

УДК 004.896

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЗМЕЩЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Д. А. Перепелкин**, д.т.н., профессор, декан ФВТ РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0003-4775-5745, e-mail: perepelkin.d.a@rsreu.ru

**В. Ю. Ликучев**, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0002-2430-5234, e-mail: v.likuchov@yandex.ru

*С развитием отрасли радиоэлектронной промышленности меняются характер и специфика выполнения процедур конструкторского проектирования радиоэлектронных средств специального назначения. Непрерывно оказывают влияние следующие факторы: во-первых, ужесточение требований по качеству и точности функционирования устройств, а во-вторых, миниатюризация радиоэлектронных компонентов (РЭК) и, как следствие, увеличение размерности схем, компонуемых на модулях первого уровня. Использование инструментальных средств автоматизации проектирования позволяет сокращать сроки разработки изделий, однако в условиях, описанных выше, необходимо, чтобы эти средства могли решать задачу с учетом всего множества критериев, а результат проектирования удовлетворял множеству требований, предъявленных к конструкции, что особо сложно при больших размерностях схем. В основе инструментальных средств автоматизации проектирования лежат математический и алгоритмические аппараты, которые базируются на некоторой модели представления объекта. Эффективным способом усовершенствования средств проектирования является представление объекта как системы, то есть совокупности связанных элементов (агентов), которые в свою очередь могут составлять более крупные структурные элементы. Например, в задаче размещения РЭК на печатной плате, в зависимости от уровня и критерия представления, элементами структуры являются сами РЭК, функциональные узлы, симметричные группы РЭК и группы РЭК с определенными свойствами. Особого внимания требует разработка алгоритмов структурирования, то есть выделения элементов структуры. Критерии выделения должны быть такими, чтобы каждый элемент соответствовал функциональной или структурной части объекта проектирования. Только такое решение позволит учитывать полноту требований к разрабатываемой конструкции. Кроме того, правильный выбор критериев выделения позволит оптимизировать вычислительный процесс размещения, отсеять лишние итерации, распараллелить типовые операции за счет обнаруженной на этапе структурирования повторяемости структурных элементов. **Цель работы** – разработка алгоритмов структурирования электрической схемы для решения задачи размещения радиоэлектронных компонентов на основе мультиагентных систем*

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, топологическое проектирование, размещение элементов, мультиагентная система, электронный модуль, печатная плата.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2024-87-90-102

### Введение

Наиболее существенной и объемной задачей конструкторского этапа проектирования радиоэлектронных средств являются топологическое проектирование [1] и, в частности, его ключевая процедура – размещение компонентов на печатной плате.

Размещение компонентов в процессе топологического проектирования модулей современных радиоэлектронных средств специального назначения характеризуется следующими условиями:

– большая размерность электрических схем и многофункциональность устройств, компонуемых на базовых несущих конструкциях модулей;

– неравномерность структуры объекта размещения, то есть разброс геометрических конфигураций компонентов и отсутствие фиксированных позиций для их размещения;

– наличие большого числа пересекающихся требований к конструкции и топологии проектируемых устройств, среди которых требования по обеспечению заданного пути прохождения сигнала, его точности, помехоустойчивости, общие требования ЭМС и тепловой защищенности и другие конструкционные требования.

Также одной из основных задач на этапе конструкторско-технологического проектирования и подготовки производства печатных плат является повышение технологичности изделий, что сложно в условиях постоянно увеличивающейся плотности компоновки узлов при существующих требованиях к конструкциям [2].

В условиях современного уровня развития электронной техники многие стандарты и подходы к проектированию подвергаются пересмотру. Во многих случаях это связано с тем, что правила проектирования составляются как разумный компромисс между максимально достижимым качеством проектируемой техники и возможностями систем проектирования и производства. Постоянный рост технического уровня производственных площадок и развитие систем проектирования не могут и не должны сдерживаться отставанием развития методологических подходов. На сегодняшний день некоторые из таких подходов в области проектирования печатных плат требуют переоценки целесообразности применения [3].

Для достижения оптимального размещения уже недостаточно руководствоваться чисто метрическими критериями, такими как длина соединений (во многих случаях метрические критерии не первостепенны). Расположение каждого компонента должно быть обосновано с точки зрения правильного функционирования устройства. В независимости от формального описания данного требования, для его выполнения необходимо упорядочить и детерминировать поиск оптимального положения компонентов путем ориентации на их сущностное представление (в виде автоматов или интеллектуальных агентов) и использования системных свойств объекта размещения. В контексте подхода ключевым методом является структурирование объекта, то есть выделение в нем структурных частей по заданным критериям. Для электрической схемы такими частями являются функциональные узлы, симметричные группы компонентов и группы с особыми признаками. В результате такого разбиения обнаруживается, во-первых, порядок следования функциональных звеньев цепи, учет которого способствует соблюдению правильного пути прохождения сигнала, во-вторых, повторяемость частей схемы, позволяющая сократить число поисковых итераций.

Структурировать объект можно и на уровне агентов – на основании их характеристик, например, РЭК можно дифференцировать по степени их связности, габаритам и т.п. Здесь говорится о выделении кластеров и построении иерархий агентов. Определив индивидуальные параметры (скорость, шаг) и критерии поиска для агентов разного порядка, можно параллелизировать поиск по глобальному аддитивному критерию на общесистемном уровне.

Таким образом, представление объекта проектирования в виде системы программных сущностей и ее последующее структурирование позволяют повысить эффективность средств размещения в контексте соблюдения требований к конструкции и использования вычислительного времени. Поэтому особое внимание при построении математического обеспечения новых средств автоматизации топологического проектирования стоит уделить алгоритмам и методам структурирования схемы, рассмотрению которых и посвящена данная работа.

