

Топометрический подход к построению САПР плоских конструктивов

С.В. Курапов,
к.ф. - м.н., доц., lilili5050@rambler.ru,
ЗНУ, г. Запорожье, Украина,
М.В. Давидовский,
зав. ЦИО, m.davidovsky@gmail.com,
ЗОИППО, г. Запорожье, Украина

На основе теории вращений создана теоретико-множественная структура – топологический рисунок графа (\mathbf{G}, \hbar) схемы электрической принципиальной. Данная модель позволяет решать следующие задачи проектирования плоских конструктивов: проверку графа на планарность, выделение максимально плоского суграфа непланарного графа, построение топологического рисунка с минимальным числом пересечений рёбер, построение рисунка графа минимальной толщины. Решение задач осуществляется алгебраическими методами, не производя никаких геометрических построений на плоскости. Для построения общего и послойных топологических рисунков применяются алгоритмы методов дискретной оптимизации с полиномиальной вычислительной сложностью.

On the basis of the theory of rotations, the authors propose a set-theoretic structure – a topological drawing of graph (\mathbf{G}, \hbar) , where graph \mathbf{G} represents the circuit diagram (principal electric scheme) of a flat construction. This model allows solving the following problems of flat constructs design: graph planarity testing, finding the maximally flat subgraph of a non-planar graph, constructing the topological drawing of a graph with the minimum number of edges intersections, constructing the drawing of a graph of minimum thickness. The solution of problems is carried out by algebraic methods without producing any geometric constructions on the plane. For the construction of general and layered topological drawings, the algorithms of discrete optimization methods with polynomial computational complexity are applied.

Под *плоским конструктивом* будем понимать техническое устройство (конструкцию), где непересекающиеся соединения между элементами устройства и сами элементы расположены в параллельных (эквилидистантных) плоскостях. Это могут быть печатные платы, гибкие печатные платы, интегральные микросхемы, БИС, СБИС и т.д.

Будем рассматривать и сравнивать два подхода к методам автоматизированного проектирования плоских конструктивов.

Первый подход в основном базируется на геометрическом методе поиска пути волновым алгоритмом Ли или его модификациями. Данный подход позволяет получить единственное решение, как правило, далекое от оптимального. Причём, это решение достигаемое методом случайного ненаправленного поиска. Применяемые в рамках такого подхода алгоритмы не позволяют получать множество альтернативных решений и осуществлять их анализ. Данные методы проектирования полностью игнорируют топологические свойства соединений и принципиально не могут решить задачу определения пересечений соединений до их проведения в пространстве \mathbf{R}^2 . Будем называть такой подход геометрическим подходом.

Второй подход основан на топометрических методах, основой которых является построение рисунка графа схемы электрической принципиальной (СЭП), и решении следующих основных задач: выделение максимально плоского подграфа, построение рисунка графа с минимальным числом пересечений соединений, расслоение рисунка графа на минимальное число плоских суграфов, определяющих слой, и других задач. Такой подход будем называть топометрическим.

В свою очередь, следует различать топологический и геометрический рисунки графа. Топологический рисунок графа – это граф с определенным вращением вершин. Т.е., топологический рисунок графа – это теоретико-множественная структура, позволяющая описывать процесс проведения соединений алгебраическими методами, не проводя геометрических построений на плоскости. Геометрическое проведение соединений осуществляется в конце решения задачи на основе топологического рисунка быстродействующими алгоритмами. Топологический рисунок графа позволяет описывать процесс проведения соединений как в общем виде – с учётом их пересечения, так и в виде планарных суграфов для каждого слоя. Геометрический рисунок графа – это отображение топологического рисунка с заданными координатами вершин и определенной функциональной зависимостью соединений.

Следует отметить, что при применении первого подхода возникает странная ситуация, когда рисунок графа принципиальной электрической схемы восстанавливается по геометрическому изображению соединений проведенных геометрическим методом (верификация). В то время как прямое решение задачи – это получение геометрического изображения для заданного топологического рисунка с учётом конструктивно-технологических параметров.

