



Научная статья

УДК: 621.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188270>

EDN: <https://www.elibrary.ru/ULUFUI>

ЕДИНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ И ПРОИЗВОДСТВА СЛОЖНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

А.В. Назаров , Е.А. Лийн  , Т.Х. Чан

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия

 elijn@bk.ru

Цитирование: Назаров А.В., Лийн Е.А., Чан Т.Х. Единый подход к оптимизации конструкции и производства сложных печатных плат на основе модифицированного метода Монте-Карло // Труды МАИ: электрон. журнал. № 148.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188270>

Аннотация. Несмотря на обилие систем автоматизированного проектирования печатных плат, ни одна из них не содержит эффективных инструментов автоматического размещения компонентов, удовлетворяющего специфическим требованиям, предъявляемым к радиоэлектронным средствам авиационной и ракетно-космической техники. В таких изделиях критически важны минимальная масса и габариты, высокая надёжность, а также строгое ограничение суммарной длины межсоединений для обеспечения требуемых электрических характеристик и электромагнитной совместимости. Обычно системы для решения этой задачи используют интерактивные методы размещения. В результате время проектирования возрастает, а решение остаётся далёким даже от квазиоптимального. Причинами сложившейся ситуации являются факториальная сложность задачи и её большая размерность (число элементов $n > 100$). Дело осложняется ещё и тем, что вычислительная сложность расчёта суммарной длины связей для каждого из N вариантов размещения насчитывает n^2 умножений, что

доводит число вычислительных операций до $(n^2 \times n!) / 2$. В работе предлагается модификация классического метода Монте-Карло, позволяющего за приемлемое время получить квазиоптимальное размещение элементов печатных плат, соответствующее жёстким требованиям, характерным для бортовой аппаратуры. Ключевым отличием предложенного подхода является связь между этапом проектирования и производственной реализацией: минимизация суммарной длины связей напрямую влияет на сокращение времени сборки, снижение числа переналадок оборудования и повышение коэффициента загрузки производственных ресурсов. Это позволяет уже на стадии проектирования количественно оценивать производственную эффективность компоновки и выбирать такие варианты размещения, которые максимизируют вероятность выполнения сменно-суточного задания в условиях мелкосерийного приборостроительного производства. Проведено сравнение эффективности предложенного алгоритма с известными алгоритмами размещения других алгоритмов на конкретных примерах. Результаты показывают, что модифицированный метод Монте-Карло обеспечивает сокращение суммарной длины связей почти в 2,2 раза по сравнению с классическим подходом. Работа также демонстрирует потенциал интеграции в агентно-ориентированные системы проектирования, что делает её актуальной для современных производственных и исследовательских задач.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования; автоматическое размещение элементов на печатной плате; метод статистических испытаний; минимизация суммарной длины связей; NP-полная задача; оптимизация производственных процессов.

PLACEMENT OF COMPONENTS ON COMPLEX PRINTED CIRCUIT BOARDS USING A MODIFIED MONTE-CARLO METHOD

A.V. Nazarov , E.A. Lijn  , H.T. Trung

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

 elijn@bk.ru

Abstract. Despite the abundance of printed circuit board (PCB) computer-aided design (CAD) systems, none of them provides efficient tools for automatic component placement that meet the stringent requirements imposed on radioelectronic equipment used in aviation and rocket-space technology. In such applications, minimal mass and dimensions, high reliability, and strict limitations on total interconnect length are critical to ensure required electrical performance and electromagnetic compatibility. Typically, existing CAD systems address this problem using interactive placement methods. As a result, design time increases significantly, and the resulting placement remains far from even quasi-optimal. This situation stems from the factorial computational complexity of the placement problem and its high dimensionality (number of components ($n > 100$)). The challenge is further exacerbated by the fact that evaluating the total interconnect length for each of the N placement variants requires approximately n^2 multiplication operations, leading to an overall computational complexity of about $(n^2 \times n!) / 2$.

This paper proposes a modification of the classical Monte Carlo method that enables obtaining a quasi-optimal PCB component placement within acceptable computation time while satisfying the rigorous constraints typical of onboard avionics and spaceborne electronics. The key distinction of the proposed approach lies in establishing a direct link between the design phase and production implementation: minimizing the total interconnect length directly reduces assembly time, decreases the number of equipment setup changes, and increases the utilization rate of production resources. This allows quantitative assessment of manufacturing efficiency already at the design stage and enables selection of placement alternatives that maximize the probability of successfully completing shift-daily production assignments in the context of small-batch instrument manufacturing.

A comparative analysis of the proposed algorithm's efficiency against well-known placement algorithms is carried out on specific, application-relevant examples. The results demonstrate that the modified Monte Carlo method reduces the total interconnect length by nearly a factor of 2.2 compared to the classical approach. The study also

demonstrates the potential for integration into agent-based design systems, making it highly relevant for contemporary industrial and research challenges.

Keywords: computer-aided design (CAD) system; automatic component placement on a printed circuit board; Monte Carlo method; minimization of total interconnect length; NP-complete problem; production process optimization.

Введение

В настоящее время при разработке печатных плат высокой сложности и сверхбольших интегральных схем на размещение компонентов уходит время, на порядок большее, чем на синтез межсоединений [1–3]. Причина состоит в том, что задача трассировки решается, как правило, в автоматическом режиме, что обеспечивается либо конструкцией топологических слоёв, либо добавлением их числа. Задачу же размещения элементов обычно решают с помощью интерактивных средств систем автоматизированного проектирования (САПР). Несмотря на многочисленные попытки решить эту задачу в автоматическом режиме, она остаётся проблематичной и актуальной до настоящего времени [4, 5]. Например, в системе SPECCTRA реализован алгоритм последовательного размещения, выполняющийся в автоматическом режиме. Однако его эффективность, как известно, очень низкая.

Интересно отметить, что сама постановка задачи размещения — будь то компонентов на плате или оборудования в цехе — имеет общую природу: речь идёт о минимизации расстояний, сокращении переходов и повышении общей эффективности системы за счёт оптимального пространственного распределения ресурсов с учётом накладываемых ограничений [6]. В случае производства печатных плат именно качество размещения элементов определяет не только электрические характеристики изделия, но и технологичность его изготовления, включая длительность сборки, частоту переналадок и загрузку оборудования. Таким образом, задача размещения элементов на плате выступает не только как конструкторская, но и как производственная проблема, от решения которой

напрямую зависит возможность выполнения сменно-суточного задания в условиях мелкосерийного приборостроения [7].

