

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗОК ШИНЫ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ ПИКОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Р. Р. Газизов, М. Н. Кухаренко, Т. Р. Газизов

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-22-28

**Аннотация** – Отмечена актуальность использования генетических алгоритмов (ГА) для исследования пикового напряжения сверхкороткого импульса (СКИ) в шине печатной платы (ПП) системы автономной навигации (САН) космического аппарата. Моделировалось распространение вдоль проводников шины СКИ в форме трапеции. С помощью ГА оптимизировались параметры 10-ти нагрузок на концах проводников этой шины по критерию минимизации суммы пиковых напряжений в заданных узлах. Оптимизация запускалась по 10 раз со следующими параметрами: число особей в поколении – 3, 5, 7, 10; число поколений – 6, 8, 11, 26; коэффициент мутации – 0.1; коэффициент кроссовера – 0.5. С помощью оптимизации удалось уменьшить амплитуду сигнала в активной линии в 30 раз, при этом выявленные вдоль проводников максимумы не превышали значений до оптимизации. Показана хорошая сходимость полученных результатов.

**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс, печатная плата, оптимизация, генетические алгоритмы, электромагнитная совместимость, пиковое напряжение.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Распространение электрических сигналов в многопроводных линиях передачи (МПЛП) хорошо исследовано [1]. Однако особенности распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) вдоль проводников с высокой плотностью межсоединений печатных плат (ПП) изучены недостаточно, что может приводить к их неконтролируемому распространению [2]. Выявление и локализация пиковых значений сигнала важны, поскольку их результаты могут быть полезны для выявления более точных мест установки датчиков контроля полезных и мониторинга помеховых сигналов, что важно для повышения помехозащищенности и надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [3]. Кроме того, это может быть полезно для определения мест возможных паразитных взаимовлияний и излучений, чтобы своевременно принять меры по их устранению, для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

Для таких исследований целесообразно использовать не измерения, а компьютерное моделирование, поскольку необходимо получение форм сигнала в большом числе точек вдоль каждого проводника сложных структур. Помимо этого искажение сигнала импедансом измерителя сказывается на точности определения амплитуд напряжений. Для анализа межсоединений ПП используют квазистатический подход, поскольку схемотехнический анализ не всегда позволяет получить результаты достаточной точности, а электродинамический требует значительных вычислительных затрат. Теоретические основы квазистатического вычисления отклика для произвольной схемы из отрезков МПЛП описаны в работах [4, 5]. На основе данной теории разработаны алгоритмы вычисления временного отклика [6], которые позволяют вычислить значения токов и напряжений только в узлах схемы.

Ранее в [7, 8] были описаны основные выражения и алгоритм, позволяющие вычислить значения тока и напряжения в заданной координате вдоль каждого проводника отрезка МПЛП для произвольной схемы, на основе которых усовершенствовано вычисление временного отклика в системе TALGAT, а также рассмотрены меандровые линии с одним и двумя витками.

Поскольку в данных работах исследованы одиночные отрезки связанных линий, причем идеальных, было выполнено аналогичное исследование реальной шины ПП радиоприемного устройства (РПУ) системы автономной навигации (САН) [9], а также локализации максимума СКИ вдоль проводников шины при изменении граничных условий [10]. Исследование данной шины с фиксированным изменением длительности СКИ выполнено в [11], а с использованием оптимизации генетическими алгоритмами (ГА) в [12]. Также в работе [12] получены параметры СКИ, при которых значение максимума напряжения является наибольшим. Однако представляет интерес поиск с помощью ГА таких параметров нагрузок на концах проводников, при которых этот максимум был бы минимальным. Это целесообразно, поскольку у разработчика ПП есть определенная степень

свободы выбора параметров нагрузок. Таким образом, важно использовать эту возможность не только для полезных сигналов, но и для уменьшения помех в различных точках ПП.

Цель данной работы – выполнить оптимизацию параметров нагрузок на концах проводников шины ПП РПУ САН с помощью ГА по критерию минимизации суммы пиковых напряжений в местах подключения шины к другим элементам ПП.

