

УДК 621.3

**А.В. Носов, Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов**

## **Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью**

Экспериментально доказана возможность разложения сверхкороткого импульса в С-секции с лицевой связью. Для этого изготовлены макеты секций разной длины. Максимальный уровень сигнала на выходе макета составил 24% от уровня сигнала на входе линии.

**Ключевые слова:** С-секция, лицевая связь, защита, четная и нечетная моды, сверхкороткий импульс.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-47-50

В настоящее время основную часть элементов современных цифровых устройств составляют микропроцессоры и системы, построенные на их основе. Их активное развитие в последние несколько десятилетий привело к значительному увеличению быстродействия современных устройств, а также росту их рабочих частот и уменьшению напряжений используемых сигналов. Наряду с увеличивающимися уровнями мощности и расширяющимися диапазонами частот электромагнитных воздействий, а также растущим числом их источников самой разнообразной природы, это ведет к повышению восприимчивости современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к воздействию электромагнитного излучения. Все реальное становится угроза преднамеренного электромагнитного воздействия с целью выведения из строя важных объектов инфраструктуры общества в террористических целях, о чем свидетельствует ряд зарегистрированных случаев такого воздействия [1].

Наиболее опасны импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов, которые могут проникать внутрь РЭА. Традиционно для защиты от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) применяются электромагнитные экраны, различные фильтры, устройства развязки, ограничители помех. Однако они имеют ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются недостаточное быстродействие, малая мощность, а также наличие паразитных параметров, затрудняющих защиту устройств от мощных СКИ. Кроме того, реализация такой защиты требует обязательного введения в состав устройства дополнительных компонентов, а защита РЭА от воздействий в широком диапазоне требует построения сложных многоступенчатых устройств, что неизбежно ведет к росту массогабаритных показателей конечных устройств. Между тем на практике требуются простые и дешевые устройства защиты от СКИ. Поэтому актуален поиск новых технических решений.

В этой связи примечателен подход к защите РЭА, основанный на использовании искажений в витке меандровой линии задержки [2–4], часто называемом С-секцией [5–7]. Достоинством подхода является то, что его реализация может не требовать устройства защиты как такового. Вместо него могут

быть использованы уже имеющиеся на печатной плате меандровые линии, прямое назначение которых – задержка сигнала на печатной плате для трактирования импульсных сигналов в точках приема.

Защита от СКИ с помощью предложенного подхода достигается за счет его разложения на последовательность импульсов с меньшей (относительно исходной) амплитудой, минимизация которой осуществляется путем выравнивания амплитуд этих импульсов. Для этого необходимо выполнить ряд условий, связывающих параметры меандровой линии и длительность СКИ. Так, для линии с однородным диэлектрическим заполнением необходимо, чтобы импульс основного сигнала пришел к концу линии по окончании импульса перекрестной наводки на ближнем конце линии (в терминологии связанных линий) за счет обеспечения нескольких простых условий [8, 9]. Основным из них является значение задержки в линии большее, чем длительность СКИ. Тогда за счет оптимизации связи между сигнальными проводниками линии могут быть обеспечены минимизация и равенство амплитуд импульсов наводки и основного сигнала на выходе линии [2]. В линии с неоднородным заполнением могут различаться скорости распространения мод, что может быть использовано для разложения основного сигнала на два импульса. Эти импульсы можно назвать импульсами четной и нечетной мод, поскольку форма сигнала в любой точке линии, по существу, является результатом суперпозиции четной и нечетной мод, а увеличение разности задержек мод приводит к разделению сигнала на два импульса. Поэтому для простоты изложения далее эти импульсы будут называться импульсами четной и нечетной мод. Их разделение позволяет дополнительно ослабить амплитуду СКИ в 1,5 раза в линии с боковой связью [3].

Описанные исследования проведены только на основе моделирования, причем идеализированных структур, а не межсоединений реальных печатных плат, где влияние потерь и дисперсии на результаты может быть существенным. Поэтому выполнено исследование С-секции с лицевой связью, при котором учтены потери в проводниках и диэлектрике [4]. Оно показало, что учет потерь приводит к дополнительному уменьшению амплитуды СКИ. В работе

отмечено, что из-за потерь, наряду с уменьшением амплитуды СКИ на выходе линии, также уменьшается оптимальное значение связи между ее проводниками, что упрощает практическую реализацию защитных линий. Затем была экспериментально доказана возможность защиты РЭА от СКИ за счет его разложения в С-секции с боковой связью, где ослабление СКИ составило 6,3 раза [10, 11].