Формальное решение задачи размещения элементов на плате сводится к переборным процедурам [8] различных вариантов перестановок с вычислением суммарной длины связей (СДС) для каждого варианта. Такие алгоритмы позволяют либо получить локальный минимум СДС (методы и/или групповых парных перестановок), либо улучшить качество наперед заданного размещения (перестановки Штейнберга). Попытка же решить проблему методом полного перебора (метод «грубой силы») сталкивается с невозможностью дождаться результата уже при $n > 13$ из-за факториальной сложности этой задачи [9].

Для минимизации СДС применяются алгоритмы мультиплицирования расчётной модели. При малом количестве элементов на плате ($n < 25...30$) эффективно применение алгоритма ветвей и границ и квазиоптимальных методов, позволяющих получить приближенное решение поставленной задачи за приемлемое время. В монографии [10] можно найти систематическое изложение подобных алгоритмов. Так же представляет интерес алгоритм «модельной закалки» [11, 12], или «алгоритм отжига», который позволяет решать *NP*-полные задачи за приемлемое время для нескольких сотен вершин. К сожалению, результаты применения метода отжига для решения задачи размещения авторам найти не удалось. В известных же зарубежных публикациях приводятся результаты его применения на этапе автоматической сборки платы [13–15], в которых размещение уже известно и решается задача оптимизации работы оборудования.

Что касается метода случайного перебора, то кроме простоты его реализации, никаких других преимуществ перед остальными методами размещения в литературе не отмечается. Более того, в практике автоматизированного конструирования печатных плат сложилось устойчивое мнение, что автоматическое размещение элементов на печатной плате методом Монте-Карло является неэффективным, так как он не гарантирует оптимальности и занимает слишком много времени, с чем нельзя не согласиться.

Однако, при более детальном анализе проблемы авторы обратили внимание на использование метода статистических испытаний для перебора вариантов по схеме, реализованной в статье [16]. Здесь описана модифицированная версия метода Монте-Карло, с помощью которой авторам удалось построить минимальный гамильтонов цикл холостого хода сверла между 1296 отверстиям в заготовке матрицы контактирующего устройства (рисунок 1, а) всего за 8 минут (рисунок 1, б). Анализ причин получения такого эффекта показал, что авторы использовали сокращённую стратегию перебора, применив разработанную ими модификацию метода статистических испытаний. Это позволило вместо перебора $1296!$ вариантов ограничиться лишь малой его частью.

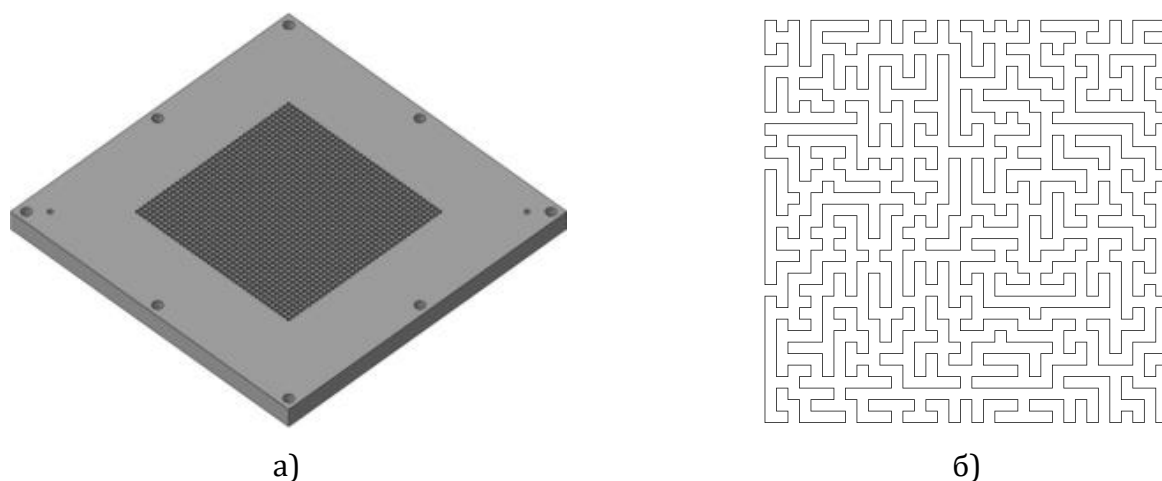


Рисунок 1 — 3D-модель матрицы (а) и путь сверла (б) при её изготовлении

Целью настоящей работы является расширение области применения модифицированного алгоритма статистических испытаний [16] на решение новой задачи — задачи автоматического поиска квазиоптимального размещения элементов сложных печатных плат и/или фрагментов сверх больших интегральных схем [17, 18]. Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- адаптировать модифицированный алгоритм Монте-Карло для решения новой задачи — задачи размещения на плате электрорадиоэлементов (далее, элементов);

- разработать модификацию критерия размещения — минимум суммарной длины связей (далее, СДС) с целью сокращения времени счёта;
- проверить эффективность выполненных модификаций на модельной задаче;
- провести сравнение эффективности алгоритма с известными методами размещения.

Научная новизна работы заключается в разработке математических моделей и алгоритмов, позволяющих реализовать получение квазиоптимального размещения элементов на печатной плате по критерию минимума суммарной длины связей на основе метода статистических испытаний. Для верификации исследований использован метод гистограмм [19] и метод прямого сравнения с известным размещением, СДС.

Предлагаемый метод. Адаптация алгоритма Монте-Карло

Выше мы согласились с заключением о непригодности использования классического метода Монте-Карло (далее, метод *МК1*) к решению задачи оптимизации размещения элементов на плате. Принципиальное отличие предлагаемой ниже версии метода Монте-Карло (далее, метод *МК2*) от версии *МК1* состоит в том, что проведённая модификация позволила изменить закон распределения величин СДС, получаемых в результате испытаний, проведённых по алгоритму *МК1*, резко увеличив частоту (а, следовательно, и вероятность) попаданий величин СДС в область минимальных значений. На рисунке показаны гистограммы обоих распределений. Данные, полученные в результате вычислительного эксперимента, по которым построены гистограммы, сведены в таблице. Эксперимент показал, что минимальная величина СДС, полученная по предлагаемому алгоритму *МК2* ($\approx 190\,000$ — интервал № 2) в полтора раза меньше той же величины ($\approx 305\,000$ — интервал № 12), полученной по классическому алгоритму Монте-Карло.

