

УДК 004.421.2

## АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТРАНЕНИЯ КЛИНЧЕЙ В ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

С.Ю. Лузин, С.И. Попов, Ю.И. Попов

Предложено решение часто встречающейся проблемы клинчей при автоматической разводке печатных плат. Приведены способы автоматического распознавания различных типов клинчей, алгоритмы их устранения.

**Ключевые слова:** САПР, автоматическая трассировка, клинчи.

### Введение

Применяемые в современных системах автоматизированного проектирования (САПР) методы оптимизации топологии печатного монтажа могут «застревать» в локальных минимумах. Это происходит в тех случаях, когда разводка еще не завершена, но в то же время никакой шаг локальной оптимизации (перекладка одиночного проводника) не может привести к ее улучшению. Пример подобной ситуации – клинч проводников (рис. 1). Клинч не только увеличивает длину проводников, но еще и создает помеху для дальнейшей разводки. Например, при наличии клинча (рис. 1, а) между контактами нельзя провести вертикальную трассу, в то время как при корректной разводке (рис. 1, б) это возможно.

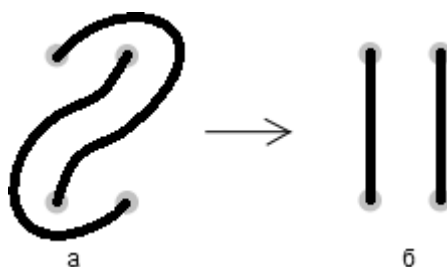


Рис. 1. Пример локального минимума при оптимизации топологии печатного монтажа: клинч (а); желаемая топология (б)

Практически все современные системы автоматической трассировки печатного монтажа при работе создают клинчи в большом количестве, и хотя визуально подобные ситуации определяются легко, устранение их в ручном режиме – весьма трудоемкая задача.

В настоящей работе предложены алгоритмы распознавания и устранения простейших клинчей, однако с некоторыми модификациями их можно использовать и для устранения более сложных топологических ситуаций, таких как многоконтактные и кратные (вложенные многопроводные) клинчи.

### Признаки клинчей

Дальнейшее изложение предполагает использование триангулированного пространства печатного монтажа [1, 2].

Для обнаружения клинчей можно использовать следующие признаки:

1. ребро триангуляции, соединяющее пару объектов (например, контактов), пересекает проводник, инцидентный одному из них (дуга  $a_1$  на рис. 3, а);
2. ребро триангуляции соединяет пару эквипотенциальных объектов, однако ребро пересекают проводники других цепей, а соединяющий их проводник не идет вдоль ребра (дуга  $a_1$  на рис. 4, а);
3. проводник пересекает ребро триангуляции более одного раза;
4. взаимное огибание: проводник цепи  $A$  огибает контакт цепи  $B$ , а проводник цепи  $B$  огибает контакт цепи  $A$  (рис. 5).

Пусть ребру  $e$  триангуляции между вершинами  $b_1$  и  $b_2$  соответствуют две противоположно направленные дуги (рис. 2): (дуга  $a_1$  от  $b_1$  к  $b_2$  и дуга  $a_2$  от  $b_2$  к  $b_1$ ).

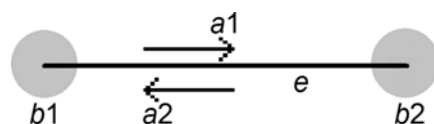


Рис. 2. Соответствие ребру  $e$  двух дуг: дуга  $a_1$  от вершины  $b_1$  к вершине  $b_2$  и дуга  $a_2$  от  $b_2$  к  $b_1$

На рис. 3, а, представлен *обычный клинч*, распознаваемый по признаку 1: в нем проложить длинный проводник  $w_1$  по более короткому пути мешает проводник  $w_2$ . Такой клинч существует, если проводник  $w_1$ , начинающийся с той же вершины  $b_1$ , что и дуга  $a_1$ , пересекает эту дугу, и при этом он не является первым пересекающим ее проводником. На рис. 3, а, до проводника  $w_1$  дугу  $a_1$  пересекает про-

проводник  $w_2$ . Вершине триангуляции  $b_1$  не должны быть инцидентны другие проводники (почему – будет объяснено далее при описании алгоритма устранения клинча).

