

УДК 621.396

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Малолеткин А.Б., магистрант<sup>1</sup>, Скудняков Ю.А., доцент<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Институт информационных технологий, г. Минск, Республика Беларусь

Скудняков Ю.А. – канд. техн. наук, доцент каф. ИСиТ

**Аннотация.** В работе проведен анализ эффективности алгоритмов размещения электронных компонентов электронных средств на печатной плате. Осуществлен сравнительный анализ эффективности последовательного и обратного размещения равного количества компонентов одной и той же электрической схемы в соответствии с критерием минимума суммарной длины соединений на монтажной плоскости (печатной платы). Лучший результат показывает для удовлетворения указанного критерия последовательный алгоритм.

**Ключевые слова:** анализ эффективности алгоритмов размещения, последовательный и обратный алгоритмы размещения, критерий минимума суммарной длины соединений между элементами электрической схемы.

**Введение.** При конструкторском проектировании электронных средств (ЭС) решаются задачи, связанные с поиском наилучшего варианта конструкции, удовлетворяющего требованиям технического задания и максимально учитывающего возможности технологической базы производства. Одной из основных задач синтеза конструкций является задача размещения элементов коммутационной схемы на заданном монтажном поле [1,2]. Размещение элементов электрической схемы – это задача определения их местоположения на монтажном поле в конструктивном модуле такого, при котором создаются наилучшие условия для решения последующей задачи трассировки соединений с учетом конструктивно–технологических требований и ограничений. Среди существующих алгоритмов размещения группа последовательных алгоритмов в наибольшей степени имитирует действия инженера-проектировщика, рассчитывая при этом локальный критерий оптимальности. Поиск глобального экстремума при решении задачи размещения возможен только при использовании метода полного перебора.

**Основная часть.** Цель работы состоит в исследовании эффективности алгоритмов размещения элементов электрической схемы при минимизации суммарной длины соединений.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

- проанализировать ряд алгоритмов, используемых для решения задачи размещения элементов электрической схемы;
- исследовать эффективность предложенного алгоритмического подхода с помощью вычислительного эксперимента.

При разработке алгоритмов и программ следует стремиться к наиболее полному удовлетворению требований, предъявляемых к ним: минимальная продолжительность решения максимального объема задач размещения при заданной емкости оперативной емкости компьютера, максимальная точность решения, высокая надёжность, эффективность, завершённость, понятность и т.д. Перечисленные показатели определяют качество программного обеспечения системы автоматизированного проектирования (САПР). Причём, на этапе разработки алгоритмов достаточно учесть такие показатели, как точность, временная и ёмкостная сложность, а при разработке программ или их сравнении следует учитывать и остальные показатели [1 – 3].

Для оценки качества алгоритма размещения надо решить этим алгоритмом  $m$  задач и определить среднюю суммарную длину соединений полученных размещений. Затем это же множество задач  $m$  решить другим алгоритмом и выполнить такую же оценку. Лучшим будет тот из алгоритмов, который даст меньшую среднюю суммарную длину соединений.

Исходными данными для решения задачи размещения являются:

- данные о конфигурации и размерах коммутационного пространства, определяемые требованиями установки и крепления соответствующей сборочной единицы в аппаратуре;
- количество и геометрические размеры конструктивных элементов, подлежащих размещению;
- схема соединений, а также ряд ограничений на взаимное расположение отдельных элементов, учитывающих особенности разрабатываемой конструкции.

Задача сводится к отысканию для каждого размещаемого элемента таких позиций, при которых оптимизируется выбранный показатель качества  $L$ , и обеспечиваются наиболее благоприятные условия для последующего электрического монтажа.

Универсальным критерием оптимизации как при размещении элементов, так и при трассировке соединений между элементами электрической схемы является минимум суммарной длины соединений:

$$L(P) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} \times dp(i)p(j) \rightarrow \min \quad (1)$$

В том случае, если в качестве критерия размещения множества элементов схемы  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  в множество фиксированных позиций  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  использовать минимум суммарной взвешенной длины соединений, необходимо сформировать матрицу связности  $R = \| r_{ij} \|_{n \times n}$  и матрицу расстояний между элементами схемы  $D = \| d_{ij} \|_{n \times n}$ , где  $n$  – количество размещаемых элементов электрической схемы. В общем случае расстояние между элементами  $e_i$  и  $e_j$  схемы вычисляется по формуле:  $d_{ij} = ((x_i - x_j)^k + (y_i - y_j)^k)^{1/s}$ .