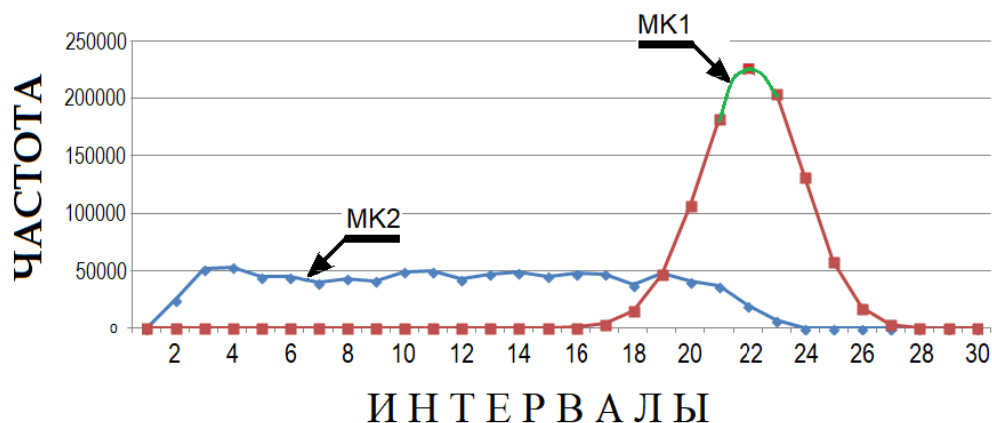


Рисунок 2 — Гистограммы СДС, полученные методом Монте-Карло (МК1) и его модификации (МК2)

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

№	Интервал	МК2	МК1
1	190000..200000	0	0
2	200001..210000	24848	0
3	210001..220000	51974	0
4	220001..230000	53093	0
5	230001..240000	44845	0
6	240001..250000	44743	0
7	250001..260000	39564	0
8	260001..270000	43294	0
9	270001..280000	41231	0
10	280001..290000	49170	0
11	290001..300000	49412	0
12	300001..310000	42492	1
13	310001..320000	47203	2
14	320001..330000	48942	11
15	330001..340000	45247	103

№	Интервал	МК2	МК1
16	340001..350000	47494	738
17	350001..360000	47129	3729
18	360001..370000	38091	15455
19	370001..380000	47371	47155
20	380001..390000	40903	107164
21	390001..400000	36778	182702
22	400001..410000	20113	226930
23	410001..420000	7280	204992
24	420001..430000	0	131642
25	430001..440000	0	58163
26	440001..450000	0	17512
27	450001..460000	0	3315
28	460001..470000	0	352
29	470001..480000	0	33
30	480001..490000	0	0

Логическая схема предложенного алгоритма дана на рисунке . Как видим, его работа идёт по классической схеме алгоритма статистических испытаний (рисунок 4), однако, каждое следующее назначение генерируется на основе одного и того же начального назначения. Здесь на каждом шаге назначений в блоке 2 в качестве следующего назначения всегда принимается модифицированное начальное назначение. Как результат резко возрастает частота попаданий СДС в младшие интервалы таблицы 1, что и подтверждается гистограммой МК2 на рисунке 2.