На рис. 4, а, представлен *u*-клинч, распознаваемый по признаку 2: провести проводник  $w_1$  вдоль дуги  $a_1$  мешает пересекающий эту дугу проводник  $w_2$ . Вершинам триангуляции  $b_1$  и  $b_2$  не должны быть инцидентны другие проводники (почему – будет объяснено далее при описании алгоритма устранения клинча).

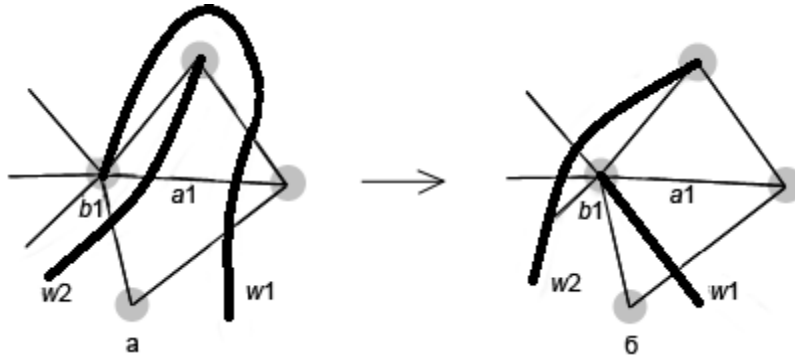


Рис. 3. Обычный клинч: топология до устранения клинча (а); топология после устранения клинча (б).  
 $w_1$  – длинный проводник;  $w_2$  – мешающий проводник;  $a_1$  – дуга, на которой обнаружен клинч;  
 $b_1$  – вершина триангуляции с которой начинается проводник  $w_1$

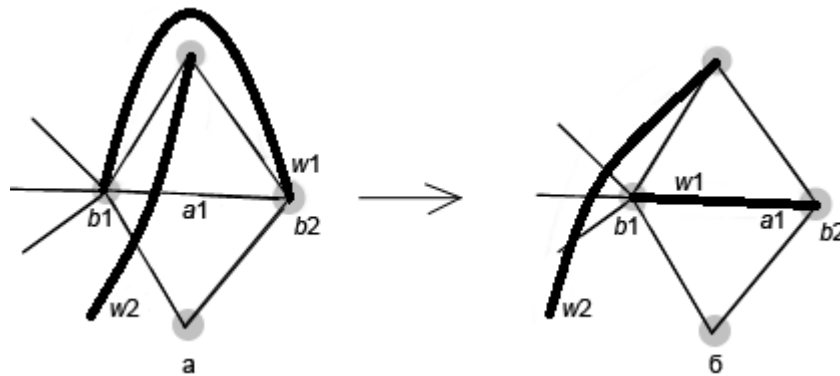


Рис. 4. *u*-клинч: топология до устранения клинча (а); топология после устранения клинча (б).  
 $w_1$  – длинный проводник;  $w_2$  – мешающий проводник;  $a_1$  – дуга, на которой обнаружен клинч;  
 $b_1, b_2$  – вершины, которым инцидентен проводник  $w_1$

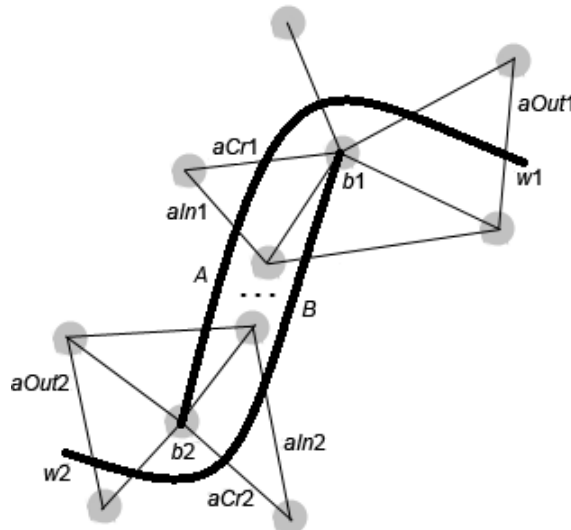


Рис. 5. Неявный клинч:  $w_1$  – длинный проводник;  $w_2$  – мешающий проводник;  $b_1$  – вершина, огибаемая проводником  $w_1$ , с которой начинается проводник  $w_2$ ;  $b_2$  – вершина, которой инцидентен проводник  $w_1$ ;  $aCr1, aCr2$  – дуги, исходящие из вершин  $b_1$  и  $b_2$  соответственно, которые пересекают  $w_1$  и  $w_2$ ;  $aln1, aln2, aOut1, aOut2$  – дуги, через которые  $w_1$  и  $w_2$  входят в окрестности соответствующих вершин и выходят из них

Рассмотрим окрестность вершины триангуляции, состоящую из инцидентных вершине граней. Проведем два вектора: первым соединим вершину триангуляции с точкой входа проводника в окрестность вершины, вторым – эту же вершину триангуляции с точкой выхода проводника из окрестности. Угол между этими двумя векторами назовем углом огибания проводником вершины триангуляции.

