

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

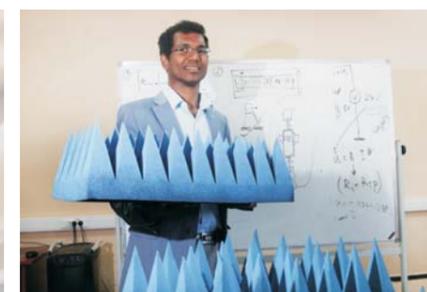
Материалы докладов

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/>).



А.А. Квасников, С.П. Куксенко

## Совершенствование алгоритма вычисления матрицы погонных сопротивлений линии передачи

Усовершенствован алгоритм вычисления матрицы погонных сопротивлений линии передачи. Реализован обобщенный алгоритм вычисления матрицы погонных сопротивлений линии передачи. Алгоритм интегрирован в систему TALGAT.

**Ключевые слова:** линия передачи, матрица погонных сопротивлений, компьютерное моделирование, Qt, TALGAT, C++.

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости является актуальной из-за увеличения количества радиоэлектронной аппаратуры, работающей в ограниченном пространстве. Также стоит отметить рост количества исследований, в которых моделируются устройства защиты на связанных линиях, например модальные фильтры, для которых выявлено сильное влияние потерь на амплитуду сигнала на выходе [1]. Однако точная оценка потерь в проводниках в общем случае отрезка многопроводной линии передачи (МПП), описываемая его матрицей  $\mathbf{R}$ , остается сложным вопросом. Использование вычислительных ресурсов компьютера для решения подобного рода задач позволяет существенно сократить время, затраченное на решение систем уравнений, выполнение матричных операций и т.д. В работе [2] представлена программная реализация алгоритма вычисления матрицы погонных сопротивлений МПП в системе TALGAT, тем не менее он не учитывает особенности вычислений коэффициентов матрицы  $\mathbf{R}$  для разных частотных диапазонов и требует доработки.

Цель данной работы – разработка обобщенного алгоритма вычисления матрицы погонных сопротивлений линии передачи. Для достижения цели требуется решить следующие задачи: разработать алгоритм вычисления матриц погонных сопротивлений для разных частотных диапазонов и выполнить его апробацию на тестовых задачах.

### Разработка алгоритма

Как было упомянуто ранее, в работе [2] описана программная реализация алгоритма вычисления матрицы  $\mathbf{R}$  для высокочастотного диапазона, основывающаяся на подходе, предложенном в работе [3]. Данная работа посвящена разработке обобщенного алгоритма вычислений матрицы погонных сопротивлений, позволяющего учесть особенности ее вычислений в разных диапазонах частот [4, 5]. Алгоритм включает в себя вычисление границ перехода между диапазонами, вычисление матрицы на постоянном токе, в среднечастотном диапазоне и на высоких частотах.

Для описания алгоритма использованы следующие обозначения:  $\sigma$  – удельная проводимость проводника;  $\mu$  – магнитная проницаемость проводника;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника;  $w$  – ширина

проводника;  $t$  – толщина проводника;  $h$  – толщина диэлектрика (подложки);  $g$  – ширина опорного проводника;  $k_s, k_r$  – коэффициенты (1,6 и 0,2) [4].

Алгоритм вычисления границ перехода определяется следующей последовательностью шагов:

1. Ввод параметров материала проводника:  $\sigma, \mu$ .
2. Ввод исходных геометрических параметров структуры.
3. Вычисление значения погонного сопротивления сигнального проводника

$$\mathbf{R}_{w0} = \frac{1}{\sigma w t}. \quad (1)$$

4. Вычисление значения погонного сопротивления опорного проводника

$$\mathbf{R}_{g0} = \frac{1}{\sigma g t}. \quad (2)$$

5. Вычисление границы перехода от низкочастотной области к среднечастотной

$$f_0 = \frac{2}{\mu_0} \frac{\mathbf{R}_{w0} \mathbf{R}_{g0}}{\mathbf{R}_{w0} + \mathbf{R}_{g0}}.$$