### **Разбиение электрической схемы**

В работе [4] определены следующие структурные части объекта размещения и соответствующие алгоритмы их выделения.

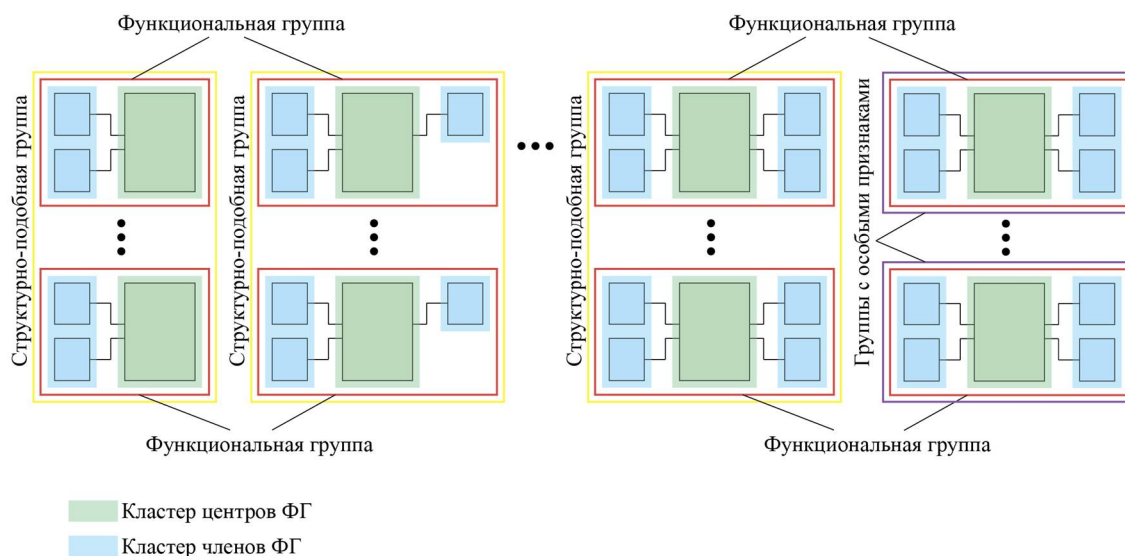
Функциональная группа (ФГ) есть подмножество связанных агентов, оптимальные положения которых находятся в общей локальной окрестности параметрического пространства. В контексте задачи размещения ФГ интерпретируются как функциональные узлы устройства, каждый из которых выполняет некоторую функцию обработки сигнала, и РЭК

которого должны быть размещены максимально компактно. Алгоритм выделения таких групп будем называть алгоритмом разбиения. Применение алгоритма разбиения в составе алгоритмической структуры программного модуля позволит решать задачу размещения в соответствии с принципом учета функционально-узловой структуры устройств.

Структурно-подобная группа (СПГ) есть множество одинаковых по составу и структуре подмножеств связанных агентов, причем оптимальные положения агентов одного подмножества совпадут с оптимальными положениями другого подмножества при переносе одного на другое. В контексте задачи размещения СПГ интерпретируется как подобные части схемы (например, каналы обработки сигналов), размещение которых должно быть максимально симметричным. Алгоритм выделения таких групп будем называть алгоритмом типизации. Применение алгоритма типизации в составе алгоритмической структуры программного модуля позволит решать задачу размещения в соответствии с принципом учета наличия в устройствах подобных узлов.

Группа с особыми признаками (ГОП) есть подмножество агентов, которые обладают особыми признаками, формирующими особые отношения с агентами вне этого подмножества. В контексте задачи размещения ГОП интерпретируется как группа РЭК-источников электромагнитных помех, повышенного тепловыделения или зафиксированных РЭК. Оптимальное положение таких компонентов регламентируется специальными правилами. Алгоритм выделения таких групп будем называть алгоритмом назначения. Применение алгоритма назначения в составе алгоритмической структуры программного модуля позволит решать задачу размещения в соответствии с принципом учета наличия в устройствах вышеописанных РЭК.

Системная структура электрической схемы представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Системная структура электрической схемы**  
**Figure 1 – Electrical circuit system structure**

Наиболее сложной задачей является создание алгоритмов разбиения, так как электрическая схема не дает представления о функциональной структуре устройства или, по крайней мере эту информацию нельзя получить алгоритмическим путем без использования существенной интерактивной компоненты. Проще говоря, функциональные узлы устройства мы можем выделить на схеме только вручную, что неэффективно при решении задач большой размерности. Поэтому при разбиении мы вынуждены отойти от стремления воспроизвести истинную функционально-узловую структуру устройства, но при этом должны сохранить требования компактности размещения наиболее связанных РЭК и соблюдения порядка размещения таких квази-функциональных групп связанных компонентов.

Определим основные принципы разбиения электрической схемы.

1. Агент обладает примитивным поведением. Согласно ЦР-модели [5], в процессе системной самоорганизации каждый агент имеет конечное число целей, а его действия по их достижению регламентированы конечным набором линейных правил (регламентом). Описание агента тем проще, чем меньше правил в его регламенте и чем меньше целей перед ним стоит (в идеальном случае цель должна быть единственной).

2. Функциональная группа есть группа агентов, составляющих некоторую функциональную сущность, но не сознающих ее в той мере, в которой единичный агент сознает свою индивидуальную цель или функцию. Поиск оптимума группой по аддитивному критерию возможен только путем параллельного поиска по компонентам этого критерия – агентами различных кластеров внутри группы. В свою очередь, кластеры можно получить дифференциацией агентов по некоторому признаку. РЭК в схеме можно разделить по степени связности. Компоненты с наибольшим значением этого параметра будем считать формальными центрами функциональных групп, определяющими положение последних в пространстве размещения (в связи с этим существование центров – обязательно) и, следовательно, выполняющими поиск по усложненному критерию. Чтобы воспроизвести увеличение времени оценки критериев центрами групп и особым образом синхронизировать потоки выполнения, необходимо для разных кластеров РЭК ввести индивидуальные значения параметров поиска, например скорости и шага перемещения.

