

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

XIV Международная научно-практическая конференция

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

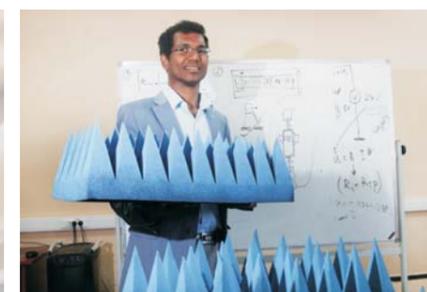
Материалы докладов

г. Томск

28–30 ноября 2018 г.

В двух частях

ЧАСТЬ 1



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

# **ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**XIV Международная научно-практическая конференция**

**28–30 ноября 2018 г.**

**Материалы докладов**

**В двух частях**

**Часть 1**

В-Спектр  
Томск – 2018

**УДК 621.37/39 + 681.3**  
**ББК (Ж/О) 32.84.85.965**  
**Э 45**

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – 348 с.  
ISBN 978-5-91191-401-1  
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)  
ISBN 978-5-91191-403-5 (Ч. 2)

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 28–30 ноября 2018 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника СВЧ; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства СВЧ; нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; плазменная электроника; биомедицинская электроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; инновации в сфере электроники и управления; оптоэлектроника и фотоника; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение.

Для студентов, преподавателей и специалистов, интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3  
ББК (Ж/О) 32.84.85.965

*Конференция проводится при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).  
Проект № 18-07-20094*

*Часть статей секций 2–22 направлена для публикации  
в журнале «Доклады ТУСУРа»*

**ISBN 978-5-91191-401-1**  
**ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)**

© ТУСУР, 2018  
© Коллектив авторов, 2018

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «КЕЙСАЙТ ТЕКНОЛОДЖИЗ»



ООО «Кейсайт Текнолоджиз»  
Россия, 115054, г. Москва,  
Космодамианская наб., 52, стр. 3.

Тел.: 495 797 39 00  
Факс: 495 797 39 02  
[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

Как самостоятельная компания Keysight Technologies была образована в 2014 г. в результате стратегического разделения компании Agilent Technologies, которая, в свою очередь, до 1999 г. входила в корпорацию Hewlett-Packard. Первый измерительный прибор под маркой Hewlett-Packard был выпущен более 75 лет назад.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр лабораторных, модульных и портативных контрольно-измерительных приборов, в том числе оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, источники питания, генераторы импульсов, системы сбора данных, логические анализаторы, ручные приборы), решения для тестирования телекоммуникаций, а также системы автоматизированного проектирования и моделирования электронных устройств.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard / Agilent, используются уже более 45 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших заказчиков Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

В 2012 г. компания Keysight Technologies открыла два дополнительных региональных офиса в России – в Приволжском и Сибирском федеральных округах. В 2013 г. дополнительный офис открыт в Ростове-на-Дону, в 2014 г. – в Санкт-Петербурге.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: [www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

*Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз»  
Смирнова Галина Владимировна*

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «ЛЕКРОЙ РУС»



ООО «ЛеКрой РУС»  
119071, г. Москва, 2-й Донской  
проезд, д. 10, стр. 4, 2-й этаж

Тел.: 495 777-5591  
Факс: 495 640-3023  
<https://prist.ru/>

Компания «ПриСТ» основана в 1994 г. Сегодня АО «ПриСТ» один из крупнейших российских поставщиков приборов для электроизмерений, радиоизмерений и измерений параметров окружающей среды (<https://prist.ru/>).

В компании работает более 80 высококвалифицированных сотрудников, открыты представительства в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге, имеется дилерская сеть по всей территории России, дилеры в Белоруссии и Казахстане.

Основные виды деятельности:

- Поставки измерительного оборудования.
- Технические консультации по подбору средств измерения и вариантам замен приборов, снятых с производства или морально устаревших.
- Услуги по поверке и калибровке СИ.
- Услуги по техническому обслуживанию СИ, включая закрытую калибровку.
- Услуги автоматизации процессов поверки и калибровки.
- Испытания для целей утверждения типа СИ.
- Сервисная поддержка, гарантийное и послегарантийное обслуживание.
- Предоставление СИ в арендное пользование.

Компания «ПриСТ» является эксклюзивным поставщиком на территории России и СНГ продукции таких компаний, как APPA, Center, Good Will Instrument, SEW, Tabor Electronics, Teledyne LeCroy и Wayne Kerr Electronics. Дистрибьюторские и партнерские соглашения связывают компанию со всемирно известными производителями: Anritsu, Fluke, Keysight, National Instruments, Rohde&Schwarz, Pendulum, Spectracom, TDK-Lambda, Pico Technology.

