

7. Semenov E.S., Galich S.V., Tyukhtyaev D.A. Analiz i klassifikaciya zaderzhek voznikayushchih pri rabote protokola ARP v programmno-konfiguriruemym setyah [Analysis and classification of delays of ARP protocol in software-defined networks]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2015, no. 5, pp.217-228. doi: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-217-228.
8. Galich S.V., Deogenov M.S., Kartashevskii V.G., Pasiuk A.O., Semenov E.S. Issledovanie proizvoditelnosti pks-kontrollera OpenDaylight na setyah raznykh masshtabov [OpenDaylight SDN controller: a study of performance scaling on networks of different sizes]. *Izvestiya Juzhnogo Federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2016, no. 9, pp.121-134. doi: 10.18522/2311-3103-2016-9-121133.
9. Azizi M., Benaini R., Mamoun M.B. Delay Measurement in OpenFlow-enabled MPLS-TP Net-work. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 3, pp. 90-101. doi:10.5539/mas.v9n3p90.
10. Gorshenin A.K., Zamkovets S.V., Zakharov V.N. Parallelizm v mikroprocessorah [Parallelism in microprocessors]. *Systems and Means of Informatics*, 2014, vol. 24, no. 1, pp. 46-60. doi: 10.14357/08696527140102.
11. Guerin X., Tan W., Liu Y., Seelam S., Dube P. Evaluation of Multicore Scalability Bottlenecks in Enterprise Java Workloads. *Proceedings of the 2012 IEEE 20th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, VA, USA, 2012, pp. 308-317. doi:10.1109/MASCOTS.2012.43.
12. Chen K.-Y., Chag J. M., Hou T.-W. Multithreading in Java: Performance and Scalability on MultiCore Systems. *IEEE Transactions on Computers*, pp. 1521-1534. doi: 10.1109/TC.2010.232.
13. Amdahl G.M. Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities. *AFIPS '67 (Spring) Proceedings of the spring joint computer conference*. New York: ACM, 1967. pp. 483-485. doi: 10.1145/1465482.1465560
14. Amdahl G. Kompyuternaya arhitektura i zakon Amdala [Architecture of computers and Amdahl's law]. *Otkrytye sistemy*, 2014, no. 2, pp. 46-50.
15. Hill M.D., Marty M.R. Amdahl's Law in the Multicore Era. *Computer*, 2008, vol. 41, issue 7, pp. 33-38. doi: 10.1109/MC.2008.209.
16. Martin C. Multicore processors: challenges, opportunities, emerging trends. *Proc. Embedded World Conference 2014*, Nuremberg, Germany, pp. 1–9.
17. Vengainathan B., Basil A., Tassinari M. *Internet-Draft Benchmarking Methodology for SDN Controller Performance*. Available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-bmwg-sdn-controller-benchmark-meth-01> (accessed 16.03.2016).
18. Kolechkin A.O., Vladyko A.G. [Software for testing of controllers in software-defined net-works]. *Materialy 19 Mezhdunarodnoy Nauchnoy Konferencii «Raspredelemnnye kompyuternye i telekommunikacionnye seti: upravlenie, vychislenie, svyaz»* [Proc. 19th Int. Scient. Conf. «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications»]. Moscow, 2016, pp. 256-264.
19. Bagdasarov G.A., Dyachenko S.V., Olhovskaya O.G. [Program package MARPLE3D performance and scalability measurements]. *Preprint No.37 Keldysh Institute of applied mathematics*, Moscow, 2012. (In Russian). Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-37> (accessed 16.03.2016)
20. Akhter S., Roberts J. *Multi-Core Programming. Increasing Performance through Software Multi-threading*. USA, Intel Press, 2006. 336 p.

*Received 11.04.2017*

---

## ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

---

УДК 621.3.061

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПИКОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИГНАЛА В ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ

*Газизов Р.Р., Газизов Т.Т.*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, РФ*

*E-mail: timurtsk@gmail.com*

Рассмотрены особенности распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) и локализации пиковых значений напряжений вдоль многопроводной шины печатной платы (ПП) разными подходами: с помощью ручного подбора длительности СКИ и при помощи оптимизации. Проведено моделирование распространения СКИ в форме тра-

пеции вдоль проводников этой шины при разных количествах возбуждаемых проводников, а также при фиксированном изменении общей длительности СКИ (3; 0,3; 0,03 нс) и оптимизируемом генетическими алгоритмами (по критерию максимизации пикового значения напряжения). При фиксированном изменении выявлен и локализован максимум СКИ, на 20% превышающий установившийся уровень, а также минимум перекрестной наводки, составляющий минус 0,199 В (39,8% от установившегося уровня). Путем оптимизации выявлен и локализован максимум СКИ, на 38% превышающий установившийся уровень. Показано, что с уменьшением длительности СКИ наблюдаются значительные превышения сигнала как по максимуму, так и по минимуму, причем их локализация непостоянна: пиковые значения появляются в разных местах шины ПП, в том числе на разных ее слоях.