Если при проектировании плоских конструктивов геометрический рисунок графа $(\mathbf{G}, \mathbf{R}^2)$ рассматривать в качестве прообраза, тогда в качестве образа должен выступать топологический рисунок графа (\mathbf{G}, \hbar) . Очевидно, что при таком подходе отображение $f : (\mathbf{G}, \mathbf{R}^2) \rightarrow (\mathbf{G}, \hbar)$ будет сюръективным и может быть не связано с заданной СЭП. Но тогда естественный процесс визуализации топологического рисунка графа в геометрический должен быть описан как $f^{-1} : (\mathbf{G}, \hbar) \rightarrow (\mathbf{G}, \mathbf{R}^2)$. То есть одному топологическому рисунку должно соотноситься множество геометрических рисунков. Данная ситуация возникла из-за отсутствия математической модели рисунка графа, так как теория графов описывает структуры с точностью до изоморфизма.

В самом начале развития топометрического подхода осуществлялся только поиск методов выделения и описания плоской части графа (см., например, отечественные работы авторов Мелихова А.Н., Берштейна Л.С., Курейчика В.М., Дедьдобренко Б.Н., Касьянова В.Н., Евстигнеева В.А. [4,11] и других авторов). Разрабатывались методы

определения пересечения связей (Шемелинин В.М. [14]); отечественными учеными Раппопортом Л.И., Мороговским Б.Н., Поливцевым С.А. была создана векторная алгебра пересечений [12].

Среди широко известных алгоритмов анализа графа на планарность наилучшими являются алгоритмы Хопкрофта-Тарьяна [13], Лемпеля-Ивена-Цедербаума [15] и Рабина [17]. Однако задача анализа планарности непланарного графа, как правило, сама по себе лишена смысла, но поскольку математический аппарат анализа хорошо разработан, то имеет смысл использовать алгоритмы проверки планарности как основу для построения алгоритмов планирования непланарных графов. По этому пути идут многие исследователи и создатели программного обеспечения.

Вопросу построения рисунка графа посвящено большое количество работ, и их анализ представляет собой отдельную задачу и частично отражен в работах Апанович З.В. [1] и Roberto Tamassia [16]. К сожалению, следует отметить, что все известные нам работы, посвящённые проблеме построения рисунка графа, строятся на основе геометрического подхода, игнорируя его топологические свойства. В свою очередь, целью настоящей работы является рассмотрение вопроса применения подхода «топологический рисунок – геометрический рисунок» к проектированию плоских конструктивов.

Ядром топологического подхода является решение задачи выделения максимально плоского подграфа. Известно, что данная задача является NP-полной [2]. Для её решения применяют различные эвристические методы: генетические алгоритмы, методы отжига, роевые алгоритмы, случайный поиск и так далее [3,4,10]. Однако данные алгоритмы лишь косвенно отражают процесс выделения плоской части графа, так как в них отсутствует четкое математическое понятие рисунка планарного графа.

Следует отметить, что существует полиномиальный алгоритм сведения задачи выделения максимально плоского подграфа к задаче выделения максимально плоского суграфа. Для такой задачи существуют приближенные методы дискретной оптимизации для поиска решения в подпространстве циклов с полиномиальной вычислительной сложностью [9].

Выделим основные этапы построения математической модели для проектирования соединений, условно называемым топометрическим методом [5-8].

Этап 1. Построение графа принципиальной электрической схемы и если элемент представлен в виде вершины – выделение изометрических циклов графа. Если элемент представлен циклическим фрагментом – выделение единичных циклов. Цепи представляются гиперребрами. Полученные множества циклов являются неким инвариантом графа СЭП (схемы электрической принципиальной) в пространстве суграфов G .

Этап 2. Выделение максимально плоского суграфа осуществляется методами дискретной оптимизации на выделенном базисе подпространства циклов C до получения минимального значения функционалов Маклейна, а затем Понтрягина-Куратовского.

Этап 3. Размещение вершин графа в поле плоского конструктива и построение дерева минимального веса (расстояния) для гиперребра электрической цепи. Размещение вершин после определения их топологического взаимоположения можно проводить различными итерационными «силовыми» алгоритмами.

Этап 4. Построение общего топологического рисунка графа с минимальным числом пересечений путём добавления рёбер удалённых в процессе планирования (см. рис. 1, 2 и 3). Как правило, такие задачи хорошо решаются фрагментарно-эволюционными алгоритмами.