Поскольку при конструировании печатных плат, как правило, трассировка соединений между элементами схемы осуществляется в ортогональной (под прямым углом) и евклидовой (по диагонали) метриках, то запишем формулы, по которым вычисляется  $d_{ij}$  в указанных выше метриках соответственно:

- 1)  $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ , когда  $s = k = 1$  – в ортогональной метрике;
- 2)  $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  при  $s = k = 2$  – в евклидовой метрике.

В вышеприведенных формулах  $x_i, x_j$  и  $y_i, y_j$  – координаты позиций, в которые размещаются соответственно  $i$ -й и  $j$ -й модули.

Математически задача формулируется следующим образом. Электрическая схема представляется в виде мультиграфа [1,2,4,5,6], а моделью монтажного пространства служит графовая решётка [1]. Требуется вершины мультиграфа разместить в узлы графовой решётки таким образом, чтобы суммарная длина ребер размещенного мультиграфа была минимальна.

Задача размещения является комбинаторной, т.е. может быть решена только полным перебором (для размещения  $n$  элементов на  $n$  позиций существует  $n!$  вариантов размещения). Для решения задач размещения разработано большое количество различных алгоритмов [1, 2]. В данной работе рассмотрены эвристические алгоритмы.

**Алгоритм последовательного размещения** включает такую последовательность действий:

1. Сформировать матрицу расстояний  $D$ , элементы которой будем определять по формуле ортогональной метрики:  $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ .
2. Для каждой строки матрицы  $D$  определяем суммарное значение:  $d_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}$ .
3. Вводим матрицу связности  $R$  и ее размерность  $n$ .
4. Для каждой строки матрицы связности  $R$  определяем сумму элементов:  $r_i = \sum_{j=1}^n r_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .
5. Находим минимальное значение  $d_i$ , если  $p = i$ , то помещаем столбец в позицию  $d_j = p$ .
6. Находим максимальное значение  $r_i$ , если  $e = i$ , то удаляем столбец  $j = p$ .
7. Размещаем элемент  $e$  в позицию  $p$ .
8. Находим минимум  $d_i$  среди оставшихся  $(n - 1)$  элементов; находим строку с минимальным  $d_i$  и находим минимальный  $d_{ij}$  среди помеченных элементов. Здесь  $j = p$ . Определяем, какой элемент расположен в позиции  $j$ ; вновь присваиваем  $p = i$ ,  $j = p$  и помечаем столбец  $j$ .
9. Рассматриваем строку  $E$  в матрице  $R$  и находим максимальный  $r_{max}$ ; присваиваем  $e = i$ ,  $j = e$  и помечаем столбец  $j$ .
10. Находим число помеченных столбцов  $k$ ; если  $k < n$ , выполняем переход к 8, иначе – к 11.
11. Подсчитываем суммарную длину соединений.

**Алгоритм обратного размещения** включает такую последовательность действий:

1. Вычислить матрицу расстояний  $D$  между позициями на плате. Элементы матрицы  $d_{ij}$  определяются по формуле:  $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ .
2. Для каждой строки матрицы  $D$  определить суммарное значение элементов  $d_{ij}$ , стоящих в этой строке.
3. Для каждой строки матрицы  $R$  определить суммарное значение элементов  $r_{ij}$ , стоящих в этой строке. Полученные значения – локальные степени элементов.
4. Упорядочить элементы  $t_1$  по возрастанию характеристики  $r_i$ :  $tz_1, tz_2, \dots, tzn$ .
5. Упорядочить позиции  $l_j$  по убыванию характеристики  $d_j$ :  $ld_1, ld_2, \dots, ldn$ .
6. Выполнить размещение элементов в позиции  $p(t_k) = l_k$ , где  $k = 1, \dots, n$ .
7. Подсчитать суммарную длину по формуле минимума суммарной длины соединений между элементами электрической схемы.