**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс, печатная плата, локализация, пиковые значения напряжений, генетические алгоритмы, оптимизация

## 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 схематехнический 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 [4-5]. На основе данной теории разработаны алгоритмы вычисления временного отклика [6], которые позволяют вычислить значения токов и напряжений только в узлах схемы.

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, приведены в [7]. В этой же работе выполнено исследование двухвитковой меандровой микрополосковой линии, показавшее необходимость более тщательного исследования. Поэтому был рассмотрен один виток в диапазоне параметров [8].

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]. Однако исследование данной шины с изменением длительности СКИ не было выполнено. Между тем исследование данной шины при изменении длительности СКИ особенно актуально для повышения быстродействия и помехоустойчивости РЭА. Так, для повышения быстродействия уменьшаются длительности полезных сигналов, тогда как длительности помеховых сигналов также становятся все меньше. Однако для исследований с изменением длительности СКИ целесообразно использовать оптимизацию, поскольку благодаря ей может быть рассмотрен более широкий диапазон длительностей СКИ, а полученные результаты будут более точны.

Так как вычисление пиковых значений СКИ может оказаться затратным по времени, а вариантов длительности СКИ может быть весьма большое количество, то целесообразно использование эволюционных алгоритмов (ЭА), а именно генетических алгоритмов (ГА). Известно, что использование ГА в задачах электродинамики и распространения радиоволн получило большое распространение среди исследователей. С каждым годом все больше работ, посвященных этой тематике, появляется в высокоцитируемых международных изданиях. Так, поиск в базе Scopus

дает 65762 публикации по результатам конференций и 94510 журнальных статей, связанных с ГА, в 1977-2016 гг. [11], что существенно превышает количество работ, где используются другие ЭА.

Цель данной работы – обобщить и представить в единой работе ряд недавних и новых результатов исследования локализации пиковых напряжений в шине ПП РПУ САН, а также их уровней при фиксированном изменении длительности СКИ и оптимизированном с помощью ГА по критерию максимизации пикового напряжения.

### Теоретические основы

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;  $x$  – координата вдоль отрезка МПЛП;  $N_k$  – число проводников  $k$ -го 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  $x = l$ , где  $l$  – 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:

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

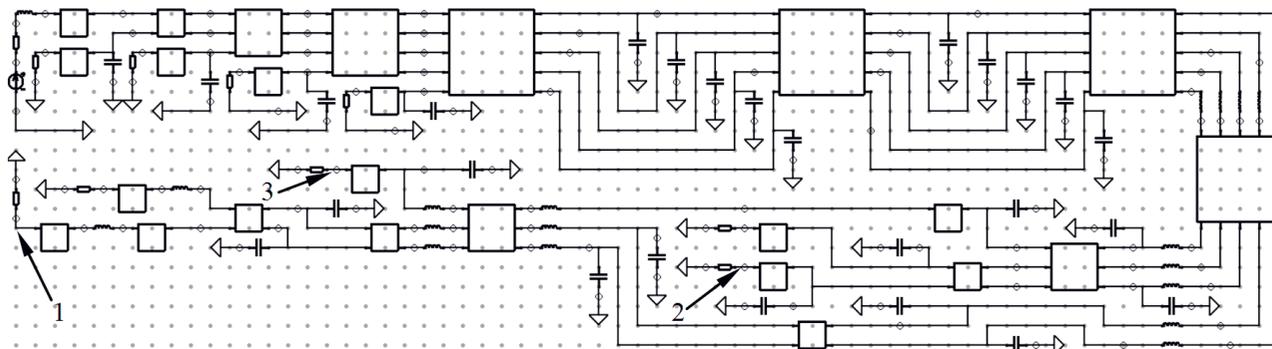


Рис. 2. Принципиальная схема ПП РПУ САН с исследуемой шиной

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 ( $A$  – число 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,  $m_k = 2 N_k$  – число токов, входящих в  $k$ -ый 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 [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.

В качестве исследуемой структуры выбрана шина ПП РПУ САН. Фрагмент платы изображен на рис. 1, а ее принципиальная схема – на рис. 2.

