

DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-5-12

УДК. 681.32

О. Ю. Сысоев, С. С. Соколов, В. А. Тупик

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ПРОЦЕДУРЫ ТРАССИРОВКИ ПО КОНСТРУКТИВНОМУ КРИТЕРИЮ

Аннотация. Проведен анализ эффективности автоотрашивщиков известных систем автоматизированного проектирования (САПР) топологии печатных плат (ПП) в условиях наложенных конструктивно-технологических ограничений. Выявленные существенные ограничения связаны с тепловой прочностью проводников и возможными взаимными влияниями через электромагнитное поле. При ручном проектировании конструктор, руководствуясь собственным опытом, может проигнорировать эти и другие ограничения. В отличие от человека, автоотрашивщик строго выполняет все заданные ограничения, что при заданном топологическом пространстве ПП не позволяет выполнить трассировку полностью. С другой стороны, давая большую свободу автоотрашивщику, часто невозможно удовлетворить требования производства по допустимым параметрам топологического рисунка – ширине проводников и зазорам между ними. Проблема трассировки ПП, в том числе и многослойных, значительно усложнилась с появлением интегральных микросхем в корпусах типа TSOP, MOFP и BGA с числом выводов до нескольких сотен, расположенных с очень малым шагом. В статье исследована возможность максимального использования топологического пространства ПП с этими и другими типами корпусов. Обоснована необходимость введения буферной зоны вокруг компонента для повышения эффективности процедуры автоотрашивки. Показано, однако, что наличие буферной зоны не избавляет от появления в ней некоторого числа межслойных переходов, зависящего от вида трассировки. На основании предложенного критерия качества работы автоотрашивщика – отношения суммарной длины проводников к числу межслойных переходов – проанализирована эффективность использования топологического пространства ПП тремя автоотрашивщиками. Представленные экспериментальные результаты исследования конкурирующих вариантов трассировки САПР ПП TороR и Sрессга подтвердили возможность увеличения добавленной площади топологического рисунка печатной платы для возможного дальнейшего ее использования.

Ключевые слова: топология печатной платы, системы автоматизированного проектирования, автоотрашивки, интегральный критерий качества

Для цитирования: Сысоев О. Ю., Соколов С. С., Тупик В. А. Выбор рациональной процедуры трассировки по конструктивному критерию // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 5–12.
doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-5-12

Oleg Yu. Sisoev, Sergey S. Sokolov, Victor A. Tupik
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

CHOOSING RATIONAL TRACING PROCEDURE BY CONSTRUCTIVE CRITERION

Abstract. The analysis of autorouter efficiency in the known CAD systems under structural and technological constraints is carried out. The revealed significant constraints are related to the thermal strength of the wires and possible mutual influence through the electromagnetic field. When manually designing the designer guided by his own experience, can ignore these and other constraints. Unlike a person, the autorouter strictly fulfills all the specified constraints, which, given

the topology of the printed circuit board, does not allow tracing to complete. On the other hand, giving greater freedom to the autorouter often makes it impossible to meet the production requirements on permissible parameters of the topological pattern, which is the width of the conductors and the gaps between them. The problem of tracing printed circuit boards, including multilayer ones, has become much more complicated with the introduction of integrated circuits in TSOP, MOFP and BGA type enclosures packages with fine-pitch pins, a number of which can reach several hundred. The article investigates the possibility of maximizing printed circuit board topological space with these and other types of enclosures. The necessity of introducing a buffer zone around the component to improve the routing efficiency is explained. It is shown, however, that the availability of a buffer zone does not eliminate the appearance of vias in it, the number of which depends on the routing type. On the basis of the proposed criterion for the autorouter performance, i.e. the ratio of the total wire length to the number of vias, the efficiency of using the topological space of a printed circuit board by three autorouters is analyzed. The presented experimental results of competing routing systems TopoR and Specctra confirmed the possibility to enlarge the pattern area of the printed circuit board for its further use.