Логичным продолжением исследований защитных устройств было бы экспериментальное подтверждение возможности защиты от СКИ за счет использования С-секции с лицевой связью. Хотя в такой линии и протекают те же волновые процессы, что и в линии с боковой связью, но они имеют существенное различие с точки зрения реализации устройства защиты. Это различие заключается в принципиально разном подходе к выравниванию амплитуд импульсов разложения на выходе линии. В первом случае (линия с боковой связью) при прохождении по витку импульс перекрестной наводки имеет значительно меньшую амплитуду, чем импульсы четной и нечетной мод, поэтому для их выравнивания необходимо усиление связи между сигнальными проводниками (что осуществить на практике может быть довольно сложно). Во втором случае (линия с лицевой связью) – наоборот, импульс перекрестной наводки имеет большую амплитуду, по сравнению с амплитудой импульсов четной и нечетной мод, поэтому для их выравнивания необходимо ослабление связи между сигнальными проводниками.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭА от СКИ за счет его разложения в С-секции с лицевой связью. Для достижения поставленной цели сначала необходимо разработать и изготовить макеты С-секций, для чего нужны предварительная оптимизация и моделирование в соответствии с технологическими возможностями изготовителя печатных плат. После изготовления макетов необходимы проведение натурных экспериментов и обработка результатов.

Моделирование и оптимизация параметров поперечного сечения выполнялись в системе компьютерного моделирования TALGAT [12]. Критерием оптимизации выбрана минимизация амплитуды СКИ на выходе линии. Ее поперечное сечение представлено на рис. 1, а. Его параметры выбраны так, чтобы обеспечить равенство среднего геометрического волновых сопротивлений четной ( $Z_c$ ) и нечетной ( $Z_o$ ) мод линии сопротивлению измерительного тракта 50 Ом, а также выполнение условия для разложения СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды [3]:

$$2 \cdot l \cdot |\tau_e - \tau_o| > t_r + t_d + t_f. \quad (1)$$

Вводя условие (1), необходимо сделать несколько замечаний о прохождении полезного сигнала по С-секции. Прежде всего, отметим, что невыполнение условия (1) не обеспечивает прохождения полезного сигнала без разложения на последовательность импульсов. В случае если длительность полезного сигнала сопоставима или меньше левой час-

ти неравенства (1), то полезный сигнал также будет подвергаться искажениям, вызванным различием скоростей распространения четной и нечетно мод и приводящим к разложению сигнала, однако увеличение его длительности будет приводить к уменьшению влияния этих искажений на форму сигнала. Таким образом, при длительности полезного сигнала много большей верхней длительности СКИ, для которой выполнено проектирование линии, влияние искажений будет несущественным и не приведет к разложению сигнала на последовательность импульсов с меньшей амплитудой.

В качестве материала основы для изготовления печатной платы выбран материал FR-4. В соответствии с технической документацией на частоте 1 МГц диэлектрическая проницаемость материала может варьироваться в диапазоне от 3,5 до 4,1. Поэтому при моделировании принято среднее значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{rC}=3,8$ . При оптимизации значения некоторых параметров поперечного сечения линии выбирались из типовых значений для этого материала [13]. Так, толщина стеклотекстолита  $h=500, 1000, 1500$  и  $2000$  мкм, а толщина сигнального проводника  $t = 18$  и  $35$  мкм. В результате оптимизации выбраны следующие параметры поперечного сечения:  $h = 1500$  мкм,  $w = 6000$  мкм и  $t = 18$  мкм соответственно, расстояние между активным и опорным проводниками  $s = 200$  мкм.

На рис. 1, б приведена схема соединений линии. Она состоит из двух параллельных проводников длиной  $l$ , соединенных между собой на одном конце. Один из проводников линии соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . Другой проводник линии соединен с приемным устройством, которое представлено на схеме сопротивлением  $R2$ . Значения  $R1$  и  $R2$  при моделировании приняты равными 50 Ом для имитации измерительного тракта.

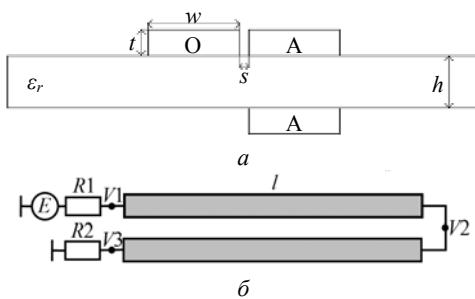


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б)  
С-секции с лицевой связью

Из вычисленных матриц погонных коэффициентов электромагнитной и электростатической индукции получены погонные задержки четной и нечетной мод:  $\tau_e = 6,007$  нс/м,  $\tau_o = 4,578$  нс/м. Таким образом, для выполнения условия (1) достаточно обеспечить длину линии  $l = 40$  мм. Однако длина линии  $l$  была выбрана с запасом и имела значения 100, 150, 200 мм, чтобы оценить ее влияние на амплитуду и форму сигнала на выходе линии. При

длине линии 100 мм произведение модуля разности погонных задержек четной и нечетной мод линии на ее удвоенную длину составляет 285,8 пс. Сумма длительностей фронта, плоской вершины и спада импульсного сигнала составляет 108 пс. Таким образом, условие (1) выполняется с запасом. Соответственно для большей длины линии условие (1) также будет выполняться.