6. Вычисление границы перехода от среднечастотной области к высокочастотной

$$f_s = \frac{k_s + \frac{10t/w}{1+w/h}}{\pi \mu_0 \sigma t^2}.$$

Алгоритм вычисления матрицы  $\mathbf{R}$  на постоянном токе определяется следующей последовательностью шагов:

1. Ввод значения удельной проводимости проводников  $\sigma$ .
2. Ввод исходных геометрических параметров структуры.
3. Вычисление значения погонного сопротивления сигнального проводника по формуле (1).
4. Вычисление значения погонного сопротивления опорного проводника по формуле (2).
5. Вычисление сопротивления по постоянному току

$$\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{w0} + \mathbf{R}_{g0}. \quad (3)$$

Стоит отметить, что данный алгоритм также может быть использован для низкочастотной области. В случае когда количество проводников  $N > 2$ , диагональные элементы рассчитываются как  $\mathbf{R}(0)$ , а недиагональные – как  $\mathbf{R}_{g0}$ .

Для вычисления матрицы  $\mathbf{R}$  в среднечастотном диапазоне используется следующий алгоритм:

1. Ввод параметров материала проводника  $\sigma$ ,  $\mu$ .
2. Ввод исходных геометрических параметров структуры.
3. Ввод частоты.
4. Вычисление значения погонного сопротивления сигнального проводника по формуле (1).
5. Вычисление значения погонного сопротивления заземляющего проводника согласно (2).
6. Вычисление сопротивления по постоянному току микрополосковой линии по формуле (3).
7. Вычисление  $f_0$ .
8. Вычисление  $f_s$ .
9. Вычисление значения  $\mathbf{R}$  на частоте  $f_s$  с помощью алгоритма для высокочастотного диапазона.
10. Вычисление  $R(f)$  на заданной частоте

$$\mathbf{R}(f) = \mathbf{R}_0 + \frac{\mathbf{R}_\infty(f_s) \frac{\sqrt{f/f_s} + \sqrt{1+(f/f_s)^2}}{1 + \sqrt{f/f_s}} - \left[ \mathbf{R}_\infty(f_s) - \mathbf{R}_0 \right] F(f) - \mathbf{R}_0}{1 + \frac{k_r}{1+w/h} \log(1+f_s/f)}, \quad (4)$$

где

$$F(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}. \quad (5)$$

Алгоритм вычисления матрицы погонных сопротивлений МЛП для высокочастотного диапазона выглядит следующим образом:

1. Ввод параметров материала проводника  $\rho$ ,  $\mu$ .
2. Ввод частоты.
3. Ввод исходных геометрических параметров структуры.
4. Вычисление значения приращения границ проводника  $\partial n$  (по умолчанию используется значение 0,1 от минимального параметра структуры).
5. Вычисление поверхностного сопротивления проводника

$$R_s = \sqrt{\pi f \mu \rho}.$$

6. Построение геометрической модели поперечного сечения структуры при исходных параметрах.
7. Вычисление исходной матрицы погонных коэффициентов электромагнитной индукции  $\mathbf{L1}$ .
8. Расширение всех границ опорного проводника на  $\partial n$ .
9. Вычисление матрицы индуктивностей  $\mathbf{L2}$  для измененной структуры.
10. Вычисление  $\Delta \mathbf{L}_{j,k} = \mathbf{L1}_{j,k} - \mathbf{L2}_{j,k}$ .
11. Вычисление недиагональных элементов матрицы  $\mathbf{R}_{j,k}$

$$\mathbf{R}_{j,k} \Big|_{j \neq k} = \frac{R_s}{\mu_0} \left( \frac{-\Delta \mathbf{L}_{j,k}}{\partial n} \right), \text{ Ом/м.}$$

12. Вычисление диагональных элементов матрицы  $\mathbf{R}_{j,j}$  при  $j = 1$ .