На рис. 5 приведен пример *неявного клинча*, распознаваемого по признаку 4: для его обнаружения измеряется угол огибания проводником  $w1$  вершины триангуляции  $b1$  (от дуги  $aIn1$  до дуги  $aOut1$ ). Если такое огибание есть, и огибаемой вершине инцидентен один проводник  $w2$ , который проходит мимо вершины, с которой начинается  $w1$  (пересечение дуги  $aCr2$ , инцидентной вершине  $b2$ ), то имеет место неявный клинч. По дуге  $aCr1$  определяется, что  $w1$  проходит мимо  $b1$ . Между вершинами  $b1$  и  $b2$  может быть произвольное расстояние, для идентификации клинча главное – ситуация на концах проводников.

### Устранение клинчей

Для устранения обычного клинча необходимо:

1. проложить мешающий проводник с другой стороны от инцидентной длинному проводнику вершины триангуляции;
2. присоединить длинный проводник к вершине напрямую (рис. 3, б).

Рассмотрим чуть более сложный случай (рис. 6). Пусть имеется уже не длинный проводник, а длинный путь, состоящий из соединенных точками ветвления проводников ( $w5, w3, w1$  на рис. 6, а).

Для устранения клинча следует:

1. удалить проводник, инцидентный вершине  $b1$ ;
2. соединить вершину  $b1$  с проводником  $w1$ . При этом добавится новое ветвление (и вершина триангуляции,  $b2$  на рис. 6, б) и, возможно, новый проводник (в данном случае  $w7$ ).

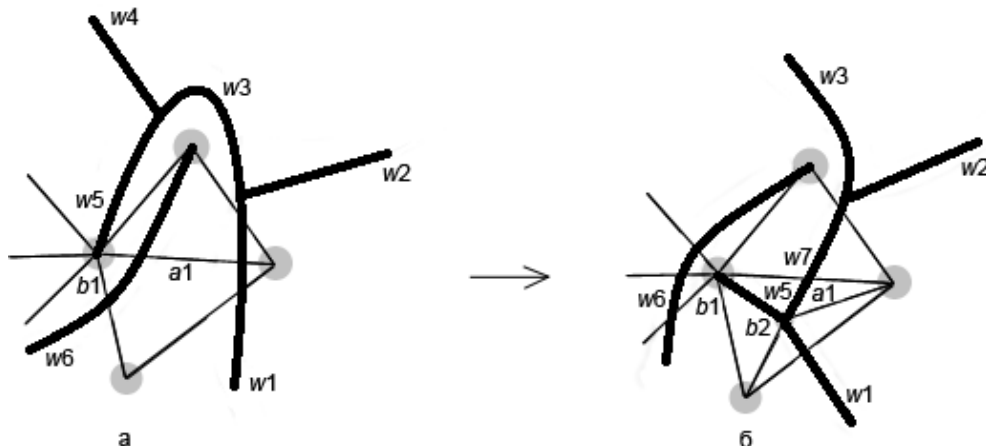


Рис. 6. Устранение обычного клинча: топология до устранения клинча (а); топология после устранения (б).  
 $a1$  – дуга, на которой обнаружен клинч;  $b1$  – вершина, от которой отходит дуга  $a1$ ;  
 $w1, w3, w5$  – проводники, составляющие длинный путь в клинче;  $w6$  – мешающий проводник в клинче;  
 $w2, w4, w7$  – проводники;  $b2$  – вершина добавленного ветвления

В случае *и-клинча* (рис. 4) необходимо:

1. переложить мешающий проводник с другой стороны от вершины  $b1$ ;
2. длинный проводник  $w1$  проложить вдоль дуги, на которой обнаружен клинч.

Если в клинче есть длинный путь, состоящий из нескольких проводников (рис. 7), то вдоль дуги следует переложить первый проводник в длинном пути ( $w1$  на рис. 7).

