

Научная статья

УДК 621.3.049.75

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2-6>



Анализ обеспечения целостности сигнала на печатной плате при проектировании высокопроизводительных вычислительных устройств

**Александр Александрович Пирогов¹, Марина Владимировна Хорошайлова¹,
Николай Григорьевич Назаренко¹, Элеонора Викторовна Сёмка^{2✉}**

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

Аннотация. Проведен всесторонний анализ перекрестных помех между различными микрополосковыми структурами на печатных платах. В качестве метода анализа использовался метод конечных разностей во временной области, обеспечивающий точное моделирование распространения электромагнитных волн и, как следствие, перекрестных помех. Диапазон частот, охваченный моделированием, составлял до 10 ГГц. Этот широкий диапазон критически важен для оценки влияния перекрестных помех на высокоскоростные цифровые и аналоговые схемы, где паразитные эффекты могут существенно влиять на производительность.

Моделирование показало, что микрополосковые линии с двойным выступом снижают перекрестные помехи на дальнем конце более чем на 35 % по сравнению с параллельными линиями, но при этом увеличивают перекрестные помехи на ближнем конце более чем на 12 %. Линии с чередующимися выступами показали хорошие результаты в снижении на дальнем конце. Параллельные змеевидные микрополосковые линии уменьшили на дальнем конце более чем на 10 дБ и на ближнем конце примерно на 2 дБ, чем другие структуры. На основе параметров индуктивности и емкости проанализированы вносимые потери (100 МГц – 20 ГГц), на ближнем конце, собственное сопротивление в частотной и передача во временной области, с последующим сравнением трассировок с выступами и без них.

Разработан метод моделирования эквивалентной схемы трассировки с трапециевидными отрезками, основанный на сегментации. Предложенная модель верифицирована посредством 3D-электромагнитного моделирования и измерений в частотной области.

Ключевые слова: целостность сигнала, электромагнитные помехи, микрополосковые линии, перекрестные помехи, печатная плата, усеченные трапециевидные отрезки, метод конечных разностей во временной области

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003.

Для цитирования: Пирогов А. А., Хорошайлова М. В., Назаренко Н. Г., Сёмка Э. В. Анализ обеспечения целостности сигнала на печатной плате при проектировании высокопроизводительных вычислительных устройств // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 2. С. 47–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2-6>.

Original article

Signal integrity control analysis on printed circuit board in design of high-performance computing devices

Aleksandr A. Pirogov¹, Marina V. Khoroshailova¹,
Nikolay G. Nazarenko¹, Eleonora V. Syomka²✉

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin
Air Force Academy, Voronezh, Russia

Abstract. Crosstalk between different microstrip structures on printed circuit boards has been comprehensively analyzed. The finite difference time domain (FDTD) was used as the analysis method, providing an accurate simulation of electromagnetic wave propagation and, consequently, crosstalk. The frequency range covered by the modelling was up to 10 GHz. This wide range is critical for assessing the impact of crosstalk on high-speed digital and analogue circuits, where parasitic effects can significantly affect performance.

Simulations revealed that microstrip lines with double protrusions reduce far end crosstalk (FEXT) by more than 35% compared to parallel lines, but increase near end crosstalk (NEXT) by more than 12%. Lines with alternating protrusions showed good results in reducing FEXT. Parallel serpentine microstrip lines reduced FEXT by more than 10 dB and NEXT by about 2 dB than other structures. The insertion loss (100 MHz – 20 GHz), FEXT, intrinsic resistance in the frequency domain and transmission in the time domain were analyzed based on inductance and capacity parameters, followed by a comparison of traces with and without protrusions.

Segmentation-based method for modelling an equivalent trace pattern with trapezoid segments is developed. The proposed model is validated by means of 3D electromagnetic modelling and measurements in the frequency domain.

Keywords: signal integrity, electromagnetic interference, microstrip lines, crosstalk, printed circuit board, truncated trapezoid segments, finite difference time domain method

Funding: the work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment “Youth laboratory” No. FZGM-2024-0003.

For citation: Pirogov A. A., Khoroshailova M. V., Nazarenko N. G., Syomka E. V. Signal integrity control analysis on printed circuit board in design of high-performance computing devices. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(2):47–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2-6>.

ВВЕДЕНИЕ

Современные печатные платы сталкиваются с вызовами в области целостности сигналов, что требует применения специализированных методов компоновки и трассировки. Основная задача заключается в минимизации искажений сигнала при его передаче от источника к приемнику.

Для достижения этой цели применяются ключевые стратегии, включая разработку многослойной структуры, которая включает оптимизацию распределения питания, заземляющих проводников и сигнальных цепей. Кроме того, важной является грамотная подборка компонентов, что включает выбор конденсато-

ров, расчет импеданса, а также учет ограничений для цепей и дифференциальных пар.

При работе с высокоскоростными сигналами критически важно точно рассчитать импеданс для предотвращения отражений, снижения потерь и дисперсии, устранения перекрестных помех, минимизации излучательных потерь и обеспечения корректного уровня цифровых сигналов. Необходимо также учитывать влияние высокочастотных эффектов, вызванных паразитными компонентами и потерями, обусловленными шероховатостью меди.