13. Расширение всех границ  $j$ -го проводника.
14. Вычисление  $\mathbf{L2}_{j,j}$ .
15. Вычисление  $\Delta \mathbf{L}_{j,j} = \mathbf{L1}_{j,j} - \mathbf{L2}_{j,j}$ .
16. Вычисление диагональных элементов матрицы  $\mathbf{R}_{j,j}$

$$\mathbf{R}_{j,j} = \frac{R_s}{\mu_0} \left( \frac{-\Delta \mathbf{L}_{j,j}}{\partial n} \right), \text{ Ом/м.}$$

17. Восстановление исходных границ  $j$ -го проводника.

18.  $j = j + 1$ .

19. Повторение пунктов 13–17 для каждого из  $N$  диагональных элементов, поочередно расширяя поверхность вычисляемого проводника.

Его реализация в системе TALGAT также имеет свои особенности. Все вычислительные операции получения значений матрицы  $\mathbf{R}$  объединены в одну универсальную функцию, чтобы избежать дублирования строчек кода. В общем случае пользователь задает входные параметры алгоритма с помощью кода: размеры структуры, частоту, точность вычислений, параметры отображения результатов. В зависимости от того, было ли задано значение расширения границ проводника, оно устанавливается равным пользовательскому либо высчитывается программно как 0,1 от минимального параметра структуры. В цикле, обходящем все сегменты поперечного сечения, происходит ряд вычислений.

Сначала заполняется матрица кортежей трех элементов  $(t, w, h)$ , соответствующих толщине, ширине и высоте расположения проводника. Вычисления вынесены в отдельную функцию, в которой производятся алгебраические операции между минимальными и максимальными элементами по оси  $Y$  и  $X$ .

В случае соответствия сегмента заземленному элементу вычисляется значение погонного сопротивления опорного проводника  $\mathbf{R}_{g0} = \frac{1}{\sigma g t}$  на  $i$ -й

итерации. Полученная матрица  $\mathbf{R}$  хранится в памяти в виде отдельного массива.

Далее вычисляются значения погонного сопротивления сигнального проводника согласно (1).

Затем вычисляются координаты точек проводников, соответствующих минимуму и максимуму по осям. Вычисление происходит за счет сравнения их текущих значений с минимальными/максимальными значениями предыдущих итераций.

На следующем шаге происходит заполнение внедиагональных элементов матрицы  $\mathbf{R}$ . При наличии бесконечной земли значение  $\mathbf{R}_{g0}$  вычисляется как  $\frac{1}{\sigma S_{\text{общее}}}$ . В ином случае значения  $\mathbf{R}_{g0}$  берутся из

матрицы, полученной на предыдущем шаге. Значения главной диагонали увеличиваются на соответствующие значения  $\mathbf{R}_{g0}$ . Затем происходит вычисление границ перехода от низкой частоты к средней ( $f_0$ ) и от средней к высокой ( $f_s$ ).

На последнем этапе вычислений пользовательское значение введенной частоты сравнивается с

несколькими константными (0) и вычисленными ( $f_s$ ) значениями. При  $f$ , равном 0, расчет матрицы  $\mathbf{R}$  считается законченным, матрица отправляется на печать. В противном случае, расчет  $\mathbf{R}$  происходит по алгоритму Маттея [3]. В случае если  $f > f_{s\text{среднее}}$ , результат получен. В ином случае вычисляются  $F(f)$  по формуле (5). Диагональные элементы пересчитываются согласно (4).

Установленная точность вычислений влияет на количество знаков после запятой. Для вычисления матрицы  $\mathbf{R}$  в системе TALGAT необходимо вычислить матрицу SIAU с помощью команды SET «smn» SMN\_L conf\_ig. Затем вычислить матрицу  $\mathbf{R}$  с помощью команды SET «Rm» CALCULATE\_R smn conf\_ig f. Здесь переменная  $f$  определяет значение частоты, на которой необходимо вычисление. При указании  $f = 0$  вычисление происходит на постоянном токе. Глобальная переменная «delta\_n\_for\_r» определяет значение приращения границ проводника.