С 2004 г. АО «ПриСТ» представляет на российском рынке компанию LeCroy (с 2012 г. Teledyne LeCroy) – одного из мировых лидеров в разработке и производстве цифровых осциллографов. Осциллографы высочайшего класса помогают инженерам-конструкторам и учёным осуществлять наблюдение, измерение и анализ сигналов в электронных цепях и трактах различных устройств. Компания «Teledyne LeCroy» является одним из технологических лидеров на рынке цифровых осциллографов. Это подтверждают ее достижения, например, в 2013 г. компания представила многоканальную систему с полосой пропускания 100 ГГц в режиме реального времени. В том же 2013 г. были представлены осциллографы высокого разрешения (HDO) с 12-битным АЦП и полосой пропускания 1 ГГц. Семейство осциллографов HDO существенно изменило представление о точности измерений, доступной цифровым осциллографам. 2018 год ознаменовался выходом новой серии осциллографов высокого разрешения WavePro HDR, которая обеспечивает теперь высокоточные измерения в полосе до 8 ГГц. Кроме цифровых осциллографов, компания «Teledyne LeCroy» выпускает анализаторы протоколов. Это широкий класс приборов для тестирования устройств передачи данных как на физическом, так и на логическом уровне. В этой области «Teledyne LeCroy» также занимает лидирующие позиции и предоставляет решения для всех современных протоколов передачи последовательных данных (<http://lecroy-rus.ru/>).



Е.А. Сердюк, Р.С. Суворцев

## Выражения для аналитической оценки формы и амплитуды импульсного сигнала в витке меандровой линии задержки

Представлены результаты разработки аналитических выражений для быстрой оценки формы и амплитуды сверхкороткого импульса в витке меандровой линии задержки. Для этого рассмотрены две известные модели для анализа перекрестных наводок в связанных линиях передачи. Для оценки корректности выполнено моделирование формы сигнала в конце витка меандровой линии с помощью метода моментов. В результате выявлено хорошее качественное совпадение результатов расчета и моделирования. Однако также выявлено количественное несовпадение по амплитуде сигнала на выходе витка меандровой линии до 11,35%.

**Ключевые слова:** меандровые линии, сверхкороткий импульс, модальный анализ.

В настоящее время радиоэлектронная аппаратура (РЭА) является неотъемлемой частью жизни современного человека. На практике требуется повышение быстродействия наряду с уменьшением габаритов и стоимости РЭА. Это ведет к росту восприимчивости РЭА к различным электромагнитным воздействиям (ЭМВ), например, на таких критичных объектах инфраструктуры общества, как объекты топливно-энергетического комплекса [1]. Среди ЭМВ особенно опасными являются сверхкороткие импульсы (СКИ) с длительностью до нескольких наносекунд и амплитудой до нескольких десятков киловольт. Традиционные устройства защиты не всегда способны защитить от таких импульсов из-за своей недостаточной мощности и низкого быстродействия. Поэтому для защиты зачастую применяются сложные многоступенчатые устройства, реализация которых неизбежно ведет к увеличению массы и габаритов конечного устройства.

Предложен способ защиты РЭА от СКИ, основанный на свойствах меандровых линий [2]. Традиционное их назначение заключается в задержке сигнала на печатной плате в тех случаях, когда необходимо синхронизировать время прихода нескольких тактируемых сигналов в точке приема.

Принцип защиты основан на модальных искажениях сигнала, которые позволяют уменьшить амплитуду СКИ за счет его разложения на последовательность импульсов меньшей амплитуды (импульс перекрестной наводки на ближнем конце, импульс нечетной и четной мод). Как показал обзор, выполненный ранее, наиболее распространенным методом для анализа меандровых линий задержки является метод моментов, поскольку он хорошо себя зарекомендовал для решения задач электромагнитного поля в многопроводных связанных линиях передачи [3]. Несмотря на то, что моделирование позволяет получить более точные знания о поведении системы, зачастую на практике требуется быстрая оценка того или иного свойства рассматриваемой системы. Например, оценка изменения формы и амплитуды СКИ в витке защитной меандровой линии. Для таких оценок нужны простые и понятные аналитические выражения, которые позволят на самом раннем этапе оценить целесообразность дальнейшего исследования объекта. Поэтому необходима разработка ана-

литических выражений для быстрой оценки формы и амплитуды СКИ в меандровых линиях задержки. Наиболее простым путем является получение таких выражений на основе уже известных и применяемых моделей за счет их сведения к более частному случаю.