### II. ТЕОРИЯ

Для вычисления значений напряжения и тока вдоль отрезка МПЛП используются уравнения в частотной области [7]:

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{S}_V (\mathbf{E}(x) \mathbf{C1} + \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{C2}), \quad (1)$$

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{S}_I (\mathbf{E}(x) \mathbf{C1} - \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{C2}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{S}_V$  – матрица модальных напряжений;  $\mathbf{S}_I$  – матрица модальных токов;  $\mathbf{E}(x)$  – диагональная матрица  $\{\exp(-\gamma_1 x), \exp(-\gamma_2 x), \dots, \exp(-\gamma_{N_k} x)\}$  и  $\gamma_{N_k}$  – коэффициенты распространения отрезка МПЛП, где  $N_k$  – число проводников  $k$ -го отрезка МПЛП;  $x$  – координата вдоль отрезка МПЛП;  $\mathbf{C1}$ ,  $\mathbf{C2}$  – векторы констант. Вычисление значений матриц  $\mathbf{S}_I$ ,  $\mathbf{S}_V$ ,  $\mathbf{E}(x)$  описано в [6].  $\mathbf{C1}$  и  $\mathbf{C2}$  вычисляются как

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C1} \\ \mathbf{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_V [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{E}(l) = \mathbf{E}(x)$  при  $x=l$  и  $l$  – длина отрезка МПЛП;  $\mathbf{V}(0)$  и  $\mathbf{V}(l)$  – векторы констант, описывающие напряжение на концах отрезка МПЛП, полученные после решения уравнения для схемы из  $n$  отрезков МПЛП с сосредоточенными элементами на концах отрезков:

$$\mathbf{V}(s) = \left( s \mathbf{W} + \mathbf{H} + \sum_{k=1}^n \mathbf{D}_k \mathbf{Y}(s)_k \mathbf{D}_k^t \right)^{-1} \mathbf{E}(s), \quad (4)$$

где  $s=j\omega$ ,  $\omega$  – угловая частота;  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{H}$  – матрицы размера  $A \times A$ , описывающие произвольные оконечные и соединительные схемы из активных и реактивных элементов ( $A$  – количество параметров, вычисляемых в модифицированном методе узловых потенциалов);  $\mathbf{D}_k$  – матрица-селектор, отображающая токи, входящие в  $k$ -й отрезок МПЛП, с элементами  $d_{i,j} \in \{0, 1\}$ , где  $i \in \{1, \dots, N_k\}$ ,  $j \in \{1, \dots, m_k\}$  с одним ненулевым значением в каждом столбце,  $m_k = 2 \cdot N_k$  – количество токов, входящих в  $k$ -й отрезок МПЛП;  $\mathbf{Y}(s)_k$  – матрица проводимостей для  $k$ -го отрезка МПЛП;  $\mathbf{V}(s)$  – вектор узловых напряжений;  $\mathbf{E}(s)$  – вектор, состоящий из независимых источников напряжения или токов.

Алгоритм, используемый для вычисления откликов, описан в работе [6]. Сначала исходное воздействие из временной области с помощью прямого быстрого преобразования Фурье (БПФ) переводится в частотную. Затем производятся вычисления по (1)–(4). Полученный результат из частотной области переводится во временную с помощью обратного БПФ.

### III. ИССЛЕДУЕМАЯ СТРУКТУРА

В качестве исследуемой структуры взята шина ПП РПУ САН из [12], фрагмент платы изображен на рис. 1, а ее принципиальная схема – на рис. 2. На концах каждого проводника шины включены сопротивления. Изгиб проводника приближенно моделировался емкостью 1 пФ, а переходное отверстие – индуктивностью 1 нГн.

