



Научная статья

УДК 621.3.049.75

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189151>

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

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ШТЕЙНБЕРГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И РЕКОНФИГУРИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Е.А. Лийн¹✉ , А.В. Назаров¹ , К.К. Смирнов²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

✉ elijn@bk.ru

Цитирование: Лийн Е.А., Назаров А.В., Смирнов К.К., Модификация алгоритма Штейнберга для решения задач оптимизации топологии печатных плат и реконfigurирования процессов их производства // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189151>

Аннотация. Современные системы автоматизированного проектирования печатных плат, за редким исключением, не содержат автоматических процедур размещения элементов. Однако, даже если такие инструменты и присутствуют в составе программных средств САПР, они используются для оптимизации некоторого начального размещения, полученного либо интерактивными методами, либо алгоритмами квазиоптимального размещения. На следующем этапе оптимизации размещения может использоваться классический алгоритм Штейнберга, гарантированно повышающий качество любого наперёд заданного размещения. Известные реализации алгоритма Штейнберга выполняют перестановки элементов только в пределах занимаемых ими позиций. Однако можно существенно повысить эффективность алгоритма за счёт использования

ранее не задействованных ресурсов: а) при размещении элементов — это ранее не занятые, но доступные для размещения участки платы; б) при производстве плат — возможность для технолога уже на ранней стадии конфигурировать оборудование, минимизируя его загрузку и максимизируя вероятность выполнения сменно-суточного задания, что особенно критично в условиях проектирования радиоэлектронных средств авиационной и ракетно-космической техники без внешней консалтинговой поддержки. Приводится математический аппарат и результаты экспериментальной проверки предложенной модификации.

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

MODIFICATION OF STEINBERG'S ALGORITHM FOR PRINTED CIRCUIT BOARD TOPOLOGY OPTIMIZATION AND PRODUCTION PROCESS RECONFIGURATION

E.A. Lijn¹✉, A.V. Nazarov¹, K.K. Smirnov²

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

²Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre
«Kurchatov Institute», Moscow, Russia

✉ elijn@bk.ru

Citation: Lijn E.A., Nazarov A.V., Smirnov K.K., Modification of Steinberg's Algorithm for Printed Circuit Board Topology Optimization and Production Process Reconfiguration // Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189151>

Abstract. Modern printed circuit board (PCB) computer-aided design (CAD) systems, with rare exceptions, do not contain automatic component placement procedures. However, even if such tools are present within CAD software, they are used for optimizing an initial placement obtained either by interactive methods or by quasi-optimal placement algorithms. At the next stage of placement optimization, the classical Steinberg algorithm can be used, which guarantees an improvement in the quality of any predefined

placement. Known implementations of the Steinberg algorithm perform element permutations only within the positions occupied by them. However, the algorithm's efficiency can be substantially increased by utilizing previously unused resources: a) in component placement — these are previously unoccupied but available areas of the PCB; b) in PCB production — this provides the process engineer with the opportunity to configure equipment at an early stage, minimizing its load and maximizing the probability of completing the shift-daily production task, which is especially critical in the design of radioelectronic equipment for aviation and rocket-space technology without external consulting support. The mathematical framework and results of experimental verification of the proposed modification are presented.

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

Введение

На современном этапе развития производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при принятии решений по повышению качества выпускаемой продукции широко используются методы решения задач оптимизации [1–3]. В качестве несущего основания функциональных ячеек этой аппаратуры широко используются печатные платы. Наиболее трудным и ответственным этапом их технического проектирования остается задача оптимального размещения электрорадиоэлементов (ЭРЭ) в установочные позиции печатных плат [4–6]. Несмотря на многочисленные попытки решить эту задачу в автоматическом режиме, она остается актуальной до настоящего времени, поскольку имеет факториальную сложность [7–9].

Известно, что целью размещения ЭРЭ на печатной плате является создание благоприятных условий для последующей трассировки соединений [10–11]. Наибольшие трудности здесь возникают при проектировании цифровых устройств, в которых зачастую количество связей много больше числа элементов на печатной плате. Если размещение ЭРЭ на плате уже известно, то управлять

структурой проводников практически невозможно [12–14]. Вот почему необходимо искать способы управления структурой проводников с целью ее упрощения уже на этапе размещения ЭРЭ.

С формальной точки зрения сокращение длины реальных трасс на этапе размещения можно обеспечить на основе критерия минимума суммарной длины связей (СДС). В этой связи, представляется целесообразным выделить в качестве объекта исследования группу алгоритмов, позволяющих уменьшить СДС любого наперед заданного размещения [15–17]. К этой группе можно отнести итерационные алгоритмы парных и/или групповых перестановок, метод дихотомического деления [18–22] и алгоритм Штейнберга. Последний алгоритм выгодно отличается от остальных, поскольку гарантированно уменьшает величину СДС размещения на очередной итерации (или оставляет ее без изменений). Далее мы покажем, что предлагаемая в настоящей работе модификация классического алгоритма Штейнберга даёт более качественный результат размещения, чем оригинал.