Проведем сравнительный анализ эффективности рассмотренных выше алгоритмов с точки зрения удовлетворения критерию минимума суммарной длины соединений между элементами электрической схемы. Пусть исходная схема соединений между элементами электрической схемы имеет вид (рисунок 1).

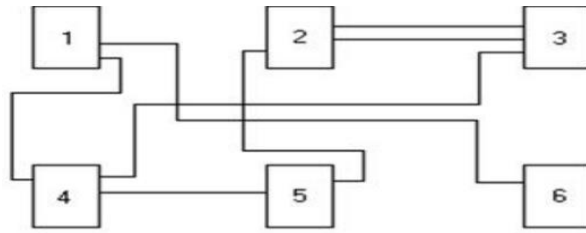


Рисунок 1 – Исходная схема соединений

Для исходной структуры соединений между элементами электрической схемы строим графовую модель (рисунок 2).

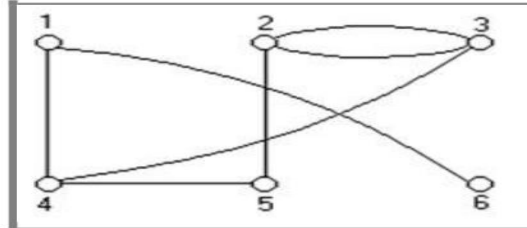


Рисунок 2 – Графовая модель исходной схемы соединений

Для приведенного примера рассмотрим работу последовательного алгоритма размещения. Составим матрицу расстояний  $D$  и матрицу связности  $R$ . Определим сумму элементов в каждой  $i$ -й строке матриц.

		1	2	3	4	5	6	$\sum d_i$
D=	1	0	1	2	1	2	3	9
	2	1	0	1	2	1	2	[7]
	3	2	1	0	3	2	1	9
	4	1	2	3	0	1	2	9
	5	2	1	2	1	0	1	7
	6	3	2	1	2	1	0	9

		1	2	3	4	5	6	$\sum r_i$
R=	1	0	0	0	1	0	1	2
	2	0	0	2	0	1	0	[3]
	3	0	2	0	1	0	0	3
	4	1	0	1	0	1	0	3
	5	0	1	0	1	0	0	2
	6	1	0	0	0	0	0	1

Среди  $S_{dij}$  находим минимальное число, оно равно 7 и соответствует позиции №2.

Все элементы второго столбца матрицы  $D$ . Среди  $S_{rij}$  находим максимальное число, оно равно 3 у.е. вершины №2. Поэтому 2-й модуль, имеющий наибольшее количество связей, размещаем в позицию №2. После этого 2-й столбец матрицы  $R$  исключаем из дальнейшего рассмотрения.

Имеем:

		1	2*	3	4	5	6	$\sum d_i$
D=	1	0	1	2	1	2	3	9
	2	1	0	1	2	1	2	
	3	2	1	0	3	2	1	9
	4	1	2	3	0	1	2	9
	5	2	1	2	1	0	1	[7]
	6	3	2	1	2	1	0	9

		1	3	4	5	6
R=	1	0	0	1	0	1
	2	0	[2]	0	1	0
	3	0	0	1	0	0
	4	1	1	0	1	0
	5	0	0	1	0	0
	6	1	0	0	0	0

Аналогично получаем:

		1	2*	3	4	5*	6	$\sum d_i$
D=	1	0	1	2	1	2	3	[9]
	2	1	0	1	2	1	2	
	3	2	1	0	3	2	1	9
	4	1	2	3	0	1	2	9
	5	2	1	2	1	0	1	
	6	3	2	1	2	1	0	9

		1	4	5	6
R=	1	0	1	0	1
	2	0	0	[1]	0
	3	0	1	0	0
	4	1	0	1	0
	5	0	1	0	0
	6	1	0	0	0

		1*	2*	3	4	5*	6	$\sum d_i$
D=	1	0	1	2	1	2	3	
	2	1	0	1	2	1	2	
	3	2	1	0	3	2	1	[9]
	4	1	2	3	0	1	2	9
	5	2	1	2	1	0	1	
	6	3	2	1	2	1	0	9