3. Положим, что одним из критериев оптимизации размещения будет минимальная средняя длина связей. Однако РЭК различных кластеров будут минимизировать различные типы связей: центры ФГ – межузловые связи (внешние), остальные РЭК – связи между ними и центрами ФГ (внутренние). Для упорядочивания поиска и отсекаемых проверяемых (целевых) соединений также введем понятия входных и выходных связей.

Входные связи ФГ – это внешние связи между данной ФГ и группой, которая была определена на предшествующем шаге выделения. Для данной ФГ эти связи являются целевыми, то есть проверяемыми, оптимизируемыми. Выходные связи ФГ – это внешние связи между данной ФГ и группой, определенной на следующем шаге выделения, для которой эти связи будут целевыми.

Заметим, что последовательное выделение ФГ определяет иерархию групп и порядок их следования от первого до окончательного звена схемы. Этот механизм вместе с принципами входных/выходных связей обеспечивает соблюдение требуемого пути прохождения сигнала.

4. В функциональную группу включаются максимально связанные агенты. Если для РЭК существует неоднозначность его включения в конкретную ФГ (он одинаково связан с центрами нескольких ФГ), то он включается в ту группу, центр которой сильнее связан с компонентами, имеющими связь с этим РЭК.

Учитывая правила единственности цели и обязательного существования центра в ФГ, можно заключить, что схема содержит всего два кластера РЭК: кластер центров ФГ, определяющих положение групп и оптимизирующих их внешние (входные) связи, и кластер остальных членов – это РЭК, непосредственно связанные с центрами и оптимизирующие внутренние связи в группах. Разделение на кластеры происходит по критерию связности (степени вершины). Если в предполагаемой ФГ компоненты не дифференцируются по связности, то за центр принимается РЭК, смежный со всеми остальными.

Принцип входных и выходных связей устанавливает последовательный характер выделения ФГ – одну за другой. За начальные звенья принимаются РЭК, положение которых фиксировано (чаще всего это разъемы).

На основе вышеперечисленных принципов формализуем задачу разбиения электрической схемы.

Представим схему в виде гиперграфа  $H(V, E)$ , где  $V = \{v_1 \dots v_n\}$  – множество узлов или элементов схемы, а  $E = \{e_1 \dots e_m\}$  – множество ребер или электрических цепей. Также имеется множество  $F = \{f_1 \dots f_k\} \subset V$  – множество элементов с фиксированным положением. Требуется найти разбиение  $P = \{p: p \subset (V \setminus F)\}, \forall p_1, p_2 \in P, p_1 \neq p_2 \Rightarrow p_1 \cap p_2 = \emptyset$  – множество

подмножеств элементов или множество функциональных групп, таких, что элементы каждой группы максимально связаны друг с другом.

Понятие максимальной связности является специфическим и раскрывается в ходе анализа инженерных стратегий ручного проектирования [6], где за элементарную группу размещения обычно принимается группа, состоящая из одного элемента с валентностью вершины  $dv > 2$  (микросхема или многовыводной активный элемент) и смежных с ним элементов (обычно двухвыводных пассивных), причем среди цепей, инцидентных этим элементам, может существовать только одна цепь, инцидентная элементам не из данной группы. Таким образом, мы можем определить два кластера элементов:  $V_C = \{v_C: d(v_C) > 2\} \subset (V \setminus F)$  – кластер центров функциональных групп и  $V_B \subset (V \setminus F) \setminus V_C$  – кластер членов групп. Тогда  $i$ -ю группу можно представить как  $p_i = \{v_C^{p_i}, v_{B_1}^{p_i}, v_{B_2}^{p_i}, \dots, v_{B_n}^{p_i}\}$ ,  $\forall v_B^{p_i} \Leftrightarrow v_B^{p_i} \sim v_C^{p_i}$ , где  $v_C^{p_i}$  – центр группы,  $v_B^{p_i}$  – элемент группы,  $v_B^{p_i} \sim v_C^{p_i}$  – обозначение смежности элемента ФГ  $v_B^{p_i}$  и центра  $v_C^{p_i}$ , а условие разбиения –  $|\{e \in E: eI(v_B^{p_i}, v_B^{p_j})\}| \leq 1$ , где  $eI(v_B^{p_i}, v_B^{p_j})$  – обозначение инцидентности ребра  $e$  двум вершинам из разных ФГ ( $v_B^{p_i}, v_B^{p_j}$ ).

Опишем алгоритм такого разбиения, при этом будем использовать следующие обозначения:  $aIb$  – инцидентность объектов  $a$  и  $b$ ,  $a \sim b$  – смежность объектов  $a$  и  $b$ ,  $a \bar{I}b$  – отсутствие инцидентности  $a$  и  $b$ ,  $a \bar{\sim} b$  – отсутствие смежности  $a$  и  $b$ .

**Шаг 1.** Формируем очередь из ребер, инцидентных фиксированным вершинам:

$$Q = \{q \in E: qI(f \in F)\}.$$

**Шаг 2.** Просматриваем вершину из числа вершин, инцидентных первому ребру очереди  $q_{head} = Q[0]$ , то есть вершину  $v_i \in \{v \in (V \setminus F): vIq_{head}\}$ .

Если вершина  $v_i$  еще не принадлежит к ФГ – ( $\forall p \in P \Leftrightarrow v_i \notin p$ ), то создается новая ФГ –  $p_{cur} \in P$  и  $v_i$  включается в нее в качестве текущего центра:  $v_i = v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$ . При этом  $q_{head}$  включается в список входных цепей  $p_{cur}$ .