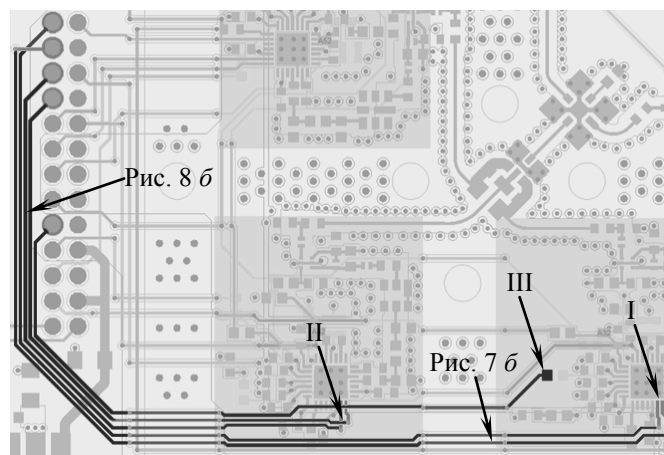


Рис. 1. Исследуемая шина на фрагменте ПП РПУ САН

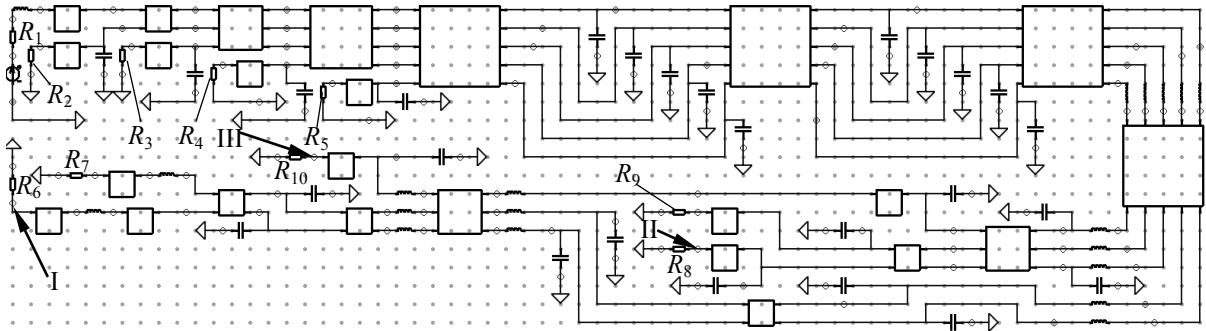


Рис. 2. Принципиальная схема шины ПП РПУ САН

Согласно параметрам стека печатной платы построены поперечные сечения каждого отрезка линий передачи и вычислены матрицы **L** и **C**. Потери в отрезках МПЛП не учитывались.

В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции, полученный в [12]. Длительность фронта равна 12,3 пс, вершины – 0,549 нс, спада – 12,14 пс, с амплитудой Э.Д.С. 1 В.

ГА основаны на теории естественного отбора Дарвина. ГА могут использовать реальное или двоичное кодирование. В двоичном кодировании каждая хромосома кодируется бинарной строкой [13]. Наиболее часто используемые операторы: кроссовер, мутации и отбор. Оператор отбора выбирает две хромосомы родителей из текущей популяции в соответствии со стратегией отбора. Наиболее популярными стратегиями отбора являются «рулетка» и «турнирный отбор». Оператор кроссовера комбинирует две родительские хромосомы, чтобы получить новую дочернюю хромосому. Оператор мутации применяется с предустановленной вероятностью к дочерней хромосоме. Использование ГА позволило уйти от полного перебора. ГА с бинарным кодированием запускался со следующими параметрами: коэффициент мутации – 0.1; коэффициент кроссовера – 0.5. Оптимизировалось 10 параметров – сопротивления в диапазоне от 1 до 200 Ом, при числе особей в поколении – 3, 5, 7, 10; количество поколений – 6, 8, 11, 26. Минимизировалась максимальная сумма пиковых значений напряжений в заданных узлах шины ПП РПУ САН, в месте подключения проводников шины к другим элементам ПП. Таким образом, цель оптимизации заключалась в том, чтобы определить такие значения резисторов, при которых сумма напряжений в узлах I, II и III (указаны на рис. 1 и 2) будет минимальна.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты работы ГА ( $U_{\min}$  – минимальное значение суммы пиковых напряжений в узлах I, II и III) при разных запусках и количестве ( $n$ ) вычислений целевой функции (равном произведению числа особей и числа поколений) представлены в табл. I.

ТАБЛИЦА I  
 $U_{\min}$  ПРИ РАЗНЫХ ЗАПУСКАХ И  $N$

№ запуска	$n$							
	18	30	33	55	56	60	110	260
1	0,428003	0,061105	0,052782	0,049948	0,077410	0,044938	0,043614	0,040659
2	0,081837	0,087071	0,282994	0,052152	0,153742	0,046894	0,765032	0,035245
3	0,584048	0,169733	0,077932	0,046553	0,094259	0,046491	0,084093	0,023072
4	0,120383	0,234133	0,059084	0,052289	0,072007	0,187201	0,059112	0,021620
5	0,356240	0,180381	0,046233	0,044385	0,085584	0,081958	0,061886	0,035501
6	0,104887	0,236146	0,046894	0,059200	0,143357	0,052289	0,043614	0,026478
7	0,130032	0,077144	0,043614	0,031226	0,059527	0,087968	0,046894	0,028024
8	0,114778	0,131745	0,052152	0,053707	0,071204	0,051224	0,059084	0,018190
9	0,413427	0,049128	0,187201	0,087968	0,054136	0,076503	0,059527	0,016395
10	0,122400	0,144220	0,153742	0,037011	0,037666	0,072007	0,054136	0,035083

Для каждой комбинации числа особей и количества поколений выполнено по 10 запусков ГА с целью проверить сходимость результатов целевой функции. На рис. 3 представлены графики сходимости значений  $U_{\min}$  при разном  $n$ . Зависимости минимальных значений напряжения от количества вычислений приведены на рис. 4.