Key words: PCB topology, computer aided design system, auto routing, the integral quality criterion

For citation: Sysoev O. Yu., Sokolov S. S., Tupik V. A. Choosing Rational Tracing Procedure by Constructive Criterion. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 6, pp. 5–12. (In Russian) doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-5-12

Введение. Системы автоматизированного проектирования (САПР) технических средств разного вида играют ведущую роль в научно-техническом прогрессе. Их возможности безграничны благодаря постоянному обновлению и взаимодействию пользователей [1]. Одним из важнейших функционально-конструктивных узлов современной радиоэлектроники является печатная плата (ПП) с установленными на ней элементами. В настоящее время в отечественной радиоэлектронной промышленности функционирует и развивается несколько САПР ПП [2]. Эти САПР позволяют проектировать топологию ПП при наложении различных конструктивно-технологических ограничений, реализуемых как при ручном проектировании, так и с помощью автотрассировщика [3]. Например, ширина проводника может быть установлена исходя из плотности тока, с учетом его паразитной индуктивности или допустимого уровня перекрестных электромагнитных помех [4]. Узкий проводник обладает большей паразитной индуктивностью [5] и меньшей теплостойкостью; широкий проводник, занимая большее топологическое пространство ПП, снижает плотность монтажа. С другой стороны, уменьшение зазоров между проводниками увеличивает уровень электромагнитных перекрестных помех. Поэтому при ручном проектировании конструктор часто обходит наложенные ограничения, беря на себя ответственность за конечный результат проектирования ПП [6].

Автотрассировщик САПР по определению не может игнорировать наложенные ограничения [7]. Знакомство с теоретическими основами схемотехнических САПР [8]–[10] и их взаимодействием с САПР конструкций радиоэлектронных средств поз-

воляет осознанно подходить к результатам автотрассировки топологии ПП. Если, например, правила не разрешают сужать проводник при подходе к контактной площадке, ширина которой меньше ширины проводника, то автотрассировщик (в зависимости от типа) может подвести с нарушением или не подвести проводник к контактной площадке. Жесткость алгоритма автотрассировщика часто приводит к необходимости ручной доработки топологического рисунка, что удлинняет и удорожает процесс. С другой стороны, варианты топологии при большой свободе автотрассировщика часто неприемлемы для конкретного производства. Особенно это касается регионов ПП, для которых невозможно выполнение трассировки в соответствии с ограничениями, заданными для всей ПП. Поэтому при введении ограничений специально для регионов необходимо учитывать возможные последствия этого шага. И хотя ограничения, заданные для регионов, не являются обязательными, пользуются ими лишь в случае необходимости [11].

Таким образом, практический интерес представляет рассмотрение задачи выбора рационального варианта автотрассировщика, удовлетворяющего вышеуказанным конкурирующим требованиям.

Особенности проектирования регионов. В САПР TopoR введены понятия минимальной и номинальной ширины проводника и минимального и номинального зазоров, автоматически увеличивающихся при наличии свободного пространства до номинальных. Назначение "штрафа" за отклонение ширины проводника от номинальной делает процедуру трассировки по новым правилам более гибкой, чем введение специальных ограничений на регион, не требуя при этом трудоемких вычислений его границ.