**Шаг 3.** Если текущий центр  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$  инцидентен по крайней мере двум ребрам кроме  $q_{head}$  –  $|\{e \in (E \setminus q_{head}): eIv_{C_{cur}}^{p_{cur}}\}| \geq 2$  и смежен по крайней мере с двумя нефиксированными вершинами –  $|\{v \in (V \setminus F): v \sim v_{C_{cur}}^{p_{cur}}\}| \geq 2$ , то  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$  устанавливается и происходит переход к шагу 5, иначе – выполняется поиск нового центра (переход к шагу 4).

**Шаг 4.** Проверяются вершины  $\{v \in (V \setminus F): v \sim v_{C_{cur}}^{p_{cur}}\}$  на роль нового центра  $p_{cur} - v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$ . Приоритетом обладает вершина, для которой выполняются условия из шага 3. Если  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$  смежен с несколькими такими вершинами, то из них выбирается та, которая смежна с наибольшим числом вершин, смежных с текущим центром  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$ , то есть  $\max|\{v \in V: v \sim v_{C_{cur}}^{p_{cur}}, v \sim v_{C_{new}}^{p_{cur}}\}|$ , где  $v_{C_{new}}^{p_{cur}}$  – вершина-кандидат. Если таких вершин не существует, то центром становится первая смежная с текущим центром  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$  вершина (если существует).

**Шаг 5.** В текущую ФГ  $p_{cur}$  включаются все невключенные, нефиксированные вершины, смежные с центром ФГ  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}: \{v \in (V \setminus F), v \notin p_{cur}: v \sim v_{C_{cur}}^{p_{cur}}\}$ .

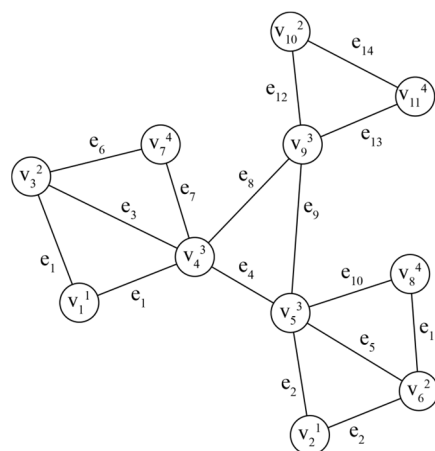
**Шаг 6.** В очередь  $Q$  добавляются следующие ребра – ребра, инцидентные центру ФГ  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}$  и вершинам, не входящим в текущую ФГ  $p_{cur}: \{e \in (E \setminus Q): eIv_{C_{cur}}^{p_{cur}}, \forall v \notin p_{cur} \Leftrightarrow vIe, \forall v \in \{v_{B_1}^{p_{cur}}, v_{B_2}^{p_{cur}}, \dots, v_{B_n}^{p_{cur}}\} \Leftrightarrow v \bar{I}e\}$ ; – ребра, инцидентные членам текущей ФГ  $p_{cur}$ , но не инцидентные центру  $v_{C_{cur}}^{p_{cur}}: \{e \in (E \setminus Q): e \bar{I}v_{C_{cur}}^{p_{cur}}, \forall v \notin p_{cur} \Leftrightarrow vIe, \forall v \in \{v_{B_1}^{p_{cur}}, v_{B_2}^{p_{cur}}, \dots, v_{B_n}^{p_{cur}}\} \Leftrightarrow vIe\}$ .

При этом, если рассматриваемое ребро принадлежит очереди  $Q$ , то оно заносится в список входных цепей текущей ФГ  $p_{cur}$ .

Далее происходит возврат к шагу 2 для просмотра следующей не просмотренной вершины  $v_i \in \{v \in (V \setminus F): vIq_{head}\}$ , если таковая имеется, иначе – переход к шагу 7.

**Шаг 7.** Первое ребро  $q_{\text{head}}$  исключается из очереди  $Q$  и происходит переход к шагу 2 с новым ребром  $q_{\text{head}}$ . Если очередь  $Q$  становится пустой, то алгоритм заканчивает свою работу.

Рассмотрим работу алгоритма на примере графа, представленного на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Пример графа электрической схемы**  
**Figure 2 – Example of an electrical circuit diagram graph**

В этой схеме вершины  $v_1$  и  $v_2$  являются фиксированными. На первом шаге формируем очередь  $Q$ . В нее войдут ребра, инцидентные фиксированным вершинам, то есть ребра  $e_1$  и  $e_2$ .

Рассматриваем вершины, инцидентные первому ребру очереди  $Q$ . Первая вершина, инцидентная ребру  $e_1$ , – вершина  $v_3$ . Она становится текущим центром новой ФГ, а ребро  $e_1$  заносится в список входных связей этой ФГ.

Далее, на роль нового центра рассматриваются вершины, смежные с  $v_3$ . Вершина  $v_4$  удовлетворяет условию множественной связности (условие шага 3 алгоритма) и поэтому становится новым центром текущей ФГ, куда включаются вершины, смежные с  $v_4$ , но не удовлетворяющие условию множественной связности. Такой вершиной будет только  $v_7$ .

Получаем первую ФГ, в которую входят вершины  $v_3, v_4, v_7$ . В очередь  $Q$  добавляются ребра  $e_4$  и  $e_8$  и исключается из нее ребро  $e_1$ . На данном этапе очередь  $Q$  будет иметь вид  $\{e_2, e_4, e_8\}$ .

При рассмотрении ребра  $e_2$  будет сформирована вторая ФГ с вершинами  $v_5, v_6, v_9$  и центром  $v_5$ . В очередь  $Q$  добавится ребро  $e_9$ . Состав очереди  $Q$  на данном этапе –  $\{e_4, e_8, e_9\}$ .