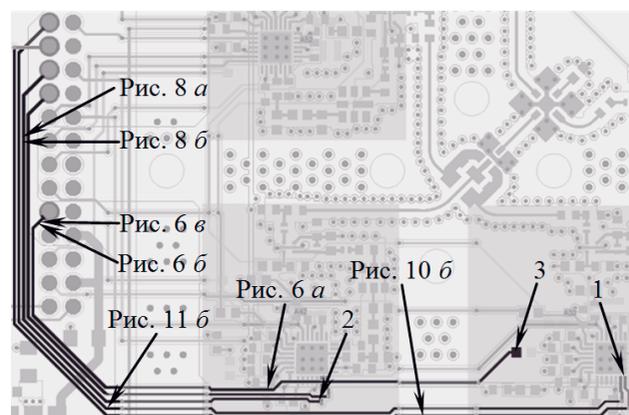


Рис. 1. Фрагмент ПП РПУ САН с исследуемой шиной

На концах каждого проводника шины включены резисторы 50 Ом. Изгиб проводника приближенно моделировался емкостью 1 пФ, а переходное отверстие – индуктивностью 1 нГн. Согласно параметрам стека печатной платы построены поперечные сечения каждого отрезка линий передачи и вычислены матрицы  $L$  и  $C$ . Потери в отрезках МПЛП не учитывались.

Рассмотрено три случая, отличающихся количеством и расположением генераторов. В случае №1 использовано два генератора, установленных на крайних проводниках (см. рис. 3а); в случае №2 – четыре генератора, когда третий (центральный) проводник был пассивным (см. рис. 3 б); в случае №3 использован один генератор, установленный на первом (верхнем на схеме) проводнике (см. рис. 3 в). На указанных рисунках генераторы отмечены стрелками. Исследование разделено на две части. Случаи №1 и №2 относятся к первой части исследования, а случай №3 – ко второй.

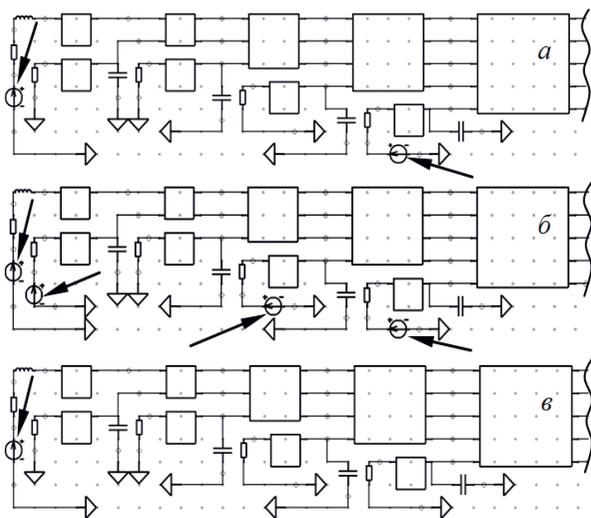


Рис. 3. Фрагмент схемы для случаев №1 (а), №2 (б) и №3 (в)

В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции с амплитудой ЭДС = 1 В. В первой части выбраны три длительности этого импульса, формы для каждой из которых представлены на рис. 4. Первый импульс  $U_1$  имеет длительности фронта, спада и вершины по 1 нс, второй  $U_2$  – по 100 пс, а третий  $U_3$  – по 10 пс, так что общая длительность импульсов составляет 3; 0,3 и 0,03 нс. Выбор этих параметров импульса обусловлен тем, что таким образом рассматриваются не только полезные сигналы, но и помеховые.

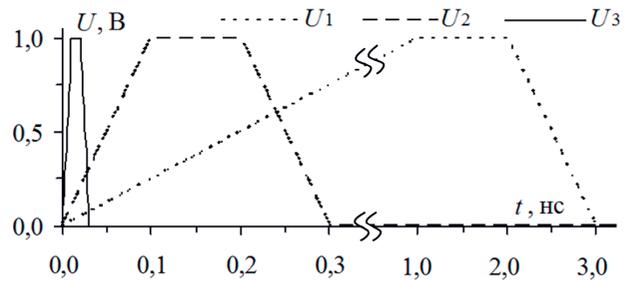


Рис. 4. Формы импульсов воздействий из первой части исследования

Во второй части исследования по отдельности изменялись длительности фронта  $t_f$ , плоской вершины  $t_d$  и спада  $t_f$  от 1 до 0,01 нс. Наиболее популярными среди ЭА ГА основаны на теории естественного отбора Дарвина, они могут использовать реальное или двоичное кодирование. В двоичном кодировании каждая хромосома кодируется бинарной строкой [12]. 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 реальным кодированием запускался со следующими параметрами: коэффициент мутации – 0,1; коэффициент кроссовера – 0,5. В первой части оптимизация не использовалась.