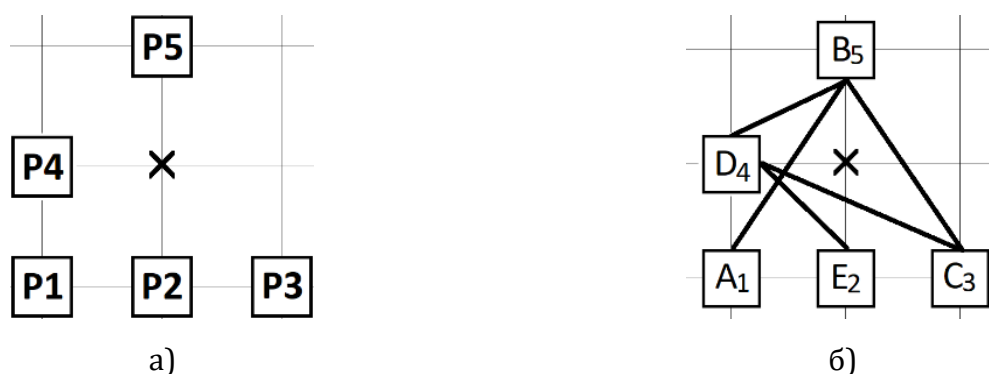


Рисунок 1 — Поле позиции и исходная установка в них (а) в позиции платы (б)

Вначале на модельной задаче дадим графическую иллюстрацию эффекта, к которому мы стремимся в работе. С этой целью, расставим произвольно множество вершин, соответствующих элементам электрической схемы в множество позиций печатной платы, как показано на рисунке 1, а, причём запись: (i_j) будет означать факт размещения i -ой вершины в позицию j . Выберем в текущем примере внутренне устойчивое множество вершин: $V_1 = \{A, E, C\}$, и выполним перестановки классическим алгоритмом Штейнберга — результат размещения показан на рисунке 2, а. Общая длина связей здесь, рассчитанная в манхэттенской геометрии, равна 13 шагов сетки.

Пусть, далее, в множество позиций добавлена ещё одна позиция, разрешённая для установки в неё любой вершины исходного множества. Эта позиция отмечена косым крестом на рисунке 1, а решение примет вид, показанный на рисунке 2, б. Видим, что СДС сократилась ещё на три шага сетки. Покажем далее, как может быть формально получено это решение с помощью алгоритма Штейнберга, несмотря на то, что матрица стоимости здесь не будет квадратной, что является необходимым условием при решении задачи по этому алгоритму.

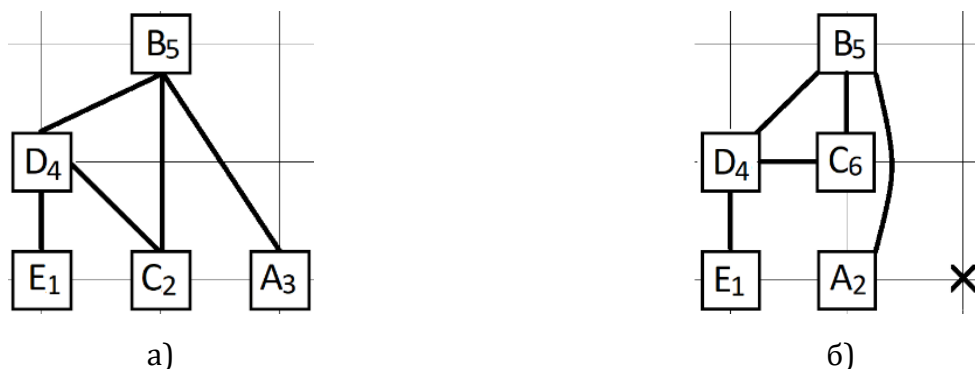


Рисунок 2 — Размещение вершин графа $G(E, R)$ по классическому (а) и модифицированному (б) алгоритму Штейнберга

Предлагаемый метод

Необходимость модификации классического алгоритма Штейнберга вытекает из того очевидного факта, что в его формулировке ясно сказано, что элементы оптимизируемого множества на плате переставляются только между позициями, которые они занимали в исходном размещении. Это, в свою очередь гарантирует, что для каждого элемента в исходной позиции обязательно найдётся место для установки в результирующем размещении, и матрица стоимости назначения i -го элемента в позицию j будет квадратной. Однако, при таком подходе, в каждом назначении внутренне устойчивого множества элементов, «за бортом» остаётся масса свободных позиций, в которые можно более эффективно установить выбранные элементы.