Надежное заземление и его правильное размещение вблизи сигнальных проводников

играют ключевую роль. Правильная организация слоев и оптимальный выбор конфигурации слоев питания и заземления позволяют эффективно решать множество проблем, связанных с электромагнитной совместимостью и целостностью передаваемых сигналов.

Обеспечение целостности сигнала (ЦС) на печатной плате (ПП) критически важно для проектирования высокопроизводительных вычислительных устройств. С ростом частот и плотности компонентов, проблемы, такие как отражения, перекрестные помехи и потери мощности, оказывают существенное влияние на функциональность и надежность системы.

Анализ ЦС включает моделирование поведения сигналов, используя такие методы, как анализ во временной и частотной областях. Необходимо учитывать импеданс трасс, согласование нагрузок, развязку питания и заземления. Особое внимание уделяется проектированию дифференциальных пар, расположению компонентов и выбору материалов ПП с низкими диэлектрическими потерями.

Для минимизации проблем ЦС используются специализированные программные средства для моделирования и верификации. Валидация физического прототипа с помощью измерений параметров S-параметров, временной области (ВО) и анализа электрического поля подтверждает соответствие требованиям. Правильный анализ и проектирование ЦС гарантируют оптимальную производительность и надежность вычислительного устройства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование перекрестных помех (Crosstalk) на ближнем конце NEXT (Near-End Crosstalk) и дальнем конце FEXT (Far-End Crosstalk) на печатной плате (ПП) является критически важным этапом при проектировании высокопроизводительных вычислительных устройств. Метод конечных разностей во временной области (КРВО) предоставляет эффективный инструмент для анализа и уменьшения этих помех. В процессе моде-

лирования учитываются геометрия проводников, диэлектрические свойства материала ПП и характеристики сигналов [1–3].

Применение КРВО позволяет точно оценить амплитуду и форму импульсов NEXT и FEXT, возникающих из-за емкостной и индуктивной связи между линиями передачи. Результаты моделирования используются для оптимизации трассировки, добавления экранирующих слоев и подбора импеданса с целью минимизации перекрестных помех и обеспечения целостности сигнала. Валидация модели КРВО осуществляется путем сравнения результатов симуляции с измерениями на тестовых платах. Снижение уровня перекрестных помех улучшает производительность и надежность вычислительных устройств.

На рис. 1 представлены параллельные микрополосковые линии на печатной плате. В данном случае первая линия функционирует как источник помех (агрессор), а вторая линия подвергается воздействию этих помех (жертва), на которой возникают перекрестные интерференции.



Рис. 1. Параллельные линии проводников на печатной плате

Примечание: составлено авторами.

В описанных линиях источник сигнала находится на одном конце агрессора, в то время как его противоположный конец соединен с нагрузкой модулем 50 Ом. Перекрестные помехи NEXT и FEXT можно представить в виде различных индуктивных и емкостных связей.

Рис. 2 демонстрирует дорожки на печатных платах, одна сторона микрополосковой линии которой касается воздуха.

На диэлектрическом слое формируются дорожки, а заземление располагается на нижней стороне этого слоя. Линии имеют одинаковую ширину (W) и равную длину (L), при этом подложка характеризуется диэлектриче-

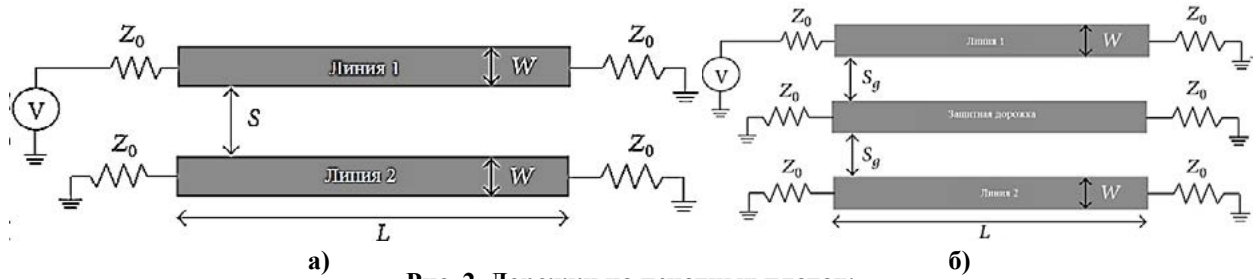


Рис. 2. Дорожки на печатных платах:
 а) параллельные линии проводников на печатной плате;
 б) линии проводников на печатной плате с защитной дорожкой
 Примечание: составлено авторами.

ской проницаемостью ϵ_r и толщиной H , а проводник – толщиной t и шириной W . Расстояние между линиями обозначается буквой S .

На рис. 2а представлены стандартные параллельные микрополоски, расположенные с интервалом S , при этом индуктивная связь между ними значительно превышает емкостную. Один из способов уменьшить перекрестные помехи – увеличить расстояние между линиями агрессора и жертвы, но это снижает плотность упаковки. Другой метод – вставка защитной трассы между этими линиями на расстоянии S_g (рис. 2б), что помогает уменьшить помехи. Защитная трасса имеет те же размеры, что и линии агрессора и жертвы, чтобы минимизировать сложности, однако может привести к несбалансированности импеданса. Альтернативным решением может быть использование сквозной защитной трассировки, но это не всегда подходит при общей плате.