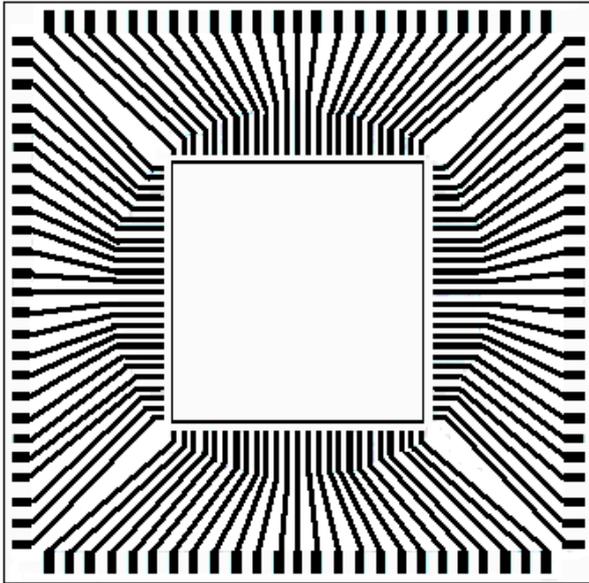


Рис. 1

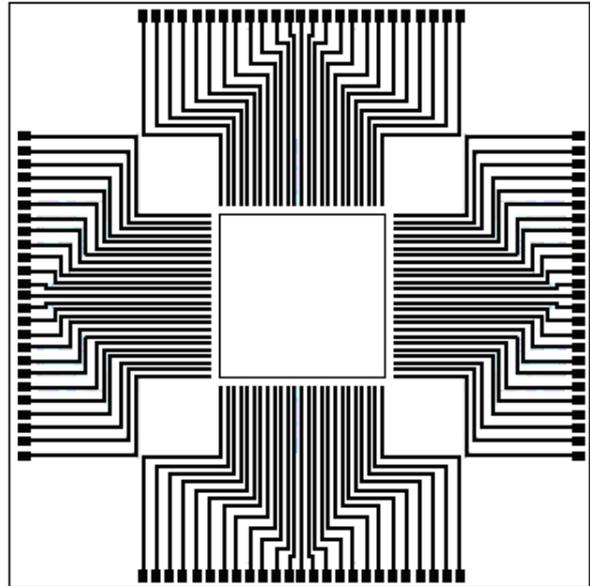


Рис. 3

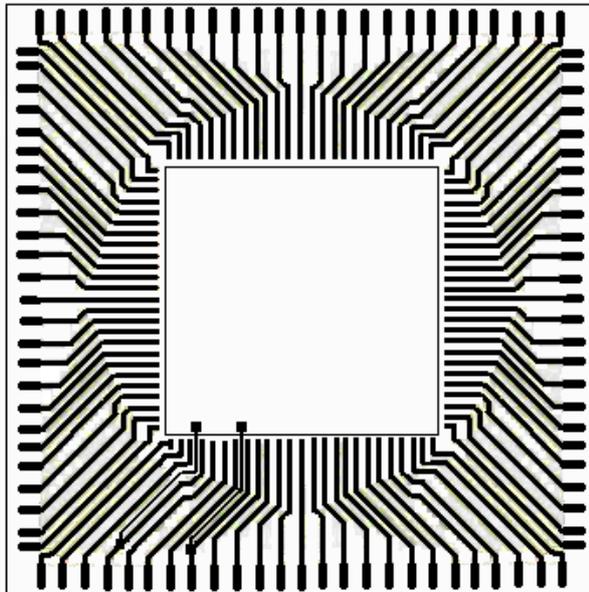


Рис. 2

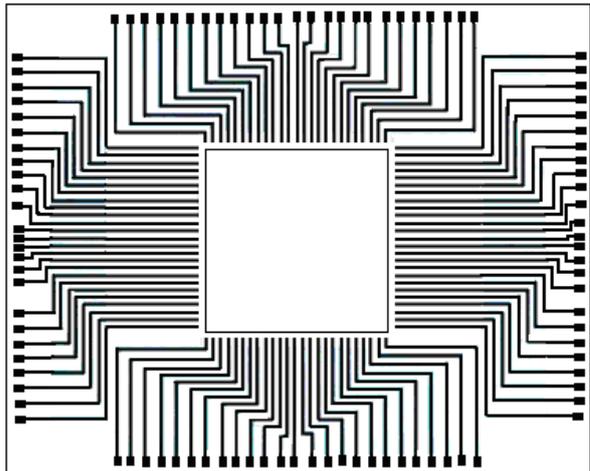


Рис. 4

Для перехода к трассировке по другим правилам необходимо наличие буферной зоны, в которой нежелательно присутствие контактов других компонентов и межслойных переходов; минимальные размеры зоны зависят от соотношений правил и вида трассировки: ортогональная, под 45° или под произвольным углом [11].

Например, для платы заданы правила: ширина проводников – 0.4 мм; зазоры между ними – 0.4 мм. Монтируемый компонент имеет четырехстороннее расположение контактов шириной и зазорами между ними – 0.2 мм. Четыре ряда контактов по внешним краям буферной зоны имитируют переход к правилам 0.4/0.4 мм.

С задачей трассировки буферной зоны справляется автотрассировщик "any angle" (рис. 1); с 4 межслойными переходами справляется автотрассировщик, допускающий трассы под 45° (рис. 2); с 80 межслойными переходами не справляется ортогональный автотрассировщик.

Для возможности ортогональной односторонней разводки такого фрагмента требуется в два раза больше свободного пространства. В противном случае в угловых областях фрагмента начинают конфликтовать вертикальные и горизонтальные отрезки трасс (рис. 3). Прямоугольный регион позволяет получить топологию с большей плотностью (рис. 4).

Трассировка с учетом критерия качества. Важным условием выбора САПР топологии ПП является необходимость достижения желательного качества трассировки – отношения суммарной