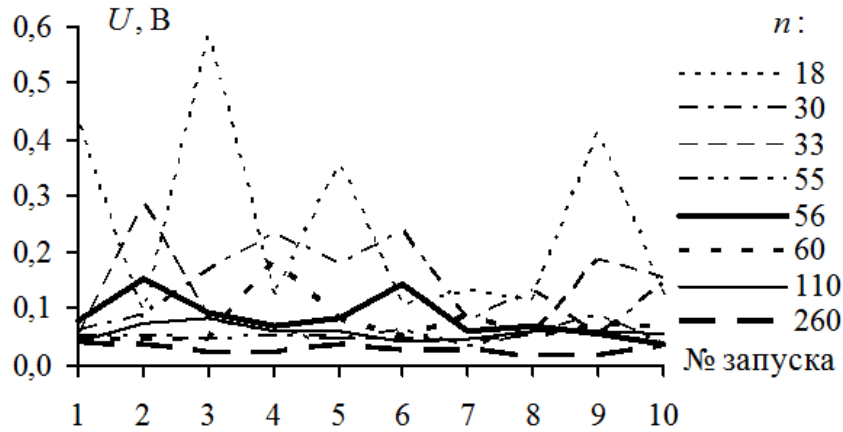


Рис. 3. Значения  $U_{\min}$  для 10-и запусков при разных  $n$

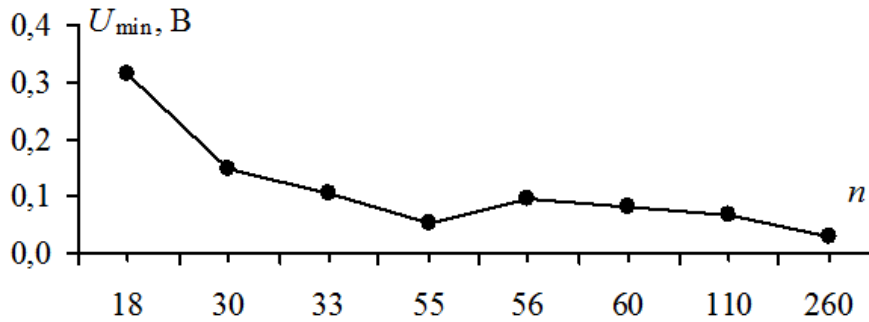


Рис. 4. Зависимость  $U_{\min}$  от  $n$

Для наилучшего значения результата целевой функции (запуск 9 при  $n$ , равном 260) приведены полученные сопротивления в табл. 2, а также получена форма сигнала в заданных точках с использованием этих параметров (рис. 5). Кроме того на рис. 6 приведена форма сигнала в этих же точках, но с использованием параметров до оптимизации.

ТАБЛИЦА 2  
ЗНАЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ  
ДЛЯ НАИЛУЧШЕГО РЕЗУЛЬТАТА ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Сопротивление	Значение, Ом
$R_1$	123,345
$R_2$	131,854
$R_3$	101,057
$R_4$	59,0162
$R_5$	30,9100
$R_6$	1,01822
$R_7$	74,8943
$R_8$	2,69743
$R_9$	174,438
$R_{10}$	3,61447

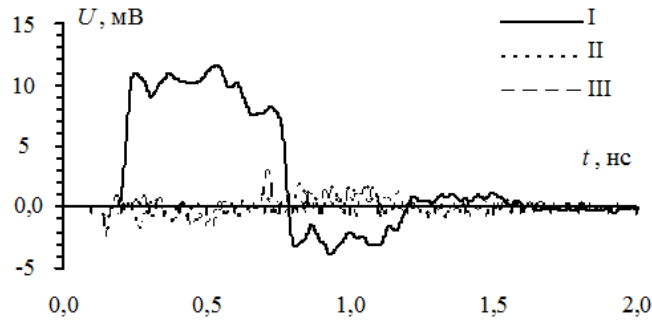


Рис. 5. Формы сигналов в точках I, II и III для наилучшего результата целевой функции