Формальная сторона проблемы связана с необходимостью решить задачу математического программирования, известную как задача с булевыми переменными [23]. Именно в этой постановке решается задача размещения в предлагаемой далее модификации алгоритма Штейнберга. В терминологии

теории графов размещение, показанное на рисунке 1, b, представляет собой двудольный граф:

$$G = (E, P, R), \quad (1)$$

в котором графически представлен один из возможных вариантов назначения $E \rightarrow P$ множества вершин $E = \{A, B, C, D, E\}$ на множество позиций $P = \{P1, P2, \dots, P5\}$. Множество рёбер здесь позволяет оценить качество сделанного назначения. Обозначим стоимость назначения вершины E_i в позицию P_j как: $C_{E_i \rightarrow P_j}$, и определим ее суммарной длиной рёбер (в манхэттенской геометрии), связывающих вершину E_i , установленную в позицию P_j , со всеми другими вершинами множества E_i . Так, стоимость установки вершины D в позицию $P4$ составит:

$$C_{D \rightarrow P4} = 2 + 2 + 3 + 3 = 10. \quad (2)$$

Рассчитаем стоимости всех рёбер внутренне устойчивого множества $V_1 = \{A, E, C\}$ на рисунке 1, b, и данные расчёта сведём в матрицу стоимости: $C = \|c_{ij}\|_{3 \times 3}$, показанную в таблице 1.

Таблица 1

Расчёт стоимости всех рёбер внутреннее устойчивого множества									
		$P1$	$P2$	$P3$			$P1$	$P2$	$P3$
$C =$	A	$C_{A \rightarrow p1}$	$C_{A \rightarrow p2}$	$C_{A \rightarrow p3}$	$=$	A	3	2	3
	E	$C_{E \rightarrow p1}$	$C_{E \rightarrow p2}$	$C_{E \rightarrow p3}$		E	1	2	3
	C	$C_{C \rightarrow p1}$	$C_{C \rightarrow p2}$	$C_{C \rightarrow p3}$		C	4	4	6

Решить текущую задачу — это значит выбрать $N = |E|$ линейно независимых элементов в матрице стоимости C так, чтобы сумма выбранных элементов была минимальна по сравнению с суммой значений при всех других выборах (назначениях).

Для формальной записи целевой функции свяжем элемент $c_{i,j}$ матрицы C с переменной $x_{ij} \in X$, которую установим в 1 (0), если в очередном назначении в i -й строке выбран (не выбран) j -й элемент. В любом назначении среди чисел множества X должно быть точно N единиц, и должны выполняться условия:

$$\forall(E \rightarrow P): \left\{ \left[\sum_{i=1}^{|E|} x_{ij} = 1 \quad j=1,2,\dots,|E| \right] \& \left[\sum_{j=1}^{|P|} x_{ij} = 1 \quad i=1,2,\dots,|P| \right] \right\}, \quad (3)$$

где:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i=1,2,\dots,E; \quad j=1,2,\dots,P \\ 0, & \end{cases} \quad (4)$$

С учетом того, что в классическом алгоритме Штейнберга $|E| = |P|$, целевую функцию, которую требуется минимизировать можно записать так:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $N = |E| = |P|$.

Поскольку выражения (3 ÷ 5) линейны относительно булевой переменной x_{ij} , то сформулированная задача является задачей линейного программирования с булевыми переменными. В литературе [24] она хорошо известна как *задача о назначении*. Её решение основано на итерационном преобразовании матрицы стоимости C в эквивалентную матрицу $C^\wedge$, в которой наилучшее решение соответствует нулевым элементам, причём итерации преобразования завершаются, как только в матрице D появляются ровно N линейно независимых элементов.

Приведём решение сформулированной задачи (3 ÷ 5), взяв в качестве исходной матрицы стоимости таблицу 1.

Выполняем редукцию строк (таблица 2) и столбцов (таблица 3) матрицы (2).

Таблица 2

Редукция строк			
	$P1$	$P2$	$P3$
A	1	0	1
E	0	1	2
C	0	0	2

Таблица 3

Редукция столбцов			
	$P1$	$P2$	$P3$
A	1	0	0
E	0	1	1
C	0	0	1

Выбирая 3 линейно-независимых нуля, приходим к решению на рисунке 2, а:

$$E \rightarrow 1; \quad C \rightarrow 2; \quad A \rightarrow 3$$

После добавления одной разрешённой для установки вершин позиции в матрицу стоимости добавляется новый столбец с номером этой позиции, и она приобретает следующий вид:

Матрица стоимости с дополнением столбца номера позиции

7. Минимальный не зачёркнутый элемент в матрице $C^\wedge$ вычесть из всех не зачёркнутых строк и прибавить ко всем зачёркнутым столбцам (в матрице $C^\wedge$ появится новый нуль) и перейти к блоку 6.

8. Завершить вычисления, приняв назначение, найденное алгоритмом Форда-Фалкерсона в пункте 6 алгоритма.

