

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

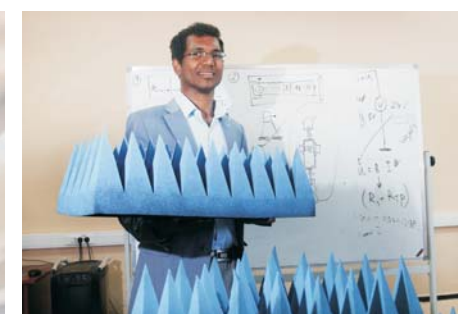
Материалы докладов

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

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

*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/>).



1. В зеркально-симметричном МФ диагональные и взаимные элементы матриц L и C одинаковы в зависимости от расположения проводников относительно земли. Эту особенность можно использовать для расчета погонных задержек мод с помощью аналитических выражений в сокращенном виде.

2. Значения матрицы модальных напряжений в проводниках четырехпроводного МФ равны по модулю. Выявлено, что изменения параметров структуры изменяют значения погонных задержек, но не влияют на элементы матрицы модальных напряжений S_v .

3. Обеспечение одновременно лицевой и торцевой связи в зеркально-симметричном МФ позволяет получить выравненные интервалы между импульсами разложения.

Заключение

В результате моделирования двухпроводной, четырехпроводной и шестипроводных линий передач выявлены особенности зеркально-симметричных МФ, что позволяет определить свойства, которыми обладают зеркально-симметричные структуры, и использовать их для оптимизации и получения требуемых характеристик фильтра.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД 365.2018.8.

Литература

1. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.

2. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Томск: Изд-во ТУСУРа, 2015. – С. 41–44.

3. Белоусов А.О. Трехкритериальная оптимизация как ресурс для совершенствования зеркально-симметричного модального фильтра / А.О. Белоусов, Е.Б. Черникова, А.М. Заболоцкий // Матер. 23-й Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-23–2017)». – г. Томск, 24 ноября 2017. – С. 150–154.

4. Черникова Е.Б. Моделирование и разработка макета зеркально-симметричного модального фильтра / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий // Матер. 13-й Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», посвященной 55-летию ТУСУРа. – г. Томск, 29 ноября – 1 декабря 2017 г. – С. 5–7.

5. Вейль Г. Симметрия. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 3-е изд. – 192 с.

6. 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.

7. Черникова Е.Б. Аналитические выражения для вычисления погонных задержек мод зеркально-симметричного модального фильтра / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018». – г. Томск, 10–12 мая 2017. – С. 240–243.

Черникова Евгения Борисовна
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: chernikova96@mail.ru

Белоусов Антон Олегович
Аспирант каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

УДК 621.372.8

А.В. Демаков

Обзор коаксиальных камер для измерения эффективности экранирования композитных материалов

Представлен обзор коаксиальных камер для проведения измерений эффективности экранирования (ЭЭ) композитных материалов. Рассмотрены варианты исполнения конструкций коаксиальных камер с разрывным и неразрывным центральным проводником. Представлены аналитические выражения для расчета оптимальных геометрических параметров проводников и приведены варианты обеспечения согласования конструкции камеры. Описаны принцип и методики проведения измерений ЭЭ согласно стандартам ASTM E5-7 и ASTM-D4935.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, коаксиальная камера, экранирование, композитные материалы.

Одним из конструкторских средств обеспечения ЭМС является электромагнитное экранирование, обеспечивающее защиту узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от излучаемых помех [1]. Традиционно электромагнитные экраны выполняются из стали, меди, алюминия и других металлов, что оказывает влияние на массу РЭА в целом и является критичным для космического и авиационного приборостроения [2]. В настоящее время активно

исследуются электромагнитные экраны из композитных материалов, измерение эффективности экранирования (ЭЭ) которых выполняют с использованием различных методов и устройств. Так, известен метод антенных измерений [3], согласно которому ЭЭ материала определяется через количественную меру затухания электромагнитной волны (ЭМВ), распространяющейся через плоский экран из исследуемого материала, расположенного между прием-

ной и передающей антеннами внутри безэховой камеры. Данный метод позволяет получить достоверные значения ЭЭ при корректном взаимном расположении приемной и передающей антенн. При этом метод является трудоемким и дорогостоящим при измерениях в области низких частот ввиду больших габаритов антенн и камеры. Аналогичным образом проводятся измерения в реверберационной камере [4] с вложенной ТЕМ-камерой [5]. Достоинством данного метода является возможность проведения измерений в широком диапазоне частот (до 100 ГГц), однако эффект реверберации в данных устройствах достигается лишь с определенной высокой частоты, определяемой габаритами камеры, в связи с чем исследование материалов в области низких частот также являются затруднительными. Отличающимися от описанных выше методов являются методы измерения в коаксиальных камерах (коаксиальные ТЕМ-камеры), обеспечивающие измерения в широком частотном диапазоне (от единиц герц до десятков гигагерц) без применения антенн и безэховых помещений. Однако на текущий момент существуют коаксиальные камеры, отличающиеся размерами, конструкцией и диапазоном рабочих частот, что затрудняет их выбор при проведении испытаний.