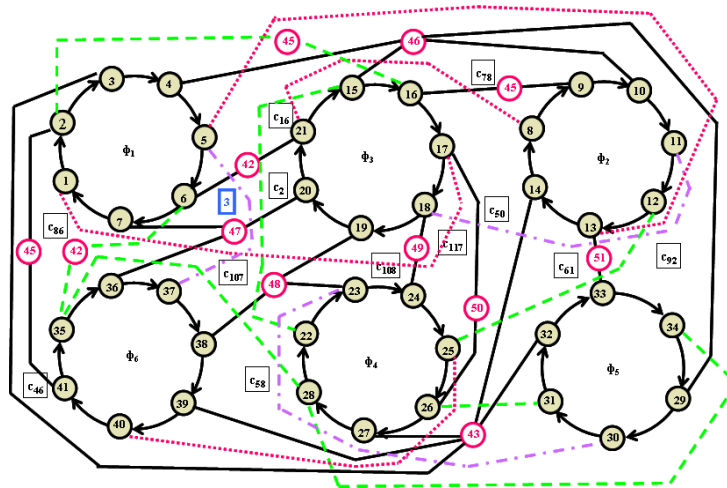


рис. 1. Общий топологический рисунок графа

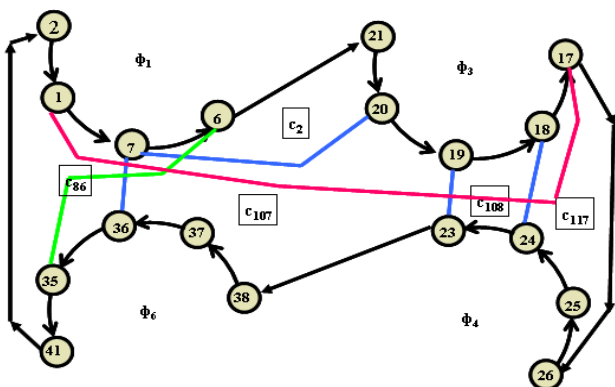


рис. 2. Соединения не пересекаются

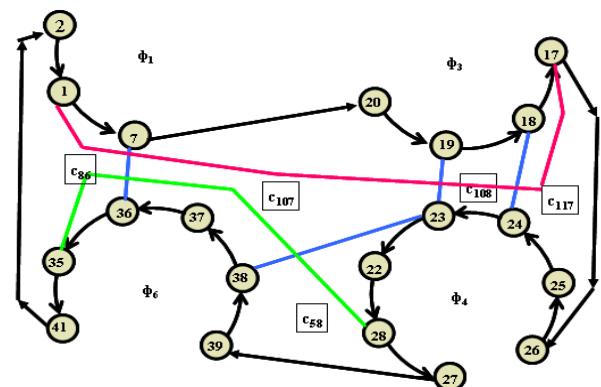


рис. 3. Соединения пересекаются

Этап 5. Разбиение топологического рисунка графа на планарные суграфы с целью получения минимального количества слоёв. Здесь решение производится относительно общего топологического рисунка алгоритмами раскраски вершин графа пересечения связей.

Этап 6. Проведение топометрических линий с целью определения загрузки макродискретов пространства R^2 .

Этап 7. Предварительная трассировка соединений по макродискретам методом гибкой трассировки (см. рис. 4).

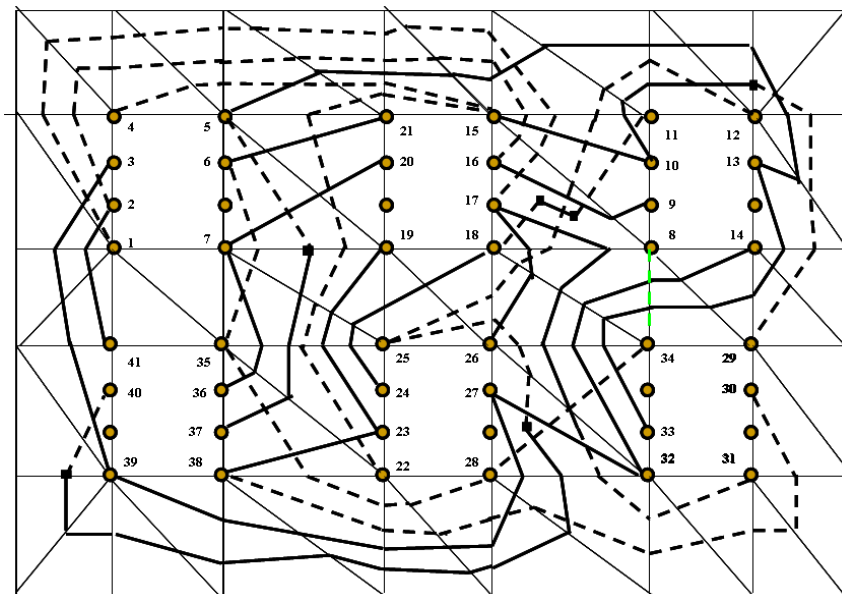


рис.4. Предварительная гибкая трассировка

Здесь возможно применение алгоритмов трассировки по частям, сжатие и расширение пространства макродискретов и другие преобразования (см. рис. 6, 8 и 9).