#### Апробация алгоритма

В результате работы был разработан обобщенный алгоритм. Для его апробации выполнена его программная реализация в системе TALGAT. Для тестирования использованы две структуры. Поперечное сечение первой приведено на рис. 1, а, где  $w = h = 2$  мм,  $t = 0,5$  мм. Результаты для частоты  $f = 10$  ГГц представлены в табл. 1.

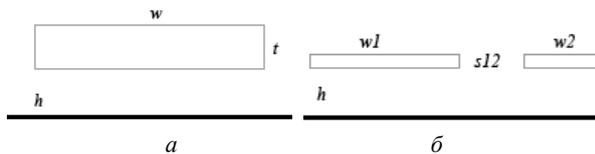


Рис. 1. Примеры одиночной (а) и связанных (б) линий передачи

Из табл. 1 следует, что сегментация слабо влияет на значение  $\mathbf{R}$ . Изменение значения  $\Delta l$  существенно только при переходе от 100 к 10. Сравнение

ручного и программного вычислений говорит о том, что программная реализация в системе TALGAT верна.

Выполнено сравнение результатов и для связанных МПЛ. Поперечное сечение представлено на рис. 1, б, где  $w_1 = 10$  мм,  $w_2 = s_{12} = h = 5$  мм и  $t = 1$  мм. Результаты для частоты  $f = 10$  ГГц приведены в табл. 2–4. На основании полученных данных также можно сделать вывод, что сегментация и  $\Delta l$  почти не влияют на значения элементов  $\mathbf{R}$ . Таким образом, алгоритм, реализованный в системе TALGAT, дает приемлемые результаты вычисления матрицы  $\mathbf{R}$ .

Таблица 1  
Сравнение ручного и программного вычислений значения  $R$  для одиночной МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении проводников на  $\Delta l$

$\Delta l$ , мкм	$R$ , Ом/м							
	Ручное вычисление, мкм				Программное вычисление, мкм			
	50	25	12,5	6,25	50	25	12,5	6,25
0,1	9,12403	9,12403	8,91667	9,12403	9,08166	9,08293	9,08344	9,08364
1	9,06182	9,08256	9,06182	9,08256	9,076	9,07727	9,07777	9,07797
10	9,02035	9,02865	9,0245	9,0245	9,02028	9,02151	9,022	9,02219
100	8,55337	8,54715	8,54445	8,54362	8,54131	8,54224	8,54261	8,54276

Таблица 2  
Значение  $R_{11}$  для связанных МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении проводников на  $\Delta l$ . Сравнение ручного и программного вычислений

$\Delta l$ , мкм	$R_{11}$ , Ом/м					
	Ручное вычисление, мкм			Программное вычисление, мкм		
	50	25	12,5	50	25	12,5
0,1	2,48837	2,28101	2,48837	2,45833	2,45849	2,45855
1	2,46764	2,4469	2,4469	2,45792	2,45808	2,45814
10	2,45519	2,45312	2,45312	2,45382	2,45398	2,45404
100	2,41642	2,416	2,4158	2,41547	2,41561	2,41566

Таблица 3  
Значение  $R_{22}$  для связанных МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении проводников на  $\Delta l$ . Сравнение ручного и программного вычислений

$\Delta l$ , мкм	$R_{22}$ , Ом/м					
	Ручное вычисление, мкм			Программное вычисление, мкм		
	50	25	12,5	50	25	12,5
0,1	3,73256	3,73256	3,73256	3,79811	3,79836	3,79846
1	3,79477	3,79477	3,79477	3,79701	3,79725	3,79735
10	3,78647	3,78855	3,78647	3,78604	3,78628	3,78638
100	3,6859	3,68487	3,68445	3,6838	3,68401	3,68409

Таблица 4  
Значение  $R_{12}$ ,  $R_{21}$  для связанных МПЛ при различной сегментации, полученное при возмущении опорного проводника на  $\Delta l$ . Сравнение ручного и программного вычислений

$\Delta l$ , мкм	$R_{12}, R_{21}$ Ом/м					
	Ручное вычисление, мкм			Программное вычисление, мкм		
	50	25	12,5	50	25	12,5
0,1	0,35252	0,37326	0,37326	0,363796	0,363808	0,363812
1	0,36289	0,36289	0,36496	0,363798	0,36381	0,363814
10	0,36372	0,36392	0,36392	0,36382	0,363832	0,363836
100	0,36403	0,36403	0,36405	0,364027	0,364038	0,364043

**Заключение**

Таким образом, в ходе работы реализован универсальный алгоритм, позволяющий выполнить расчет матрицы погонных сопротивлений  $R$  для разных частотных диапазонов. Алгоритм успешно апробирован и протестирован в системе TALGAT.