Целью данной работы является разработка аналитических выражений для оценки амплитуды и формы импульсного сигнала в витке меандровой линии задержки и оценка их корректности. Для достижения поставленной цели нужно решить следующие основные задачи: получить аналитические выражения на основе нескольких известных моделей; апробировать полученные выражения на известном примере витка меандровой линии; сравнить с результатами моделирования другим методом.

Примечательными для анализа видятся сразу несколько подходов, предложенных для оценки перекрестных связей и наводок в многопроводных связанных линиях передачи [4, 5]. Оба подхода основаны на модальном разложении сигнала, но исходные выражения для первого получены во временной области, а для второго – в частотной. Меандровые линии задержки являются частным случаем многопроводных связанных линий передачи за счет особого соединения проводников линии друг с другом. Поэтому отмеченные подходы могут быть применены и для анализа меандровых линий.

В качестве тестового примера примечательным видится виток меандровой микрополосковой линии задержки с покрывающим диэлектрическим слоем, результаты анализа которого представлены в [6]. Параметры диэлектриков витка выбраны такими, чтобы обеспечить равенство скоростей распространения четной и нечетной мод линии. Такое равенство исключает влияние дальней перекрестной наводки на форму сигнала. А выбор оптимальной длины линии обеспечивает приход основного сигнала по окончании импульса ближней перекрестной наводки. Таким образом, этот виток обеспечивает задержку импульсного сигнала без искажения его формы перекрестными наводками.

### Исходные данные для моделирования

Параметры поперечного сечения витка (рис. 1) выбраны следующими: ширина ( $w$ ) и толщина ( $t$ ) сигнальных проводников 120 и 30 мкм соответст-

венно, толщина ( $h_1$ ) подложки 100 мкм, толщина ( $h_2$ ) покрывающего слоя 50 мкм, расстояние ( $s$ ) между проводниками 120 мкм, относительные диэлектрические проницаемости подложки ( $\epsilon_{r1}$ ) и покрывающего слоя ( $\epsilon_{r2}$ ) соответственно.



Рис. 1. Поперечное сечение витка

Виток состоит из двух сигнальных проводников, соединенных на одном дальнем конце. Ближний конец первого проводника соединен с источником сигналов, представленным на схеме идеальным источником ЭДС с внутренним сопротивлением  $R_{s1}$ , а ближний конец второго проводника соединен с приемным устройством, представленным на схеме сопротивлением  $R_{s2}$  (рис. 2). Сопротивления  $R_{s1}$  и  $R_{s2}$  приняты равными 50 Ом. В качестве воздействующего принят импульс в виде трапеции с ЭДС 1 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс. Длина полувитка  $l = 25$  мм.

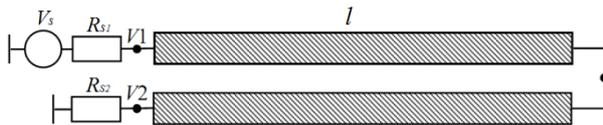


Рис. 2. Схема соединений витка

### Теоретические основы выбранных методов

В момент начала распространения сигнала по первому проводнику начинает наводиться импульс ближней перекрестной наводки (в терминологии связанных линий) во втором проводнике: положительный импульс, который первым приходит в конец линии (узел  $V_2$ ), в нулевой момент времени. Сразу за ним к концу линии придет основной сигнал, который прошел полный путь (в прямом и обратном направлении) по витку. После основного импульса к концу линии придет отрицательный импульс ближней перекрестной наводки.

Сначала рассмотрим аналитический подход для вычисления формы и амплитуды сигнала, который предложен для оценки перекрестных наводок в связанных линиях передачи во временной области и детально описан в [4]. В его основе лежит разложение исходного сигнала на моды, при котором напряжения и токи мод сигнала в произвольной точке вдоль линий выражаются аналитически в виде моды изначально падающего напряжения и коэффициентов отражения каждой из мод от концов линии. Далее будут представлены только необходимые аналитические выражения для вычисления форм и амплитуд сигнала в линии.