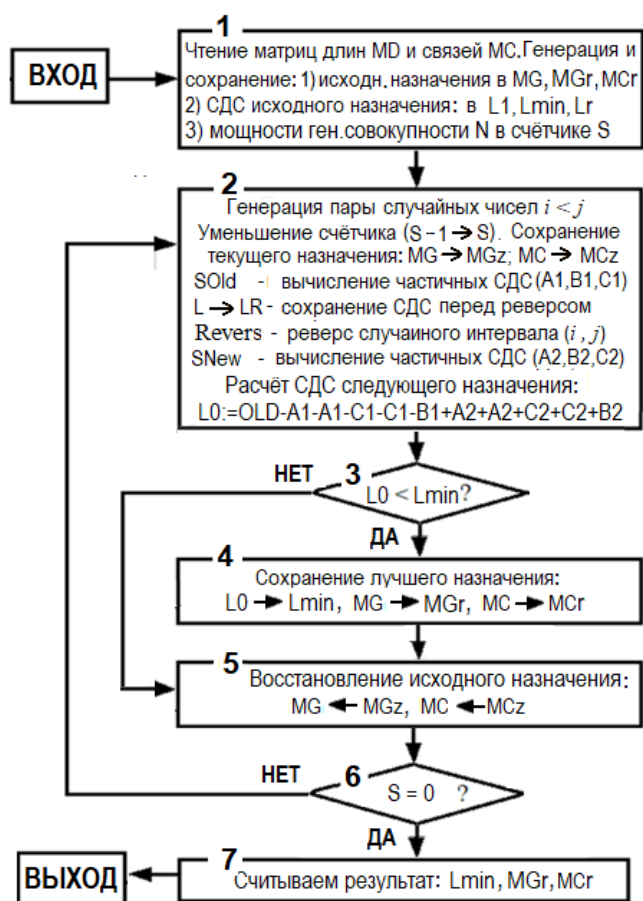


Рисунок 3 — Блок-схема алгоритма MK2

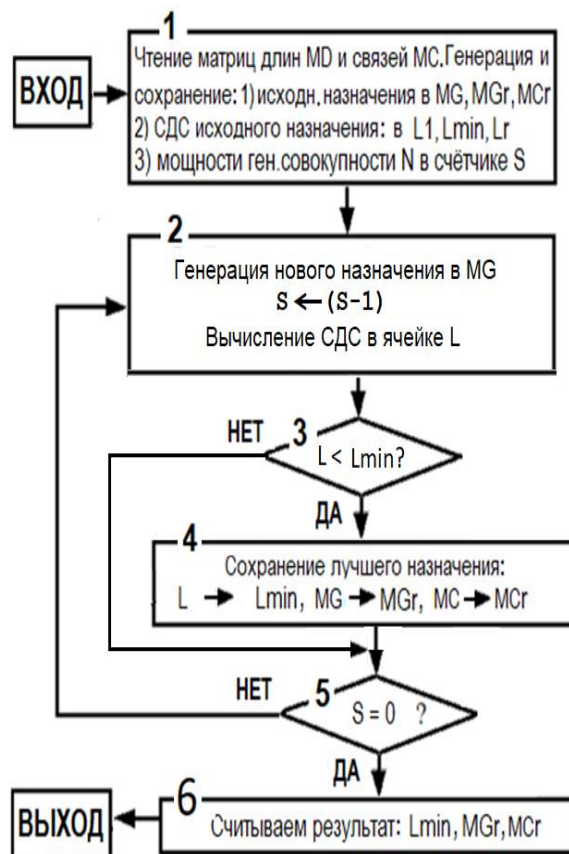


Рисунок 4 — Блок-схема алгоритма MK1

Методика получения следующего случайного назначения в алгоритмах MK1 и MK2 также в корне отличается друг от друга. Если в алгоритме MK1 следующее назначение просто генерируется заново, то в алгоритме MK2 следующее назначение генерируется этапами:

- выбираются два случайных числа ($i < j$) — индексы начала и конца последовательности номеров элементов, составляющих вектор размещения;
- выполняется реверсивный обмен вершин, попавших в выбранный интервал;
- модифицируется матрица связей элементов, в которой переставляются строки и столбцы в соответствие с новым назначением.

Рассмотрим работу этой части алгоритма по шагам на примере модификации показанного на рисунке 5 начального размещения вершин (A, B, C, D, E, F) соответственно в множество позиции ($P1, P2, \dots, P6$).

1. В таблицу 2 записываем матрицу связей заданных элементов.

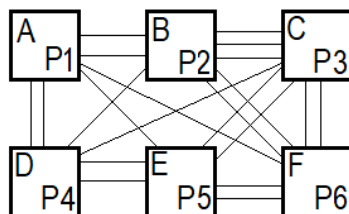


Рисунок 5 — Начальное размещение вершин в позиции ($P_1, P_2, \dots, P_6$).

2. Применяя манхэттенскую геометрию, составляем и записываем в таблицу 3 матрицу длин.
3. Вычисляем покомпонентное произведение этих матриц, то есть СДС начального размещения, которое составит $Sold = 62$.
4. Получаем два случайных числа (например $i = 2$ и $j = 5$).

Таблица 2

Матрица связей

	A	B	C	D	E	F
A	0	2	0	2	1	1
B	2	0	3	1	0	2
C	0	3	0	1	2	2
D	2	1	1	0	2	0
E	1	0	2	2	0	2
F	1	2	2	0	2	0

Таблица 3

Матрица длин

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
P1	0	1	2	1	2	3
P2	1	0	1	2	1	2
P3	2	1	0	3	2	1
P4	1	2	3	0	1	2
P5	2	1	2	1	0	1
P6	3	2	1	2	1	0

5. Выполним реверс цепочки вершин (B, C, D, E), получаем вектор размещения в виде: (A, E, D, C, B, F).
6. Выполним в матрице (таблица 2) перестановку столбцов в соответствии с новым назначением, получаем таблицу 4.
7. Выполним в матрице (таблица 4) перестановку строк в соответствии с новым назначением, получаем таблицу 5.
8. Вычислив покомпонентное произведение матриц в таблицах 4 и 3, получим новую величину СДС, равную $Snew = 72$.

Таблица 4

Матрица связей после перестановки столбцов

	A	B	C	D	E	F
A	0	2	0	2	1	1
E	2	0	3	1	0	2
D	0	3	0	1	2	2
C	2	1	1	0	2	0
B	1	0	2	2	0	2
F	1	2	2	0	2	0

Таблица 5

Матрица связей после перестановки строк

	A	E	D	C	B	F
A	0	2	0	2	1	1
E	2	0	3	1	0	2
D	0	3	0	1	2	2
C	2	1	1	0	2	0
B	1	0	2	2	0	2
F	1	2	2	0	2	0

Модификация критерия размещения

Критерий минимума СДС является наиболее адекватным критерием оценки качества размещения элементов на плате при решении переборных задач. Данный критерий обладает тем преимуществом по сравнению с другими, что даёт интегральную оценку качества размещения отдельного назначения, что позволяет проводить с его помощью эффективное сравнение вариантов назначения. Однако, в нашем случае, если вычислять покомпонентное произведение матриц обычным способом, то количество умножений будет выполняться, по сути дела, вхолостую, поскольку в вычислениях будут участвовать и ячейки матриц, не затронутые процедурой их модификации в процессе реверса вектора размещения. Проще говоря, недостатком процедуры вычисления критерия минимума СДС является его большая вычислительная сложность. Принятая выше стратегия возврата вычислений к исходному назначению перед началом выполнения каждой случайной перестановки, позволяет радикально решить задачу сокращения времени вычислений. Алгоритмически эту задачу решают программные процедуры *Sold* и *SNew*, показанные в блоке 2 структурной схемы алгоритма *МК2* на рисунке.

Для пояснения принципа их работы рассмотрим таблицы 6 и 7, где: в таблице 6 показана перестановка столбцов *D* и *C* исходной матрицы связей (таблица 2), а в таблице 7 — перестановка строк *D* и *C* в таблице 6 в соответствии со случайными числами $i = 3$ и $j = 4$. Матрица длин (таблица 3) не менялась.

Суммарная длина связей полученного размещения или, что тоже самое покомпонентное произведение матриц (таблица 3 и 7) равно $S_{new} = 74$. Именно так выполняется расчёт СДС для каждого случайного назначения в алгоритме *МК1*.

В алгоритме же *МК2* ситуация меняется к лучшему, поскольку для каждой пары i и j всегда доступны для вычисления блоки покомпонентных произведений $A1$, $B1$ и $C1$, соответствующие тёмным участкам матриц связей (таблица 2 — исходная *MC*) и $A2$, $B2$ и $C2$ — таблица 7 (матрица, преобразованная согласно новому вектору).