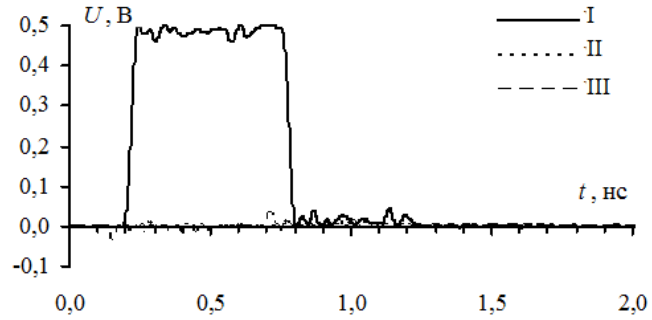


Рис. 6. Формы сигналов в точках I, II и III до использования оптимизации

Представляет интерес, что будет происходить с сигналом на протяжении всего проводника при полученных параметрах. Поэтому, используя эти параметры при наилучшем значении целевой функции, вычислены по 20 форм напряжений на последующих сегментах вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП из рис. 2. Однако представлены только формы в начале ( $U_b$ ) и конце ( $U_e$ ) проводника, а также с максимальными ( $U_{max}$ ) значениями напряжений. Приведены результаты только для активного проводника и одного пассивного (с наибольшей амплитудой перекрестной наводки). На рис. 7 *a* показаны формы напряжений вдоль активного проводника, а на рис. 7 *б* – место локализации максимума СКИ. На рис. 8 показаны аналогичные результаты для перекрестной наводки.

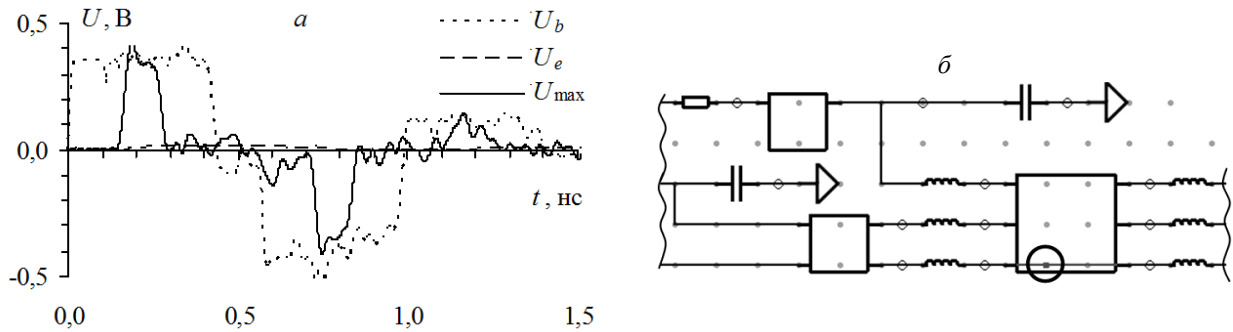


Рис. 7. Формы напряжений вдоль активного проводника (*a*) и локализация максимума напряжения (*б*)

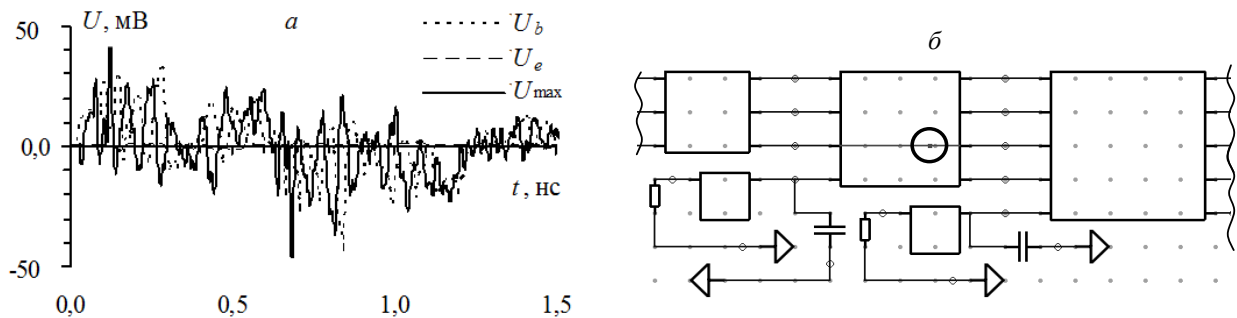


Рис. 8. Формы напряжений вдоль пассивного проводника (*a*) и локализация максимума напряжения (*б*)