Во второй части исследования по отдельности оптимизировали длительности фронта, плоской вершины и спада в диапазоне от 1 нс до 10 пс, при числе особей в поколении – 3, 5 и количестве поколений – 5; 10; 50 и 75. Максимизировалась сумма пиковых значений напряжений на концах проводников шины ПП в точках 1; 2 и 3 (указаны стрелками на рис. 1 и рис. 2), в месте их подключения к другим элементам ПП. Целью оптимизации было определение значений длительности фронта, плоской вершины и спада СКИ, при которых сумма напряжений в указанных точках будет максимальна.

### Результаты моделирования

В первой части исследования вычислены по 20 форм напряжений МПЛП на последующих сегментах вдоль каждого проводника каждого

отрезка согласно рис. 2. Однако представлены только формы в начале  $U_b$  и конце  $U_e$  проводника, а также с максимальными  $U_{max}$  и минимальными  $U_{min}$  значениями напряжений, возникающих при каждом из воздействий.

Рассмотрим случай №1: с двумя генераторами на крайних проводниках. На рис. 5 показаны формы сигналов вдоль пятого проводника, а на рис. 6 – места пиковых значений этих сигналов.

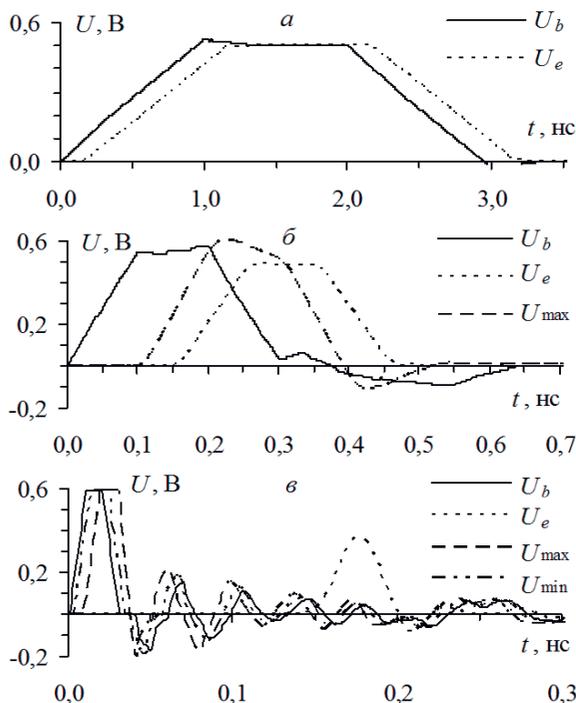


Рис. 5. Формы сигналов, полученные в случае №1, при воздействиях  $U_1$  (а),  $U_2$  (б) и  $U_3$  (в)

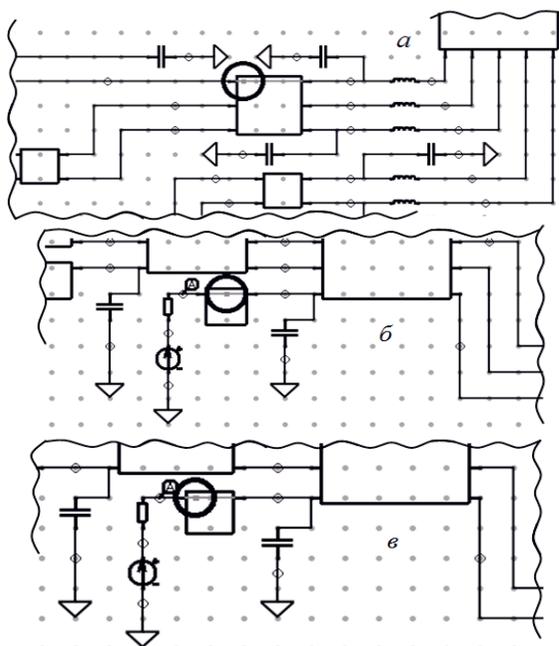


Рис. 6. Локализация максимумов (а и б) для сигналов из рис. 5 б и в, соответственно, а также минимума (в) для сигнала из рис. 5 в

Результаты моделирования для случая №2 (при четырех генераторах) представлены на рис. 7, а места пиковых значений – на рис. 8.

