

Международная академия наук высшей школы
Академия наук высшей школы Российской Федерации
Сибирская академия наук высшей школы
Бурятский, Красноярский, Кузбасский, Новосибирский,
Омский, Томский научные центры САН ВШ
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-27-2021)

27-я международная
научно-практическая конференция

16 ноября 2021 г.
г. Томск, Россия

ДОКЛАДЫ
(материалы конференции)

Томск
Издательство ТУСУРа
2021

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Р. С. СУРОВЦЕВ, канд. техн. наук, доцент каф. ТУ,
ТУСУР, Томск

ПОЛОСКОВЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ МЕАНДРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ КОНДУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ: ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кратко представлены результаты комплексного исследования полосковых устройств на основе меандра для защиты радиоэлектронных средств от электромагнитных воздействий. Рассмотрены перспективы исследований данного направления.

Современные тенденции развития микроэлектроники обуславливают рост чувствительности радиоэлектронных средств (РЭС) к кондуктивным электромагнитным воздействиям сверхкороткой длительности. Специфика результата воздействия сверхкороткого импульса (СКИ) заключается в том, что наводки от него могут восприниматься в качестве полезных сигналов, нарушая цифровой обмен, а при более высокой амплитуде проникать через традиционные средства защиты и выводить из строя РЭС [1] даже по цепям питания [2]. Поэтому разработка подходов и устройств защиты от таких воздействий не теряет своей актуальности.

Сотрудники кафедры телевидения и управления ТУСУРа около 20 лет занимаются решением задачи защиты РЭС от СКИ. Одним из способов такой защиты является использование модальных искажений (из-за различия скоростей распространения мод сигнала) для разложения СКИ на последовательность импульсов (2 импульса мод в случае двухпроводной линии) в полосковых линиях передачи, что позволяет уменьшить амплитуду СКИ в 2 раза и более [3]. Другим подходом на основе модальных искажений сигнала является разложение СКИ на последовательность уже из 3 основных импульсов (наведенного из-за перекрестной связи и 2 импульсов мод) в полосковых линиях задержки в виде меандра [4]. Между тем второй подход имеет ряд преимуществ по сравнению с первым, основным из которых

является в два раза меньшая длина устройства для разложения СКИ той же длительности. Поэтому его развитие актуально. Однако за 7 лет его исследований накопилось много результатов, которые целесообразно осмыслить и систематизировать для более плодотворного их продвижения. Целью настоящей работы является систематизация результатов исследований данного подхода и обсуждение перспектив дальнейших исследований.

Исследование защитных меандровых линий началось с обнаруженной возможности исключить влияние наведенного сигнала на основной импульс за счет выбора оптимальной длины витка меандра [5]. Затем было показано, что в витке с воздушным диэлектрическим заполнением, когда скорости распространения мод равны, возможно выравнивание амплитуд 2 импульсов (наводки и основного сигнала) на выходе линии за счет сильной связи между проводниками [6]. После этого в витке микрополосковой линии показана такая же возможность для 3 импульсов (наводки и импульсов мод линии) [7]. Ослабление амплитуды СКИ составило 1,62 и 2,41 раза для воздушной и микрополосковой линий соответственно. Для каждой из линий определены простые условия, выполнение которых обеспечивает разложение СКИ на последовательность импульсов с указанным ослаблением.

При дальнейших исследованиях выполнен анализ влияния потерь: сначала в проводниках витка воздушной линии [8], затем в проводниках и диэлектрике витка микрополосковой линии [9]. В результате выявлено, что потери позволяют обеспечить оптимальную связь между проводниками при большем значении разности между ними и это может упростить практическую реализацию таких устройств. По итогам исследований представлены результаты комплексного (численного и экспериментального) анализа во временной и частотной областях витка меандровой микрополосковой линии [4]. Экспериментально доказана возможность защиты РЭС от СКИ за счет использования модальных искажений сигнала в полосковых устройствах в форме меандра. Указанный комплекс исследований позволил победить в конкурсе грантов РФФИ. Целью проекта являлось комплексное исследование возможности разработки новой технологии защиты РЭС от СКИ на основе использования меандровых линий [10].