Таблица 6

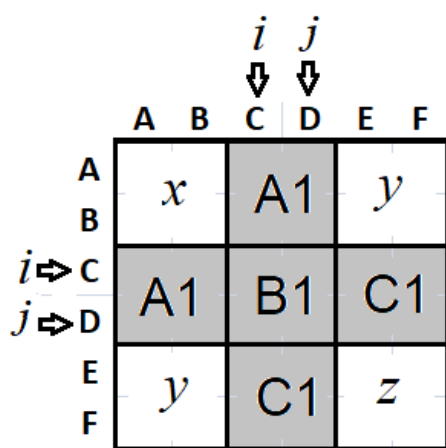
Матрица связей после
перестановки столбцов *C* и *D*

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>A</i>	0	2	2	0	1	1
<i>B</i>	2	0	1	3	0	2
<i>C</i>	0	3	1	0	2	2
<i>D</i>	2	1	0	1	2	0
<i>E</i>	1	0	2	2	0	2
<i>F</i>	1	2	0	2	2	0

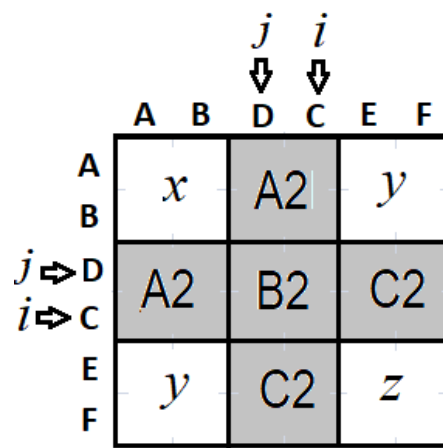
Таблица 7

Матрица связей после
перестановки строк *C* и *D*

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>A</i>	0	2	2	0	1	1
<i>B</i>	2	0	1	3	0	2
<i>D</i>	2	1	0	1	2	0
<i>C</i>	0	3	1	0	2	2
<i>E</i>	1	0	2	2	0	2
<i>F</i>	1	2	0	2	2	0



а)



б)

Рисунок 6 — Матрицы связей до (а) и после (б) процедуры «Реверс»

Для вывода расчётных формул удобнее представить таблицы 2 и 7 в стилизованном виде, как показано на рисунке 6. Заменяя в матрице (таблица 2) группы цифр согласно рисунку 6, а), получим уравнение вычисления переменной *Sold*:

$$Sold = A1 + A1 + B1 + C1 + C1 + x + y + y + z \quad (1)$$

После вычислений в блоке *Revers* матрица связей примет вид таблицы 7 и рисунка 6, б). По только что описанной методике получим уравнение вычисления переменной *Snew*:

$$Snew = A2 + A2 + B2 + C2 + C2 + x + y + y + z \quad (2)$$

Вычитая из формулы (1) формулу (2), получим формулу вычисления разности покомпонентных произведений между начальным и очередным назначением, минуя этап вычисления полных покомпонентных произведений двух пар матриц длин и связей для каждого нового назначения. Эта формула примет вид:

$$Sold - Snew = A1 + A1 + B1 + C1 + C1 - (A2 + A2 + B2 + C2 + C2) \quad (3)$$

Именно по этой формуле и выполняется расчёт СДС следующего назначения в последнем операторе блока 2 алгоритма МК2. Воспользуемся оператором (3) для вычисления СДС нового назначения для случая $i = 3$ и $j = 4$, приняв в качестве исходной матрицу в таблице 2.

Вычислим сначала константы, входящие в эту формулу:

$$OLD = 62; A1 = 7; B1 = 6; C1 = 8; A2 = 11; B2 = 6; C2 = 10 \quad (4)$$

Тогда, СДС нового назначения ($L0$) равна:

$$L0 = 62 - 7 - 7 - 8 - 8 - 6 + 11 + 11 + 10 + 10 + 6 = 74 \quad (5)$$

Для случая выпадения чисел $i = 2$ и $j = 5$ (см. пример выше), имеем:

$$OLD = 62; A1 = 9; B1 = 28; C1 = 8; A2 = 12; B2 = 28; C2 = 13 \quad (6)$$

И величина СДС нового назначения ($L0$) составит:

$$L0 = 62 - 9 - 9 - 28 - 8 - 8 + 12 + 12 + 10 + 10 + 28 = 72, \quad (7)$$

что и требовалось доказать.

Описанный алгоритм вычисления СДС для очередного назначения более чем вдвое сокращает общее время вычисления покомпонентных произведений.

Оценка эффективности предложенного алгоритма

Большинство авторов алгоритмов по теме оптимизации размещения элементов на плате сравнивают эффективность своих алгоритмов с классическими алгоритмами Capo 8.6, Feng Shui 2.0 и Dragon 2.23. Например, авторы алгоритма размещения элементов [20], основанного на поведении «волчьей стаи», показывают, что этот алгоритм превосходит по эффективности алгоритмы [21] примерно на 4 %. Однако, результаты здесь даются в виде формул и таблиц, которые невозможно оперативно связать с конкретными примерами размещения элементов на плате. Результаты сравнения в этих условиях могут значительно отличаться от квазиоптимальных, когда речь идёт о задачах факториальной сложности, и остаётся непонятным, как воспользоваться на практике этими результатами.

Примерно такие же результаты показывает алгоритм [10], оптимизирующий размещение фрагментов БИС на основе гибридного алгоритма, включающего агрегацию фракталов. Однако, отличие от описания многих других алгоритмов, приведённое в работе [10] описание алгоритма оптимизации размещения на основе агрегации фракталов содержит конкретный пример размещения с выходными данными, которые уже можно было бы использовать для сравнения с ним эффективности предложенного алгоритма, тем более, что, как и предыдущий, он даёт результат на 4 % лучше алгоритма [21]. Более того, сравнение можно провести на том же самом примере, который привели авторы работы [22]. Однако, малое число размещаемых элементов ($n = 9$) в приводимом примере не может гарантировать уровень качества более сложных задач размещения с числом элементов более сотни. Поэтому далее поступим следующим образом: проведём сравнение эффективности предлагаемого алгоритма с другим алгоритмом авторов — с методом дихотомического деления, изложенным в работе [23]. Применение этого алгоритма к оптимизации размещения вершин в модельной задаче из работы [22] (рисунок , а), даёт результат, показанный на рисунке , в). Как видим, полученное здесь размещение с длиной связей 78 единиц всего на 2 единицы больше глобального минимума (полученного авторами настоящей статьи методом «грубой силы») и на 12,3 % лучше метода агрегации фракталов, а следовательно, и алгоритма [21].