Чередующаяся микрополосковая линия представляет собой альтернативную маршру-

тизацию для снижения перекрестных помех, где трассы приближены к пропорциональным линиям, что видно на рис. 3а. На рис. 3б представлена микрополосковая линия с переменными выступами, прикрепленными вертикально как к линиям агрессора, так и к линиям жертвы.

Использование КРВО открывает возможности для решения электромагнитных задач в одномерных, двумерных и трехмерных пространствах. Этот подход основан на модифицированных уравнениях Максвелла, применяемых с центральными разностями для получения приближенных решений.

В отличие от частотной области, где уравнения Максвелла решаются для конкретных частот, КРВО решает их непосредственно во временной области, предоставляя решения, изменяющиеся во времени, для электромагнитных полей. Этот подход особенно полезен для анализа широкополосных сигналов и переходных процессов, когда частотный анализ может быть громоздким.

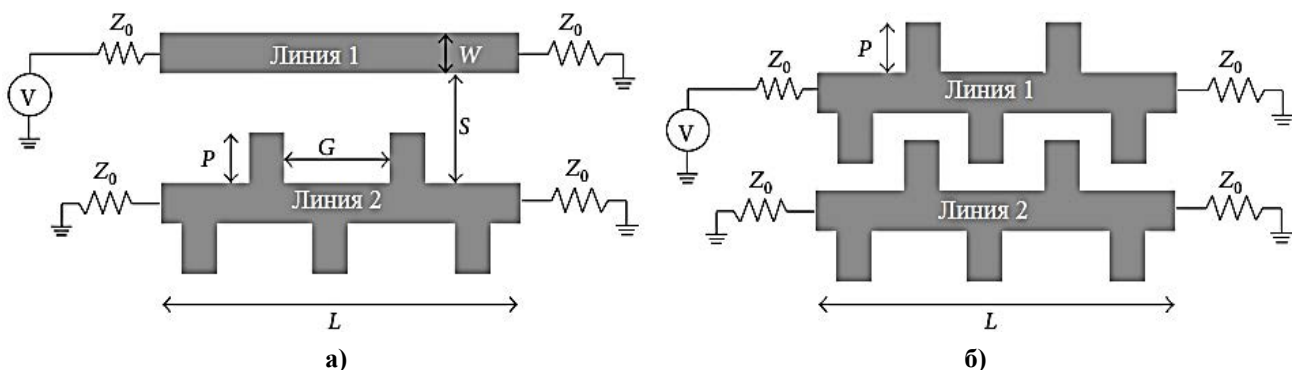


Рис. 3. Микрополосковая линия с переменными выступами:
 а) конфигурация с одним выступом; б) конфигурация с двойным выступом
 Примечание: составлено авторами.

Ключевыми уравнениями, используемыми в методе КРВО, являются закон Ампера и закон Фарадея, представленные в дифференциальной форме. Эти уравнения устанавливают взаимосвязь между изменениями электрического поля и магнитного поля и наоборот. В КРВО пространство и время дискретизируются, что позволяет заменить дифференциальные операторы на централизованные разностные аппроксимации, тем самым обеспечивая численное решение уравнений Максвелла.

Приведенные ниже уравнения Максвелла применяются для анализа электрических и магнитных полей во временной области (1)–(3):

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times E = \frac{\partial D}{\partial t} + J, \quad (2)$$

где D – напряженность электрического поля, а B – плотность магнитного потока, которые могут быть записаны через E и H как

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon E, \\ B &= \mu H, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ обозначает проницаемость, а ε – диэлектрическую проницаемость. Структура предполагалась без потерь, среда изотропная и однородная.

Эта дискретизация приводит к набору алгебраических уравнений, которые могут быть решены итеративно для вычисления значений электрического и магнитного полей в каждой точке сетки в каждый момент времени. Для обеспечения точности и стабильности решения необходимо соблюдать критерий Куранта – Фридрихса – Леви (CFL), который связывает размер шага по времени с размером ячейки сетки.

На рис. 4 представлена система передачи данных в запоминающем устройстве, которая состоит из центрального процессора (ЦП), ПП и двойного модуля памяти (DIMM). В этом контексте особое внимание уделяется ключевым аспектам ЦС.

В этой системе возникают проблемы с ЦС в высокоскоростном канале передачи данных, которые обусловлены потерями в канале, пересечениями на дальних границах и несоответствием импедансов. Проектирование таких каналов должно принимать во внимание указанные недостатки. Для увеличения ско-