		1	4	6
R=	1	0	1	1
	2	[0]	0	0
	3	0	1	0
	4	1	0	0
	5	0	1	0
	6	1	0	0

		1*	2*	3*	4	5*	6	$\Sigma d_i$
	1	0	1	2	1	2	3	
	2	1	0	1	2	1	2	
D=	3	2	1	0	3	2	1	
	4	1	2	3	0	1	2	[9]
	5	2	1	2	1	0	1	
	6	3	2	1	2	1	0	9

		4	6
	1	1	1
	2	0	0
R=	3	1	0
	4	0	0
	5	1	0
	6	0	0

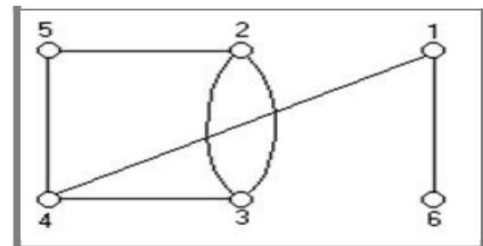
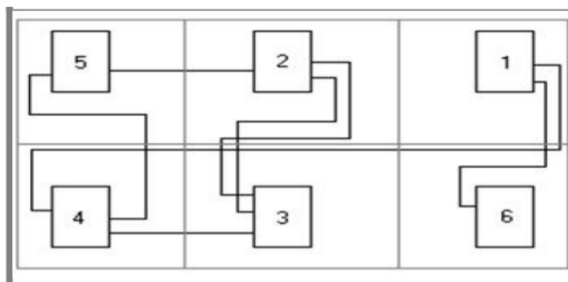
		1*	2*	3*	4*	5*	6	$\Sigma d_i$
	1	0	1	2	1	2	3	
	2	1	0	1	2	1	2	
D=	3	2	1	0	3	2	1	
	4	1	2	3	0	1	2	
	5	2	1	2	1	0	1	
	6	3	2	1	2	1	0	[9]

		6
	1	1
	2	0
R=	3	0
	4	0
	5	0
	6	0

Порядок размещения элементов схемы в монтажном пространстве представлен в следующей таблице, где X – координата центра ячейки по x; Y – координата центра ячейки по y; N – номер элемента:

X	1	2	3	1	2	3
Y	1	1	1	2	2	2
N	5	2	1	4	3	6

Преобразованные схемы соединений и графа изображены на рисунках 3.а и 3.б.



а

б

Рисунок 3 – Преобразованная схема соединений (а) и преобразованный граф (б)

Результаты вычислений: суммарная длина проводников  $L = 9$  у. е.

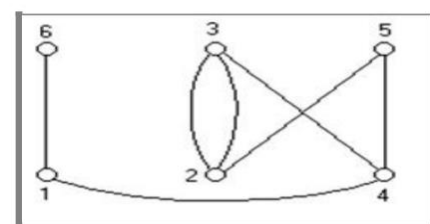
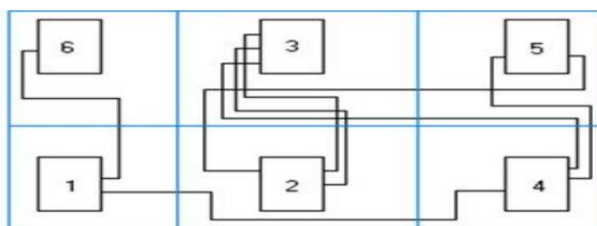
Рассмотрим работу алгоритма обратного размещения. Составим матрицы  $D$  и  $R$ .