Продemonстрируем применение данного алгоритма, приняв в качестве исходных данных матрицу стоимости, полученную нами в таблице 4. Фактически это значит, что пункты с 1-го по третий алгоритма уже выполнены. Продолжим вычисления, начиная с пункта 4, приняв двойную нумерацию пунктов решения «№ шага решения (№ блока алгоритма)»:

1(4). Поскольку в матрице стоимости (таблица 4) уже присутствует одна добавленная позиция (P6), то после добавления нулевой строки матрица стоимости примет вид (таблица 5):

Таблица 5

Матрица стоимости с нулевой строкой

$$C^\wedge = \|c_{ij}\|_{4 \times 4} =$$

	P1	P2	P3	P6
A	3	2	3	1
E	1	2	3	2
C	4	4	6	1
f_1	0	0	0	0

Таблица 6

Матрица стоимости после редукции строк

	P1	P2	P3	P6
A	2	1	2	0
E	0	1	2	1
C	3	3	5	0
f_1	0	0	0	0

Нулевую строку таблицы 5 следует читать так: «стоимость установки первого фиктивного элемента f_1 в любую разрешённую позицию равна нулю».

2(5). Выполнив редукцию строк матрицы $C^\wedge$, получим матрицу стоимости в виде таблицы 6.

3(6). Поиск опоры графа $G=(E,P,R)$, выполняем этапами:

- на основе таблицы 6 строим двудольный граф $G(E, P, R)$, в котором каждое ребро соответствует нулевому элементу матрицы $C^\wedge$ (рисунок 3, а);
- в граф G добавляем вершины: «источник» и «приёмник», которые соединяем с вершинами множеств E и P так, как показано на (рисунке 3, б);

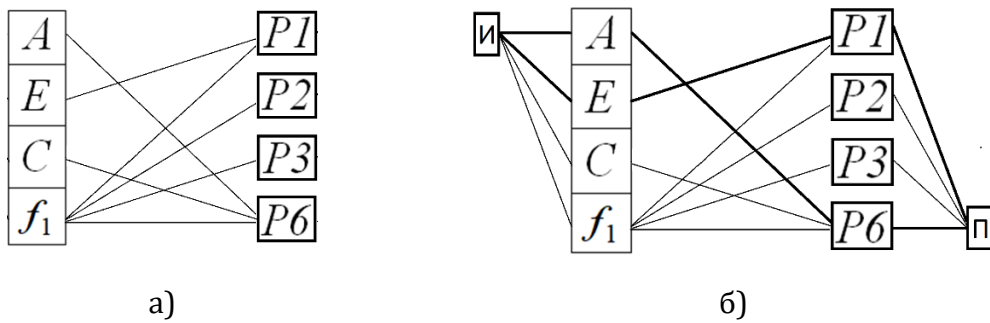


Рисунок 3 — Поиск опоры графа

- рассматривая рёбра как транспортную сеть с единичной пропускной способностью, последовательно нагружаем сеть, пытаясь доставить каждый новый груз от источника «И» к приёмнику «П» по кратчайшему пути — на рисунке 4, а) показан полученный в результате полный поток из 2-х грузов;
- для максимизации потока выполняем обход Форда-Фалкерсона, отмеченный на рисунке 4, б) пунктиром (идём вправо по толстым рёбрам, а влево — по тонким) — обход заканчивается в точке приёма «П» — максимальный поток после инверсии рёбер на пунктирном пути примет вид рисунка 5;
- повторная попытка максимизации потока терпит неудачу — груз, пройдя путь:

$$\Gamma = (И — P6 — C — И), \quad (6)$$

ввернулся в точку старта — это означает, что опора графа найдена — в неё входят вершины: $(E, f_1, P6)$, то есть — вершины множества E , не принадлежащие пути (6), и вершины множества P , принадлежащие этому пути.

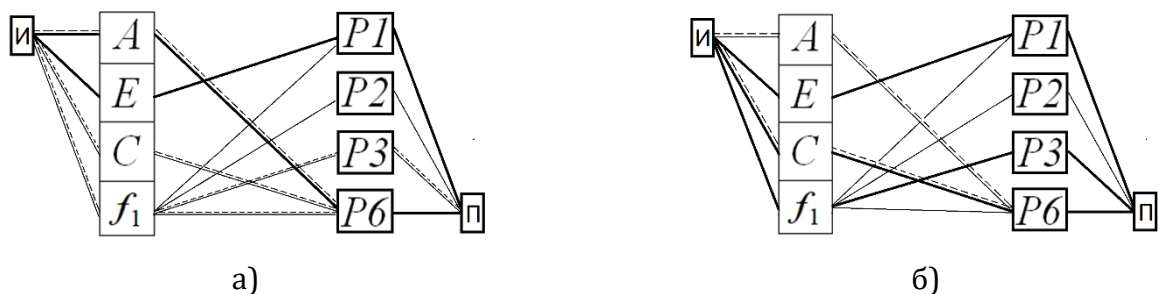


Рисунок 4 — Максимизация потока

Матрица $C^{\wedge}$ с зачёркнутыми строками и столбцом показана на рисунке 5.