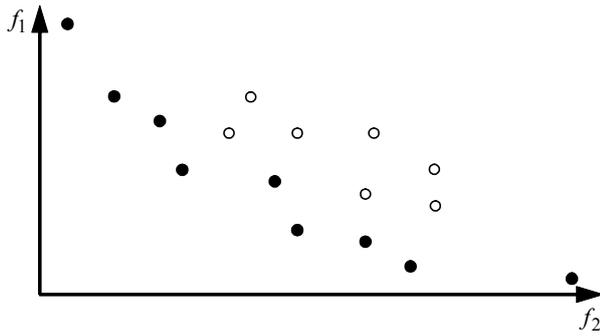


Рис. 5

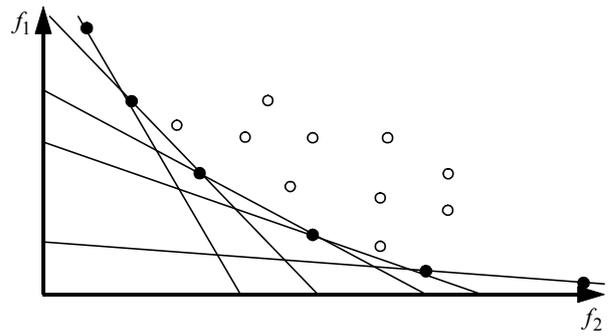


Рис. 7

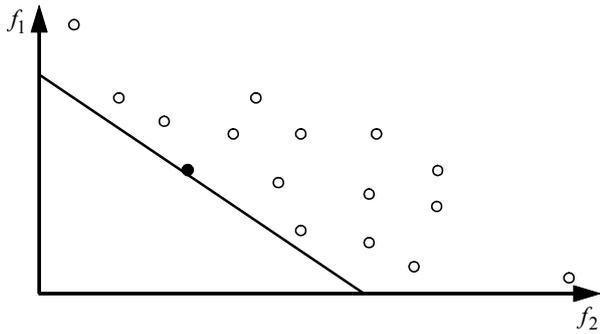


Рис. 6

длины проводников топологии к числу переходных отверстий. При автотрассировке минимизируют и суммарную длину проводников, и число переходных отверстий, однако на практике уменьшение числа переходных отверстий часто возможно за счет увеличения суммарной длины проводников. В [12] рассмотрены некоторые проблемы выбора вариантов на основе количественной оценки их частных преимуществ.

В качестве примера рассмотрим варианты автоматической трассировки ПП, выполненные автотрассировщиками: Xpediton, Specetra, Situs и ToroR. Чаще всего варианты сравнивают по критерию Парето и по интегральному критерию.

Вариант, оптимальный по Парето, – лучше каждого из других вариантов хотя бы по одному оцениваемому параметру. На рис. 5 черными точками отмечены варианты, оптимальные по Парето для случая двух параметров f_1 и f_2 . Таких вариантов может быть много, и чем больше параметров, тем и больше вариантов, оптимальных по Парето.

Альтернативный подход основан на подсчете значений интегрального функционала

$$F = \sum_{i=1}^n a_i f_i,$$

где a_i – весовые коэффициенты, обоснование значений которых является проблемой данного подхода; f_i – оцениваемые параметры.

На рис. 6 наклонной прямой обозначена линия уровня интегрального функционала для одного из значений весового коэффициента (для случая двух оцениваемых параметров достаточно выбора одного коэффициента, определяющего наклон прямой). Все варианты, лежащие на одной и той же линии уровня, имеют одинаковое значение функционала. Обычно оптимальным оказывается только один из вариантов (черная точка).

Методика получения решения для всех возможных соотношений этих коэффициентов без обоснования их значений рассмотрена в [13], [14]. При этом оптимальными объявляют варианты, образующие выпуклую оболочку из их имеющегося множества (рис. 7). Этим вариантов меньше, чем вариантов, оптимальных по Парето, но больше одного, поэтому сохраняется необходимость выбора лучшего варианта.

Экспериментальные результаты. В таблице представлены конкурирующие варианты трассировки САПР ПП ToroR при их параллельно-последовательной оптимизации по значениям нескольких параметров при отсутствии нарушений и подрезок.

Имя варианта	Длина проводников, мм	Число переходов	Таймер	Уровень	Показатель качества, мм/переход
+arz 2L 8648-343s.fsb	8648	343	6:07	3	
+arz 2L 9069-267s.fsb	9069	267	5:46	2	5.6 (421/76)
+arz 2L 9341-242s.fsb	9341	242	5:36	10	10.9 (272.4/25)
+arz 2L 9584-233s.fsb	9584	233	5:25	19	27 (242.9/9)
+arz 2L 9826-225s.fsb	9826	225	6:15		30.3 (242/8)
+arz 2L 10065-219s.fsb	10065	219	6:21		39.9 (239/6)
+arz 2L 10177-217s.fsb	10177	217	6:20		56 (112/2)
+arz 2L 10626-212s.fsb	10626	212	6:02	18	89.8 (449/5)

В крайнем правом столбце таблицы приведены значения показателя качества – средние значения увеличения длины на один добавленный переход по отношению к предыдущему варианту. Например, в выделенной строке длина проводников – 10 065 мм; число переходов – 219; в предыдущей строке длина проводников – 9826 мм; число переходов – 225; среднее увеличение длины на один переход – 39.9 мм. В то же время без достаточного обоснования разработчики рекомендуют выбирать вариант со значением показателя качества менее 25 мм/переход.