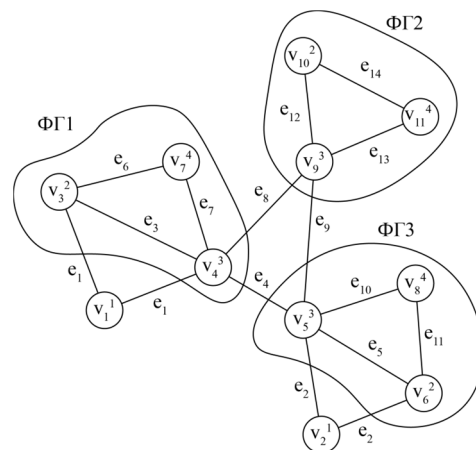
Рассмотрение  $e_4$  не приведет к созданию ФГ, так как инцидентные ему вершины  $v_4, v_5$  входят в уже существующие ФГ.

При рассмотрении ребра  $e_8$  будет сформирована третья ФГ с вершинами  $v_8, v_{10}, v_{11}$  и центром  $v_8$ . Ребро  $e_8$  заносится в список входных связей этой ФГ.

В очереди  $Q$  остается единственное ребро  $e_9$ . Его рассмотрение не приведет к созданию ФГ, но оно также будет включено в список входных связей третьей ФГ.

В итоге мы получим следующее разбиение  $P = \{\{v_3, v_4, v_7\}, \{v_5, v_6, v_9\}, \{v_8, v_{10}, v_{11}\}\}$ , диаграмма которого представлена на рисунке 3.

При формировании алгоритма было установлено, что условие отнесения компонента к кластеру центров  $dv > 2$  в общем является не строгим, так как при выполнении шага 4 (проверка центра) может оказаться, что для текущего двухвалентного центра не существует смежных многовалентных и многосвязных вершин. Тогда в роли центра остается либо текущая, либо смежная двухвалентная вершина.



**Рисунок 3 – Диаграмма разбиения графа**  
**Figure 3 – Graph partition diagram**

Алгоритм разбиения, по сути, представляет собой процедуру поиска в глубину с ограничением на размерность выделяемых подграфов. Ребра, инцидентные вершинам подграфов, выделенных в текущей итерации, и еще нерассмотренным вершинам, записываются для обхода в следующей итерации. В итоге происходит формирование списков входных цепей, минимизация которых может выступать в качестве критерия поиска для центров групп.

Таким образом, в процессе разбиения схемы определяются следующие структурные объекты:

- ФГ компонентов для реализации функционально-ориентированного размещения компонентов;
- кластеры центров и членов групп для распараллеливания общесистемного поиска по нескольким критериям;
- внутренние цепи ФГ для формирования критерия поиска для членов групп;
- входные цепи ФГ для формирования критерия поиска для центров групп.

### Типизация электрической схемы

Повторяемость фрагментов электрической схемы предполагает симметричное размещение РЭК внутри этих фрагментов. В большинстве случаев соблюдать данное условие нужно для того, чтобы обеспечить повторяемость характеристик сигналов, которые обрабатываются внутри подобных узлов. В качестве примеров таких узлов можно привести фильтры и усилители в многоканальных устройствах, коммутационные линии, источники напряжения и т.д.

Симметричное размещение компонентов в повторяющихся фрагментах способствует уменьшению различий в путях сигналов, что критически важно для поддержания стабильности и предсказуемости характеристик сигналов. Так, например, в случае многоканальных аналоговых устройств, таких как усилители и фильтры, несимметричное размещение может привести к различиям в задержках сигнала, фазовых характеристиках и амплитудных откликах. Это, в свою очередь, может негативно сказаться на качестве обработки сигналов и общей работоспособности устройства.

Кроме того, симметричное размещение повторяющихся блоков упрощает процесс проектирования и производства. Оно облегчает масштабирование схемы, добавление или удаление каналов без значительного перепроектирования. Также это обеспечивает удобство при монтаже и отладке, так как инженерам проще работать с повторяющимися, знакомыми конструкциями.

В целом, принцип повторяемости и симметрии в размещении РЭК в электрических схемах является ключевым для обеспечения высокой производительности, надежности и эффективности многоканальных и многомодульных электронных устройств.

Свойство электрических схем содержать повторяющиеся фрагменты можно использовать для ускорения или синхронизации поиска оптимума их размещения. В первом случае

размещение фрагментов повторяется по размещению подобного им фрагмента, для которого раньше, чем для других, был найден оптимум, а во втором – РЭК подобных фрагментов совершают одновременные симметричные перемещения. В этом контексте в качестве таких узлов можно рассматривать изоморфные функциональные группы, выделенные на этапе разбиения.

Исходя из этого, определим два порядка СПГ: группы изоморфных ФГ (СПГ первого порядка) и группы изоморфных совокупностей ФГ (СПГ второго порядка).

Формально СПГ первого порядка можно представить как множество  $S^I \subseteq P$ ,  $\forall p_1, p_2 \in S^I, p_1 \neq p_2 \Rightarrow p_1 \cap p_2 = \emptyset$ , в котором два любых  $p$  – изоморфны. Задача типизации первого порядка состоит в определении в схеме всех таких  $S^I$ .

Для выделения СПГ первого порядка достаточно проверки изоморфизма графов ФГ, полученных при разбиении схемы.

Два графа  $G = (X, U)$  и  $G' = (X', U')$  называются изоморфными, если можно установить взаимно однозначное соответствие  $X \leftrightarrow X', U \leftrightarrow U'$  такое, что если  $(x_i, x_j) \in X \leftrightarrow (x'_i, x'_j) \in X'$ , то ребро  $u_k = (x_i, x_j) \in U \leftrightarrow u'_k = (x'_i, x'_j) \in U'$  [7].

Очевидно, что проверка проводится по количеству и весам вершин (веса означают типы РЭК), а также по количеству и инцидентности ребер (внутренних цепей ФГ).

