

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

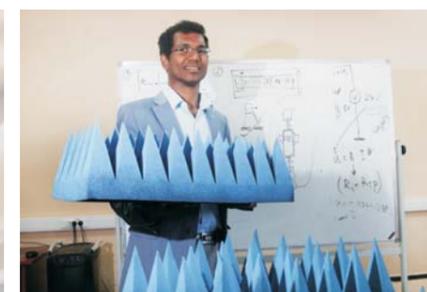
Материалы докладов

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/>).



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 ( $\epsilon_r$ ) – 4, тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) – 0,017 (геометрические параметры взяты из [5]).

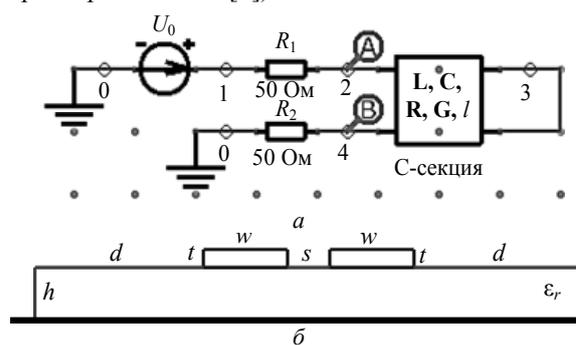


Рис. 1. Схема включения (а) и поперечное сечение (б) микрополосковой С-секции

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

погонных проводимостей  $G$ , учитывающие потери в проводниках и диэлектриках соответственно. При моделировании без учета потерь данные матрицы приняты равными нулю. При учете потерь в проводниках при вычислении элементов  $R$  учитывались: скин-эффект, эффект близости и потерь в плоскости земли по методике [8]. При учете потерь в диэлектриках при вычислении элементов матрицы  $G$  использована модель частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материалов FR-4 [9].

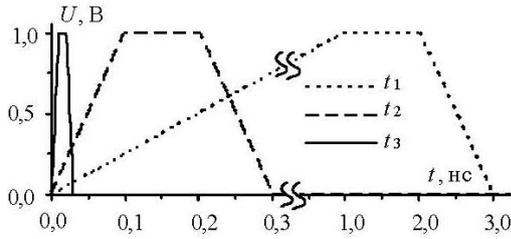


Рис. 2. Формы импульсов воздействий

**Результаты моделирования**

Выполнено моделирование для 3 разных длительностей воздействия. Вдоль каждого полувитка вычислено по 20 форм напряжений, однако показаны только формы сигнала на входе ( $U_b$ ) и выходе ( $U_e$ ) С-секции, а также с максимальным значением: ( $U_{max}$ ) – без учета потерь, а ( $U_{maxloss}$ ) – с учетом потерь.

Результаты моделирования распространения сигнала вдоль проводников С-секции при общей длительности воздействия 3 нс приведены на рис. 3, а. На рис. 3, б и в показаны увеличенные фрагменты с экстремумом сигнала. Аналогичные результаты для 0,3 и 0,03 нс приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

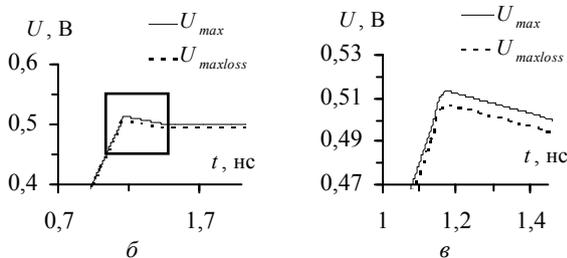
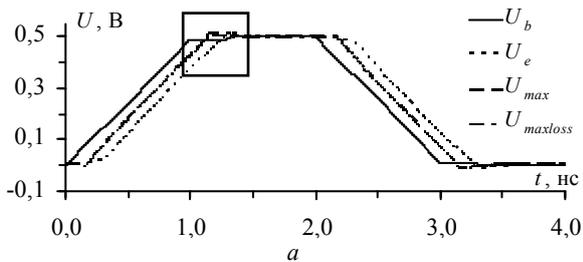


Рис. 3. Формы сигнала при  $t = 3$  нс (а) и увеличенные фрагменты с экстремумом (б, в)

В таблице сведены результаты моделирования для трех длительностей с учетом потерь и без них, где  $t$  – длительность сигнала,  $n$  – номер сегмента, в котором локализован максимум,  $U_{maxloss}$  – амплитуда

максимума с учетом потерь,  $U_{max}$  – амплитуда максимума без учета потерь,  $d$  – разница амплитуд.

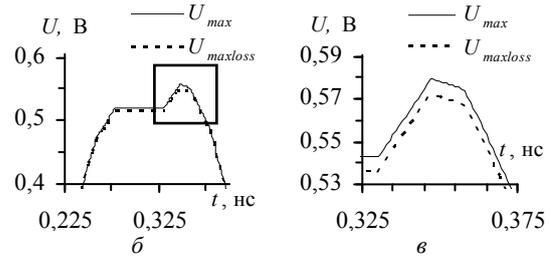
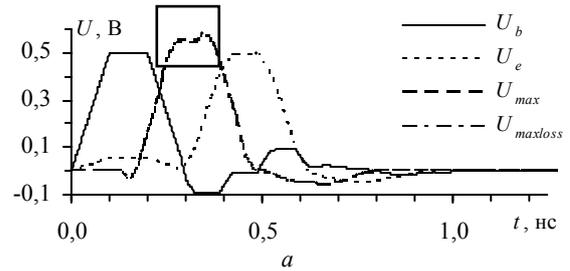


Рис. 4. Формы сигнала при  $t = 0,3$  нс (а) и увеличенные фрагменты с экстремумом (б, в)