Матрицы модальных источников и модальных импедансов (нижние индексы  $S$  и  $L$  обозначают начало и конец линии соответственно):

$$\mathbf{V}_{Sm} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{V}_S, \quad \mathbf{V}_{Lm} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{V}_L,$$

$$\mathbf{R}_{Sm} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{R}_S \mathbf{T}_I, \quad \mathbf{R}_{Lm} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{R}_L \mathbf{T}_I,$$

где  $\mathbf{V}_S, \mathbf{V}_L$  – матрицы источников напряжения;  $\mathbf{R}_S, \mathbf{R}_L$  – матрицы импедансов на концах линии;  $\mathbf{T}_V, \mathbf{T}_I$  – матрицы преобразования мод, которые для двухпроводной линии выглядят следующим образом:

$$\mathbf{T}_V = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 1 & -1/2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_I = \begin{bmatrix} 1/2 & 1 \\ 1/2 & -1 \end{bmatrix}.$$

Вектор источников изначально падающих мод

$$\mathbf{V}_{0m} = (\mathbf{E} + \mathbf{R}_{Sm} \mathbf{Z}_{cm}^{-1})^{-1} \mathbf{V}_{Sm},$$

где  $\mathbf{E}$  – единичная матрица;  $\mathbf{Z}_{cm}$  – матрица характеристических импедансов мод, коэффициенты которой определялись как

$$Z_{cmi} = \sqrt{\frac{L_{mi}}{C_{mi}}}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $L_{mi}$  и  $C_{mi}$  – диагональные матрицы индуктивности и емкости.

Матрица мод коэффициентов отражения

$$\mathbf{\Gamma}_{vm} = (\mathbf{R}_{vm} \mathbf{Z}_{cm}^{-1} + \mathbf{E})^{-1} (\mathbf{R}_{vm} \mathbf{Z}_{cm}^{-1} - \mathbf{E}).$$

Основные выражения для вычисления формы сигнала на ближнем и дальнем концах связанной линии во временной области (нижние индексы  $c$  и  $d$  введены для обозначения четной и нечетной моды):

$$V_{1,2}(0, t) = V_c(0, t) \pm V_d/2 = \{V_{0c}(t) \pm V_{0d}(t)/2\} + \{ \Gamma_{Ldd} \Gamma_{Scd} \pm \Gamma_{Ldd} (1 + \Gamma_{Sdd}) / 2 \} V_{0d}(t - 2T_d) + \{ \Gamma_{Ldc} \Gamma_{Scd} + \Gamma_{Ldc} (1 + \Gamma_{Sdd}) / 2 \} V_{0c}(t - (T_d - T_c)) + \{ \Gamma_{Lcd} (1 + \Gamma_{Scc}) \pm \Gamma_{Lcd} \Gamma_{Sdc} / 2 \} V_{0d}(t - (T_d + T_c)) + \{ \Gamma_{Lcc} (1 + \Gamma_{Scc}) \pm \Gamma_{Lcc} \Gamma_{Sdc} / 2 \} V_{0c}(t - 2T_c), \quad (1)$$

$$V_{1,2}(l, t) = V_c(l, t) \pm V_d(l, t) / 2 = \{ \Gamma_{Lcd} \pm (1 + \Gamma_{Ldd} / 2) \} V_{0d}(t - T_d) + \{ (1 + \Gamma_{Lcc}) \pm \Gamma_{Ldc} / 2 \} V_{0c}(t - T_c), \quad (2)$$

где  $T_c$  и  $T_d$  – время распространения мод, которое определяется как произведение погонной задержки соответствующей моды на длину линии.

Второй подход также предложен и разработан для анализа перекрестных наводок в многопроводных линиях передачи и основан на модальном анализе сигнала в частотной области [5]. Полученные аналитические выражения в частотной области для описания передаточных функций по напряжению и току с помощью соответствующих выкладок и обратного преобразования Фурье получены и для временной области. Ниже приведено общее аналитическое выражение для вычисления формы сигнала во временной области для связанной линии («+» для активного и «-» для пассивного проводников):

$$V_{1,2}(x, t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{P_1} E_1 \left( t - \frac{x}{v_1} \right) \pm \frac{1}{P_2} E_1 \left( t - \frac{x}{v_2} \right) \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{pL1}{P_1} E_1 \left( t - \frac{2l-x}{v_1} \right) \pm \frac{pL2}{P_2} E_1 \left( t - \frac{2l-x}{v_2} \right) \right], \quad (3)$$

где  $E_1$  – ЭДС источника;  $p_{L1}, p_{L2}$  – элементы матрицы коэффициентов отражения  $p_{Ln}$ , которая определяется как

$$p_{Ln} = \frac{Z_L - Z_n}{Z_L + Z_n}, \quad P_n = 1 + \frac{Z_G}{Z_n},$$

где  $Z_n$  – матрица характеристического импеданса;  $Z_L, Z_G$  – сопротивления в конце и начале линии.