		1	2	3	4	5	6	$\Sigma d_i$
	1	0	1	2	1	2	3	9
	2	1	0	1	2	1	2	7
D=	3	2	1	0	3	2	1	9
	4	1	2	3	0	1	2	9
	5	2	1	2	1	0	1	7
	6	3	2	1	2	1	0	9

		1	2	3	4	5	6	$\Sigma r_i$
	1	0	0	0	1	0	1	2
	2	0	0	2	0	1	0	3
R=	3	0	2	0	1	0	0	3
	4	1	0	1	0	1	0	3
	5	0	1	0	1	0	0	2
	6	1	0	0	0	0	0	1

Упорядочим  $Sr_i$  по возрастанию: 1(6) 2(5) 2(1) 3(4) 3(2) 3(3). Упорядочим  $Sd_i$  по убыванию: 9(1) 9(3) 9(4) 9(6) 7(5) 7(2).

Преобразованные схемы графа и соединений изображены на рисунках 4.а и 4.б.



а

б

Рисунок 4 – Преобразованная схема связей (а) и преобразованный граф (б)

Порядок размещения элементов схемы в монтажном пространстве представлен в следующей таблице:

X	1	2	3	1	2	3
Y	1	1	1	2	2	2
N	6	3	5	1	2	4

В результате работы алгоритма суммарная длина проводников равна:  $L = 10$  у. е.

Вывод: наиболее эффективным оказался алгоритм последовательного размещения.

**Заключение.** В работе предложена методика оценки эффективности применения того или иного алгоритма размещения элементов электрической схемы на основе сравнительного анализа качества работы алгоритмов по критерию минимума суммарной длины соединений. Результаты проведения сравнительного анализа позволяют найти алгоритмы, использование которых обеспечивает минимизацию суммарной длины связей между компонентами (конструктивными модулями) проектируемой печатной платы и, тем самым, приводит к повышению надежности, компактности и долговечности конструкции платы и экономии материальных и финансовых ресурсов. Причем, следует отметить, что эффективность алгоритмов будет отличаться при размещении разного количества конструктивных модулей. Основная практическая ценность работы заключается в разработке и применении нового подхода для решения задач процесса размещения функциональных устройств различного уровня структурной иерархии на ранних этапах проектирования, которые характеризуются недостаточностью априорной информации. Применение предложенной методики оптимального размещения позволит на 20-50 % повысить удельную функциональную емкость в новых разработках ЭС различного назначения. Практические результаты работы могут быть положены в основу создаваемого государственного стандарта "Стандартные электронные модули первого и второго уровней РЭС".

**Список использованных источников:**

1. Морозов, К.К. Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие для вузов / К.К. Морозов, В.Г. Одинокоев, В.М. Курейчик. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
2. Зыков, А.Г. Алгоритмы конструкторского проектирования ЭВМ / А.Г. Зыков, В.И. Поляков. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 136 с.
3. Иванова, Н.Ю. Технология проектирования печатных плат в САПР P-CAD-2006 / Н.Ю. Иванова, А.С. Петров, В.И. Поляков, Е.Б. Романова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 - 168 с.
4. Омельченко, А. В. Теория графов / А.В. Омельченко. – М.: МЦНМО, 2018. – 416 с.
5. Емеличев, В. А. Лекции по теории графов. / В. А. Емеличев, О. И. Мельников, В. И. Сарванов, Р. И. Тышкевич. – М.: УРСС, 2009. -392 с.
6. Зыков, А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. – М.: Вузовская книга, 2004. - 664 с.

UDC 621.396

## ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF ALGORITHMS FOR PLACING ELECTRONIC COMPONENTS AT THE EARLY STAGES OF DESIGN

*Maloletkin A.B. <sup>1</sup>, Skudnyakov Yu.A. <sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus*

*<sup>2</sup> Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Skudnyakov Yu.A. – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

**Annotation.** The paper analyzes the effectiveness of algorithms for placing electronic components of electronic means on a printed circuit board. A comparative analysis of the efficiency of sequential and reverse placement of an equal number of components of the same electrical circuit in accordance with the criterion of the minimum total length of connections on the mounting plane (printed circuit board) is carried out. The best result is shown by a sequential algorithm to meet the specified criterion.

**Keywords:** analysis of the effectiveness of placement algorithms, sequential and reverse placement algorithms, the criterion of the minimum total length of connections between the elements of the electrical circuit.