Цель данной работы – представить современное состояние исследований в области разработки конструкций коаксиальных камер и методов измерений ЭЭ с их помощью.

Конструкция коаксиальной камеры

Конструкция коаксиальной камеры представляет собой линию передачи, образованную двумя изолированными друг от друга соосными коническими проводниками. При этом выделяют два вида коаксиальных камер для измерения ЭЭ: конструкции с неразрывным центральным проводником, для измерения ЭЭ в которых образец материала должен быть выполнен в форме диска (рис. 1, а), и конструкции с разрывным проводником, для измерений в которых образец материала выполняют в форме плоской пластины, размещаемой в зазоре между симметричными секциями камеры (см. рис. 1, б).

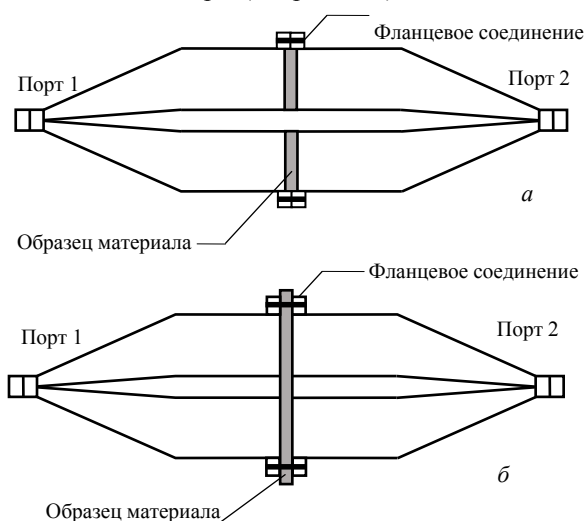


Рис. 1. Конструкции коаксиальных камер: с неразрывным (а) и разрывным (б) центральными проводниками

Волновое сопротивление коаксиальной линии может быть вычислено по выражению [6]

$$Z = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (1)$$

где $\eta_0 = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства; ϵ_r – диэлектрическая проницаемость среды; r_1 – радиус активного проводника; r_2 – радиус опорного проводника.

Диаметры для проводников коаксиальной камеры вычисляются исходя из требований к верхней граничной частоте рабочего диапазона (до частоты возбуждения моды TE_{11}) и постоянства волнового сопротивления в каждом элементарном сечении коаксиальной камеры. Граничная частота камеры определяется частотой возбуждения моды TE_{11} [7]

$$f_{TE_{11}} = \frac{c}{\pi(r_1 + r_2)}, \quad (2)$$

где c – скорость света в свободном пространстве.

Значения радиусов активного r_1 и опорного r_2 проводников определяются согласно выражениям:

$$r_1 = \frac{c}{\pi f_{TE_{11}}} \left(\frac{1}{1 + e^{2\pi Z_0 / \eta_0}} \right), \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{c}{\pi f_{TE_{11}}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{2\pi Z_0 / \eta_0}} \right). \quad (4)$$

Выбор внешнего радиуса r_3 опорного проводника является достаточно важным для конструкции камеры (см. рис. 1, б), поскольку, с одной стороны, значение r_3 должно быть как можно больше для обеспечения высокой емкостной связи между двумя половинами опорного проводника (в сборке камеры), с другой стороны, необходимо уменьшить количество возможных резонансов, проявляющихся от стыков и неровностей соединяемых поверхностей, а также из-за ограничений, связанных с размером образца материала.

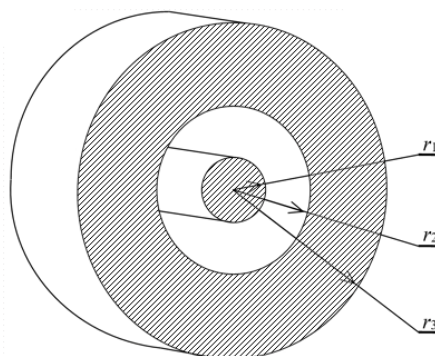


Рис. 2. Поперечное сечение коаксиальной камеры

Важной задачей при разработке конструкции коаксиальной камеры является обеспечение согласования камеры с измерительными приборами, поскольку от этого зависит корректность результатов проводимых измерений. Как правило, согласование обеспечивают путем сохранения постоянства волнового сопротивления за счет пропорционального изменения радиусов опорного и активного проводни-

ков. Так, например, в [8] показано, что при линейном законе изменения радиусов соосных проводников коаксиальной камеры её КСВН $\leq 1,2$, тогда как при экспоненциальном изменении максимальное значение КСВН $\leq 1,1$ в диапазоне частот до 3 ГГц. Следовательно, экспоненциальная форма переходов камеры обеспечивает наилучшее согласование, что позволяет уменьшить влияние отражений от элементов конструкции камеры на результаты измерений.