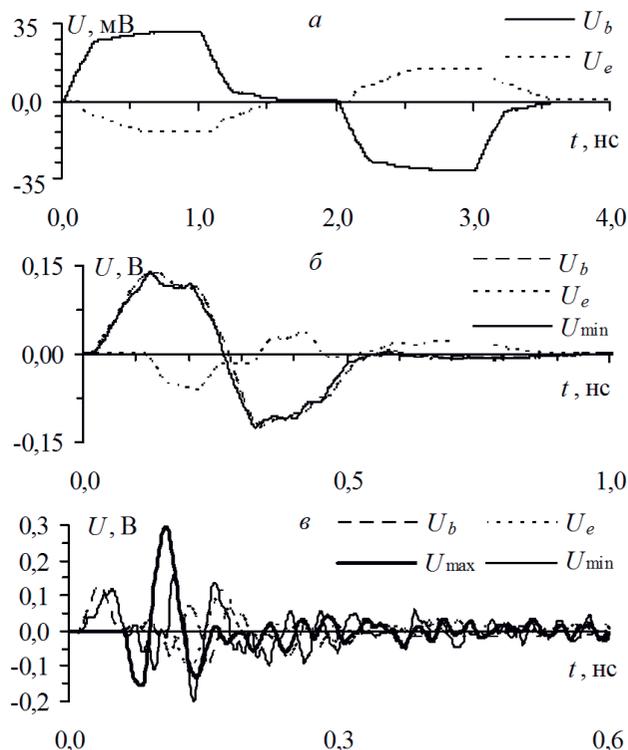


Рис. 7. Формы сигналов, полученные в случае №2, при воздействиях  $U_1$  (а),  $U_2$  (б),  $U_3$  (в)

Максимум сигнала совпадает с формой сигнала в узле при воздействии  $U_1$ , а минимумы – при  $U_1$  и  $U_2$ . Поэтому их формы и локализация не указаны на рис. 5 и рис. 6.

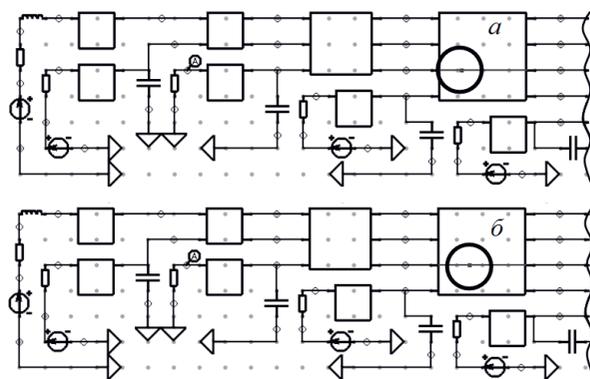


Рис. 8. Локализация минимумов для сигналов рис. 7 б (а) и рис. 7 в (б)

Рассмотрим воздействие полезного сигнала  $U_1$ . Для случая №1 с двумя генераторами выявлены пиковые значения, представленные на рис. 5а, однако их уровни и места совпадают с сигналами на концах проводника. Для случая №2 с четырьмя генераторами ситуация аналогична, поскольку выявленные

формы пиковых значений напряжений, представленные на рис. 7а, также совпадают с сигналами на концах проводника и локализованы в узлах схемы.

Рассмотрим помеховые сигналы (к которым можно отнести воздействия  $U_2$  и  $U_3$ ), длительность которых меньше, чем у полезных. Для случая №1 при воздействии  $U_2$  выявлен максимум напряжения, равный 0,6 В (см. рис. 5б), что на 20% превышает установившийся уровень 0,5 В. Он локализован в сегменте 17 в трехпроводной линии передачи, находящейся во второй половине шины ПП РПУ САН. При воздействии  $U_3$  аналогично выявлено два пиковых значения: максимальное, равное 0,593 В, что на 18% превышает установившийся уровень, и минимальное, равное -0,2 В (40% от установившегося уровня). Оба значения локализованы в одном отрезке линии передачи, ближайшей к источнику напряжения (рис. 6б и в). Отличия состоят только в номере сегмента: минимальное значение локализовано в сегменте 5, а максимальное – в сегменте 11. Кроме того, для этого воздействия, помимо появления пиковых значений напряжения, наблюдаются многократные отражения. Также наблюдается снижение амплитуды сигнала на выходе линии. На рис. 5в она составляет 0,4 В, что на 20% меньше уровня 0,5 В.

Для случая 2 все выявленные максимумы напряжений локализованы в узлах, а минимумы: при воздействии  $U_2$ , равный -0,126 В (25,2% от 0,5 В) – в сегменте 5, а при воздействии  $U_3$ , равный -0,199 В (39,8% от 0,5 В) – в сегменте 8.