По результатам моделирования и оптимизации из двухстороннего стеклотекстолита марки FR-4 изготовлена печатная плата с набором макетов С-секций с лицевой связью длиной  $l = 200, 150$  и  $100$  мм. Затем макеты были разделены (рис. 2).

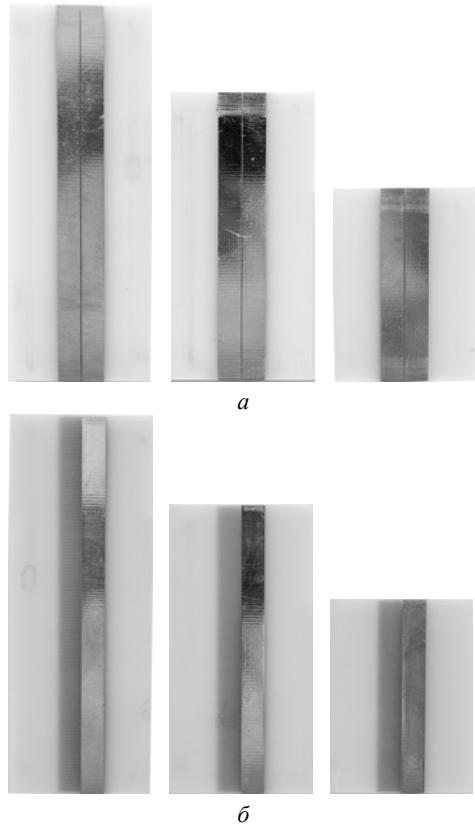


Рис. 2. Изготовленные макеты С-секций с лицевой связью: виды сверху (а) и снизу (б)

С выхода генератора на вход комбинированного осциллографа С9-11 подавался сигнал с параметрами: амплитуда 0,648 В, длительность по половине от максимального уровня  $t_{0,5}=40$  пс, длительность по уровню 0,1  $t_{0,1}=72$  пс, при аппроксимации трапециевидным импульсом длительность фронта и спада импульса составили  $t_f=60$  пс,  $t_c=48$  пс соответственно (рис. 3).

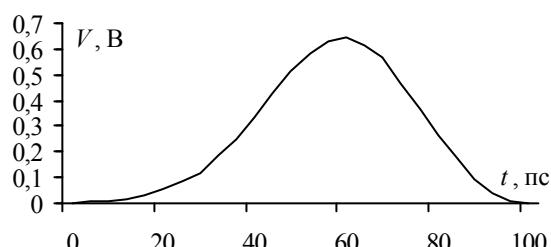


Рис. 3. Форма воздействующего импульса

Для снятия осцилограмм между выходом генератора и входом осциллографа С9-11 последовательно включались макеты С-секций с помощью соединителей типа SMA. Полученные осциллограммы сигналов на выходе каждого макета представлены на рис. 4.

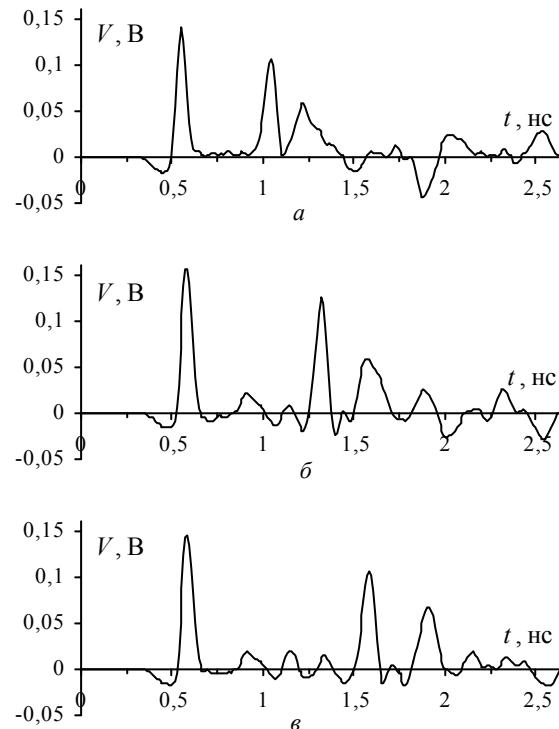


Рис. 4. Осциллограммы сигналов на выходе макетов С-секций длиной 100 (а), 150 (б) и 200 (в) мм