На реальной ПП присутствуют проводники разной ширины и контактные площадки межслойных переходов разных диаметров. На двухсторонней однослойной ПП контактные площадки располагают на ее обеих сторонах металлизации; на многослойной ПП – на сторонах нескольких слоев, а для сквозных переходных отверстий – на сторонах всех слоев. Таким образом, при равных значениях суммарной длины и числа межслойных переходов площадь, занимаемая добавленным в процессе трассировки топологическим рисунком, может быть разная. Для сравнения результатов оптимизации в большинстве САПР эта площадь может быть вычислена.

Для эксперимента был выбран пример № 3 из числа примеров, поставляемых с TороRLite [15]: ПП двухсторонняя, компоненты расположены с обеих сторон, суммарная площадь контактных площадок компонентов – 1133.3 мм².

В программе Specetra (Cadence, USA) были опробованы варианты трассировки с предварительной и без предварительной расстановки фанатов – переходных отверстий, соединенных с

расположенной в непосредственной близости эквипотенциальной контактной площадкой. Расстановка фанатов снижает риск блокировки контактов при автоматической трассировке, однако, как показывает эксперимент, может приводить к увеличению числа межслойных переходов [15].

Пример трассировки (фрагмент) верхней стороны ПП с предварительной расстановкой фанатов приведен на рис. 8. В этом варианте суммарная длина проводников равна 12 870 мм; число межслойных переходов – 510; площадь металлизации – 4199 мм². В варианте трассировки той же ПП без предварительной расстановки фанатов суммарная длина проводников равна 12 931 мм; число межслойных переходов – 460; площадь металлизации – 4141 мм².

При трассировке платы в САПР TороR также были опробованы варианты с проводниками под углами, кратными 45°, и под произвольным углом с дугами ("any angle"). Пример трассировки (фрагмент) верхней стороны ПП по первому варианту приведен на рис. 9 (верхний слой – черный, нижний – серый), в котором суммарная длина проводников равна 9544 мм; число переходов – 212; площадь металлизации – 3076 мм².

Пример трассировки (фрагмент) верхней стороны ПП по второму варианту приведен на рис. 10 (верхний слой – черный, нижний – серый), в котором суммарная длина проводников равна 9089 мм; число переходов – 213; площадь металлизации – 3915 мм².

Для сравнения вариантов трассировки Specetra и TороR с минимальной добавленной площадью топологического рисунка вычтем площадь контактных площадок компонентов из площади металлизации:

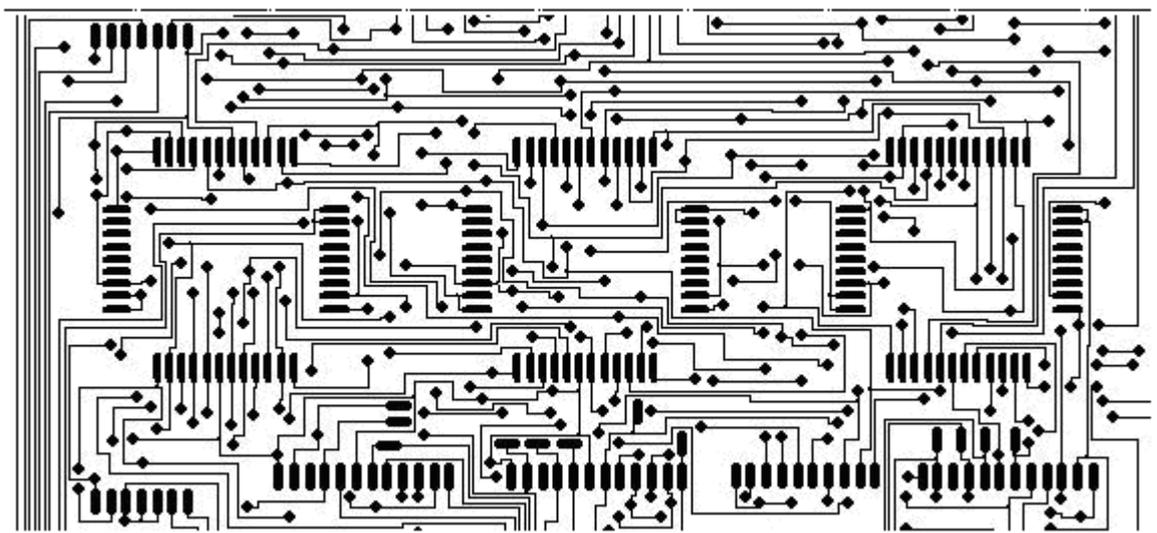


Рис. 8

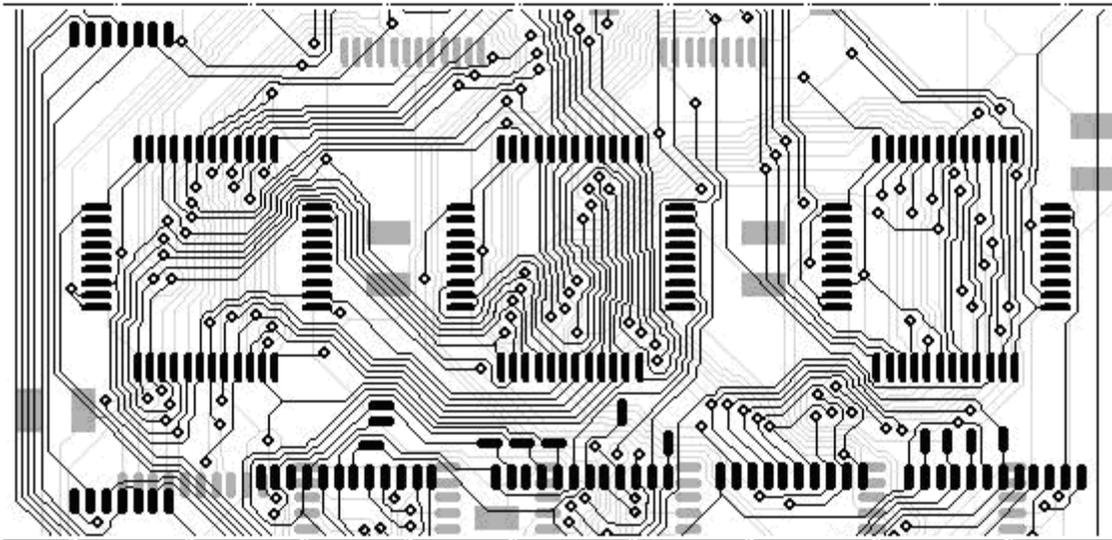


Рис. 9

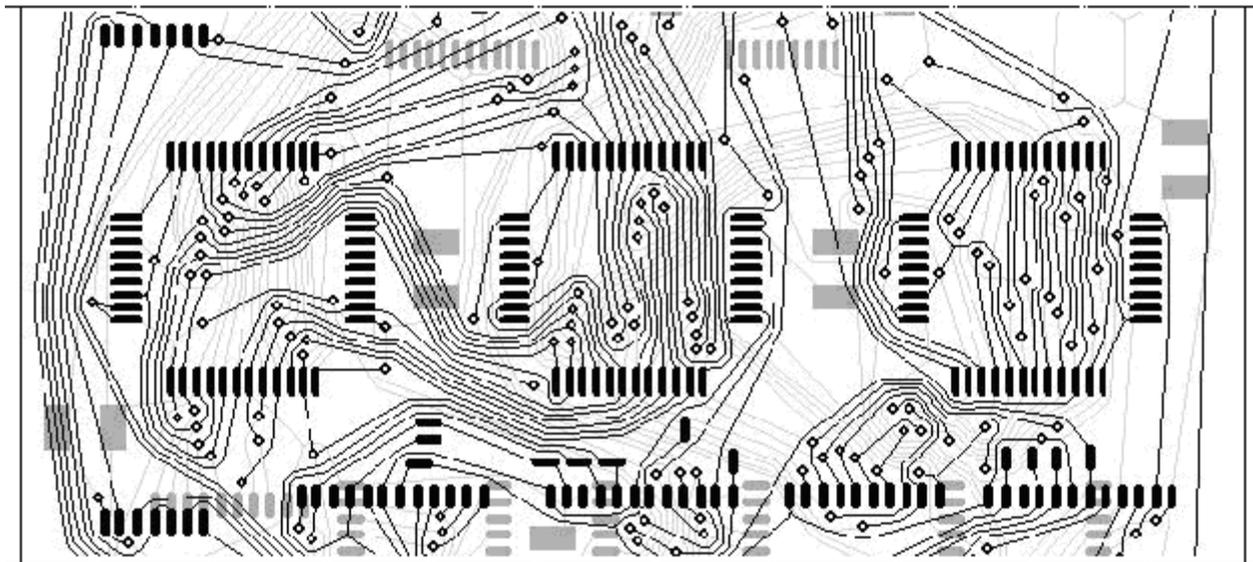


Рис. 10

SpecTra: $4141 - 1133 = 3007 \text{ мм}^2$;

Торор: $3016 - 1133 = 1883 \text{ мм}^2$.