Во второй части исследования для каждой комбинации числа особей и количества поколений выполнено по пять запусков ГА с целью проверить сходимость результатов целевой функции. На рис. 9 представлены графики сходимости значений  $U_{max}$  при разном количестве  $n$  вычислений целевой функции (равном произведению числа особей и числа поколений).

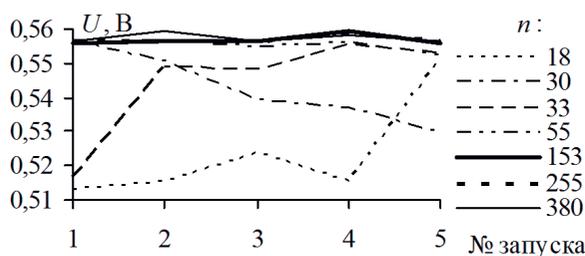


Рис. 9. Значения  $U_{max}$  для пяти запусков при разных  $n$

Используя полученные параметры при наибольшем значении целевой функции (при числе особей 5 и количестве поколений 75), вычислены по 20 форм напряжений на последующих друг за другом сегментах вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП из рис. 2. Так же, как и в первой части исследования,

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).

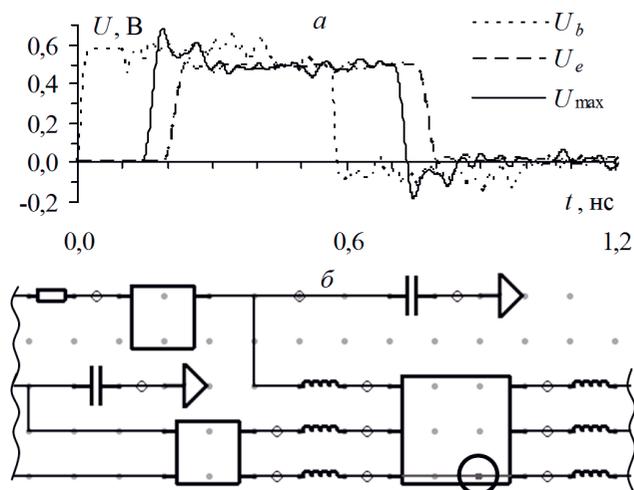


Рис. 10. Формы напряжений вдоль активного проводника (а) и локализация максимума напряжения (б)

На рис. 10а показаны формы напряжений вдоль активного проводника, а на рис. 10б – место локализации максимума СКИ. На рис. 11 а показаны формы напряжений вдоль пассивного проводника, а на рис. 11 б – место локализации максимума перекрестной наводки.

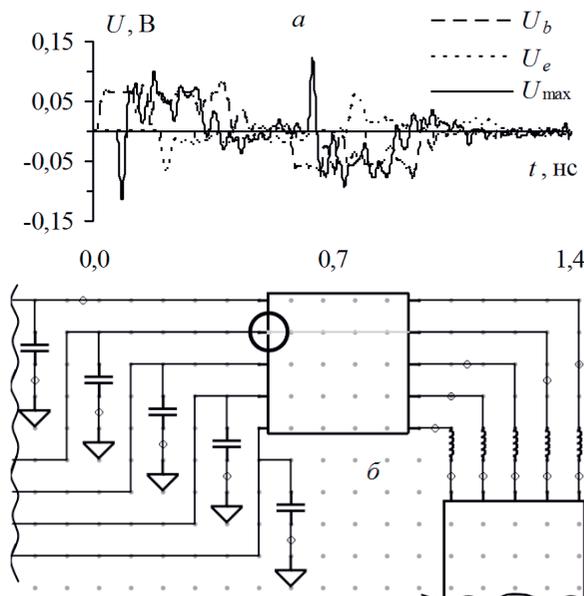


Рис. 11. Формы напряжений вдоль пассивного проводника (а) и локализация максимума напряжения (б)

При использовании оптимизированных параметров (малое время нарастания и спада и максимальная длительность плоской вершины),

полученных с числом особенностей 5 и количеством поколений 75, выявлен и локализован максимум напряжения в активном проводнике, равный 0,68 В (см. рис. 10а), что на 36% превышает установившийся уровень, причем он локализован в сегменте 6, на отрезке МПЛП из другого слоя ПП (см. рис. 10б). Кроме того, выявлен и локализован максимум перекрестной помехи, равный 0,12 В (см. рис. 11а), что составляет 24% от установившегося уровня, локализованный в сегменте 1 одной из пятипроводных линий передачи (см. рис. 11б).