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

**Литература**

1. Заболоцкий А.М. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2016. – 288 с.

2. Мусабаяев Р.Р. Программная реализация алгоритма вычисления матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи в системе TALGAT / Р.Р. Мусабаяев, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск, Россия, 4–5 мая, 2017. – С. 16–18.

3. Matthaei G.L. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines /

G.L. Matthaei, G.C. Chinn // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 1992. – P. 1353–1354.

4. Djordjevic A.R. Closed-form formulas for frequency-dependent resistance and inductance per unit length of microstrip and strip transmission lines / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 2. – P. 241–248.

5. Djordjevic A.R. Closed-form formulas for frequency-dependent per-unit-length inductance and resistance of microstrip transmission lines that provide causal response / A.R. Djordjevic, M. Stojilovic, T.K. Sarkar // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2014. – P. 1604–1612.

**Квасников Алексей Андреевич**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: aleksejkvasnikov@gmail.com

**Куксенко Сергей Петрович**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: ksergp@tu.tusur.ru

УДК 51–74

**Б.С. Мухамбетжанова, Р.Р. Газизов****Локализация максимумов  $N$ -норм в шине печатной платы**

С помощью  $N$ -норм исследована шина печатной платы. Показаны местоположения максимальных значений норм на печатной плате. Выявлены узлы шины, в которых локализованы максимумы сразу двух  $N$ -норм.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, квазистатический анализ, печатная плата,  $N$ -нормы.

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) имеет тенденции к уменьшению ее внутренних конструкций, повышению плотности их монтажа, а также росту быстродействия протекающих в ней сигналов [1]. По этой причине важно ее имитационное моделирование, так как оно позволяет выявить и устранить ее недостатки еще на стадии проектирования [2].

Это особенно актуально для печатных плат (ПП), поскольку их проводники в общем случае расположены произвольно. В этой связи важны выявление и локализация экстремумов сигналов, так как их результаты могут быть полезны для определения мест возможных паразитных взаимовлияний и излучений, чтобы принять необходимые меры по их устранению [3].

Существует несколько подходов к моделированию РЭА [4]. Наиболее точным является электродинамический анализ. Однако он требует значительных вычислительных затрат. Есть схемотехнический анализ, но точность его вычисления не всегда приемлема с ростом частоты сигналов. Поэтому часто используют квазистатический анализ.

Разработаны методика и алгоритмы выявления и локализации экстремумов сигнала [5], реализованные в системе компьютерного моделирования TALGAT [6], и выполнен ряд исследований с использованием реализованной функциональности. Недавно в этой системе появилась новая возможность вычисления из временного отклика, специальных  $N$ -норм, используемых для определения возможности выхода из строя электронных компонентов [7] ( $N_2$  – дуговой пробой,  $N_3$  – пробой диэлектрика,  $N_4$  – повреждение оборудования,  $N_5$  – выгорание компонента). Разработанные методика и алгоритм [5] основаны на вычислении  $N_1$  (максимума сигнала), такое моделирование выполнено в большом объеме, но исследования с использованием остальных норм не выполнялись.

Цель работы – локализовать максимумы  $N$ -норм для активного проводника шины ПП.

Для исследования взята шина ПП из работы [8]. Принципиальная схема шины показана на рис. 1. Рассмотрено три случая разных длительностей воздействия в форме трапеции (3 нс; 300 и 159,3 пс) (рис. 2). Выбор именно таких параметров воздейст-