Каждый ФГ представляется в виде графа, где вершины соответствуют компонентам схемы (РЭК), а ребра – внутренним цепям, соединяющим эти компоненты. В процессе проверки изоморфизма первым шагом является сопоставление вершин двух графов. Это требует совпадения количества вершин и совпадения их весов, что предполагает схожесть типов РЭК в соответствующих точках ФГ. Далее идет анализ инцидентности ребер, при котором необходимо, чтобы количество ребер также совпадало и ребра соединяли те наборы вершин, которые были сопоставлены ранее.

После того как вершины и ребра сопоставлены, проводится структурное сравнение графов. Если структура обоих графов одинакова, то есть способ соединения вершин ребрами совпадает, графы считаются изоморфными. В таком случае соответствующие ФГ принадлежат к одной и той же СПГ первого порядка, что указывает на их функциональную схожесть и возможность выполнять аналогичные функции в электрической схеме.

Алгоритм типизации можно заметно упростить, если ввести понятие неполного изоморфизма. Суть подхода заключается в том, чтобы считать изоморфными две любые ФГ с центрами одинакового типа, ведь с учетом специфики графов ФГ единственным различием между ними может быть только неполнота набора вершин относительно наибольшего (полного) набора. Тогда алгоритм типизации сводится к сортировке множества ФГ в множество СПГ первого порядка по типу центров ФГ, при этом за эталон размещения принимается ФГ с полным графом.

Опишем алгоритм типизации для выделения СПГ первого порядка.

**Шаг 1.** Создадим словарь (хэш-таблицу)  $T = \{\{t_1, c_{t_1}\}, \{t_2, c_{t_2}\}, \dots, \{t_n, c_{t_n}\}\}$ , где  $n$  – количество типов РЭК, хранящих пары ключ-значение, где ключ  $t$  – тип РЭК, а значение  $c_t$  – количество центров ФГ этого типа.

**Шаг 2.** Для каждой записи из словаря  $T$ , в которой  $c_t \geq 2$ , создаем объект СПГ первого порядка  $S^I$  с атрибутом  $t$ .

**Шаг 3.** Проходя по множеству ФГ  $P$ , включаем каждую ФГ  $p \in P$  в ту СПГ  $S^I$ , значение атрибута  $t$  которой совпадает с типом центра этой  $p$ .

**Шаг 4.** В каждой СПГ первого порядка  $S^I$  определяем ФГ  $p$  с наибольшим набором вершин графа и принимаем ее за эталон размещения  $S^I$ .

Для графа, рассмотренного ранее, словарь  $T$  будет содержать четыре записи:  $T = \{\{1,0\}, \{2,0\}, \{3,3\}, \{4,0\}\}$  (типы РЭК обозначены числами в верхнем индексе вершин). Лишь в одной записи  $c_t \geq 2$ , так как центры всех трех ФГ имеют тип  $t = 3$ . Таким образом, все три ФГ войдут в единственную СПГ первого порядка (рисунок 4).



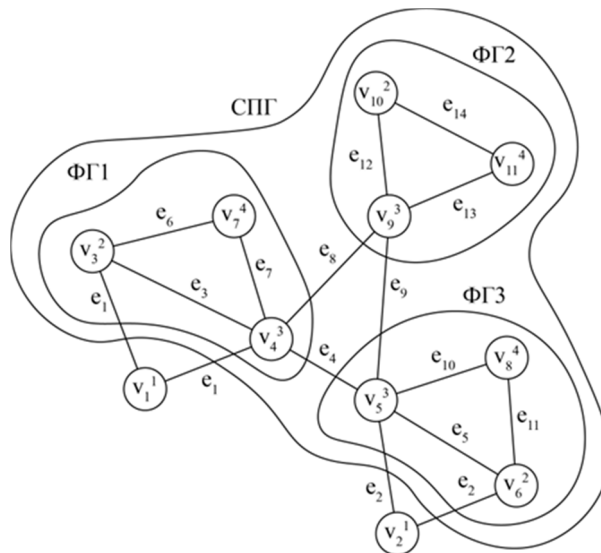


Рисунок 4 – Диаграмма типизации графа  
Figure 4 – Graph typing diagram

Пример СПГ первого порядка в реальной схеме изображен на рисунке 5.

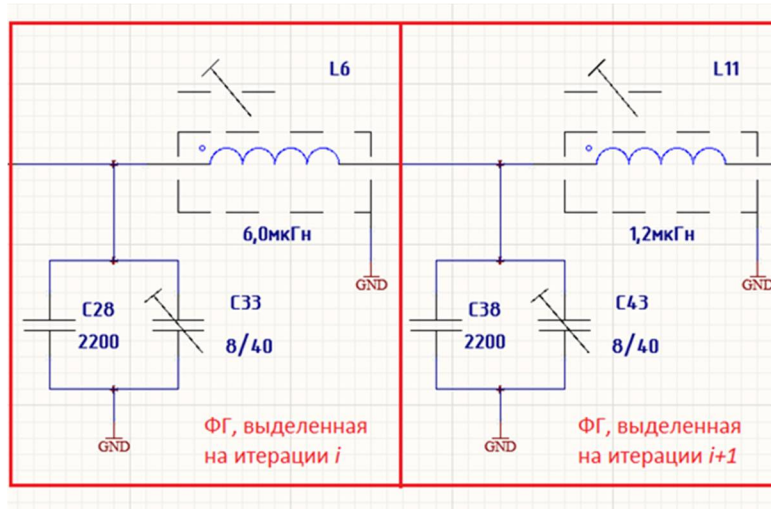
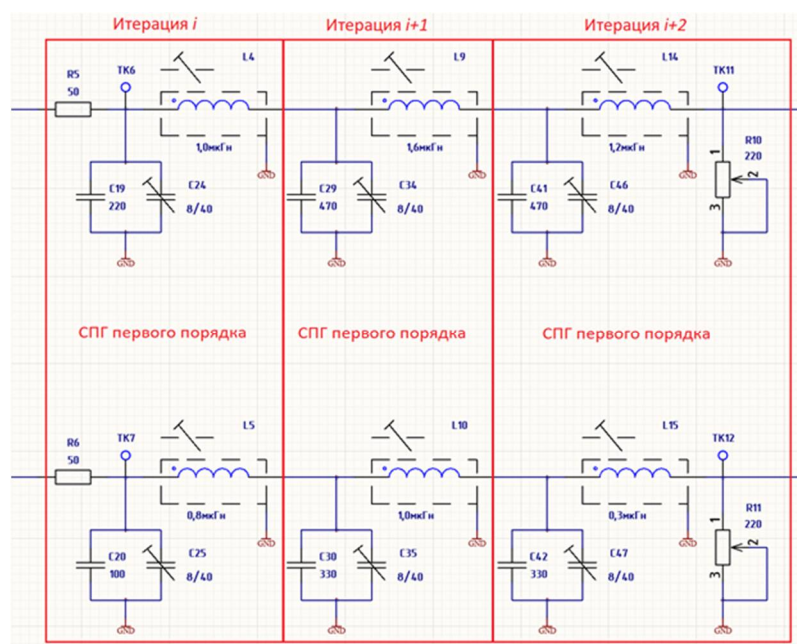