### Заключение

Проведенное исследование показывает особенности появления и локализации пиковых значений СКИ с разными длительностями, а также создаваемых ими перекрестных наводок. Кроме того, показана актуальность применения оптимизации на основе ГА для выявления и локализации пиковых значений сигнала или суммы нескольких сигналов при воздействии СКИ с разными длительностями. Так, судя по результатам исследования, наибольшее значение максимума (равное 0,68 В) выявлено при использовании оптимизации, в то время как при фиксированном выборе длительностей СКИ наибольшее выявленное значение максимума составляет 0,6 В. Также выявлено наибольшее значение минимума (-0,199 В, что составляет 39,8% от 0,5 В) на проводнике 3 при общей длительности СКИ 0,03 нс. Учитывая, что максимально допустимый уровень перекрестных наводок в трассах печатных плат САН должен составлять не более 10% от амплитуды сигнала в активном проводнике, следует, что все выявленные пиковые значения (за исключением выявленных на проводнике 3 при воздействии  $U_1$ ) не удовлетворяют этому условию.

Из анализа результатов работы следует, что при длительностях СКИ, которые можно отнести к полезным, вдоль проводников отрезков МПЛП не выявлено пиковых значений. Видно, что для комплексного исследования печатной платы полезно рассматривать не только полезные сигналы, но и помеховые, поскольку при таких воздействиях наблюдаются более сильные изменения формы сигнала и их амплитуды. Кроме того, полезно и использование оптимизации для таких исследований. Это позволит повысить производительность и безотказность проектируемой радиоэлектронной аппаратуры.

В статье рассмотрено изменение в диапазоне параметров только одного воздействия, но легко рассмотреть и любые другие, например, элек-

тродинамический разряд, гауссов импульс и т.д. Кроме того, выполнено исследование только при изменении параметров воздействия, и не предпринимались попытки уменьшения выявленных максимумов напряжения, однако в дальнейшем целесообразно провести исследование по уменьшению уже выявленных максимумов путем внесения изменений в принципиальную схему и трассировку шины ПП РПУ САН. 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 КА.

### Литература

1. Paul C. Analysis of Multiconductor Transmission Lines. New York, NY: Wiley, 2007. – 821 p.
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. No. 5, 2016. – 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. №5, 2012. – 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. Vol. 35, No. 10, 1987. – P. 898-907.
5. Achar R., Nakhla M.S. Simulation of high-speed interconnects // Proc. IEEE. Vol. 89, No. 5, 2001. – P. 693-728.
6. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. Томск: ТомГУ, 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 // Доклады ТУСУР. № 4 (38), 20125. – 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 // Доклады ТУСУР. Т. 19, № 1, 2016. – 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. №89, 2016. – С. 1-9.
10. Gazizov R.R., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Ultrashort pulse maximum localization in multiconductor structures // In 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, 2016). – P. 1-5.
11. Goudos K., Kalialakis C., Mittra R. Evolutionary algorithms applied to antennas and propagation: A Review of State of the Art // Hindawi Publishing Corporation Int. J. of Antennas and Propagation Volume, 2016. – P. 1-12.
12. Haupt R.L., Werner D.H. Genetic Algorithms in Electromagnetics. New York, NY: Wiley-Interscience, 2007. – 320 p.

*Получено 15.03.2017*

**Газизов Руслан Рифатович**, аспирант, м.н.с. Кафедры телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Тел. 8 (8-382) 241-34-39. E-mail: ruslangazizow@gmail.com .

**Газизов Тимур Тальгатович**, к.т.н., с.н.с. Кафедры ТУ ТУСУР. Тел. (8-382) 241-34-39. E-mail: timurtsk@gmail.com

## SIGNAL PEAK VALUES LOCALIZATION IN PRINTED CIRCUIT BOARD OF AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEM

*Gazizov R.R., Gazizov T.T.*

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation*

*E-mail: timurtsk@gmail.com*

The present research highlights two different approaches to studying the features of ultrashort pulse propagation and voltage peak values localization along printed circuit board (PCB) multiconductor bus: fixed selection of an ultrashort pulse duration and an optimization. Trapezoidal ultrashort pulse propagation along the conductors of real PCB multiconductor bus was simulated. Using genetic algorithms (GAs), an optimization of the whole ultrashort pulse duration and severally of the rise, top and fall durations was made by criteria of peak voltage maximization in the PCB bus. A signal maximum revealed with the fixed selection of the ultrashort pulse duration by 20% exceeds the steady state level. A crosstalk minimum value of 39, 8% of the steady state level is revealed and localized. By optimization, a signal maximum of 38% higher than the steady-state level was identified and localized. The results show that significant signal excess is observed with decreasing of ultrashort pulse duration both at the maximum and at the minimum. The localization of voltage peaks tends to vary: peak values appear in different parts of PCB bus including different PCB layers.