Скорость распространения определяется как

$$v_n = \frac{1}{\tau_n},$$

где  $\tau_n$  – погонные задержки.

Элементы матрицы  $Z$  для двухпроводной линии здесь вычисляются по выражениям:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_{11} + L_{12}}{C_{11} - C_{12}}}, \quad Z_2 = \sqrt{\frac{L_{11} - L_{12}}{C_{11} + C_{12}}}.$$

### Вычисление формы сигнала в конце меандра по аналитическим выражениям

Для вычисления форм сигнала на основе описанных подходов сначала необходимо вычислить матрицы погонных коэффициентов электростатической ( $C$ ) и электромагнитной ( $L$ ) индукции. Такое вычисление выполнено методом моментов в системе TALGAT [7]. Вычисленные матрицы  $C$  и  $L$ :

$$C = \begin{bmatrix} 112,38 & -23,20 \\ -23,20 & 112,38 \end{bmatrix}, \quad \text{пФ/м},$$

$$L = \begin{bmatrix} 339,52 & 69,93 \\ 69,93 & 339,52 \end{bmatrix}, \quad \text{нГн/м}.$$

На основе вычисленных матриц и после соответствующих преобразований (1) примет вид

$$V_2(0,t) = V_{0c}(t) - 0,5V_{0d}(t) + 0,85V_{0c}(t - T_c) + 0,53V_{0d}(t - T_d) - 0,13V_{0c}(t - 2T_c) - 0,03V_{0d}(t - 2T_d), \quad (4)$$

а выражение (3) для подхода [5]:

$$V_{1,2}(x,t) = 0,052E_1(t) + 0,24E_1\left(t - \frac{l}{v_1}\right) + 0,25E_1\left(t - \frac{l}{v_2}\right) - 0,043E_1\left(t - \frac{2l}{v_1}\right) - 0,013E_1\left(t - \frac{2l}{v_2}\right). \quad (5)$$

Рассмотрим более детально описание сигнала по выражению (4). Как было отмечено выше, перекрестная наводка в конце витка начинает распространяться в момент времени, когда в начале витка начинает распространяться основной сигнал, что характеризуется появлением положительного импульса ближней перекрестной наводки, за который отвечают первое и второе слагаемые. Положительный импульс наводки будет длиться до момента прихода основного сигнала при  $T_{c,d} = 302$  пс. Третье и четвертое слагаемые (4) описывают основной сигнал, пришедший к концу линии. В момент времени  $T_{c,d} = 604$  пс к концу линии приходит отрицательный импульс наводки, который характеризуется пятым и

шестым слагаемыми (4). Для подхода [5] рассуждения аналогичны, однако здесь первое слагаемое отвечает за положительный импульс наводки.

По выражениям (4) и (5) получены формы сигнала в конце витка меандровой линии задержки (рис. 3). Дополнительно для оценки корректности использования методов выполнено вычисление формы сигнала в конце витка модифицированным узловым методом в системе TALGAT. Выходной сигнал представлен последовательностью из трех импульсов: положительного импульса перекрестной наводки, основного сигнала и отрицательного импульса наводки.

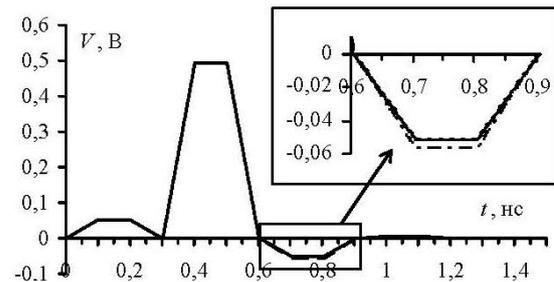


Рис. 3. Результаты оценок форм сигнала в конце витка меандровой линии

Из рис. 3 видно хорошее качественное совпадение результатов: все три формы сигнала, полученные разными подходами, совпадают между собой по форме. Так, перед основным сигналом наблюдается импульс положительной полярности, а после – отрицательной. По существу эти импульсы, в терминологии связанных линий, являются ближней перекрестной наводкой. Между тем нужно отметить количественное несоответствие результатов. Так, амплитуды и формы положительного импульса наводки и основного сигнала полностью совпадают, однако выявлено несоответствие амплитуды отрицательного импульса наводки. В таблицу сведены модули максимальной амплитуды положительного ( $V1$ ) и отрицательного ( $V3$ ) импульсов наводки и импульса основного сигнала ( $V2$ ).