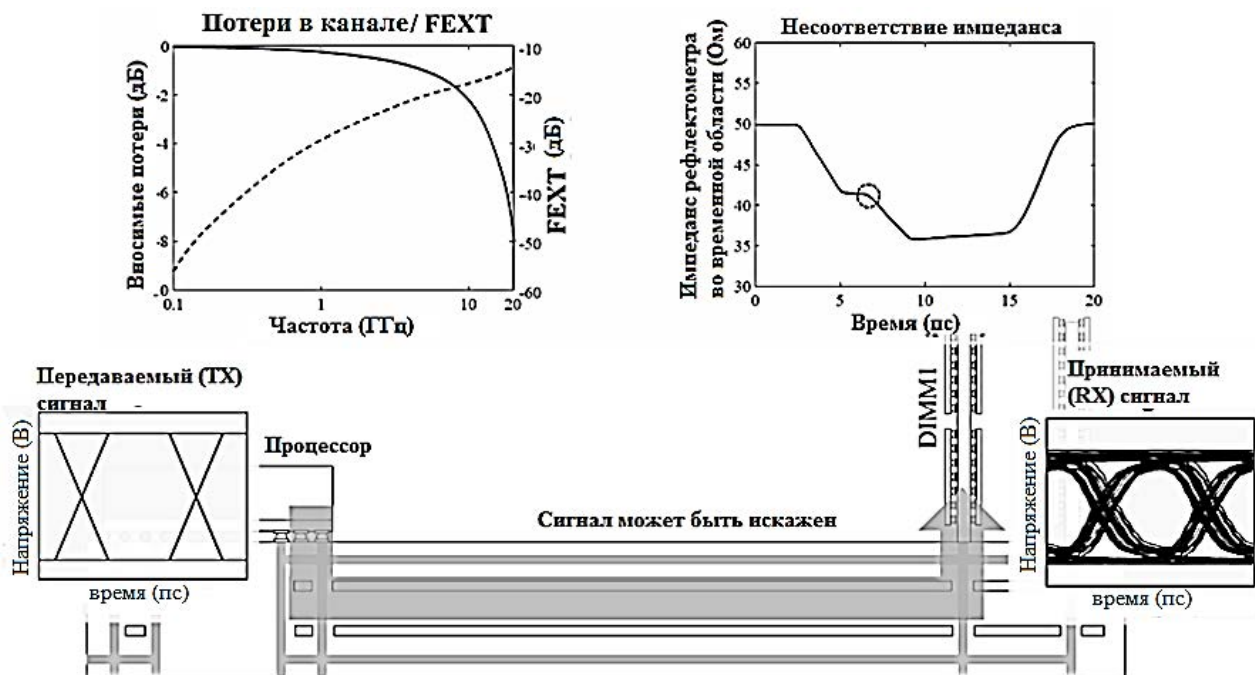


Рис. 4. Нарушение целостности пути передачи сигнала в запоминающем устройстве

Примечание: составлено авторами.

рости передачи в системе памяти необходимо уменьшить задержку в высокоскоростном канале. Кроме того, важно контролировать рефлектометрию во ВО и снизить потери, а также FEXT. В ограниченном пространстве высокая плотность каналов вызывает ухудшение передачи данных. В контексте высокопроизводительных серверных плат, используется конструкция трассировки, известная как *tabbed routing*, которая представляет собой эффективный метод для оптимизации целостности сигнала. *Tabbed routing* использует стратегическое размещение проводников, создавая своего рода «вкладки» или ответвления вдоль основной трассы, при таком методе трассировки проводники располагаются слоями и соединяются между собой через межслойные переходы (виа). Это позволяет более эффективно использовать доступное пространство платы, уменьшить перекрестные помехи и минимизировать длину трасс, что критически важно для высокоскоростных сигналов [4].

Ключевым элементом этой конструкции является применение усеченных трапециевидных отрезков. Эти усеченные отрезки выполняют двойную функцию: во-первых, они минимизируют FEXT, эффективно подавляя нежелательные электромагнитные помехи между соседними сигналами. Во-вторых, усеченные трапециевидные отрезки способствуют стабилизации импеданса трассы. Контролируемый импеданс критически важен для предотвращения отражений сигнала, которые могут привести к искажениям и снижению производительности.

В совокупности *tabbed routing* с использованием усеченных трапециевидных отрезков обеспечивает более чистый и стабильный путь сигнала, что особенно важно в средах, где скорость и надежность передачи данных имеют первостепенное значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 указаны параметры структуры и их определения.

Таблица 1

Структурные параметры, используемые при проектировании высокоскоростного канала передачи сигналов с использованием усеченных трапециевидных отрезков

Параметр	Определение
wchannel	Ширина канала без выступа
schannel	Расстояние между каналами
lwtab	Длинная ширина на выступе
swtab	Короткая ширина на выступе
ltab	Длина выступа
stab	Расстояние между выступами

Примечание: составлено авторами.

Рис. 5а демонстрирует верхний и боковой виды маршрутизации с одним блоком трапециевидных отрезков. На рис. 5б в сегментах А и Б ширина канала может варьироваться из-за конструктивных особенностей трапециевидного выступа. В отличие от стандартной линии передачи, маршрутизация с выступами требует моделирования с использованием одноэлементного выступа для оптимального сохранения сигнала.

Каждый сегмент представляет собой несимметричные связанные микрополосковые линии с изменяющейся шириной канала. Важные параметры сигнальной трассы, такие

как потери, FEXT и ВО, зависят от размеров микрополосковой линии.

В связи с этим выполнение анализа трассировки с трапециевидными выступами оказывается более сложным, что обуславливает необходимость моделирования по методу сегментации, как показано на рис. 5б. Расчет емкости и индуктивности производится с учетом изменения ширины и площади связанной микрополосковой линии. Кроме того, для границы между выступами рассчитывается дополнительная емкость края, которая учитывается в эквивалентной модели.