Площадь добавленного топологического рисунка в варианте, полученном в САПР Торор, на 37,4 % меньше, чем в варианте, полученном в SpecTra.

Заключение. 1. Периметр региона не должен быть меньше суммы ширины и зазоров проводников, входящих в регион. Невозможна без нарушений трассировка региона, в котором допущено уменьшение проектных норм и имеющего меньшие размеры.

Задание границ региона для изменения правил проектирования должно базироваться на расчете, учитывающем соотношения правил внутри и снаружи региона, а также вид трассировки. Регионы с более плотным расположением элементов топологии следует вычислять автоматически.

3. Суммарная длина проводников и число переходных отверстий – не единственные показатели качества трассировки. Можно указать, например, на допустимый уровень перекрестных электромагнитных помех. В этом случае за счет высвобожденной площади можно увеличить зазоры между проводниками, потенциально снижая уровень помех этого вида.

4. Экспериментально подтверждена возможность выбора автотрассировщика по интегральному показателю качества разводки ПП – добавленной в процессе трассировки площади топологического рисунка, например, в пользу автотрассировщика "any angle", способствующего сокращению этой площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гридин В. Н., Анисимов Д. А., Дмитриевич Г. Д. Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-сервисов // Автоматизация в промышленности. 2011. № 1. С. 9–11.
2. Кузнецова С. А., Нестеренко А. В., Афанасьев А. О. ORCAD10. Проектирование печатных плат. М.: ДМК Пресс, 2005. 454 с.
3. Васильев А. А., Горячев А. В., Монахов А. В. Применение методологии проектного управления в автоматизированном проектировании // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. Вып. 5. С. 65–72.
4. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
5. Лысенко А. А., Лячек Ю. Т., Полубасов О. Б. Автоматическое формирование линий задержки в топологии печатного монтажа // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2011. Вып. 9. С. 61–64.
6. Сорокин С. А., Сысоев О. Ю. О правилах проектирования для регионов печатной платы // Современная электроника. 2017. № 7. С. 66–68.
7. Уваров А. С. Автотрассировщики печатных плат. М.: ДМК Пресс, 2006. 288 с.
8. Дмитриевич Г. Д., Ларистов А. И., Аль-Шамери Язид Мохаммед. Модель данных для архива проектных решений схемотехнической САПР // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. Вып. 6. С. 39–41.
Статья поступила в редакцию 02 октября 2018 г.
9. Модель предметной области для базы данных схемных компонентов схемотехнической САПР / В. И. Анисимов, В. Н. Гридин, А. И. Ларистов, Аль-Шамери Язид Мохаммед // Информационные технологии. 2013. № 9. С. 28–31.
10. Лячек Ю. Т., Бочков А. Л., Большаков В. П. Проблема обмена графическими данными между САД-системами // Компьютерные инструменты в образовании. 2013. № 2. С. 37–47.
11. Определение минимальной ширины канала между парой компонентов при топологической трассировке / А. В. Бессонов, К. А. Кноп, Ю. Т. Лячек, Ю. И. Попов // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. Вып. 10. С. 31–34.
12. Лузин С. Ю., Полубасов О. Б. О трудностях сравнения систем трассировки // CHIPNEWS. 2003. № 10. С. 56–60.
13. Полубасов О. Б., Петросян Г. С. Методика отбора вариантов при оптимизации разводки соединений // Технологии приборостроения. 2005. № 3. С. 16–19.
14. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры / С. Ю. Лузин, Ю. Т. Лячек, Г. С. Петросян, О. Б. Полубасов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 224 с.
15. TopoRLite. URL: <http://www.eda.eremex.ru/downloads> (дата обращения 09.03.18).
16. Расстановка фанатуов в области BGA с нерегулярным расположением контактов / К. А. Кноп, С. Ю. Лузин, М. С. Лузин, С. А. Сорокин, Ю. Т. Лячек // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2017. № 4. С. 31–34.