Параметры сигнала на выходе витка

Подход	$V1$ , мВ	$V2$ , мВ	$V3$ , мВ
[4]	52	490	51,1
[5]	52	490	56,9
[6]	52	490	51,1

Как видно из рис. 3 и таблицы, несоответствие наблюдается только для отрицательного импульса наводки, различие амплитуд составляет 11,35%. Таким образом, нужно отметить, что результаты аналитического вычисления амплитуды СКИ в конце витка меандровой линии подходом [4] полностью совпадают с результатами вычислений, полученными в TALGAT. Несовпадение амплитуд первого и второго аналитических методов может быть вызвано чувствительностью решения к недостаточно точному вычислению матриц первичных погонных параметров из-за округлений, которые использованы для аналитических оценок.

**Заключение**

Выполнена разработка аналитических выражений для быстрой оценки формы и амплитуды СКИ в витке меандровой линии задержки. Для этого рассмотрены две известные модели для анализа перекрестных наводок в связанных линиях передачи. Дополнительно выполнено моделирование формы сигнала в конце витка меандровой линии в системе TALGAT. В результате оценок, выполненных на основе аналитических выражений и моделирования, выявлено хорошее качественное совпадение результатов расчета: все три сигнала, полученные разными методами, совпадают между собой по форме. Также выявлено количественное несовпадение по амплитуде отрицательного импульса перекрестной наводки на выходе витка меандровой линии до 11,35%. Сделано предположение о причинах несовпадения результатов вычислений.

Разработка моделей выполнена в рамках государственного задания № 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки России. Моделирование выполнено за счет гранта РФФИ №18-37-00339 в ТУСУРе.

**Литература**

1. Петкай О. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петкай, А. Тарабцев, А. Дерябин и др. // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – № 2 (6). – С. 74–76.
2. Surovtsev R.S. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transac-

tions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 58, No. 6. – P. 1864–1871.

3. Сердюк Е.А. Обзор методов и подходов к моделированию меандровых линий задержки / Е.А. Сердюк, А.В. Носов // Научная сессия ТУСУР–2018: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2018. – Т. 2. – С. 144–147.

4. Park S. Analytical Approach for Crosstalk Characterization of Multiconductor Transmission Lines Using Mode Decomposition Technique in the Time Domain / S. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52, No. 2. – P. 436–446.

5. You H. Crosstalk analysis of interconnection lines and Packages in High-speed integrated circuits / H. You, M. Soma // IEEE Transactions On Circuits And Systems. – 1990. – Vol. 37. – P. 1019–1026.

6. Суровцев Р.С. 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 ТУСУР. – 2014. – № 4(34). – С. 36–40.

7. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

---

**Сердюк Екатерина Анатольевна**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: serduk.10@mail.ru

**Суровцев Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: surovts@yandex.ru

УДК 621.3.091.1

**А.В. Демаков, М.А. Зуева**

## Обзор экранирующих материалов

Выполнен обзор современных материалов и структур на их основе, применяемых при экранировании электромагнитных полей (ЭМП). Описаны механизмы, обеспечивающие экранирование ЭМП материалами. Приведены особенности экранирующих диэлектрических структур и композитных материалов, различающихся механизмом поглощения энергии ЭМП и химическим составом.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, экранирование, электромагнитные воздействия, композитные материалы.

Тенденции миниатюризации радиоэлектронных средств и освоение новых частотных диапазонов приводят к обострению проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС). Для защиты блоков и узлов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от внешних и внутренних электромагнитных воздействий применяется электромагнитное экранирование [1]. В качестве материала при разработке экранов применяются металлы и их сплавы, которые постепенно заменяются на полимерные композиты, позволяющие уменьшить массу и повысить помехозащищенность РЭА, что является критичным для авиационной и

бортовой РЭА космических аппаратов [2]. На текущий момент разрабатываются экранирующие конструкции на основе проводящих и диэлектрических материалов, а также композитных полимерных материалов, позволяющих в широком диапазоне частот (до 100 ГГц) рассеивать электромагнитные волны (ЭМВ) и обладающих дополнительными свойствами для определенных условий эксплуатации (негорючесть, гидрофобность) [3]. Цель данной работы – представить обзор современных материалов и структур на их основе, применяемых при экранировании электромагнитных полей.