Рисунок 5 – Пример СПГ первого порядка  
Figure 5 – An example of a structurally similar first-order group

Для выделения СПГ второго порядка необходимо еще на этапе разбиения реализовать запись соответствия индексов выделяемых ФГ и номеров итераций, на которых они были выделены, то есть запись вида  $\{(p_i, n)\}$ , где  $n$  – номер итерации разбиения. Далее эта запись используется уже на этапе типизации. Если в двух или более итерациях были выделены изоморфные ФГ, то они причисляются к совокупностям-подмножествам одной СПГ второго порядка.

Формально СПГ второго порядка есть множество  $S^{II} \{S^I: \forall p_1, p_2 \in S^I, p_1 \neq p_2 \Rightarrow n_{p_1} = n_{p_2}\}; \forall S^I \in S^{II} \Rightarrow |S^I| \geq 2; \forall S^I_1, S^I_2 \in S^{II}, S^I_1 \neq S^I_2 \Rightarrow S^I_1 \cap S^I_2 = \emptyset$ . Задача типизации второго порядка состоит в определении в схеме всех таких  $S^{II}$ .

Пример СПГ второго порядка и принцип ее получения изображены на рисунке 6.



**Рисунок 6 – Пример СПГ второго порядка**  
**Figure 6 – An example of a structurally similar second-order group**

### Процедура назначения при структурировании электрической схемы

Еще одним структурным компонентом электрической схемы, выделение которого позволит при дальнейшем размещении учесть определенные критерии проектирования печатного узла, являются РЭК или группы РЭК с особыми признаками.

К особым признакам относятся:

- фиксирование положения компонента на печатной плате;
- повышенный уровень испускания электромагнитных помех;
- повышенное тепловыделение.

Наличие в схеме РЭК с особыми признаками определяющим образом влияет на формирование аддитивного критерия размещения и на сам его процесс. Так, фиксированные РЭК участвуют в процессе в качестве неподвижных отправных точек для формирования и размещения функциональных групп, а существование шумящих и греющихся компонентов требует учета ЭМС и тепловой защищенности, что изменяет вид критерия размещения (сами же подобные компоненты инициализируются в регламентах остальных РЭК как «угрозы», что приводит к их размещению на максимально отдаленном расстоянии).

Выделение РЭК с особыми признаками не поддается автоматизации, так как электрическая схема не несет данных о принадлежности компонентов к этой группе. Поэтому назначение производится в интерактивном режиме, до разбиения и типизации схемы. Причинами последнего условия являются, во-первых, потребность определения фиксированных РЭК для работы алгоритма разбиения, во-вторых, включение РЭК с особыми признаками в функциональные группы вместе с наиболее связанными компонентами (иначе связанные компоненты будут размещены на большом расстоянии), а также выделение СПГ с такими группами.

Назначение фиксированных РЭК может осуществляться и в процессе размещения в качестве корректировки промежуточного плана, однако в таком случае не произойдет переформирования функциональных групп.

### Заключение

Алгоритмы структурирования электрической схемы являются ключевой составляющей алгоритмического обеспечения средств автоматизации размещения РЭК на основе мультиагентных систем. В процессе структурирования определяются структурные элементы схемы и тем самым покрываются требования к топологическому проектированию модулей, обеспе-

чиваются механизмы повышения эффективности поискового процесса с точки зрения использования вычислительных ресурсов и времени.

Так, выделение функциональных групп (процедура разбиения) обеспечивает:

– учет связности РЭК для реализации требования их компактного размещения в пределах функциональных узлов и правильного пути прохождения сигналов;

– возможность распараллеливания поиска по нескольким критериям для разных кластеров РЭК в контексте общесистемного поиска;

– последовательный характер выделения узлов без повторных переборов гиперграфа схемы.

Выделение структурно-подобных групп (процедура типизации) обеспечивает:

– учет повторяемости ФГ или совокупностей ФГ для реализации требования повторяемости характеристик сигналов;

– возможность распараллеливания или шаблонизации размещения подобных групп.

Выделение РЭК и группы РЭК с особыми признаками (процедура назначения) обеспечивает:

– учет существования в схеме РЭК с особыми признаками;

– учет критериев ЭМС и тепловой защищенности при формировании аддитивного критерия размещения;

– назначение отправных точек для формирования ФГ и их размещения;

– назначение «угроз» для остальных РЭК.