					+
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P6</i>	
<i>A</i>	2	1	2	0	–
<i>E</i>	0	1	2	1	
<i>C</i>	3	3	5	0	–
<i>f₁</i>	0	0	0	0	

Рисунок 5 — Матрица $C^{\wedge}$

Результаты выполнения пункта 7

					алгоритма
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P6</i>	
<i>A</i>	1	0*	1	0	
<i>E</i>	0*	1	2	1	
<i>C</i>	2	2	4	0*	
<i>f₁</i>	0	0	0*	0	

4(7). После выполнения пункта 7 алгоритма получим матрицу $C^{\wedge}$ (таблица 7). В этой матрице «звёздочками» отмечено искомое назначение $E_{BVM} \rightarrow P_{BVM} : (A \rightarrow P2, E \rightarrow P1, C \rightarrow P6, f_1 \rightarrow P3)$, показанное ранее на рисунке 2, *b*.

Как видим, вершины ВУМ в процессе реализации очередного назначения: $(E_{BVM} \supseteq E) \rightarrow (P_{BVM} \subseteq P)$ автоматически занимают некоторые из добавленных позиций, освобождая те позиции, на которых они стояли ранее, для «установки» сюда фиктивных элементов. Величина *m* (число добавленных нулевых строк в матрице $C^{\wedge}$) ограничено только количеством имеющихся на плате свободных мест для установки внутренне устойчивых множеств элементов.

Отличительной чертой работы является, что формальная постановка задачи размещения компонентов на печатной плате имеет прямую аналогию с задачей оптимальной расстановки технологического оборудования на производственном участке. В обоих случаях речь идёт о минимизации суммарных «расстояний» между взаимосвязанными элементами системы: в случае проектирования печатных плат — это геометрическое расстояние между выводами компонентов, определяющее длину проводников, паразитные ёмкости и уровень электромагнитных помех; в случае производственного участка — логистическое расстояние между позициями оборудования, определяющее время транспортировки заготовок, длительность межоперационных простоев и общую продолжительность производственного цикла [25–27].

При этом, обе задачи характеризуются высокой комбинаторной сложностью (NP-полнота), наличием ограничений на размещение (габариты корпусов /

площадь цеха) и взаимозависимостью элементов (топология схемы / маршрут обработки детали).

В связи с чем предложенный в работе модифицированный алгоритм Штейнберга, позволяющий эффективно использовать дополнительные свободные позиции для улучшения качества размещения, может быть напрямую адаптирован для решения задачи расстановки оборудования. Вместо внутренне устойчивого множества компонентов алгоритм будет оперировать группой станков, выполняющих связанные операции, а вместо свободных позиций на плате — резервными местами на производственной площадке. Такой подход позволяет не только минимизировать холостые перемещения, но и повысить коэффициент загрузки оборудования, что особенно критично в условиях мелкосерийного приборостроительного производства.

Таким образом, метод, разработанный для оптимизации конструктивного решения, естественным образом расширяется до инструмента оптимизации производственной конфигурации, обеспечивая сквозную цифровую цепочку от проектирования до изготовления.

Результаты. Экспериментальная проверка алгоритма

Предложенная модификация алгоритма Штейнберга реализована в виде пакета прикладных программ *ReadPCB*, который связан с системой автоматизированного проектирования *Altium Designer* на уровне ее базы данных в символьном виде (формат) [28, 29]. Структурная схема функционирования пакета *ReadPCB* приведена на рисунке 6. В качестве исходного для оптимизации размещения пакет *ReadPCB* использует размещение, полученное в регулярной решётке алгоритмом дихотомического деления [23]. Далее с помощью волнового алгоритма устраняются наложения разногабаритных электрорадиоэлементов друг на друга. На следующем этапе, выполняется деконцентрация элементов на плате для обеспечения свободного доступа трасс к контактам элементов. Полученное в результате размещение является исходным для работы модифицированного алгоритма Штейнберга, которая реализуется в соответствии с пунктами описанного модифицированного алгоритма Штейнберга.

В заключении работы программы формируется выходной файл в формате *ASCII*, который отличается от исходного новыми координатами электрорадиоэлементов на плате.