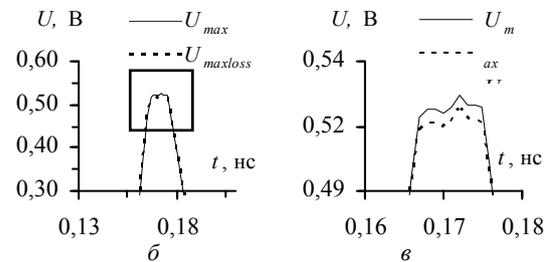
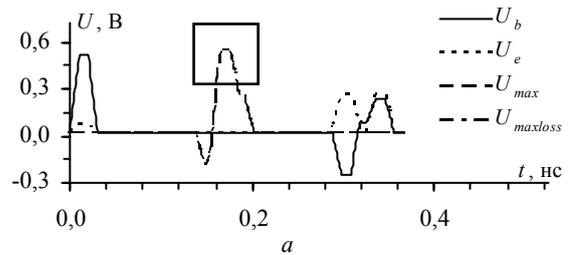


Рис. 5. Формы сигнала при  $t = 0,03$  нс (а), увеличенные фрагменты с экстремумами (б, в)

**Результаты моделирования**

$t$ , нс	$n$	$U_{maxloss}$ , В	$n$	$U_{max}$ , В	$d$ , В (%)
3	20	0,50701	20	0,51358	0,00660 (1,28%)
0,3	19	0,57468	19	0,58211	0,00743 (1,28%)
0,03	20	0,52124	20	0,52672	0,00548 (1,04%)

Из таблицы видно, что при  $t = 3$  и 0,03 нс максимум напряжения локализован в 20-м сегменте второго полувитка (это у стыка полувитков), а при  $t = 0,3$  нс – в 19-м сегменте второго полувитка. Учет потерь незначительно влияет (в пределах 1–2%) на значения максимума напряжения: для случая, когда  $t = 3$  нс, относительная разница максимумов напряжения с учетом потерь и без учета потерь составляет 1,28%. Стоит отметить, что при уменьшении длительности импульса разница между амплитудами

максимумов напряжения уменьшается. На графиках видно, что формы напряжений с учетом потерь и без их учета практически совпадают для всех случаев.

#### Заключение

Таким образом, при таких геометрически малых размерах структуры влияние потерь при моделировании распространения импульса незначительно. Целесообразно исследовать структуры с более сложной геометрической формой, а также исследовать влияние изменения ширины между проводниками на локализацию и амплитуду максимума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

#### Литература

1. Орлов П.Е. Новая концепция создания интегрированных датчиков для контроля электромагнитной обстановки в бортовой аппаратуре космического аппарата / П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2012. – № 5. – С. 20–23.
2. Achar R., Nakhla M.S. Simulation of high-speed interconnects // *Proc. IEEE*. – 2001. – Vol. 89, No. 5. – P. 693–728.
3. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передач / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2007. – 152 с.
4. Газизов Р.Р. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, П.Е. Орлов // *Доклады ТУСУР*. – 2015. – № 4(38). – С. 147–150.
5. Газизов Р.Р. Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными проводниками / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // *Доклады ТУСУР*. – 2016. – № 1(19). – С. 79–82.
6. Газизов Р.Р. Исследование локализации пиковых значений сигнала в печатной плате системы автономной навигации / Р.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2017. – Т. 15, №2. – С. 170–178.
7. Выявление и локализация экстремумов сигнала в двухвитковой меандровой линии с учетом потерь / Рустам Р. Газизов, Руслан Р. Газизов // *Сб. избр. ст. научной сессии ТУСУР: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018»*. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 2. – С. 246–249.
8. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines / G.L. Matthaei, G.C. Chinn // *Microwave Symposium Digest*. – 1992. – P. 1353–1354.
9. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality / A.R. Djordjevic, R.M. Biljic, V.D. Likar-Smiljanic, T.K. Sarkar // *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. – 2001. – Vol. 43, No. 4. – P. 662–666.

#### Газизов Рустам Рифтович

Студент каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: gazizovtsk@yandex.ru

#### Газизов Руслан Рифатович

Мл. науч. сотр. каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: ruslangazizow@gmail.com

УДК 621.396.41

Ч.Л. Хомушку, Р.Р. Газизов

## Локализация экстремумов сверхкоротких импульсов от источника преднамеренных воздействий в шине печатной платы космического аппарата

Рассматриваются выявление и локализация экстремумов сигнала в схемах из многопроводных линий передачи. Использован фрагмент шины печатной платы космического аппарата. С помощью компьютерного моделирования локализованы экстремумы напряжения при воздействии сверхкороткого импульса от источника преднамеренных воздействий, а также максимумы перекрестных наводок от него.

**Ключевые слова:** моделирование, сверхкороткий импульс, локализация экстремумов сигнала, квазистатистический анализ, электромагнитная совместимость.

С развитием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) выявление и локализация экстремумов сигнала становятся все более актуальными, поскольку их результаты могут быть полезны для обеспечения электромагнитной совместимости, а также для совершенствования защиты от преднамеренных и непреднамеренных сверхкоротких импульсов (СКИ). Это особенно актуально в критичных системах, таких как космические аппараты или самолеты.

Разработаны алгоритмы и программный комплекс по выявлению и локализации экстремумов

сигнала в многопроводных линиях передачи (МПЛП) [1]. Выполнены исследования по выявлению и локализации экстремумов СКИ в шине печатной платы (ПП) системы автономной навигации (САН) космического аппарата (КА) [2–4]. Однако эти исследования выполнены только с применением сигналов в форме трапеции, и лишь в работе [5] использован электростатический разряд. Моделирование с применением формы сигнала от реальных источников преднамеренных воздействий выполнено не было.