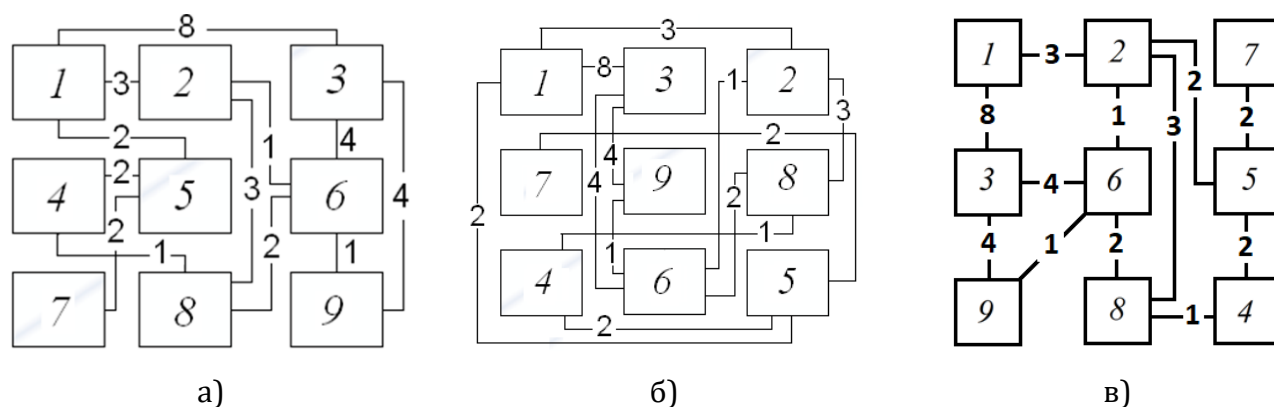


Рисунок 7 — Размещения: исходное а) и по алгоритмам: агрегации фракталов б) и дихотомии в)

Максимальное число элементов модельной задачи, длину связей которой удалось проверить авторам методом «грубой силы», составило $n = 13$, причём

время счёта заняло 3 часа на двухъядерном процессоре с частотой 2 ГГц. Полученный в результате этого эксперимента глобальный минимум СДС составил 21 838 единиц. Длина связей, полученная на том же примере методом дихотомического деления, составила 22 068 единиц (только на 1 % больше). Отсюда ясно, что мы можем вполне доверять алгоритму дихотомии в процессе сравнения с ним результатов размещения элементов, полученных по алгоритмам *МК1* и *МК2*.

Таблица 8

Данные вычислительного эксперимента, полученные для сравнения алгоритмов размещения элементов на плате

Алгоритмы	Количество ЭРЭ на плате										
	9	13	17	20	26	32	52	66	85	94	132
Перебор	13960	21838	–	–	–	–	–	–	–	–	
<i>МК2</i>	17702	22614	25288	32800	49558	50900	70700	100642	154736	252430	426700
<i>МК1</i>	23960	38156	32104	48530	58890	80600	100400	154862	262258	507348	944020
Дихотомия	18588	22008	24240	33388	48146	46852	60226	90600	132340	210150	368409

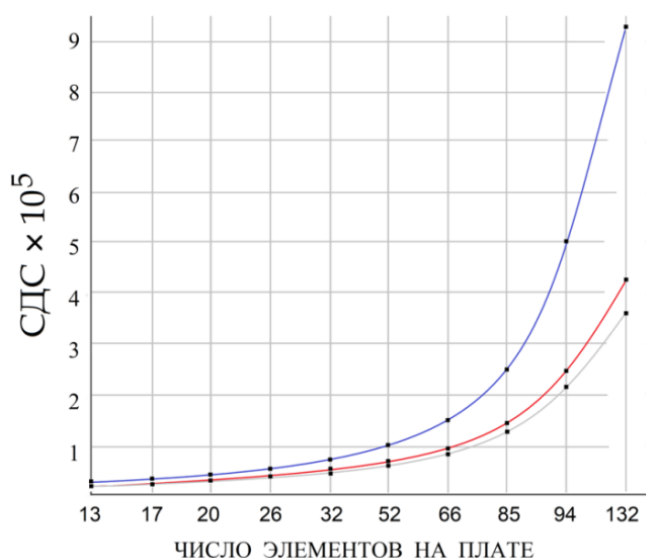


Рисунок 8 — Сравнение эффективности алгоритмов *МК1* (верхний), *МК2* (средний) и дихотомии (нижний)

Результаты вычислительного эксперимента на реальных схемах, содержащих от 17 до 132 элементов, приведены в таблице 8 и на графике (рисунок 8), построенном на её основе. Как видим, эффективность алгоритмов *МК1* и *МК2* при малом числе ЭРЭ схемы с точностью 2–3 % совпадает друг с другом. Однако, когда число элементов превысило два десятка, характер графика начал резко меняться: алгоритм *МК1* начал показывать худшие результаты, а при $n = 94$

(и при $n = 132$) длина связей полученного им размещения более чем в 2 раза превысило СДС размещений, полученных с помощью алгоритмов МК2 и дихотомии.

В заключении, рассмотрим применение предложенного алгоритма для решения практической задачи с точки зрения оптимизации производственных мощностей: необходимо разместить партию из 132 элементов на печатной плате прибора авионики. Традиционные методы (включая классический Монте-Карло, МК1) дают суммарную длину связей (СДС) около 944 020 усл. ед., что приводит к увеличению паразитных ёмкостей, ухудшению ЭМС и, как следствие, к необходимости дополнительных итераций проектирования и производства. Применение модифицированного метода Монте-Карло (МК2), предложенного в настоящей работе, позволило снизить СДС до 426 700 усл. ед., то есть почти в 2,2 раза. Это напрямую транслируется в производственные выгоды:

- сокращение времени автоматической сборки за счёт уменьшения хода головки монтажного автомата;
- снижение числа переналадок оборудования, так как компоненты группируются в непосредственной близости друг от друга;
- повышение надёжности изделия за счёт улучшения целостности сигналов.