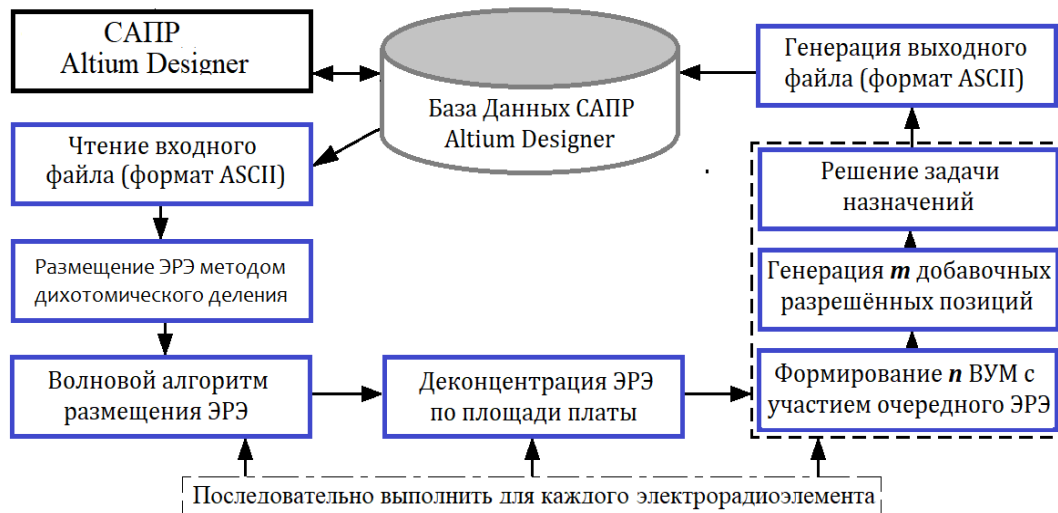


Рисунок 6 — Блок-схема функционирования пакета прикладных программ ReadPCB

На рисунке 7 показан график снижения величины СДС в процессе оптимизации размещения по предложенному алгоритму работы программы *ReadPCB*. На графике наблюдаем постоянное снижение СДС по мере перехода от текущего ВУМ к следующему, перемежающееся характерными горизонтальными участками, которые подтверждают общеизвестные выводы о том, что алгоритм Штейнберга *не увеличивает* суммарную длину связей результирующего размещения. В данном случае эффект от применения предложенной модификации составил:

$$\frac{164 - 138}{138} \times 100\% = 15,85 \%$$

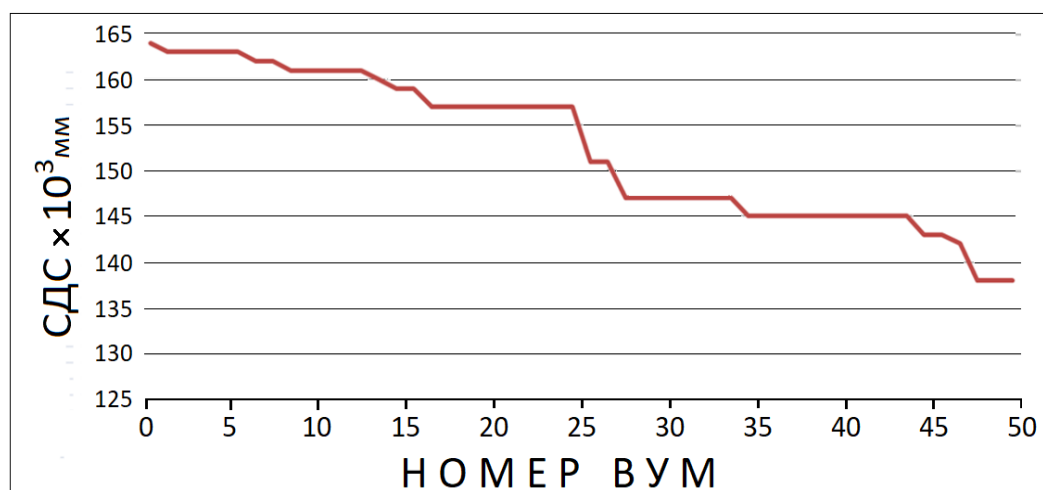


Рисунок 7 — График снижения величины СДС при работе программы ReadPCB

Заключение

Авторами статьи предложен метод оптимизации начального размещения электрорадиоэлементов на печатной плате с помощью оригинального модифицированного алгоритма Штейнберга. Показано, что модификация позволила повысить эффективность классического алгоритма Штейнберга за счет использования дополнительного множества позиций на плате, которые не были занятыми элементами до начала работы алгоритма.

Приведен математический аппарат, являющийся теоретической основой корректности проведённой модификации. Предложенная модификация обеспечила возможность применения математического аппарата решения задачи назначения (основного расчётного блока в классическом алгоритме Штейнберга) в условиях неквадратной матрицы стоимости.

Предложенный алгоритм реализован в виде пакета прикладных программ оптимизации размещения электрорадиоэлементов на печатной плате, который работает совместно с САПР *Altium Designer* на уровне ее базы данных в формате *ASCII*.

Получены данные вычислительного эксперимента на контрольном примере, содержащем 50 электрорадиоэлементов на плате. Эксперимент подтвердил эффективность предложенного алгоритма: снижение суммарной длины связей контрольного примера составило 15,85 %. Статистика снижения СДС, полученная при проектировании 10 печатных плат с числом элементов от 40 до 135, составила $\approx 14,5$ %.

Выявлена методологическая общность задачи размещения ЭРЭ и задачи расстановки оборудования на производственном участке. Предложенная модификация алгоритма Штейнберга может быть адаптирована для оптимизации производственных потоков в условиях мелкосерийного приборостроения, обеспечивая снижение времени перемещения деталей и повышение коэффициента загрузки оборудования, что соответствует задачам обеспечения цифровой самостоятельности предприятий.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1 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>.

2 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.

3 Н.В. Быковский, С.А. Некрасов, Оптимизация размещения разногабаритных элементов на коммутационном поле сложной топологии на основе комбинаторного аналога метода Гаусса-Зейделя // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2025. — № 1(225). — С. 19–28. — DOI 10.17213/1560-3644-2025-1-19-28.