Дальнейшие исследования велись по ряду направлений, каждое из которых кратко представлено ниже.

Поскольку на начальном этапе все исследования выполнялись для симметричных линий (воздушной и микрополосковой), то продолжением стали аналогичные исследования, но уже для линий с асимметричным поперечным сечением [11–13], где также теоретически и экспериментально доказана возможность защиты. Другим направлением стало исследование возможности применения устройств на основе модального разложения для защиты от электростатического разряда (ЭСР) [14, 15]. Поскольку длительность ЭСР (около 100 пс) существенно больше рассматривавшихся ранее СКИ, то предложено разложение только его пикового выброса длительностью 4 нс. Также ведутся работы по увеличению количества (а значит, уменьшению амплитуды) импульсов разложения сразу в нескольких направлениях: в витке меандра с дополнительными пассивными проводниками [16], в нескольких витках, соединенных каскадно [17], и в гибридных устройствах на основе витка меандра и модального фильтра [18]. В рамках каждого из направлений получены универсальные условия, которые позволяют разложить СКИ на последовательность без наложения импульсов друг на друга для минимизации общей амплитуды на выходе устройства.

Отдельного внимания заслуживает разработка теоретических основ для анализа и синтеза устройств. В рамках данного направления ведется работа по созданию аналитических моделей для вычисления временного отклика без затратного моделирования и многовариантного анализа численными методами при оптимизации устройств защиты. В их основе лежат широко известные модели, предложенные для связанных линий [19, 20], и модели, учитывающие заданное число отражений [21]. Так, получены аналитические выражения для оценки амплитуды и формы импульсного сигнала в витке меандровой линии на основе моделей из [19, 20], а после выполнено сравнение найденных по моделям форм и амплитуд составляющих выходного сигнала с результатами моделирования [22]. На основе моделей из [21] получены аналитические модели для вычисления временного отклика на воздействие напряжения произвольной формы в витке меандровой линии [23]. Определены условия для выравнивания амплитуд составляющих временного отклика в трех вариантах

витка меандра [24]. Условия подтверждены численным моделированием на основе метода моментов и модифицированного узлового метода. Данное направление особенно важно для практики, так как полученные условия можно использовать в качестве критерия целевой функции при оптимизации.

Существенная часть материалов описанных исследований использована в кандидатских диссертациях Суровцева Р.С. и Носова А.В., а также в бакалаврских работах и магистерских диссертациях их учеников. Также в результате цикла исследований запатентовано большое число устройств на основе данного подхода (16 патентов на изобретения), что свидетельствует о его высокой технической новизне.

Одним из наиболее перспективных направлений дальнейших исследований видится детальное изучение структур с асимметричным поперечным сечением, поскольку из-за асимметрии в отклике таких структур появляются дополнительные импульсы разложения, что позволяет еще более ослабить СКИ на выходе устройства. Имеющийся задел, а также актуальность исследования асимметричных структур позволили победить в конкурсе грантов РФФИ. Проект РФФИ № 21-79-00161 направлен на разработку математического аппарата для анализа и синтеза асимметричных структур. Его результатом будет комплекс математических моделей: для аналитического вычисления отклика, расчета времени прихода импульсов разложения, вычисления излучаемых эмиссий. На основе моделей будет разработан комплекс алгоритмов и программ для анализа и синтеза асимметричных структур. Апробация моделей позволит выявить новые закономерности поведения временных характеристик, а их анализ – определить условия выравнивания амплитуд и новые временные соотношения, обеспечивающие разнос импульсов в отклике асимметричных структур. В результате исследований будет разработан ряд методик синтеза устройств на основе асимметричных структур, изготовлены макеты таких структур и проведена апробация полученных ранее результатов с помощью измерений. В завершение комплекса исследований предполагается проработка вопросов практической реализации защиты на основе разных структурных уровней РЭС и с применением разных технологий.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 21-79-00161.