Это даёт возможность на этапе проектирования производственных мощностей количественно оценить не только качество компоновки, но и эффективность будущего производственного процесса. Технолог уже на ранней стадии может выбирать такие варианты размещения, которые минимизируют нагрузку на оборудование и максимизируют вероятность выполнения сменно-суточного задания, что особенно критично в условиях мелкосерийного приборостроения без внешней консалтинговой поддержки.

Результаты

Предложена модификация метода статистических испытаний (Монте-Карло), реализующая методологию повторного использования для каждого шага оптимизации одно и то же начальное случайное размещение элементов на плате. Данная модификация позволила примерно в два раза сократить время получения

следующего случайного размещения по сравнению с классическим алгоритмом Монте-Карло. Для реализации этой цели разработан и описан в статье на числовом примере специальный критерий вычисления СДС следующего назначения на основе исходной конфигурации (начального вектора размещения). Получение следующего назначения выполнялось на основе модификации начального вектора размещения методом реверса случайно выбранного из него отрезка случайной длины. Указанный метод был выбран авторами настоящей работы в качестве инструмента формирования очередного назначения, поскольку он хорошо себя зарекомендовал при реализации алгоритмов модельной закалки и метода дихотомии, изложенных в работах [16, 23].

Проведено сравнение эффективности модифицированного метода Монте-Карло с классической его версией и с алгоритмом дихотомии. Выбор для сравнения алгоритма дихотомического деления, ранее разработанного авторами данной статьи для решения задачи минимизации холостых перемещений станков с ЧПУ, продиктован тем, что с его помощью на модельной задаче получено размещение, лучшее примерно на 10 процентов по сравнению с классическим алгоритмом Capo 8.6, Feng Shui 2.0 и Dragon 2.23.

Заключение

Предложенная в статье модификация метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) позволила за приемлемое время получить квазиоптимальную компоновку сложных печатных плат, содержащих «на борту» свыше сотни элементов. Таким образом, исследовательская работа вносит вклад в развитие методов автоматизированного проектирования электронных систем, предлагая новый, эффективный и масштабируемый подход к размещению компонентов, который может быть интегрирован в современные САПР и системы автоматизированного проектирования (CAD/CAM/CAE).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

- 1 Ильин В.Н. Исследование способов построения множеств равноценных альтернатив при проектировании радиоэлектронных устройств летательных аппаратов / В.Н. Ильин, А.Н. Лепехин // Труды МАИ. — 2013. — № 71. — С. 35.
- 2 Анамова Р.Р. Вопросы автоматизации конструкторских работ при проектировании комплексов авиационной радиолокации / Р.Р. Анамова, А.В. Рипецкий // Труды МАИ. — 2013. — № 70. — С. 19.
- 3 Гусейнов О.А. Вопросы проектирования узлов электропитания мультикоптеров / О.А. Гусейнов, А.А. Фатуллаев // Труды МАИ. — 2024. — № 138.
- 4 Гинзбург Б.Д. Алгоритм размещения модулей на плате // Обмен опытом в радиопромышленности. — 1972. — № 4. — С. 31–33.
- 5 Теория и методы автоматизации проектирования вычислительных систем // Под. ред. М. Брейера. — М.: Мир, 1977. — 283 с.
- 6 Лийн Е.А., Борисова Е.В., Применение элементов системы массового обслуживания в задачах математического моделирования производственных процессов // Труды МАИ. — Москва. — 2025. — № 143 (45).
- 7 Лийн Е.А., Коробков М.А., Хомутская О.В., Ванцов С.В., Формализация работы производственного участка для разработки имитационной модели выполнения сменно-суточного задания // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — №5. — С. 212–215.
- 8 Селютин В.А. Машинное конструирование электронных устройств. — М: Сов. радио, 1977. — 383 с.
- 9 Бушин С.А., Курейчик В.В. Размещения узлов и блоков радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники на основе биохимических методов. — М: Программные продукты и системы, 2010, — № 1, — С. 12–14.
- 10 Карпенко А.П.; Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / А.П. Карпенко. — Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 46 с.

- 11 Метрополис Н., Розенблут А.В., Розенблут М.Н. и др. (1953), Уравнение вычислений состояния быстрыми вычислительными машинами. Журнал химической физики, — 21, — С. 1087–1092. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1699114>.
- 12 Ли К. Основы САПР (CAD, CAM, CAE). — 004.
- 13 Satoru Hashiba, T.C. Chang, Heuristic and simulated annealing approaches to PCB assembly setup reduction. – Eight International PROLAMAT Conference, Man in CIM, Tokyo, 24–26 June 1992, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89465-6.50070-3>.
- 14 Krishnan, Rithul, Placement sequence optimization in pcb assembly using neighborhood search heuristics and simulated annealing — State University of New York at Binghamton ProQuest Dissertations & Theses, — 2014. — 1562256.
- 15 Коробков М.А. Метод масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы / М.А. Коробков, В.Д. Зайкин // Труды МАИ. — 2023. — № 132.
- 16 Назаров А.В., Смирнов К.К. Оптимизация холостого хода сверла модифицированным методом Монте-Карло. — М.: REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. — 2024. — Т. 14. — № 1,— С. 40–50.
- 17 Зей М.М. Основные подходы к построению методов Монте-Карло в вычислительной аэродинамике / М.М. Зей, А.Ю. Хлопков, З. Чжо // Труды МАИ. — 2011. — № 42. — С. 3.
- 18 Ванцов С.В., Лийн Е.А., Хомутская О.В., Использование метода Монте-Карло при контроле параметров технологических процессов // Актуальные вопросы научных исследований: сборник статей XIII Международной научно-практической конференции. — Саратов: НОП «Цифровая наука». — 2023. — С. 32-35.
- 19 Солонин С.И.; Метод гистограмм. Электронное учебное пособие. — Екатеринбург, Новоуральский техно-логический институт НИЯУ МИФИ, — 2014. — 8 с.
- 20 Кулиев Э.В., Курейчик В.В., Курситыс И.О. Принятие решений в задаче размещения компонентов СБИС на основе модели поведения стаи

волков // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. — 018. — Т. 1. — С. 712–715.