Предложенный подход структурирования электрических схем открывает новые перспективы для автоматизации проектирования современных радиоэлектронных устройств специального назначения. Включение механизма структурирования в алгоритмический состав инструментального средства автоматизированного размещения обеспечивает базис для эффективной работы непосредственно алгоритма размещения, позволяя ему учитывать наиболее полный спектр конструкционных требований.

#### Библиографический список

1. **Морозов К.К., Одинокое В.Г., Курейчик М.В.** Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь. 1983. 280 с.

2. **Богданов Д.С., Богданова И.А.** Проблемы современного проектирования печатных плат // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 119-123. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-119-123.

3. **Дрожжин И.В.** Алгоритм повышения технологичности многослойных печатных плат // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 75-82. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-75-81.

4. **Перепелкин Д.А., Ликучев В.Ю.** Структура программного модуля автоматизированного размещения компонентов на основе мультиагентных систем. VI Международный научно-технический форум СТНО-2023. Сборник трудов. Том 3. С. 116-125.

5. **Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Ликучев В.Ю.** Математическая модель представления мультиагентных систем и ее применение в задачах топологического проектирования модулей радиоэлектронных средств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 83. С. 48-61. DOI:10.21667/1995-4565-2023-83-48-61.

6. **Перепелкин Д.А., Ликучев В.Ю.** Мультиагентный подход автоматизированного проектирования модулей радиоэлектронных устройств на основе анализа инженерных стратегий. V Международный научно-технический форум СТНО-2022. Сборник трудов. Том 3. С. 124-132.

7. **Курейчик В.М.** Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1990.– 352с.: ил.

UDC 004.896

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR STRUCTURING ELECTRICAL CIRCUITS IN SOLVING THE PLACEMENT PROBLEMS OF ELECTRONIC COMPONENTS BASED ON MULTI-AGENT SYSTEMS

**D. A. Perepelkin**, Dr. Sc. (Tech.), professor, Dean of the Faculty of Computer Engineering, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-4775-5745, e-mail: perepelkin.d.a@rsreu.ru.ru

**V. Y. Likuchov**, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-2430-5234, e-mail: v.likuchov@yandex.ru

*With the development of the radio-electronic industry, the nature and specifics of the design procedures of specialized radio-electronic devices are changing. The following factors continuously influence this process: firstly, the tightening of requirements for the quality and accuracy of device operation, and secondly, the miniaturization of electronic components and consequently, an increase in the dimensionality of the circuits assembled on first-level modules. The use of automated design tools helps to shorten product development times; however, under the conditions described above, it is necessary for these tools to solve the problem taking into account a multitude of criteria, and the design result must satisfy the multitude of requirements posed to the structure, which is especially difficult with large circuit dimensions.*

*At the core of automated design tools lie mathematical and algorithmic apparatuses based on a certain model of object representation. An effective way to improve design tools is to represent the object as a system, that is, a collection of interconnected elements (agents), which in turn can form larger structural elements. For example, in the task of placing ECs on a printed circuit board, depending on the level and criterion of representation, the elements of the structure are the ECs themselves, functional nodes, symmetrical groups of ECs, and groups of ECs with specific properties. Particular attention is required for the development of structuring algorithms, that is, the identification of structural elements. The criteria for identification should be such that each element corresponds to a functional or structural part of the object of design. Only such a solution will allow for considering the full range of requirements for the design under development. Moreover, the correct choice of identification criteria will optimize the computational process of placement, eliminate unnecessary iterations, and parallelize typical operations due to the repetition of structural elements identified during the structuring stage.*

*The aim of this work is to describe methods and algorithms for structuring electrical circuits to solve the problem of placing electronic components based on multi-agent systems.*

**Keywords:** design automation, topological design, component placement, multi-agent system, electronic module, printed circuit board.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-87-90-102

### References

1. **Morozov K.K., Odinkov V.G., Kurejchik M.V.** Avtomatizirovannoe proektirovanie konstrukcij radioelektronnoj apparatury. M.: *Radio i svjaz'*. 1983. 280 p. (In Russian).
2. **Bogdanov D.S., Bogdanova I.A.** Problemy sovremennogo proektirovaniya pechatnyh plat. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018. no 65, pp. 119-123. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-119-123. (in Russian).
3. **Drozhzhin I.V.** Algoritm povysheniya tehnologichnosti mnogoslojnyh pechatnyh plat. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016. no. 57, pp. 75-82. DOI:10.21667/1995-4565-2016-57-3-75-81. (in Russian).
4. **Perepelkin D.A., Likuchev V.Y.** Ctruktura programmnoogo modulja avtomatizirovannogo razmesheniya komponentov na osnove mul'tiagentnyh sistem. *VI Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij forum STNO-2023*. Sbornik trudov, vol. 3. pp. 116-125. (In Russian).
5. **Korjachko V.P., Perepelkin D.A., Likuchev V.Y.** Matematicheskaja model' predstavlenija mul'tiagentnyh sistem i ee primenenie v zadachah topologicheskogo proektirovaniya modulej radioelektronnyh

sredstv. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023, no. 83, pp. 48-61. DOI:10.21667/1995-4565-2023-83-48-61. (In Russian).

6. **Perepelkin D.A., Likuchev V.Y.** Mul'tiagentnyj podhod avtomatizirovannogo proektirovanija modulej radioelektronnyh ustrojstv na osnove analiza inzhenernyh strategij. *V Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij forum STNO-2022*. Sbornik trudov, vol 3, pp. 124-132. (In Russian).

7. **Kurejchik V.M.** Matematicheskoe obespechenie konstruktorskogo i tehnologicheskogo proektirovanija s primeneniem SAPR: *Uchebnik dlja vuzov*. – M.: Radio i svjaz', 1990.– 352p.: il. (In Russian).