

УДК 621.3

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

## Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов

Рассмотрена возможность защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов с помощью двухвитковой меандровой линии. Получены результаты квазистатического моделирования несимметричной полосковой линии в воздушном заполнении. Показано ослабление импульса более 5 раз.

**Ключевые слова:** меандровая линия, защита, четная и нечетная моды, сверхкороткий импульс.

С каждым годом появляется всё больше различной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в которой неуклонно растет плотность монтажа печатных плат (ПП). Также появляются специальные устройства, изготовленные злоумышленниками для вывода из строя РЭА. Эти факторы заставляют разработчика уделять особое внимание электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭА. Неучет требований ЭМС может повлечь за собой большие финансовые потери и подрыв репутации предприятия-разработчика.

Одной из актуальных задач ЭМС является защита РЭА от преднамеренного воздействия сверхкоротких импульсов (СКИ). Об этом свидетельствует целый ряд зарегистрированных случаев воздействия на РЭА [1]. Традиционно для защиты используются фильтры, устройства развязки, ограничители помех, разрядные устройства и т.д. Однако их недостатки уменьшают эффективность защиты от СКИ. Поэтому актуален поиск новых устройств защиты. Примечательными для этого являются широко распространенные элементы современных печатных плат (ПП) – меандровые линии задержки. Их традиционным назначением является задержка сигнала во времени между двумя точками ПП, когда ее невозможно обеспечить проведением обычных линий передачи из-за высокой плотности монтажа межсоединений ПП. Между тем известны их свойства фильтрации сигнала в полосе частот, а также всепропускающие свойства витка меандра [2]. Однако мало исследованы возможности меандров для подавления вредных сигналов, в частности для защиты от СКИ. Известен ряд исследований по защите от СКИ с помощью одновитковых меандровых линий. Так, для несимметричной полосковой линии в воздушном заполнении защита от СКИ обеспечивается путем разложения СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Максимальная амплитуда сигнала на выходе линии составила 60% от уровня основного сигнала, также получены условия, обеспечивающие разложение СКИ на последовательность импульсов [3]. Для микрополосковой линии показана возможность защиты от СКИ за счет искажений в витке совместно с явлением модального разложения. Выявлено, что СКИ в конце линии может раскладываться на последовательность импульсов меньшей амплитуды, не превышающей 40% от амплитуды сигнала в начале линии [4]. Путем оптимизации параметров поперечного сечения и длины линии с лицевой связью получен коэффициент ослабления 2,5 [5]. Однако остается не исследованной возможность защиты от СКИ с помощью линий, содержащих больше одного витка. Цель работы – показать такую возможность. Для этого необходимо построить геометрическую модель поперечного сечения линии, выбрать число витков, вычислить временной отклик на импульсное воздействие в диапазоне параметров, а также выполнить оптимизацию параметров меандровой линии.

Выбрана меандровая линия из двух витков на основе несимметричной полосковой линии в воздушном заполнении. Вычисление параметров и форм сигнала выполнялось в программном продукте TALGAT [6]. Допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяются только квази-Т волны. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Поперечное сечение линии представлено на рис. 1, а. Параметры линии, как в работе [3]: ширина и толщина сигнального проводника  $w = 100$  мкм,  $t = 100$  мкм соответственно, расстояние между проводниками первого и второго витков  $s_1 = s_2 = 100$  мкм, расстояние от слоя земли до сигнального проводника  $h = 200$  мкм, длина первого витка линии  $l_1 = 30$  мм. Схема состоит из двух витков

меандровой линии, соединенных последовательно (рис. 1, б). Начало первого витка соединено с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником ЭДС и внутренним сопротивлением  $R_1$ , а в конце второго витка – с приемным устройством, представленным на схеме сопротивлением  $R_2$ . Значения  $R_1$  и  $R_2$  для минимизации отражений сигнала на концах проводников приняты равными среднему геометрическому значению волновых сопротивлений четной и нечетной мод линии. В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции с ЭДС 1 В, длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс.