Принципы и методы измерения ЭЭ

Принцип измерения ЭЭ заключается в измерении потерь при распространении поперечной ЭМВ вдоль коаксиальной камеры с размещенным внутри образцом материала (рис. 3).

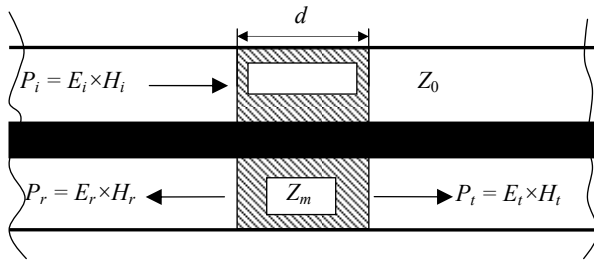


Рис. 3. Модель распространения ЭМВ в коаксиальной камере с расположенным внутри образцом материала

Из-за разницы волнового сопротивления среды распространения Z_0 и образца материала Z_m падающая волна P_i отражается от поверхности экрана P_r , поглощается экраном P_a и частично проникает через экран P_b , что выражается в соотношении мощностей [8]

$$P_i = P_r + P_a + P_t. \quad (5)$$

Классическим методом измерения ЭЭ являются измерения в коаксиальной камере с неразрывным внутренним проводником (см. рис. 1, а). Согласно данному методу и в соответствии с [9] ЭЭ может быть измерена при условии однородного заполнения образцом материала пространства между активным и опорным проводниками.

Также измерения ЭЭ могут быть проведены в коаксиальной камере с разрывным внутренним проводником (см. рис. 1, б) согласно [3]. Данный метод чаще применяется для проведения измерений экранирующих материалов, наносимых на диэлектрическую подложку [6], экранирующих тканей [10] и препреговых металлических сеток [11], однако метод требует использования контрольного образца в дополнение к основным результатам измерений. Также данный метод измерения имеет ограничение в области нижних частот (до 30 МГц) из-за разрыва электрического контакта в активном проводнике [12].

Оценка ЭЭ материала может быть выполнена при помощи измерения S -параметров коаксиальной камеры с помощью векторного анализатора цепей с помещенным внутрь камеры образцом материала и без него. Используя измеренные S -параметры, возможно одновременно оценить мощность отраженной и прошедшей ЭМВ в заданном диапазоне частот. Мощность отраженной волны (по порту 1) определяется как

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_r}{P_i}. \quad (6)$$

Мощность прошедших волн от порта 1 в порт 2 определяется как

$$|S_{21}|^2 = \frac{P_t}{P_i}. \quad (7)$$

При измерении по [9] ЭЭ определяется как

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{1}{S_{21}} \right|, \quad (8)$$

а по [3] – как

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{S_{21u}}{S_{21l}} \right|, \quad (9)$$

где S_{21u} – коэффициент передачи коаксиальной камеры с контрольным образцом, S_{21l} – коэффициент передачи камеры с образцом материала.

Заключение

В данной работе приведен обзор современного состояния исследований в области разработки коаксиальных камер для измерения ЭЭ композитных материалов. Представлены варианты исполнения камер, приведены аналитические выражения для расчета оптимальных геометрических размеров и варианты согласования коаксиальных камер. Описаны принцип и методы измерения ЭЭ согласно стандартам ASTM E57 и ASTM-D4935.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00619.

Литература

1. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
2. Комнатнов М.Е. Моделирование эффективности экранирования металлической пластиной для бортовой аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Доклады ТУСУР. – 2011. – №2(24), ч. 1. – С. 133–136.
3. ASTM D4935, Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials, 2018. – URL: <https://www.astm.org/Standards/D4935.htm> (дата обращения: 18.09.2018).
4. Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Обзор исследований в области разработки и применения реверберационных камер для испытаний на электромагнитную совместимость // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 2. – С. 151–190. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/09-Demakov.pdf>
5. IEC 1000-4-3. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Testing and measurement techniques, Section 3: Radiated radio-frequency electromagnetic field immunity test, 1995. – URL: <https://www.document-center.com/standards/show/IEC-1000-4-3/history/1ST%20EDITION> (дата обращения: 18.09.2018).
6. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и проектирование. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
7. Sarto M.S., Tamburrano A. Innovative test method for the shielding effectiveness measurement of conductive thin films in a wide frequency range // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2006. – Vol. 48, №2. – P. 331–341.