4 Гусейнов О.А. Вопросы проектирования узлов электропитания мультикоптеров / О.А. Гусейнов, А.А. Фатуллаев // Труды МАИ. — 2024. — № 138.

5 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.

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

7 К.К. Морозов, В.Г. Одинокое, В.М. Курейчик, Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие для вузов // Научно-техническое издательство "Радио и связь", 1983. — 280 с.

8 Федоров, И.А. Процесс создания автоматизированной системы с использованием аппарата таблиц решений // Труды МАИ. — 2012. — № 53. — С. 9.

9 Теория и методы автоматизации проектирования вычислительных систем // Под. ред. М. Брейера. — М.: Мир, 1977. — 283 с.

10 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.

11 И.И. Масюков, Д.Б. Борзов, Д.В. Титов, Ю.В. Соколова, Математическая модель и аппаратно-ориентированный алгоритм планирования размещения программ в системах на кристалле // Труды МАИ. — 2021. — № 119. — DOI 10.34759/trd-2021-119-13.

12 Селютин В.А. Машинное конструирование электронных устройств. — М: Сов. радио, 1977. — 383 с.

13 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.

14 Д.А. Анисин, И.В. Морозов Автоматизация проектирования технологического процесса // Труды МАИ. — 2012. — № 51. — С. 27.

15 Анамова Р.Р. Вопросы автоматизации конструкторских работ при проектировании комплексов авиационной радиолокации / Р.Р. Анамова, А.В. Рипецкий // Труды МАИ. — 2013. — № 70. — С. 19.

16 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.

17 Солонин С.И.; Метод гистограмм. Электронное учебное пособие. — Екатеринбург, Новоуральский технологический институт НИЯУ МИФИ, — 2014. — 8 с.

18 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.

19 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.

20 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

21 Абас В.М., Приближенные методы оптимального размещения элементов электрических и электронных цепей // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2021. — № 2(210). — С. 18–26. — DOI 10.17213/1560-3644-2021-2-18-26.

22 Семенова И.В. Булева алгебра и ее применение при построении математических моделей: учебное пособие / Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. — 100 с.: ил

23 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.

24 Деньдобренко Б.Н., Малика А. С Автоматизация конструирования РЭА.-М.: Высшая школа, 1980, — С.125–132

25 Лийн Е.А., Борисова Е.В., Применение элементов системы массового обслуживания в задачах математического моделирования производственных процессов // Труды МАИ. — Москва. — 2025. — № 143 (45).

26 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.

27 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.

28 Ли К. Основы САПР (CAD, CAM, CAE). — 004.

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

30 Гинзбург Б.Д. Алгоритм размещения модулей на плате // Обмен опытом в радиопромышленности. — 1972. — № 4. — С. 31–33.

31 С.В. Ванцов, Ф.В. Васильев, О.В. Хомутская, М.А. Коробков, Задачи управления технологическими процессами // Научное приборостроение. — 2022. — Т. 32, — № 4. — С. 124-137. — DOI 10.18358/np-32-4-i124137.

References

1 Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., et al. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines // The Journal of Chemical Physics. — Vol. 21. — Pp. 1087–1092. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1699114>.

2 Krishnan R. 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, 2014. — 1562256.

3 Bykovsky N.V., Nekrasov S.A. Optimization of Placement of Heterogeneous Components on a Switching Field of Complex Topology Based on a Combinatorial Analog of the Gauss–Seidel Method // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Severo-Kavkazskiy Region. Technical Sciences. — 2025. — No. 1(225). — Pp. 19–28. DOI: 10.17213/1560-3644-2025-1-19-28.

4 Guseynov O.A., Fatullaev A.A. Design Considerations for Power Supply Units of Multicopters // Trudy MAI. — 2024. — No. 138.

5 Korobkov M.A., Zaikin V.D. Mask-Based Compensation Method for Non-Uniform Radiation in Direct-Write Lithography Systems Using Liquid Crystal Arrays // Trudy MAI. — 2023. — No. 132.

6 Kureychik V.V., Kureychik V.L. VLSI Fragment Placement Based on Fractal Aggregation // Izvestiya SFU. Engineering Sciences. — 2015. — Pp. 196–205.

7 Morozov K.K., Odínokov V.G., Kureychik V.M. Automated Design of Radioelectronic Equipment Structures: Textbook for Universities. — Moscow: Radio i Svyaz, 1983. — 280 p.

8 Fedorov I.A. Process of Creating an Automated System Using Decision Tables // Trudy MAI. — 2012. — No. 53. — P. 9.

9 Theory and Methods of Automation in Computer System Design / Ed. by M. Breyer. — Moscow: Mir Publishers, 1977. — 283 p.

10 Kuliev E.V., Kureychik V.V., Kursitys I.O. Decision-Making in VLSI Component Placement Based on Wolf Swarm Behavior Model // International Conference on Soft Computing and Measurements. — 2018. — Vol. 1. — Pp. 712–715.