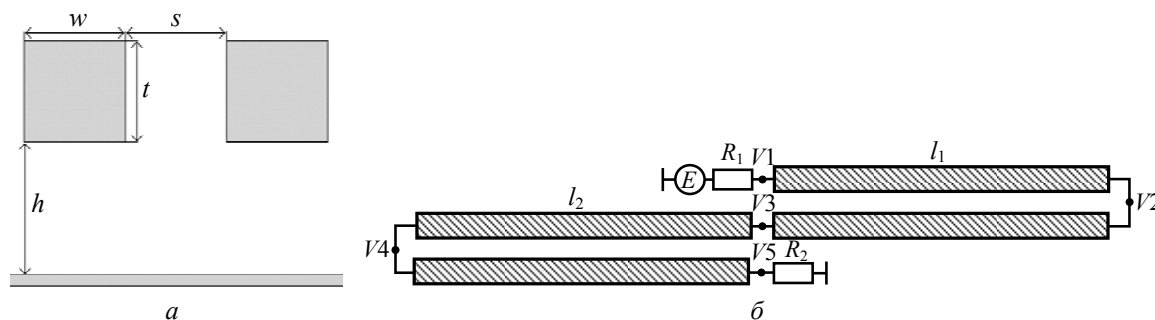


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) меандровой линии из двух витков

Для минимизации амплитуды СКИ на выходе линии желательно добиться его разложения на последовательность импульсов как можно меньшей амплитуды. Для этого нужно выбором длины полувитков ( $l_1, l_2$ ) обеспечить значение задержки в первом и во втором витках большее или равное сумме длительностей фронта ( $t_r$ ), плоской вершины ( $t_d$ ) и спада импульса ( $t_f$ ) [3]:

$$2\tau \cdot l \geq t_r + t_d + t_f \tag{1}$$

где  $\tau = \tau_e = \tau_o$ . При выполнении (1) импульс перекрестной наводки заканчивается до прихода к концу витка основного импульса, тем самым не увеличивая его амплитуду.

В работе [3] выполнен показательный анализ изменения формы сигнала в витке меандровой линии при изменении ее длины от 0 до 30 мм. Для двух витков выполнен аналогичный анализ, когда длина первого витка ( $l_1$ ) фиксирована и равна 30 мм для выполнения (1), а длина второго ( $l_2$ ) изменяется от 15 до 60 мм. В качестве примера формы сигнала в конце линии (в узле V5) при  $l_2 = 15, 30, \dots, 60$  мм показаны на рис. 2.