ЛИТЕРАТУРА

1. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Л.Н. Парфёнов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии ЭМС. 2018. № 2(65). С. 22–34.
2. Гизатуллин, З.М., Гизатуллин, Р.М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания // Радиотехника и электроника. 2016. № 5(61). С. 500–505.
3. Газизов, Т.Р., Заболоцкий, А.М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 4. С. 40–44.
4. Possibility of Protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions in Electromagnetic Compatibility. 2017. N 6(59). P. 1864–1871.
5. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 4(34). С. 34–38.
6. Surovtsev, R.S., Gazizov, T.R., Zabolotsky, A.M. Pulse Decomposition in the turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russian Federation. 2015. P. 1–6.
7. 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. Erlagol. 2015. P. 175–177.
8. Носов, А.В., Суровцев, Р.С. Оценка влияния потерь на разложение сверхкороткого импульса в витке воздушной меандровой линии // Материалы докладов Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2015. Ч. 2. С. 47–52.
9. Surovtsev, R.S., Nosov, A.V., Gazizov, T.T. Influence of losses on ultrashort pulse decomposition in a turn of meander microstrip line // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Erlagol. 2016. P. 151–154.
10. Суровцев, Р.С. Исследования возможности разработки новой технологии защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхко-

ротких импульсов на основе простых печатных структур / 25-я Международная науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-25-2019)». Томск, 2019. С. 36–40.

11. Gazizov, A. T., Zabolotsky, A. M., Gazizov, T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016. N 4(58). P. 1136–1142.

12. Nosov, A. V., Surovtsev, R. S. Study of protective meander line turn with broad-side coupling // 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Novosibirsk, 2017. P. 459–462.

13. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью / А.В. Носов, Р.С. Суровцев, А.М. Заболотский, Т.Т. Газизов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. № 3(19). С. 47–50.

14. Nosov, A. V., Surovtsev, R. S., Gazizov, T. R. Investigation of the possibility of protection against electrostatic discharge by using meander microstrip line // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1015. P. 1–6.

15. Surovtsev, R. S., Nosov, A. V., Gazizov, T. R. Using a turn of a meander microstrip line for ESD protection // *Electrica*. 2021. P. 1–9. DOI: 10.5152/electr.2021.21062.

16. Nosov, A. V., Surovtsev, R. S. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1862. P. 1–6.

17. 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. Vol. 1679. P. 1–6.

18. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition / A. V. Nosov, A. O. Belousov, R. S. Surovtsev, T. R. Gazizov // *Journal of physics: Conference series*. 2019. Vol. 1353. P. 1–6.

19. You, H., Soma, M. Crosstalk analysis of interconnection lines and packages in high-speed integrated circuits // *IEEE Trans. on circuits and systems*. 1990. Vol. 37. P. 1019–1026.

20. Park, S., 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. N 2(52). P. 436–446.

21. Леонтьев, Н.А. Анализ временного отклика в межсоединениях быстродействующих радиоэлектронных схем: дис. ... канд. техн. наук. Томск: ГУСУР, 2000.

22. Сердюк, Е.А., Суровцев, Р.С. Выражения для аналитической оценки формы и амплитуды импульсного сигнала в витке меандровой линии задержки // Материалы докладов Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Томск, 2018. Т. 1. С. 312–315.

23. Аналитические математические модели для вычисления временного отклика в витке меандровой линии / Е.А. Сердюк, А.В. Носов, Р.С. Суровцев, Т.Р. Газизов // Материалы докладов Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Томск. 2019. Т. 2. С. 49–52.

24. Суровцев, Р.С. Аналитические условия для выравнивания и уменьшения амплитуд составляющих временного отклика в витке меандровой линии // Радиотехника и электроника. 2022. № 1(61). (В печати.)

R. S. Surovtsev

Stripline devices based on meandr for protection against conducted excitations: obtained results and investigation perspectives

The results of a comprehensive study of stripline devices based on a meander for the protection of radio-electronic equipment against electromagnetic influences are briefly presented. Investigation perspectives of this direction are also considered.

surovtsevrs@gmail.com