11 Masyukov I.I., Borzov D.B., Titov D.V., Sokolova Yu.V. Mathematical Model and Hardware-Oriented Algorithm for Planning Software Placement in Systems-on-Chip // Trudy MAI. — 2021. — No. 119. DOI: 10.34759/trd-2021-119-13.

12 Selyutin V.A. Computer-Aided Design of Electronic Devices. — Moscow: Sovetskoe Radio, 1977. — 383 p.

13 Vantsov S.V., Liin E.A., Khomutskaya O.V. Application of the Monte Carlo Method in Monitoring Parameters of Technological Processes // Current Issues in Scientific Research: Collection of Articles from the XIII International Scientific and Practical Conference. — Saratov: NGO "Digital Science". — 2023. — Pp. 32–35.

14 Anisin D.A., Morozov I.V. Automation of Technological Process Design // Trudy MAI. — 2012. — No. 51. — P. 27.

15 Anamova R.R., Ripetskii A.V. Issues of Automation in Design Engineering for Airborne Radar Systems // Trudy MAI. — 2013. — No. 70. — P. 19.

16 Bushin S.A., Kureychik V.V. Placement of Nodes and Blocks in Radioelectronic and Computer Equipment Based on Bio-Inspired Methods // Software Products and Systems. — 2010. — No. 1. — Pp. 12–14.

17 Solonin S.I. The Histogram Method (Electronic Textbook). — Yekaterinburg: Novouralsk Technological Institute, NRNU MEPhI, 2014. — 8 p.

18 Zeya M.M., Khlopkov A.Yu., Zhuo Z. Fundamental Approaches to Monte Carlo Methods in Computational Aerodynamics // Trudy MAI. — 2011. — No. 42. — P. 3.

19 Nazarov A.V., Smirnov K.K. Optimization of Drill Idle Travel Using a Modified Monte Carlo Method // REDS: Telecommunication Devices and Systems. — Moscow. — 2024. — Vol. 14. — No. 1. — Pp. 40–50.

20 Nazarov A.V., Smirnov K.K., Maksimov A.Yu. Optimization of Component Placement in Printed Modules Based on Signal Integrity Criteria // Engineering and Information Systems Technologies. — 2022. — No. 3. — Pp. 53–64.

21 Abas V.M. Approximate Methods for Optimal Placement of Elements in Electrical and Electronic Circuits // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Severo-Kavkazskiy Region. Technical Sciences. — 2021. — No. 2(210). — Pp. 18–26. DOI: 10.17213/1560-3644-2021-2-18-26.

22 Semenova I.V. Boolean Algebra and Its Application in Building Mathematical Models: Textbook. — Samara: Samara University Press, 2023. — 100 p.: ill.

23 Il'in V.N., Lepikhin A.N. Investigation of Methods for Constructing Sets of Equivalent Alternatives in the Design of Radioelectronic Devices for Aircraft // Trudy MAI. — 2013. — No. 71. — P. 35.

24 Daydobrenko B.N., Malika A.S. Automation of Radioelectronic Equipment Design. — Moscow: Vysshaya Shkola, 1980. — Pp. 125–132.

25 Liin E.A., Borisova E.V. Application of Queuing Theory Elements in Mathematical Modeling of Manufacturing Processes // Trudy MAI. — Moscow. — 2025. — No. 143 (45).

26 Liin 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 // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. — 2023. — No. 5. — Pp. 212–215.

27 Karpenko A.P. Modern Search Optimization Algorithms: Nature-Inspired Algorithms (Textbook). — Moscow: Bauman Moscow State Technical University Press, 2014. — 46 p.

28 Lee K. Fundamentals of CAD/CAM/CAE Systems. — [n.d.].

29 Wang M., Yang X., Sarrafzadeh M. Standard-Cell Placement Tool for Large Industry Circuits // Proceedings of ICCAD 2000. — 2000. — Pp. 260–263.

30 Ginzburg B.D. Module Placement Algorithm on a Board // Experience Exchange in Radio Industry. — 1972. — No. 4. — Pp. 31–33.

31 Vantsov S.V., Vasiliev F.V., Khomutskaya O.V., Korobkov M.A. Problems of Technological Process Management // Scientific Instrument Engineering. — 2022. — Vol. 32. — No. 4. — Pp. 124–137. DOI: 10.18358/np-32-4-i124137.

Информация об авторах

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

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

Константин Константинович Смирнов, заведующий научно-технического отдела электрических измерений федерального государственного автономное учреждения «Федеральный научный центр НИИ системных исследований НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: mail@konstantinsmirnov.com

Information about the authors

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

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

Konstantin K. Smirnov, Head of the Scientific and Technical Department of Electrical Measurements, 2Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre «Kurchatov Institute»; Moscow, Russia; e-mail: mail@konstantinsmirnov.com.

Получено 25 марта 2026 • Принято к публикации 20 мая 2026 • Опубликовано 31 августа 2026
Received 25 March 2026 • Accepted 20 May 2026 • Published 31 August 2026