Сысоев Олег Юрьевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер-конструктор радиоэлектронного оборудования ГНЦ РФ АО «Концерн "Морское подводное оружие – Гидроприбор"». Автор семи научных работ. Сфера научных интересов – методы оптимизации топологии печатных плат.
E-mail: ol.sysoeff@gmail.com

Соколов Сергей Сергеевич – доктор технических наук (1996), профессор (1998), профессор кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 75 научных публикаций. Сфера научных интересов – случайные процессы с двойной стохастичностью; системная инженерия.
E-mail: tri-s-leningrad@yandex.ru

Тупик Виктор Анатольевич – доктор технических наук (2011), заведующий кафедрой микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 140 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанотехнологии, фракталы и самоорганизующиеся системы.
E-mail: vatupik@yandex.ru; vatupik@etu.ru

REFERENCES

1. Gridin V. N., Anisimov D. A., Dmitrevich G. D. Construction of Automated Design Systems Based on Web-Services. Automation in Industry. 2011, no. 1, pp. 9–11. (In Russian)
2. Kuznetsova S. A., Nesterenko A. V., Afanasiev A. O. ORCAD10. *Proektirovanie pechatnykh plat* [ORCAD10. Printed Circuit Board Design]. Moscow, DMK Press, 2005, 454 p. (In Russian)
3. Vasilev A. A., Goriachev A. V., Monahov A. V. Project Management Methodology Application in Computer Aided Design. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2013, no. 5, pp. 65–72. (In Russian)
4. Kniazhev A. D., Kechiev L. N., Petrov B. V. Designing Electronic and Computing Equipment in the Light of Electromagnetic Compatibility. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1989, 224 p. (In Russian)
5. Lisenko A. A., Liachek Yu. T., Polubasov O. B. Automatic Generation of Delay Lines in Printed Circuit Layout. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Pe-

tersburg Electrotechnical University]. 2011, no. 9, pp. 61–64. (In Russian)

6. Sorokin S. A., Sisoev O. Yu. On Design Rules for PCB Regions. *Modern Electronics*. 2017, no. 7, pp. 66–68. (In Russian)

7. Uvarov A. S. Printed Circuit Board Autorouters. Moscow, DMK Press, 2006, 288 p. (In Russian)

8. Dmitrevich G. D., Laristov A. I., Al'-Shameri Iazid Mohammed. Data Model for the Archive of Design Solutions for CAD Circuit Design System. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2013, no. 6, pp. 39–41. (In Russian)

9. Anisimov V. I., Gridin V. N., Laristov A. I., Al'-Shameri Iazid Mohammed. Domain Model for Circuit Components Database of CAD Circuit Design Systems. *Informacionnye tehnologii* [Information Technology]. 2013, no. 9, pp. 28–31. (In Russian)

10. Liachek Yu. T., Bochkov A. L., Bolshakov V. P. The Problem of Graphics Data Exchange between CAD-Systems. *Kompjuternye instrumenty v obrazovanii* [Computer tools in Education]. 2013, no. 2, pp. 37–47. (In Russian)

11. Bessonov A. V., Knop K. A., Liachek Yu. T., Popov U. I. Determining Minimum Channel Width Between Pair of

Components for Topological Tracing. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2013, no. 10, pp. 31–34. (In Russian)

12. Luzin S. Yu., Polubasov O. B. Problems in Comparing Trace Systems. *CHIPNEWS*, 2003, no. 10, pp. 56–60. (In Russian)

13. Polubasov O. B., Petrosian G. S. Method of Selection Options for Optimizing Wiring. *Technologia Priboro-stroenia* [The Technology of the Instrumentation]. 2005, no. 3, pp. 16–19. (In Russian)

14. Luzin S. Yu., Liachek Yu. T., Petrosian G. S., Polubasov O. B. Models and Algorithms for Radio Electronic Equipment Computer-Aided Design. SPb., *BKhV-Peterburg*, 2010, 224 p. (In Russian)

15. TopoRLite. Available at: <http://www.eda.eremex.ru/downloads> (accessed 09.03.18)

16. Knop K. A., Luzin S. Yu., Luzin M. S., Sorokin S. A., Liachek Yu. T. Fanout Arrangement in BGA Area with Irregular Contact Arrangement. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2017, no. 4, pp. 31–34. (In Russian)

Received October, 02, 2018

Oleg Yu. Sisoev – Postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", radio equipment design engineer in State Research Center JSC «Concern "Naval Underwater Weapon – Gidropribor"». The author of 7 scientific publications. Area of expertise: optimization methods for PCB topology.

E-mail: ol.sysoeff@gmail.com

Sergey S. Sokolov – D.Sc. in Engineering (1996), Professor (1998), Professor of the Micro Radio Electronics and Technology of Radio Equipment Department of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 75 scientific publications. Area of expertise: double-stochastic processes; system engineering.

E-mail: tri-s-leningrad@yandex.ru

Viktor A. Tupik – D. Sc. in Engineering (2011), Head of the Department Microelectronics and Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 140 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanotechnologies; fractal and self-organizing systems.

E-mail: vatupik@yandex.ru; vatupik@etu.ru