8. Valente R., Ruijter C.D., Vlasveld D. et al. Setup for EMI Shielding Effectiveness Tests of Electrically Conductive Polymer Composites at Frequencies up to 3.0 GHz // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 16665–16675.

9. ASTM E57, Test method for electromagnetic shielding effectiveness of planar materials, 1983. – URL: <https://www.astm.org/Standards/E57.htm> (дата обращения: 18.09.2018).

10. Sarto M.S., Greco S., Tamburrano A. Experimental characterization and modeling of metallized textiles for electromagnetic shielding // Proc. Of Int. Symp. Electromagn. Compat. Eur. – 2013.

11. Bozzetti M., Pisu L., Sarto M.S., Greco S. Shielding performance of an expanded copper foil over a wide frequency

range // Proc. of Int. Symp. Electromagn. Compat. – 2011. – P. 46–51.

12. Wilson P.F. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: Part I – far-field source simulation // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 1998. – Vol. 30, №3. – P. 239–250.

Демаков Александр Витальевич
Ассистент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: vandervals@inbox.ru

УДК 621.37

Рустам Р. Газизов, Руслан Р. Газизов

Влияние длительности сверхкороткого импульса на выявление и локализацию экстремумов сигнала в микрополосковой С-секции при моделировании с учетом потерь

Исследуется распространение сверхкороткого импульса. Выявлены и локализованы экстремумы напряжения в микрополосковой С-секции при моделировании с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Выполнено сравнение результатов моделирования, полученных без учета потерь и с их учетом. Показано, что при геометрически малых размерах структуры влияние потерь незначительно.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, С-секция, локализация, экстремум сигнала.

Возрастающая сложность разрабатываемых устройств требует особенно тщательного их моделирования. В частности, важны выявление и локализация экстремумов сигнала, поскольку их результаты могут быть полезны для выявления уязвимых мест, а также определения более точных мест установки датчиков контроля полезных и мониторинга помеховых сигналов [1]. Теоретические основы квазистатического вычисления временного отклика вдоль проводников представлены в [2, 3] и здесь опускаются.

Проведено исследование выявления и локализации экстремумов сигнала в двухвитковой меандровой линии [4]. Также исследованы С-секция при изменении ее геометрических параметров [5] и шина печатной платы [6]. Однако это выполнено при моделировании без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Поэтому выполнено моделирование двухвитковой меандровой линии с их учетом [7], однако остальные структуры не исследованы. Поэтому целесообразно восполнить этот пробел с целью сравнения результатов.

Цель работы – исследовать влияние учета потерь в проводниках и диэлектрике на выявление и локализацию экстремумов сигнала при изменении длительности воздействия.

Параметры моделирования

Для исследования выбрана одновитковая меандровая линия, которая также называется С-секцией. На рис. 1 а приведена её принципиальная схема, а

поперечное сечение – на рис. 1, б. Длина полувитков (l) по 27 мм. Ширина проводника (w) – 0,489 мм, расстояние между проводниками (s) – 0,2455 мм, толщина проводника (t) – 0,1 мм, толщина диэлектрика (h) – 0,3 мм, $d = 2 \cdot w$, относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) – 4, тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) – 0,017 (геометрические параметры взяты из [5]).

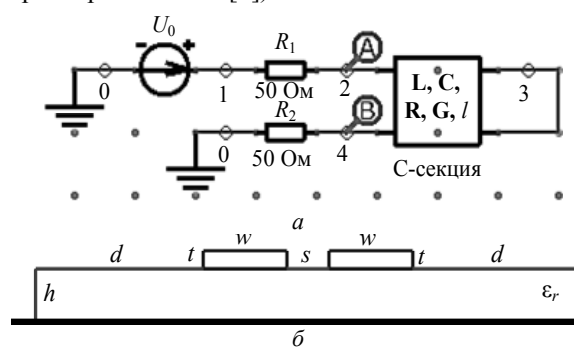


Рис. 1. Схема включения (а) и поперечное сечение (б) микрополосковой С-секции

Для исследования выбран сверхкороткий импульс (СКИ) с амплитудой ЭДС 1 В и общей длительностью 3; 0,3 и 0,03 нс с целью учесть как полезные, так и помеховые сигналы.

На рис. 2 представлены формы СКИ, где t – общая длительность; $t_1 = 3$ нс; $t_2 = 0,3$ нс; $t_3 = 0,03$ нс.

При моделировании используются матрицы элементов погонных сопротивлений \mathbf{R} и матрицы