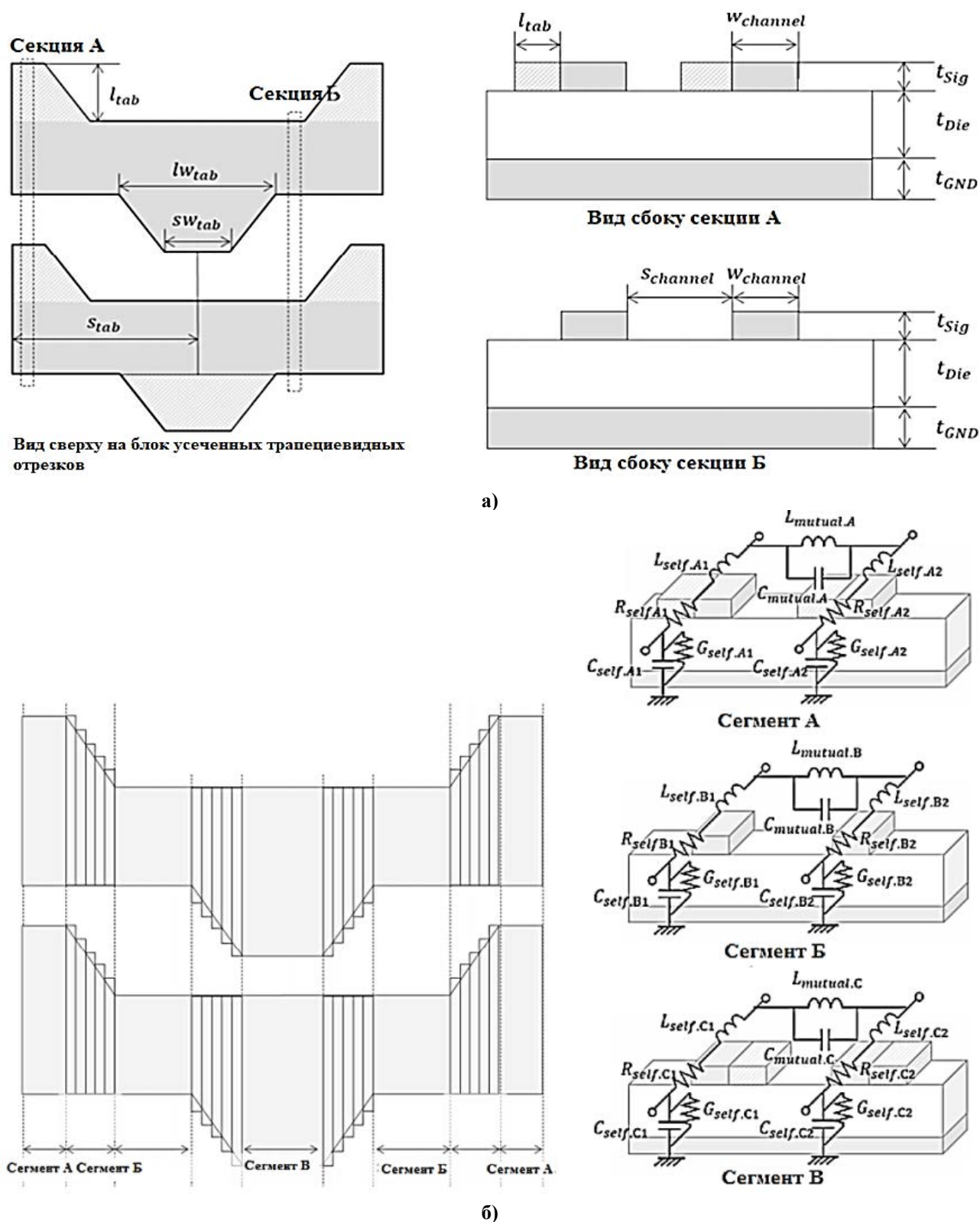


Рис. 5. Виды маршрутизации с одним блоком трапецевидных отрезков:
а) виды сверху и сбоку одноблочной трассировки с трапецевидными отрезками и структурными параметрами;

б) изображение метода сегментации для моделирования маршрутизации с трапецевидными отрезками с помощью эквивалентной схемы RLC

Примечание: составлено авторами.

Значения матрицы индуктивности определяются в однородной среде на основе емкости для парной микрополосковой линии, исключая влияние границы выступа.

Таким образом, в данной статье представлен усовершенствованный метод моделирования трассировки с использованием трапецевидных отрезков и метода сегментации, приведенный на рис. 6.