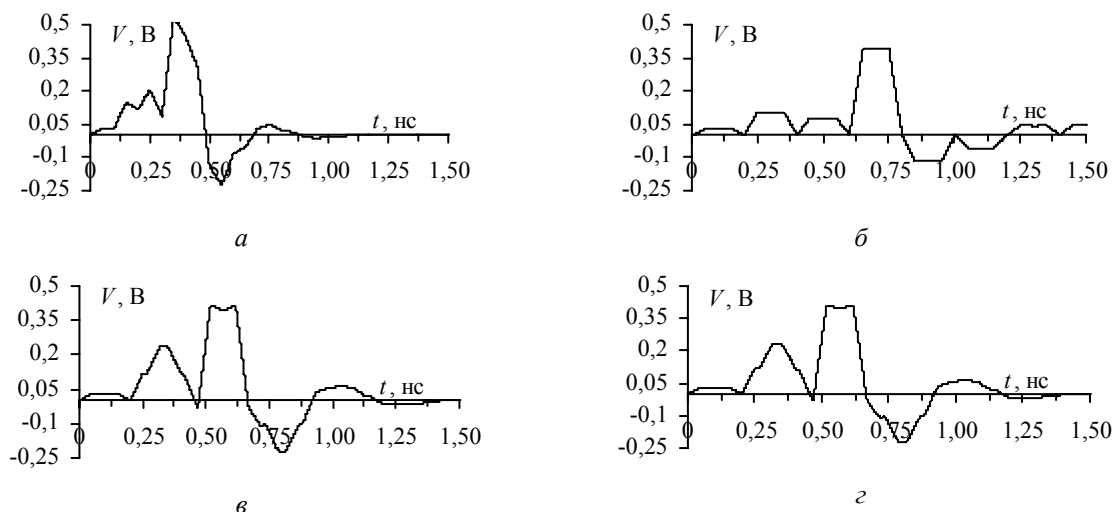


Рис. 2. Формы сигнала в конце двухвитковой меандровой линии при  $l_1 = 30$  мм для  $l_2 = 15$  (а), 30 (б), 45 (в), 60 (г) мм

Из рис. 2 видно последовательное разложение импульса с ростом  $l_2$ . Так, на фронте и спаде основного сигнала начинают проявляться выброс и провал соответственно. Также выброс и провал проявляются и на импульсе ближней перекрестной наводки. Однако при  $l_2 = 30$  мм ближняя перекрестная наводка не накладывается на фронт сигнала, так как выполняется условие (1) для второго витка и наблюдаются три импульса. Амплитуды второго и третьего импульсов составляют 0,23 и 0,38 В соответственно. Дальнейшее увеличение  $l_2$  до 60 мкм приводит к проявлению всех состав-

ляющих основного сигнала и наводок после прохождения по линии, и наблюдается 4 первых положительных импульса. Однако уровень основного сигнала увеличивается до 0,4 В. По существу, при  $l_2 = 30$  мм амплитуда второго импульса складывается из амплитуд наводок на ближнем конце от основного импульса после прохождения сначала первого, а потом второго витков. Первый импульс является наводкой на ближнем конце от фронта импульса перекрестной наводки, которая сформировалась в первом витке.

Для дальнейшей минимизации амплитуды импульсов на выходе линии за счет увеличения связи между полувитками выполнено моделирование при фиксированных значениях  $l_1 = l_2 = 30$  мм и одновременном уменьшении  $s_1$  и  $s_2$  от 100 до 10 мкм. Для наглядности, полученные формы сигнала при  $s_1 = s_2 = 70$  и 50 мкм приведены на рис. 3.

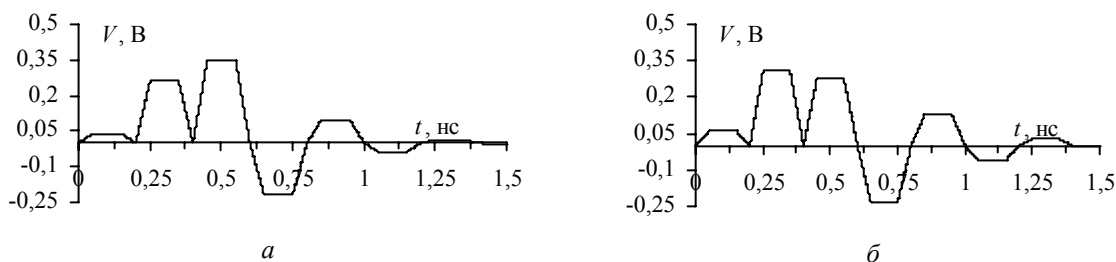


Рис. 3. Формы сигнала в конце исследуемой линии при  $l_1 = l_2 = 30$  мм для  $s_1 = s_2 = 70$  (а), 50 (б) мкм

Из графиков рис. 3 видно, что усиление связи в витках меандровой линии приводит к изменению амплитуд второго и третьего импульсов выходного сигнала: сначала (при  $s_1, s_2 = 70$  мкм) амплитуда третьего импульса (основной сигнал) выше амплитуды второго импульса (сумма импульсов перекрестных наводок на ближнем конце от основного импульса), а в конце (при  $s_1, s_2 = 50$  мкм) – наоборот. Очевидно, что в диапазоне между 70 и 50 мкм существует оптимальное значение  $s_1$  и  $s_2$ , при котором уровни второго и третьего импульсов имеют одинаковую и минимальную амплитуду. Поиск оптимума дал  $s_1 = s_2 = 56,5$  мкм и  $V = 0,3$  В.

