука. Аналоговые устройства. М: СОЛОН–Пресс. том 2. 2009. 288 с.
- [6] Messier M.A., et al. Response of telecom protection to three IEC waveforms. Proc. of the 15th Int. Zurich Symp. on EMC, Zurich, Switzerland, Feb. 18–20, 2003. P. 127–132.
- [7] Krzikalla R., Luiken J., L. ter Haseborg J. Systematic description of the protection capability of protection elements. in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC. Honolulu. HI. USA. 2007. P. 1–4.
- [8] Krzikalla R., Weber T., L. ter Haseborg J. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses. in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC. Istanbul, Turkey. 2003. P. 1313–1316.
- [9] Krzikalla R., L. ter Haseborg J. SPICE simulations of uwb pulse stressed protection elements against transient interferences. in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC. USA. Chicago. IL. 2005. P. 977–981.
- [10] Weber T., Krzikalla R., L. ter Haseborg J. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses. IEEE Trans. on EMC. 2004. V. 36. № 3. P. 423–430.
- [11] Cui Q., Dong S., Han Y. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection. in IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC). Bangkok. Thailand. 2012. P. 3–5.
- [12] Медведев А.В., Газизов Т.Р. Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием после отказов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 4. С. 59–66. doi:10.31114/2078-7707-2021-4-59-66
- [13] Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. V.59. №6. P. 1864–1871.
- [14] Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. June 29 – July 3, 2015. P. 175–177
- [15] Kim G.Y. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines / G.Y. Kim, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.T. Gazizov, A.E. Maximov // Journal of Physics: Conference Series 2020. V. 1679. P. 1–6.
- [16] Belousov, A.O.; Chernikova, E.B.; Samoylichenko, M.A.; Medvedev, A.V.; Nosov, A.V.; Gazizov, T.R.; Zabolotsky, A.M. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration. Symmetry 2020, V. 12, P. 1117.
- [17] Singer H. The method of moments (MOM) and related codes. Supplement to Proc. of the 13- th Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich, Switzerland, 1999. P. 11–19
- [18] Носов А.В., Сердюк Е.А. Методы и подходы к моделированию меандровых линий задержки. Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018» Томск, Россия, 16–18 мая 2018. В. 2. С. 144–147.
- [19] Rubin B.J. Singh B. Study of meander line delay in circuit boards. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2000, V. 48, P. 1452–1460
- [20] Bhoje A.U. et al. Meander delay line challenge problems: a comparison using FDTD, FEM and MoM. Int. Symposium on EMC, 2001, P. 805–810
- [21] 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, V. 560, P. 1–7
- [22] Griffith J.R. Nakhla M.S. Time-domain analysis of lossy coupled transmission lines. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1990, V. 38, № 10, P. 1480–1487

Improving the Analysis of the Propagation of Impulse Signals in Structures of N Cascades of Coupled Lines

G.Y. Kim, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, kimgeju@gmail.com

Abstract — The results of improving the analysis of the propagation of impulse signals in coupled transmission lines are presented using the example of multi-cascade structures based on a meander line (ML) turn. For complete decomposition of the ultrashort pulse (USP) at the output of multicascade structures, it is necessary that all decomposition pulses in each subsequent cascade come to its end not earlier than the decomposition pulses from the previous turn. Thus, it is necessary to ensure that the delay of each subsequent decomposition pulse is greater than the delay of the previous one by the value of the total duration of the USP. The universal conditions for the complete decomposition of USPs in multicascade MLs with an arbitrary, including asymmetric, cross section from an arbitrary number of cascades are formulated. Approximation of the conditions was carried out on several examples of multi-cascade structures with broadside coupling. In the ML of 2 turns, the number of main decomposition impulses was 16, and the attenuation of the USP was 9.3 times, of 3 turns - 64 and 24.1 times, respectively, of 4 turns - 256 and 84.9 times, respectively. The mathematical apparatus (which includes conditions) and the functionality of the new software module of the TALGAT system, designed for the convenience of analyzing the response of multistage structures, are briefly presented. A demonstration of the operation of the module is presented on the example of a structure of 4 turns with a broadside coupling. The presented results make it possible to significantly simplify and speed up the analysis of multicascade structures based on ML, modal filters, or simple coupled lines.