В рассмотренных двух алгоритмах устранения клинчей легко предусмотреть наличие нескольких мешающих проводников. При устранении клинча все мешающие проводники следует переложить по очереди с другой стороны от вершины  $b1$ .

При обнаружении неявного клинча (рис. 8) следует:

1. проверить, не создается ли большее огибание после устранения клинча. (Для этого используются дуги  $aIn2$  и  $aOut2$ , через которые проводник  $w2$  входит в окрестность  $b2$  и выходит из нее);
2. удалить проводники в гранях триангуляции, инцидентных вершинам  $b1$  и  $b2$  (рис. 8, б);
3. поменять принадлежность фрагментов проводников (фрагмент проводника  $w1$  становится фрагментом проводника  $w2$ , и наоборот) между окрестностями вершин  $b1$  и  $b2$ ;
4. добавить кратчайшие фрагменты, доставляющие связность проводников (рис. 8, в).

Если вершине  $b2$  инцидентно сразу два проводника и если можно найти вершину  $b3$  (рис. 9), которой инцидентно только один проводник, клинч также может быть устранен. Для этого следует:

1. переложить мешающий проводник  $w2$  с другой стороны от вершины  $b3$  и проводника  $w3$ , соединяющего вершины  $b2$  и  $b3$ ;
2. устранить неявный клинч, описанный выше.

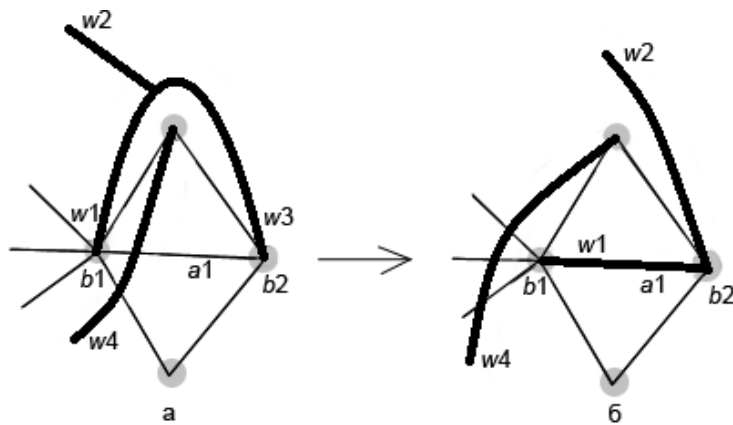


Рис. 7. Устранение  $u$ -клинча: топология до устранения клинча (а); топология после устранения (б).  $a_1$  – дуга, на которой обнаружен клинч;  $b_1$  – ветвление, от которого отходит дуга  $a_1$ ;  $w_1, w_3$  – проводники, составляющие длинный путь в клинче;  $w_4$  – мешающий проводник в клинче;  $w_2$  – проводник