Из осциллограмм рис. 4 видно, что сигнал приходит к выходу с задержкой 340 пс, которая обусловлена наличием в измерительном тракте дополнительных переходных устройств и соединителей SMA, которые необходимы для ее включения в измерительный тракт. Видно, что на осциллограммах присутствуют импульсы небольшой амплитуды, вызванные отражениями от неоднородностей тракта и при переходе от соединителей в линию. Отражения также могут быть вызваны неоднородностью, возникшей при пайке соединителей SMA и перемычки для соединения полувитков.

Выходной сигнал, как и в любой связанной линии передачи, определяется суперпозицией четной и нечетной мод, возбуждаемых в линии. В данной С-секции выходной сигнал представлен последовательностью из трех основных импульсов. В упрощенном представлении первый импульс можно считать перекрестной наводкой на ближнем конце, а второй и третий импульсы – импульсами нечетной и четной мод воздействующего импульса. Видно, что при увеличении длины линии увеличивается время прихода второго и третьего импульсов. Максимальный уровень сигнала на выходе макета меандровой линии с лицевой связью составляет 24% от уровня сигнала на входе линии. Однако видно, что он определяется амплитудой первого импульса, т.е. остался

небольшой резерв ее уменьшения за счет уменьшения связи между проводниками С-секции.

Таким образом, в работе экспериментально доказана возможность разложения СКИ на последовательность импульсов в С-секции с лицевой связью.

Разработка макетов выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе, алгоритмы и программное обеспечение разработаны в рамках выполнения проектной части государственного задания Минобразования РФ № 8.1802.2014/К, оптимизация выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254.

### Литература

1. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петракай, А. Тарабцев, А. Дерябин, С. Ларионов, В. Чванов // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – № 2 (6). – С. 74–76.

2. Surovtsev R.S. Pulse Decomposition in a Turn of Meander Line as a New Concept of Protection against UWB Pulses / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russian Federation, May 2015. – 7 p.

3. Surovtsev R.S. Simple Method of Protection against UWB Pulses Based on a Turn of Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // 16<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. 29 June – 3 July 2015. – 3 p.

4. Gazizov A.T. Simple printed structures for low-cost and effective protection against UWB pulses // Asia Electromagnetics Symposium (ASIAEM 2015), Jeju-si, Jeju Province, South Korea, 3–8 August 2015. – P. 1–4.

5. Shiffman B.M. A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1956. – Vol. 4, № 2. – P. 75–81.

6. Семенов Э.В. Особенности импульсных последовательностей, формируемых фазовыми фильтрами на основе С-секций с периодической характеристикой группового времени запаздывания / Э.В. Семенов, А.Н. Маничкин, Н.Д. Малютин // Радиотехника. – 2006. – № 6. – С. 27–30.

7. Семенов Э.В. Фазовая обработка в задачах формирования, передачи и исследования искажений сверхширокополосных сигналов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 122 с.

8. 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 Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 4(34). – С. 36–40.

9. Пат. №2556438 РФ, МПК H 03 N 7/30. Линия задержки, неискажающая импульс / Р.С Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – №2013159347/08(092269); заявл. 30.12.2013; опубл. 16.06.2015. Бюл. №19.

10. Суровцев Р.С. Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2016. – 247 с.

11. Protection against Ultrashort Pulses Based on a Turn of Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines». Omsk, Russian Federation, November 15–17, 2016. – Принята к публикации.

12. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

13. Производство печатных плат. ООО «МАЖтранс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mazh-trans.tomsk.ru>, свободный (дата обращения: 23.09.2016).

### Носов Александр Вячеславович

Магистрант каф. телевидения и управления, инж. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: alexns2094@gmail.com

### Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»

Тел.: +7 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: surovtservs@gmail.com

### Заболоцкий Александр Михайлович

Канд. техн. наук, зав. НИЛ «БЭМС РЭС»

Тел.: +7 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru

### Газизов Тимур Тальгатович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»

Тел.: +7 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: timurtsk@gmail.com

Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. **Experimental confirmation of possibility of the electronic equipment protection against an ultrashort pulse by means of its decomposition in the C-section with broad-side coupling**

The possibility of ultrashort pulse decomposition in C-section with broad-side coupling is experimentally proved. For this purpose the section prototypes of different length are designed. Peak signal level at output of prototypes is 24% from signal level at the input.

**Keywords:** C-section, broad-side coupling, protection, even and odd modes, ultrashort pulse.