21 Wang M, Yang X, Sarrafzadeh M 2000 Standard-cell Placement Tool for Large Industry Circuits ICCAD2000. — С. 260–263.

22 Курейчик В.В., Курейчик В.Л. Размещение фрагментов СБИС на основе фрактальной агрегации // Известия СФУ. Технические науки, 2015, — С. 196–205.

23 Назаров А.В., Смирнов К.К., Максимов А.Ю. Оптимизация размещения элементов печатных модулей по критерию целостности сигналов // Технологии инженерных и информационных систем, — 2022. — № 3. — С. 53–64.

References

1 Il'in, V.N., & Lepikhin, A.N. (2013). Investigation of methods for constructing sets of equivalent alternatives in the design of radioelectronic devices for aircraft. Trudy MAI, 71, 35.

2 Anamova, R.R., & Ripetskii, A.V. (2013). Issues of automation in design engineering for airborne radar systems. Trudy MAI, 70, 19.

3 Guseinov, O.A., & Fatullaev, A.A. (2024). Design considerations for power supply units of multicopters. Trudy MAI, 138.

4 Ginzburg, B.D. (1972). Module placement algorithm on a board. Experience Exchange in Radio Industry, 4, 31–33.

5 Breyer, M. (Ed.). (1977). Theory and Methods of Automation in Computer System Design. Moscow: Mir Publishers. 283 p.

6 Lijn E.A., Borisova E.V. Application of queuing system elements in mathematical modeling of production processes // Trudy MAI. — Moscow. — 2025. — No. 143 (45).

7 Lijn, E.A., Korobkov, M.A., Khomutskaya, O.V., Vantsov, S.V. Formalization of a production unit's operation for developing an imitation model of shift-daily task execution // Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya. — 2023. — No. 5. — P. 212–215.

8 Sel'utin, V.A. (1977). Computer-Aided Design of Electronic Devices. Moscow: Sovetskoe Radio. 383 p.

- 9 Bushin, S.A., & Kureychik, V.V. (2010). Placement of nodes and blocks in radioelectronic and computer equipment based on bio-inspired methods. *Programmnye Produkty i Sistemy*, 1, 12–14.
- 10 Karpenko, A.P. (2014). *Modern Search Optimization Algorithms: Nature-Inspired Algorithms (Textbook)*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Press. 46 p.
- 11 Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21, 1087–1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
- 12 Lee, K. (n.d.). *Fundamentals of CAD/CAM/CAE Systems*. — 004.
- 13 Hashiba, S., & Chang, T.C. (1992). Heuristic and simulated annealing approaches to PCB assembly setup reduction. In *Proceedings of the Eighth International PROLAMAT Conference: Man in CIM* (pp. 24–26), Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89465-6.50070-3>
- 14 Krishnan, R. (2014). *Placement sequence optimization in PCB assembly using neighborhood search heuristics and simulated annealing (Master's thesis)*. State University of New York at Binghamton. ProQuest Dissertations & Theses, 1562256.
- 15 Korobkov, M.A., & Zaikin, V.D. (2023). Mask-based compensation method for non-uniform radiation in direct-write lithography systems using liquid crystal arrays. *Trudy MAI*, 132.
- 16 Nazarov, A.V., & Smirnov, K.K. (2024). Optimization of drill idle travel using a modified Monte Carlo method. *REDS: Telecommunication Devices and Systems*, 14(1), 40–50.
- 17 Zeya, M.M., Khlopkov, A. Yu., & Zhuo, Z. (2011). Fundamental approaches to Monte Carlo methods in computational aerodynamics. *Trudy MAI*, 42, 3.
- 18 Vantsov, S.V., Liin, E.A., & Khomutskaya, O.V. (2023). Application of the Monte Carlo method in monitoring parameters of technological processes. In *Current Issues in Scientific Research: Collection of Articles from the XIII International Scientific and Practical Conference* (pp. 32–35). Saratov: NGO “Digital Science”.

- 19 Solonin, S.I. (2014). The Histogram Method (Electronic textbook). Novouralsk Technological Institute, NRNU MEPhI. Yekaterinburg. 8 p.
- 20 Kuliev, E.V., Kureychik, V.V., & Kursitys, I.O. (2018). Decision-making in VLSI component placement based on wolf swarm behavior model. In Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements (Vol. 1, pp. 712–715).
- 21 Wang, M., Yang, X., & Sarrafzadeh, M. (2000). Standard-cell placement tool for large industry circuits. In Proceedings of ICCAD 2000 (pp. 260–263).
- 22 Kureychik, V.V., & Kureychik, V.L. (2015). VLSI fragment placement based on fractal aggregation. Izvestiya SFU. Engineering Sciences, 196–205.
- 23 Nazarov, A.V., Smirnov, K.K., & Maksimov, A. Yu. (2022). Optimization of component placement in printed modules based on signal integrity criteria. Engineering and Information Systems Technologies, 3, 53–64.

Информация об авторах

Александр Викторович Назаров, д.т.н., профессор кафедры 404 «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» МАИ, г. Москва, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4831-524X>; e-mail: rat-rut@yandex.ru

Евгения Анатольевна Лийн, аспирант кафедры 307 «Цифровые технологии и информационные системы» МАИ, г. Москва, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7063-5478>; e-mail: elijn@bk.ru

Трунг Хыу Чан, магистрант кафедры 404 «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» МАИ, г. Москва, Россия; e-mail: tranhieu.hnue.99@gmail.com

Information about the authors

Alexander V. Nazarov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department 404 “Design, Technology and Production of Radioelectronic Equipment”, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4831-524X>; e-mail: rat-rut@yandex.ru

Evgeniya A. Lijn, PhD Student, Department 307 “Digital Technologies and Information Systems”, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7063-5478>; e-mail: elijn@bk.ru

Trần Hiếu Trung, Master’s Student, Department 404 “Design, Technology and Production of Radioelectronic Equipment”, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: tranhieu.hnue.99@gmail.com

Получено 06 февраля 2026 ● Принято к публикации 20 апреля 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 06 February 2026 ● Accepted 20 April 2026 ● Published 25 June 2026