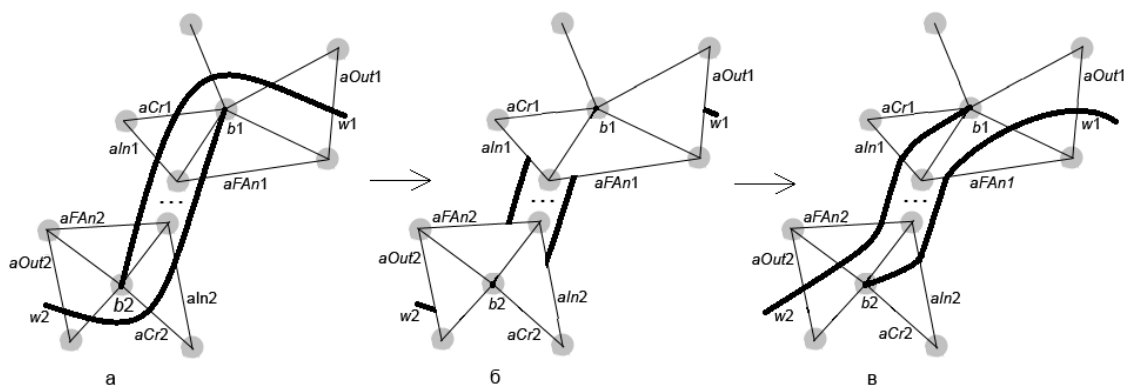


Рис. 8. Устранение неявного клинча: неявный клинч (а); удалены фрагменты проводников с инцидентных вершинам  $b_1$  и  $b_2$  дуг (б); клинч устранен (в).  $w_1$  – длинный проводник;  $w_2$  – мешающий проводник;  $b_1$  – вершина, огибаемая проводником  $w_1$ ;  $b_2$  – вершина, которой инцидентен проводник  $w_1$ ;  $aCr_1, aCr_2$  – дуги, пересекаемые  $w_1$  и  $w_2$ ;  $aln_1, aln_2, aOut_1, aOut_2$  – дуги, через которые  $w_1$  и  $w_2$  входят в окрестности соответствующих вершин и выходят из них;  $aFAn_1, aFAn_2$  – первые неинцидентные объектам  $b_1$  и  $b_2$  дуги, пересекаемые проводниками  $w_1$  и  $w_2$

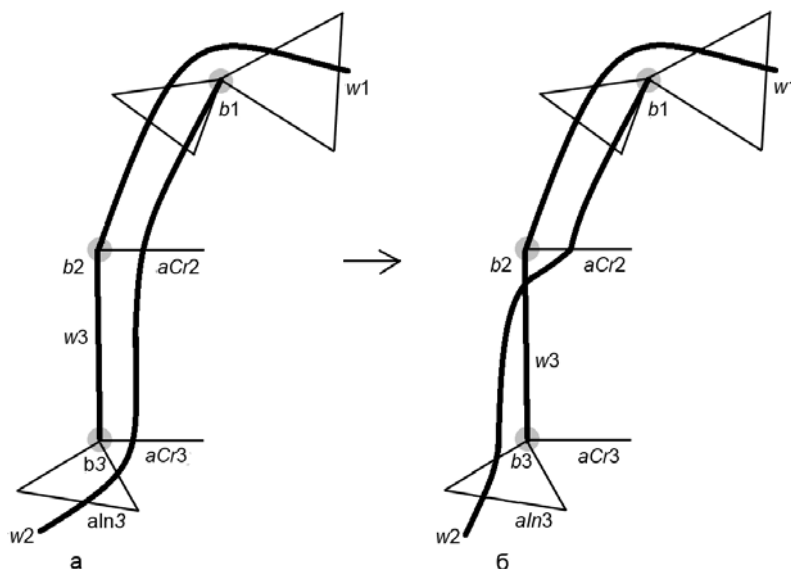


Рис. 9. Первый шаг устранения неявного клинча, длинный путь в котором состоит из последовательности разделенных вершинами проводников: топология до первого шага (а); топология после первого шага (б).  $w_1$  – длинный проводник;  $w_2$  – мешающий проводник;  $w_3$  – второй проводник в длинном пути;  $b_1$  – вершина, огибаемая проводником  $w_1$ ;  $b_2$  – вершина, с которой начинается проводник  $w_1$ ;  $b_3$  – конечная вершина длинного пути;  $aCr_2, aCr_3$  – дуги, инцидентные вершинам  $b_2$  и  $b_3$  соответственно, которые пересекает мешающий проводник  $w_2$

Во всех вышеприведенных случаях устранения клинчей следует учитывать ширину проводников: при необходимости менять ее на более подходящую и соответственно не устранять клинчи при невозможности изменить ширину. Вышеописанные признаки распознавания и способы устранения клинчей используются в отечественной САПР ТороR [3].

### Заключение

Описаны способы распознавания и устранения клинчей – топологических ситуаций, часто встречающихся при автоматической трассировке печатного монтажа. Устранение клинчей позволяет высвободить пространство для перекладки проводников, повысить качество топологии, сократить длину проводников.

В текущей версии системы автоматизированного проектирования ТороR устранение клинчей осуществляется после завершения автотрассировки. В дальнейшем планируется обнаруживать и устранять клинчи также и в процессе оптимизации трассировки.

Работа поддержана грантом для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга 2011 года.

### Литература

1. Лузин С.Ю., Лячек Ю.Т., Петросян Г.С., Полубасов О.Б. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 224 с.
2. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 127 с.
3. Полубасов О.Б. Трассировка в САПР ТороR – взгляд изнутри // Электроника: НТБ. – 2010. – № 6. – С. 104–110.

*Лузин Сергей Юрьевич*

– ООО «Эремекс», доктор технических наук, технический директор, luzin@eremex.com

*Попов Сергей Игоревич*

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sergey.popove@yandex.ru

*Попов Юрий Игоревич*

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, yurpopov@rambler.ru