**Keywords:** ultrashort pulse, printed circuit board, localization, voltage peak values, genetic algorithms, optimization

**DOI:** 10.18469/ikt.2017.15.2.10

**Gazizov Ruslan Rifatovich**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation; PhD student, Junior Research Fellow of the Department of Television and Control. Tel.: +73822413439. E-mail: ruslangazizow@gmail.com

**Gazizov Timur Talgatovich**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation; Senior Research Fellow of the Department Television and Control; PhD in Technical Science. Tel.: +73822413439. E-mail: timurtsk@gmail.com.

### References

1. Paul C. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. New York, NY: Wiley, 2007. 821 p.
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, no. 5, pp. 546–55. doi: 10.1134/S1064226916050053.

3. Orlov P., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. A new concept of development of integrated sensors for control of electromagnetic environment in spacecraft airborne. *Aviakosmicheskoye Priborostroyeniye*, 2012, no. 5, pp. 20–23. (In Russian)
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, pp. 898–907. doi: 10.1109/TMTT.1987.1133776.
5. Achar R., Nakhla M.S. Simulation of high-speed interconnects. *Proc. IEEE*, 2001, vol. 89, no. 5, pp. 693–728. doi: 10.1109/5.929650.
6. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. *Time response of multiconductor transmission lines*. Tomsk, Tomsk State University, 2007. 152 p.
7. Gazizov R.R., Zabolotsky A.M., Orlov P.E. Signal maximum localization in multiconductor transmission lines of printed circuit boards using TALGAT system. *Dokl. Tom. gos. un-ta system upr. i radioelektroniki*, 2015, vol. 38, no. 4, pp. 147–150. (In Russian)
8. Gazizov R.R., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T., «Research on ultrashort pulse propagation in microstrip C-section with variated separation between coupled conductors». *Dokl. Tom. gos. un-ta system upr. i radioelektroniki*, vol. 19, no. 1, pp. 79–82, 2016. doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-79-82. (In Russian).
9. Gazizov R.R., Zabolotsky A.M., Belousov A.O., Gazizov T.R. Voltage maximum localization in bus of printed circuit board of spacecraft autonomous navigation system. *Trudi MAI*, 2016, no. 89, pp. 1–9. (In Russian).
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, pp. 1–5. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819010.
11. Goudos K., Kalialakis C., Mitra R. Evolutionary algorithms applied to antennas and propagation: A review of state of the art. *Hindawi Publishing Corporation Int. J. of Antennas and Propagation Volume*, 2016, pp. 1–12, article ID 1010459. doi: 10.1155/2016/1010459.
12. Haupt R.L., Werner D.H. *Genetic Algorithms in Electromagnetics*. New York, NY: Wiley-Interscience, 2007. 320 p.

Received 15.03.2017

УДК 654.165

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УСЛУГ СОТОВОЙ СВЯЗИ В ТОМСКЕ

Шмаков Д.Б.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, РФ  
E-mail: dshrfc@gmail.com

Проведена комплексная оценка качества услуг сотовой связи стандартов GSM 900/1800, UMTS и LTE в Томске, а также оценка качества покрытия этих сетей. Представлены полученные на основе измерений данные об основных показателях качества услуг различных операторов сотовой связи. Сделаны выводы о фактическом качестве услуг сотовой связи в Томске.

**Ключевые слова:** качество связи, качество покрытия сетей сотовой связи

### Введение

Сотовая связь в современном мире имеет, безусловно, исключительно большое значение. Без преувеличения можно сказать, что практически каждый житель РФ сегодня является абонентом той или иной сети мобильной связи. По данным Минсвязи РФ, на конец 2015 г. телефонная плотность (проникновение) подвижной радиотелефонной связи на 100 чел. составляет 193,8 абонентских устройств [1].

Одним из важнейших направлений развития отрасли связи является обеспечение удовлетворенности потребителей качеством услуг связи и возможности осознанного выбора поставщиков услуг. Для реализации данного направления необходимо обеспечить решение задач управления качеством связи [2]. Исследования качества сотовой связи с использованием драйв-тестов нашли широкое применение в России и за рубежом: в Белоруссии [3], Англии [4], Германии [5] и других странах. Такие исследования проводят-