Этап 8. Окончательная трассировка быстродействующими алгоритмами (например, алгоритмом прицеливания – см. рис. 5 и рис. 7).

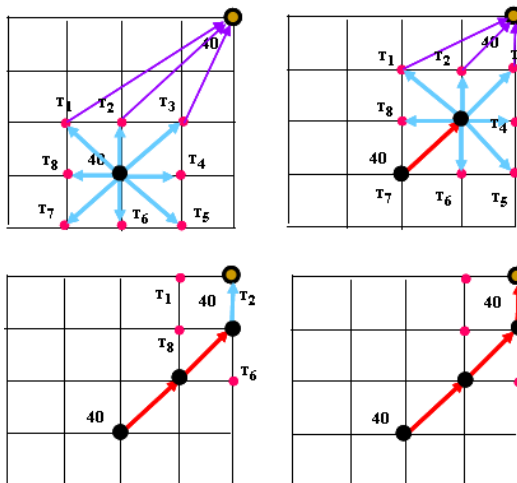
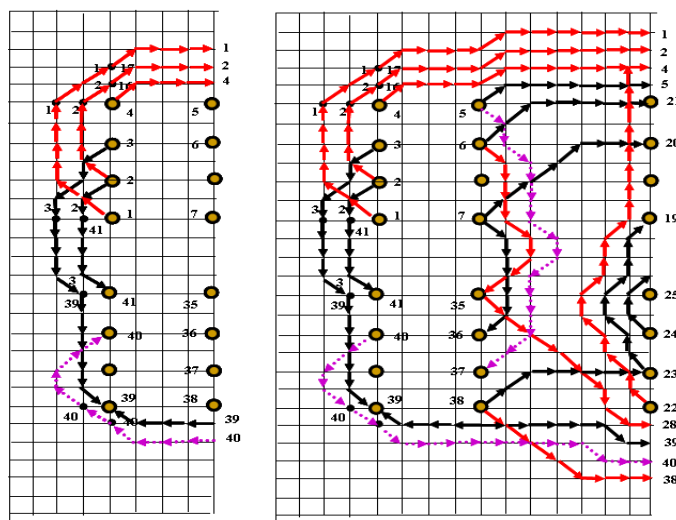