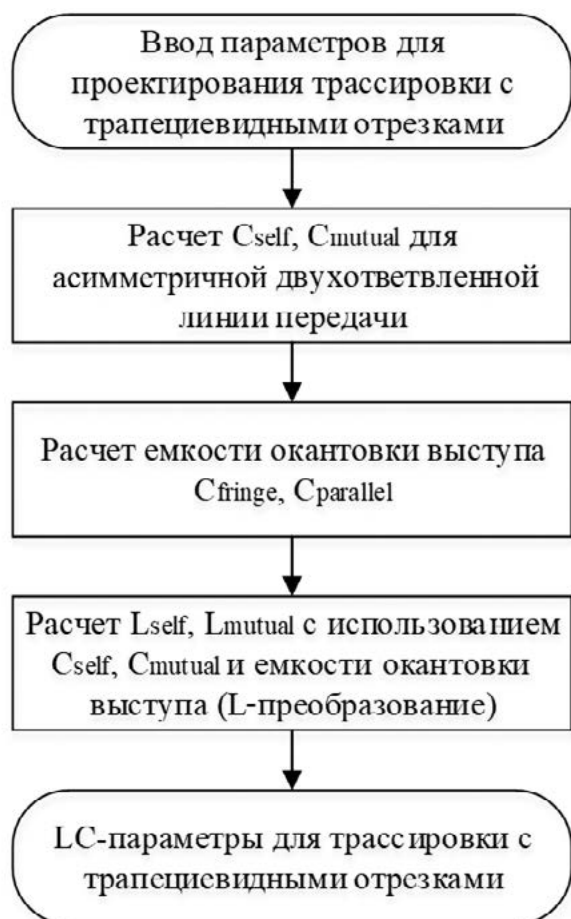


Рис. 6. Блок-схема разработанной методики трассировки с трапецевидными отрезками, основанной на методе сегментации
 Примечание: составлено авторами.

Величины собственной и взаимной емкостей несимметрично связанной микрополосковой линии вычисляются на основе эталонного уравнения, полученного из физических параметров проектирования маршрутизации с фиксированными выступами, как указано в табл. 1.

Во-вторых, емкость края C_{fringe} рассчитывается с применением фиксированных физических параметров разработки трассировки с трапецевидными отрезками. На следую-

щем этапе значения собственной и взаимной емкостей определяются путем вычисления матрицы на основе ранее полученных результатов расчета емкостей и емкости края. Также было введено понятие «L-преобразование» для расчетов матрицы индуктивности, которая включает в себя взаимную емкость и емкость, ограниченную выступами. Используя рассчитанные значения индуктивности и емкости наряду с параметрами сопротивления и проводимости, возможно создать одноблочную модель трассировки с трапецевидными отрезками.

Параметры полной емкости представлены на рис. 7 и зависят от конструктивных характеристик асимметричной микрополосковой линии.

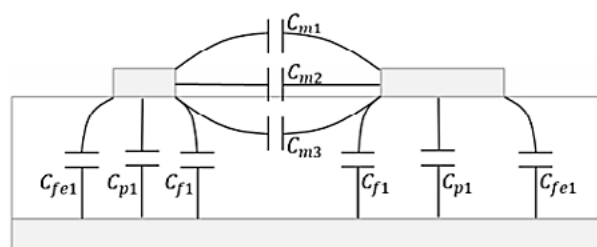


Рис. 7. Вид поперечного сечения соединенных асимметричных микрополосковых линий и параметры емкости
 Примечание: составлено авторами.

Матрица емкости C для двухполосной микрополосковой линии имеет вид (4)–(7):

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} + C_m & -C_m \\ -C_m & C_{22} + C_m \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$C_{11} = C_{f1} + C_{p1} + C_{fe1}, \quad (5)$$

$$C_{22} = C_{f2} + C_{p2} + C_{fe2}, \quad (6)$$

$$C_m = C_{m1} + C_{m2} + C_{m3}. \quad (7)$$

Матрица C в (4) представляет собой не зависящее от частоты значение, где C_{11} , C_{22} , C_m показывают значения собственной емкости линии 1 и линии 2 на землю и взаимную емкость между линиями 1 и 2 соответственно.

На втором этапе рассчитывается окаймляющая емкость выступа. Результат распределения электрической трассировки с трапецевидными отрезками представлен на рис. 8.

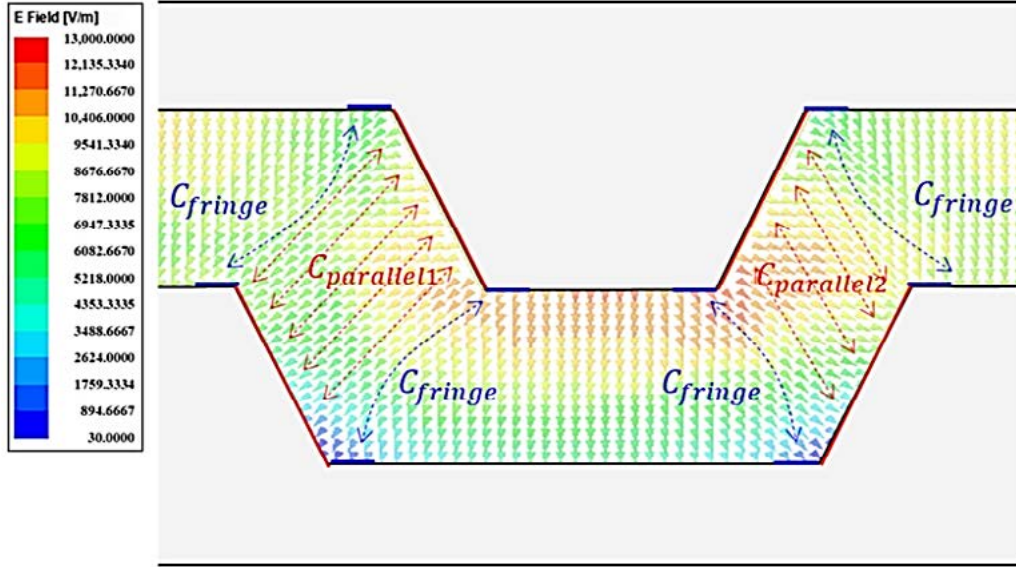


Рис. 8. Моделирование электромагнитного поля для трассировки с трапециевидными отрезками

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В общем случае вектор электромагнитного поля микрополосковой линии генерируется в направлении, перпендикулярном направлению электромагнитной волны.