Keywords — analysis of multicascade structures, software module, meander line turn.

REFERENCES

- [1] Fominich E.N., Vladimirov D.R. Elektromagnitnyj terrorizm. Novaya ugroza dlya informacionno-upravlyayushchih sistem (Electromagnetic terrorism. A new threat to information management systems). Voennyj inzhener. 2016. № 2 (2). S. 10–17.
- [2] Petkau O., Tarabcev A., Deryabin A., Larionov S., CHvanov V. Zashchita ob"ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa ot ugroz elektromagnitnogo vozdejstviya (Protection of fuel and energy facilities from electromagnetic threats). Bezopasnost' ob"ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa. 2014. № 2 (6). S. 74–76.
- [3] Mojert C. et al. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. Proc. of the 14th Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich, Switzerland. 2001. 20–22. P. 47–52.
- [4] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. № 5. P. 546–550.
- [5] Koldunov A.C. Radiolyubitel'skaya azbuka. Analogovye ustrojstva (Radio amateur alphabet. Analog Devices). M: SOLON–Press. tom 2. 2009. 288 s.
- [6] Messier M.A., et al. Response of telecom protection to three IEC waveforms. Proc. of the 15th Int. Zurich Symp. on EMC, Zurich, Switzerland, Feb. 18–20, 2003. P. 127–132.
- [7] Krzikalla R., Luiken J., L. ter Haseborg J. Systematic description of the protection capability of protection elements. in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC. Honolulu. HI. USA. 2007. P. 1–4.
- [8] Krzikalla R., Weber T., L. ter Haseborg J. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses. in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC. Istanbul, Turkey. 2003. P. 1313–1316.
- [9] Krzikalla R., L. ter Haseborg J. SPICE simulations of uwb pulse stressed protection elements against transient interferences. in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC. USA. Chicago. IL. 2005. P. 977–981.
- [10] Weber T., Krzikalla R., L. ter Haseborg J. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses. IEEE Trans. on EMC. 2004. V. 36. № 3. P. 423–430.
- [11] Cui Q., Dong S., Han Y. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection. in IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC). Bangkok. Thailand. 2012. P. 3–5.
- [12] Medvedev A.V., Gazizov T.R. Algorithm for analysis of structures with triple modal reservation after failures // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 4. P. 59-66. doi:10.31114/2078-7707-2021-4-59-66
- [13] Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. V.59. №6. P. 1864–1871.
- [14] Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. June 29 – July 3, 2015. P. 175–177
- [15] Kim G.Y. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines / G.Y. Kim, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.T. Gazizov, A.E. Maximov // Journal of Physics: Conference Series 2020. V. 1679. P. 1–6.
- [16] Belousov, A.O.; Chernikova, E.B.; Samoylichenko, M.A.; Medvedev, A.V.; Nosov, A.V.; Gazizov, T.R.; Zabolotsky, A.M. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration. Symmetry 2020, V. 12, P. 1117.
- [17] Singer H. The method of moments (MOM) and related codes. Supplement to Proc. of the 13- th Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich, Switzerland, 1999. P. 11–19

- [18] Nosov A.V., Serdyuk E.A. Metody i podhody k modelirovaniyu meandrovyyh linij zaderzhki (Methods and approaches to modeling meander delay lines). Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Nauchnaya sessiya TUSUR-2018» Tomsk, Rossiya, 16–18 maya 2018. V. 2. S. 144–147
- [19] Rubin B.J. Singh B. Study of meander line delay in circuit boards. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2000, V. 48, P. 1452–1460
- [20] Bhoje A.U. et al. Meander delay line challenge problems: a comparison using FDTD, FEM and MoM. *Int. Symposium on EMC*, 2001, P. 805–810
- [21] 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, V. 560, P. 1–7
- [22] Griffith J.R. Nakhla M.S. Time-domain analysis of lossy coupled transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1990, V. 38, № 10, P. 1480–1487 direct conversion signals receivers in wireless mobile communications systems) / *Sb. trudov «Metody i sistemy obrabotki informacii»*. CH. 2. M.: Goryachaya liniya – Telekom. 2004. S. 34–39.