рис. 5. Алгоритм прицеливания



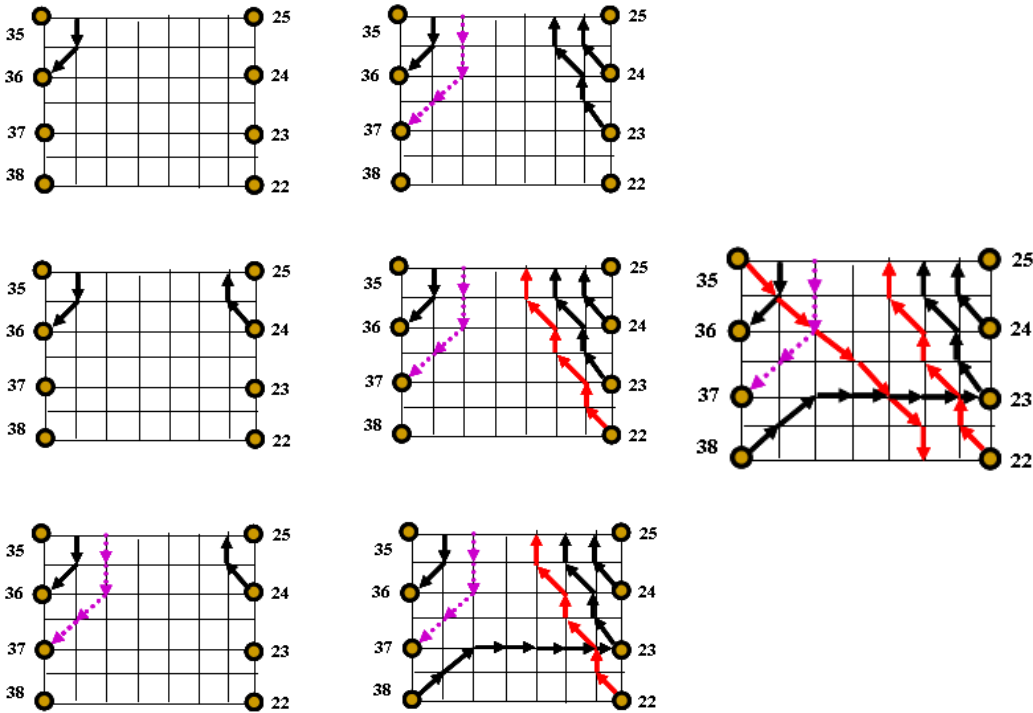


рис. 6. Трассировка по частям алгоритмом прицеливания

Так как имеется большое количество суграфов близких к максимально плоскому суграфу, то возможно построение нескольких общих топологических рисунков для заданного графа СЭП. Число таких топологических рисунков в процессе проектирования может меняться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения в зависимости от конструктивно-технологических требований.

Многовариантность решения задачи предполагает выбор одного варианта $r_i \in \mathbf{B}$ из множества альтернативных решений $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$, где k – число вариантов. Как правило, элементы множества \mathbf{B} должны быть близки к оптимальному решению по заданному критерию.

Внедрение такой многовариантной математической модели в процесс автоматизированного проектирования также позволяет осуществлять визуализацию основных этапов проектирования с целью их корректировки разработчиком-конструктором.

Таким образом, современная концепция построения рисунка графа и его визуализация, описанная в работах [3-6], построена следующим образом: вначале создаётся топологический рисунок графа с минимальным числом пересекающихся рёбер алгебраическими методами без конкретной геометрической прорисовки на плоскости. Затем, на основании топологического рисунка, строится его геометрическое изображение с учётом специфики области применения.