Для косоного уклона параллельные поверхности обращены друг к другу, и $C_{parallel}$ можно рассчитать с использованием (8)–(9):

$$C_{parallel} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{t_{sig}}{d_{tab}}, \quad (8)$$

$$d_{tab} = \sqrt{(s_{channel} - l_{tab})^2 + \left(s_{tab} - \frac{lw_{tab} + sw_{tab}}{2}\right)^2}. \quad (9)$$

Для учета наклонного электронного поля, которое создается соседними трапециевидными отрезками, можно ввести дополнительные взаимные емкости C_{fringe} и $C_{parallel}$ [5]. Это позволит более точно смоделировать эффект выступов, используя описанные ранее два этапа. Однако для повышения устойчивости моделирования вводится дополнительный шаг. Расчет матрицы индуктивности двухсвязной асимметричной микрополосковой линии L может быть выполнен по (10).

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_m \\ L_m & L_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_s^2} U_{2 \times 2} C_{air}^{-1}. \quad (10)$$

Эта матрица учитывает как самоиндуктивность каждой полоски, так и взаимную индуктивность между ними. Используя (10), можно рассчитать матрицу емкости C двухсвязной

асимметричной микрополосковой линии. Эта матрица включает в себя емкость каждой полоски по отношению к земле и взаимную емкость между полосками.

Объединяя матрицы L и C , полученные на предыдущих этапах, можно сформировать матрицу импеданса Z . Эта матрица импеданса учитывает как индуктивные, так и емкостные эффекты микрополосковой линии. Затем матрица импеданса Z используется в моделировании для определения характеристик распространения сигнала по микрополосковой линии, включая потери и задержки [6–8].

Таким образом, предложенный метод моделирования позволяет более точно учитывать влияние выступов на характеристики микрополосковой линии за счет введения дополнительных этапов и использования матриц индуктивности и емкости. Это приводит к более стабильным и надежным результатам моделирования.

Анализ целостности сигнала при трассировке с трапециевидными отрезками проводился с изменением параметров конструкции при изменении параметра длины выступа l_{tab} , C_{fringe} и $C_{parallel}$. Результаты вносимых потерь, FEXT и импеданса ВО отображаются и сравниваются на рис. 9.

При изменении параметра l_{tab} параметры C_{fringe} и $C_{parallel}$ изменяются одновременно.

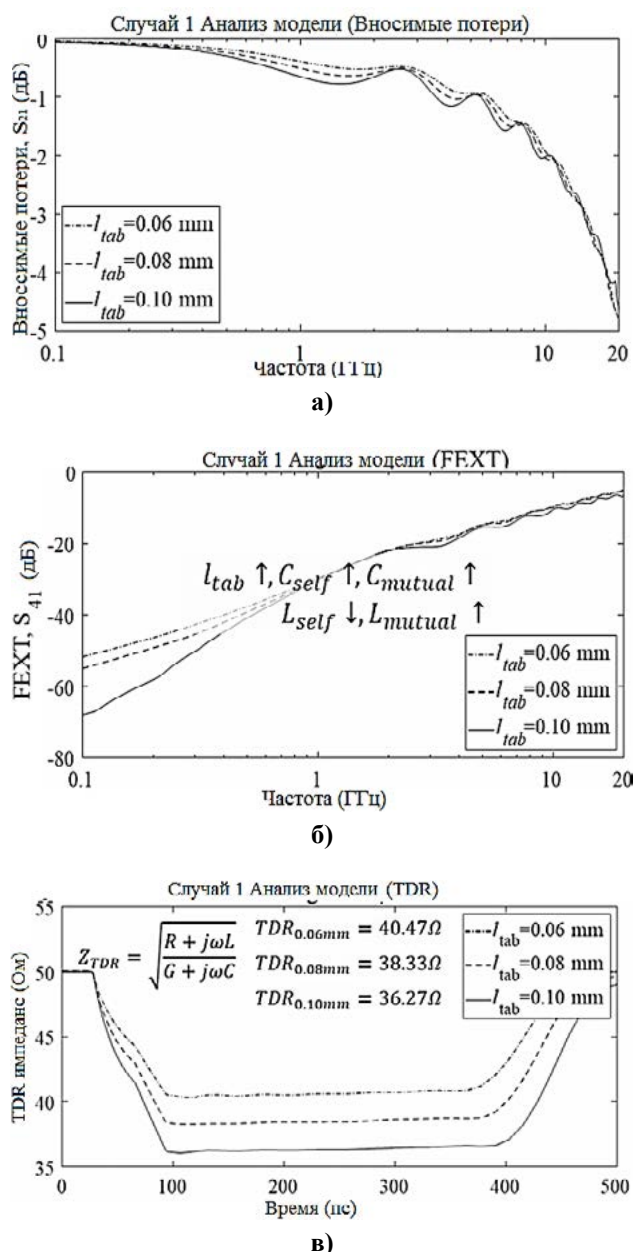


Рис. 9. Анализ вносимых потерь и FEXT в частотной области:
 а) вносимые потери; б) FEXT;
 в) результаты импеданса ВО для изменения l_{tab}
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Список источников