Наконец, выполнена оптимизация расстояний между первым и вторым витками в диапазоне значений от 1 до 1000 мкм при  $l_1 = l_2 = 30$  мм. Выявлено, что увеличение значения  $s_1$  приводит к уменьшению амплитуды второго импульса и увеличению амплитуды третьего импульса. Уменьшение значения  $s_2$  приводит к уменьшению амплитуды второго и значительному уменьшению амплитуды третьего импульса. Поиск оптимума дал  $s_1 = 560$  мкм,  $s_2 = 10$  мкм и  $V = 0,185$  В, что в 5,4 раза меньше амплитуды сигнала в начале линии. Полученная форма сигнала в конце линии (в узле  $V/5$ ) приведена на рис. 4.

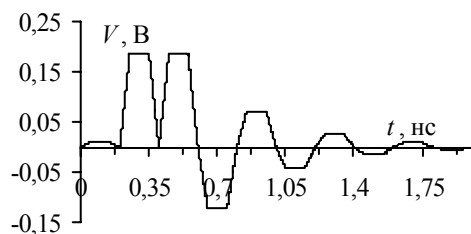


Рис. 4. Форма сигнала в конце исследуемой линии при  $l_1 = l_2 = 30$  мм,  $s_1 = 560$  мкм,  $s_2 = 10$  мкм

Стоит отметить, что в работе [3] для линии с одним витком оптимальные значения составили  $s = 7,7$  мкм,  $V = 0,309$  В, так что в двухвитковой линии амплитуда существенно меньше. Также найдены значения  $s_1 = 1000$  мкм,  $s_2 = 1$  мкм, при которых максимальная амплитуда на выходе составила  $V = 0,110$  В, что в 9 раз меньше амплитуды сигнала в начале линии, однако возникает сложность реализации устройства с такими параметрами. Используя подобный подход, в дальнейшем могут быть исследованы такие структуры меандровых линий, как, например, микрополосковые или линии с одним и двумя покрывающими слоями диэлектриков и др. Также перспективным видится анализ увеличения количества витков для различных структур меандровых линий. Наконец, необходимо отметить, что при длительностях полезного сигнала много больших длительности СКИ, меандровая линия не будет искажать полезный сигнал.

Моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе, алгоритмы и программное обеспечение разработаны в рамках выполнения проектной части государственного задания Минобрнауки РФ, оптимизация выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254.

*Литература*

1. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петкау, А. Тарабцев, А. Дерябин, С. Ларионов, В. Чванов // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – № 2 (6). – С. 74–76.
2. Jones E.M.T. Coupled-Strip-Transmission-Line and Directional Couplers / E.M.T. Jones, J.T. Bolljahn // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – April 1956. – Vol. 4, № 2. – P. 75–81.
3. 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.
4. 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 // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. 29 June – 3 July 2015. – 3 p.
5. Gazizov A.T. Simple printed structures for low-cost and effective protection against UWB pulses / A.T. Gazizov // Asia Electromagnetics Symposium (ASIAEM 2015), Jeju, South Korea, 3–8 August 2015. – 4 p.
6. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

---

**Носов Александр Вячеславович**

Магистрант, каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: alexns2094@gmail.com

**Суровцев Роман Сергеевич**

Аспирант каф. ТУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: surovitsevrs@gmail.com

**Газизов Тальгат Рашитович**

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. каф. ТУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

**Заболоцкий Александр Михайлович**

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, каф. ТУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru

Nosov A.V., Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M.

**Meander delay line with two turns, protecting against ultrashort pulses**

The ability of a meander line consisting of two turns to protect electronic equipment against ultrashort pulses is considered. The results of quasi-static simulation of the microstrip line in air are obtained. Attenuation of pulse amplitude more than 5 times is shown.

**Keywords:** meander line, protection, even and odd modes, ultrashort pulse.