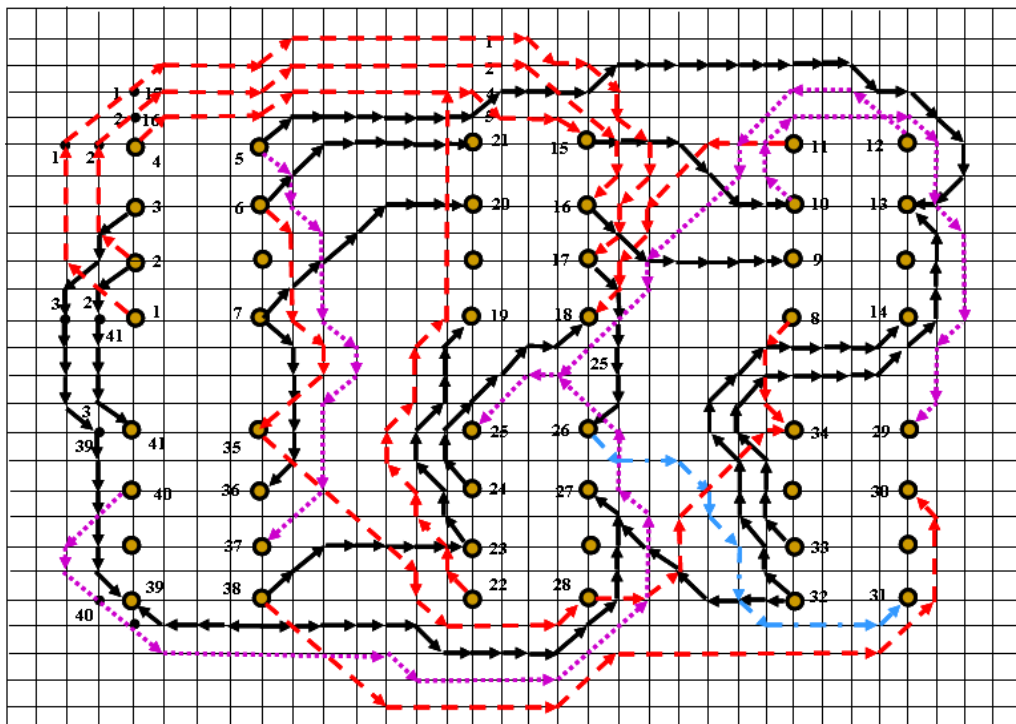


рис. 7. Общий рисунок соединений

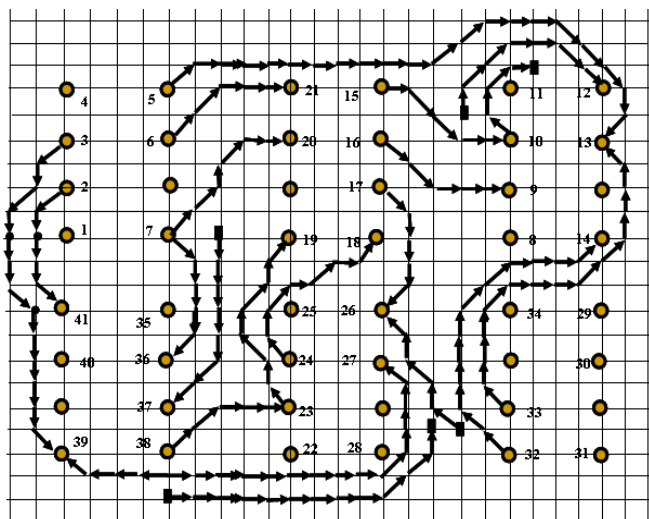


рис. 8. Расслоение. 1-ый слой

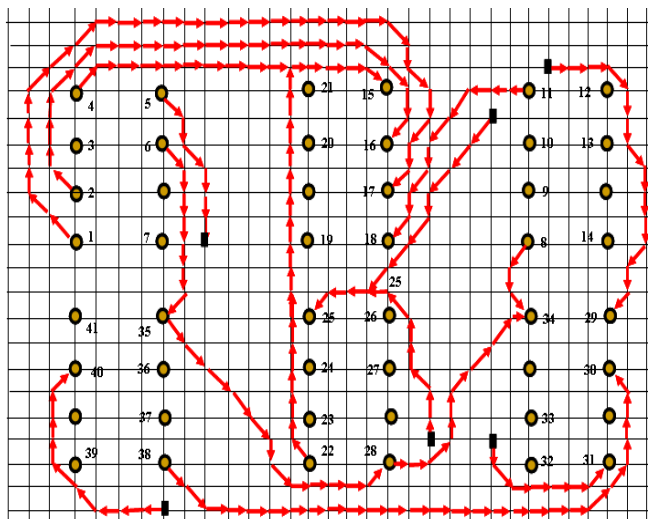


рис. 9. Расслоение. 2-ой слой

Литература

1. Апанович З.В. От рисования графов к визуализации информации. – Новосибирск, РАН. – 2007. – 24 с.
2. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи: Пер. с англ. – М.: Мир. – 1982. – 416с.
3. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
4. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 1104 с.
5. Курапов С.В., Толоч А.В. Методы построения топологического рисунка графа. // Автоматика и телемеханика – № 9. – 2013. – С. 78-97.
6. Курапов С.В., Давидовский М.В. Два подхода к проведению соединений в плоских конструктивах // Компоненты и технологии, 2015. – № 7, С.142-147.
7. Курапов С.В., Давидовский М.В. Трассировка соединений плоского конструктива. Алгоритм прицеливания // Компоненты и технологии. – 2016. – № 6. С. 104-109.
8. Курапов С.В., Давидовский М.В. Визуализация графа схемы электрической принципиальной. Геометрический и топологический рисунок графа на плоскости // Компоненты и технологии. – 2017. – № 2. С. 80-87.
9. Курапов С.В., Давидовский М.В. Выделение плоского суграфа схемы электрической принципиальной. Метод наискорейшего спуска // Компоненты и технологии. – 2017. – № 3. С. 82-86.
10. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. – М.:Радио и связь. – 1990. – 352 с.
11. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Курейчик В.М. Применение графов для проектирования дискретных устройств. – М.: Наука. ГРФМЛ. – 1974. – 304 с.
12. Раппопорт Л.И., Мороговский Б.Н., Поливцев С.А. Векторная алгебра пересечений // В кн.: Многопроцессорные вычислительные структуры. – Таганрог. –1982. – Вып. 2(11). – С. 53-56.
13. Хопкрофт Дж.Е., Тарьян Р.Е. Изоморфизм планарных графов // В кн.: Кибернетический сборник. Новая серия. – 1975. – Вып. 12. – С. 39-61.
14. Щемелинин В.М. Задача оптимального представления графа электрической схемы // В кн.: Микроэлектроника. – 1975. – Вып. 9. – С. 253-261.
15. Lempel A., Even F., Cederbaum I. An algorithm for planarity testing of graphs // In: Theory of Graphs, International Symposium, Rome, 1966. – P. 215-232.
16. Tamassia R. Handbook of Graph Drawing and Visualization. Chapman and Hall/CRC. – 862 p.
17. Rubin F. An improved algorithm for testing the planarity of graph // IEEE Trans. on Comp. – 1975. – Vol. C-24, № 2. – P. 113-121.