- Li L., Wu Z., Yang K. et al. A novel miniature single-layer eighthmode siw filter with improved out-of-band rejection // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2018. Vol. 28, no. 5. P. 407–409. <https://10.1109/lmwc.2018.2813883>.
- Packianathan R., Srinivasan R. Comparative study of crosstalk reduction techniques in RF printed circuit board using FDTD method // *International Journal*

Таким образом, с увеличением l_{tab} увеличиваются значения взаимной и собственной емкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа и моделирования можно сделать вывод о значительном влиянии структуры микрополосковых линий на перекрестные помехи и потерю сигналов в высокочастотных приложениях. Применение трассировки с трапецевидными отрезками направлено на снижение перекрестных помех FEXT. В этом процессе электрическая длина настраивается с помощью рефлектометра и анализа сигналов во временной области. В отличие от традиционных каналов, где ширина и расстояние стабильны, в трассировке с трапецевидными отрезками эти параметры изменяются от сегмента к сегменту, что, в свою очередь, сказывается на значениях емкости и индуктивности.

В представленной работе разработан метод моделирования эквивалентной схемы трассировки на основе сегментационного подхода. Эта модель позволила провести анализ трассировки с трапецевидными отрезками с учетом различных расчетных параметров, основанных на собственной и взаимной емкости и индуктивности.

Учитывая возросший интерес к высокопроизводительным вычислительным системам, возникает необходимость проектирования высокоскоростных каналов передачи сигналов в высокочастотном диапазоне с минимальными потерями, что играет ключевую роль в обеспечении надежной передачи данных.

References

- Li L., Wu Z., Yang K. et al. A novel miniature single-layer eighthmode siw filter with improved out-of-band rejection. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2018;28(5):407–409. <https://10.1109/lmwc.2018.2813883>.
- Packianathan R., Srinivasan R. Comparative study of crosstalk reduction techniques in RF printed circuit board using FDTD method. *International Journal*

- of Antennas and Propagation. 2015. 9 p. <https://doi.org/10.1155/2015/294590>.
3. Турецкий А. В., Хорошайлова М. В., Шамсуддин Н. Х. Обеспечение целостности сигнала в высокоскоростном вычислительном устройстве // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем : сб. науч. тр. Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2023. С. 199–205.
 4. Хорошайлова М. В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14, № 2. С. 99–105.
 5. Al-Araji Z. H., Swaikat N. A., Muratov A. et al. Modeling and Experimental Research of Vibration Properties of A Multi-Layer Printed Circuit Board // Proceedings of 4th Scientific International Conference Najaf (SICN), 2019. IEEE, 2019. P. 43–47.
 6. Release 2022 R1 Highlights. Ansys Sherlock & Electronics Reliability. URL: https://www.econengineering.com/wp-content/uploads/2022/01/sherlockandelectronics_2022_ansys_econ_engineering.pdf (дата обращения: 05.04.2025).
 7. Ling B., Wei K., Wang Z. et al. Experimentally Program Large Magnitude of Poisson's Ratio in Additively Manufactured Mechanical Metamaterials // International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 173. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105466>.
 8. Wang C., Gu X., Zhu J. et al. Concurrent Design of Hierarchical Structures with Three-Dimensional Parameterized Lattice Microstructures for Additive Manufacturing // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2020. Vol. 61. P. 869–894.
 - of Antennas and Propagation. 2015. 9 p. <https://doi.org/10.1155/2015/294590>.
 3. Turetskiy A. V., Khoroshailova M. V., Shamsuddin N. Kh. Obespechenie tselostnosti signala v vysokoskorostnom vychislitel'nom ustroystve. In: *Collection of Scientific Articles "Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i system"*. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2023. p. 199–205. (In Russ.).
 4. Horoshaylova M. V. Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018;14(2):99–105. (In Russ.).
 5. Al-Araji Z. H., Swaikat N. A., Muratov A. et al. Modeling and Experimental Research of Vibration Properties of A Multi-Layer Printed Circuit Board. In: *Proceedings of 4th Scientific International Conference Najaf (SICN)*, 2019. IEEE; 2019. p. 43–47.
 6. Release 2022 R1 Highlights. Ansys Sherlock & Electronics Reliability. URL: https://www.econengineering.com/wp-content/uploads/2022/01/sherlockandelectronics_2022_ansys_econ_engineering.pdf (accessed: 05.04.2025).
 7. Ling B., Wei K., Wang Z. et al. Experimentally Program Large Magnitude of Poisson's Ratio in Additively Manufactured Mechanical Metamaterials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;173. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105466>.
 8. Wang C., Gu X., Zhu J. et al. Concurrent Design of Hierarchical Structures with Three-Dimensional Parameterized Lattice Microstructures for Additive Manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020;61:869–894.

Информация об авторах

А. А. Пирогов – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>,
Pirogov.alx@gmail.com

М. В. Хорошайлова – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>,
pmv2205@mail.ru

Н. Г. Назаренко – старший преподаватель;
ua3qkc@mail.ru

Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>,
semka_elya@mail.ru✉

About the authors

A. A. Pirogov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>,
Pirogov.alx@gmail.com

M. V. Khoroshailova – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>,
pmv2205@mail.ru

N. G. Nazarenko – Senior Lecturer;
ua3qkc@mail.ru

E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>,
semka_elya@mail.ru✉