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим результаты оптимизации в табл. 1. Видно, что при увеличении числа вычислений значение целевой функции уменьшается (что также показано на рис. 4), а графики сходимости показывают хорошую сходимость результатов, начиная со 110-и вычислений (рис. 3). Так, при наибольшем количестве вычислений сумма максимальных напряжений равна 16,395 мВ (Запуск 9 из табл. 1), что в 30 раз меньше амплитуды сигнала 0,5 В в активной линии до использования оптимизации (рис. 6).

Рассмотрим изменение форм напряжений вдоль проводников шины. Видно, что максимум напряжения в активной линии локализован в 15 сегменте шины, проходящей на другом слое, однако амплитуда этого сигнала составляет 0,48 В, что не превышает амплитуду установившегося уровня 0,5 В (до оптимизации). Следует заметить, что в этом проводнике после использования оптимизации появилось существенное отрицательное напряжение, составляющее минус 0,41 В. Максимум перекрестной наводки, локализованный в 14 сегменте, равен 50 мВ, что составляет 10% от уровня 0,5 В в активной линии (до оптимизации).

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование показывает актуальность применения оптимизации на основе ГА для выявления и локализации пиковых значений суммы нескольких сигналов при изменении параметров нагрузок. Так, использование оптимизации позволило уменьшить сумму пиковых значений амплитуд в 30 раз.

Результаты использования ГА показали возможность отказаться от полного перебора и решать более сложные задачи оптимизации, например, по влиянию длительностей СКИ на значения пиковых напряжений сразу на нескольких, как активных, так и пассивных проводниках ПП. Такой подход позволит минимизировать воздействие помех и исключить ложные срабатывания микросхем критичных устройств.

## VII. БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет проекта 8.9562.2017/8.9 Минобрнауки России в ТУСУРе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul C. Analysis of Multiconductor Transmission Lines. New York, NY: Wiley, 2007. P. 821.
2. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the Immunity of Computer Equipment to the Power-Line electromagnetic Interference // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. № 5. P. 546–550.
3. Орлов П. Е., Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М. Новая концепция создания интегрированных датчиков для контроля электромагнитной обстановки в бортовой аппаратуре космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 5. С. 20–23.
4. Djordjevic A. R., Sarkar T. K. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks // IEEE Trans. Microw. Theory Tech, 1987. Vol. 35, no. 10/ P. 898–907.
5. Achar R., Nakhla M. S. Simulation of high-speed interconnects // Proc. IEEE. 2001. Vol. 89, no. 5. P. 693–728.
6. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. Томск: Томский государственный университет, 2007. 152 с.
7. Газизов Р. Р., Заболоцкий А. М., Орлов П. Е. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT: докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2015. № 4 (38). С. 147–150.
8. Газизов Р. Р., Заболоцкий А. М., Газизов Т. Т. Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными проводниками: докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. Т. 19, № 1. С. 79–82.
9. Газизов Р. Р., Заболоцкий А. М., Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Локализация максимумов напряжения в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата // Труды МАИ. 2016. № 89. С. 1–9.
10. Gazizov R. R., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. Ultrashort pulse maximum localization in multiconductor structures // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, 14–16 November, 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819010.
11. Gazizov R. R., Zabolotsky A. M., Gazizov T. T., Belousov A. O. Influence of ultrashort pulse duration on its peak values localization in PCB of spacecraft autonomous navigation system // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai, 29 June–3 July, 2017. (в печати).
12. Gazizov R. R., Gazizov T. T., Belousov A. O., Gazizov T. R. Optimization of Ultrashort Pulse Duration with Usage of Genetic Algorithms by Criteria of Peak Voltage Maximization in PCB Bus // Proc. of IEEE 2017 Siberian Symposium on Data Science and Engineering (SSDSE) (Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 12–13 Apr. 2017. DOI: 10.1109/SSDSE.2017.8071967.
13. Haupt R. L., Werner D. H. Genetic Algorithms in Electromagnetics. New York, NY: Wiley-Interscience, 2007.