

## Трасування друкованих з'єднань

1. Постановка задачі трасування. Критерій оптимізації
2. Загальні положення дискретних алгоритмів трасування
3. Хвильовий алгоритм (алгоритм Лі)
4. Алгоритми трасування друкованих з'єднань

Проектування електричних з'єднань - трасування, являється найбільш складним та трудомістким як при ручному так і по машинному конструюванні, тому що сучасна ЕОА є достатньо складною, містить тисячі з'єднань - друкованими провідниками, навісним монтажем, поверхневим монтажем і кожного разу це все ускладнюється.

**Складність** - трасування є завершальним етапом. Складність задачі трасування значно залежить як від рівня КЕ, так і від складності монтажу. **Складність трасування** полягає у **виборі оптимального варіанту траси** з великої множини варіантів провідників.

Наприклад,  $N = \frac{n(n-1)}{2}$  - кількість ребер між  $n$ -вершинами, при  $n = 5$   $t = 125$ .

1. При розробці ІС монтаж між елементами виконується шляхом нанесення в вакуумі структури провідників на підкладку. Тут провідники можуть мати саму різну конфігурацію та відгалуження. Рисунок провідників достатньо складний.
2. При реалізації друкованого монтажу необхідно враховувати число шарів плати та технологію її виготовлення. При використанні БДП (багатошарова друкована плата) виготовляють методом пошарового нарощування, електричні ланцюги нарощуються так, щоб кожний ланцюг розмістився в визначеному шарі. Крім того, як правило, ДП мають один багатовивідний роз'єм, встановлений на краю плати. Це також накладає свої обмеження на трасування - в зоні біля  $P$  щільність провідників значно зростає по зрівнянню з рештою площини плати.
3. Об'ємний - провідний монтаж займає значне місце в ЕОА - провідний монтаж став кардинально іншим. Це не окремі провідники, а плоскі або круглі шлейфи. Розташовують провідники, як правило, в спеціальних каналах (див. стійка), що мають різні габарити. Особливості проектування провідного монтажу визначають тим, що цей вид монтажу використовують переважно в КЕ старших рівнів: блоки, панелі, стійки.

Після розгляду цих особливостей **задачу трасування друкованих з'єднань** можна сформулювати наступним чином. На монтажній поверхні задано місцезнаходження множини конструктивних елементів (ПМ)  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , виводи яких утворюють деяку множину з  $L$ - зв'язаних підмножин  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$  (група розміщення). При чому кожна підмножина  $C_L$  об'єднує  $N_C$  виводів КЕ з множини  $\{X\}$  у відповідності до СЕП.

Крім того, задані розташування груп КП роз'єму (зараз на ДП декілька роз'ємів), МО (монтажні отвори - зараз елемент з поверхневим монтажем мають отвори для перевірки якості монтажу) а також ряд вимог, які визначаються топологією плати: мінімальна друкованих провідників та зазорів між ними; параметри КП; 5-й клас точності монтажу; число шарів металізації та способу переходу з одного шару на інший і т.д.

Потрібно з урахуванням заданих конструкторсько-технологічних обмежень з'єднати виводи КЕ усередині кожного підмножини  $C_L \in C$  та між підмножинами так, щоб отримані з'єднання відповідали вибраному показнику якості (приклад на мал..)

Із **задачі трасування** виходить, що вона має **топологічний** та **метричний** характер.

- **топологічний** характер – це всі дерева необхідно розташувати на ДП - пов'язаний з вибором допустимого просторового розташування окремих фрагментів з'єднання (для кожного  $C_L$ ) та їх фіксації для конкретного місцезнаходження (вибрати деревообразну структуру)
- **метричний** характер передбачає урахування конструктивних параметрів посадкових місць (штирьові, BAG, ....), а також конструктивних розмірів елементів печатного монтажу та комутаційного поля

Із **задачі трасування** виходить, що **вихідними даними** є:

- ПЕС функція вузла, для якого проектується монтаж, параметри монтажного простору, в яке будуть відображені з'єднання між усіма выводами КЕ та контактів роз'єма

Виділяють також критерії оптимізації трасувань:

- всі з'єднання повинні відповідати ПЕС (явна, але не обов'язкова умова)

-з'єднання повинні бути найкоротшими ( $\sum L_{зв} = \min$ ). Ця умова визначається вимогами – мінімізації взаємних наводок, зменшення  $\tau_{зад}$  ел. параметра, економічними міркуваннями. Крім того, провідник меншої довжини займає меншу площу й тим самим створює кращі можливості для реалізації інших провідників.

-мінімальна кількість перетинів (перетини провідників заборонені) - **ПО** (перехідні отвори). Це визначається вимогами на число переходів з шару на шар, а також вимогами зменшення кількості шарів багатшарової ДП. Кожне **ПО** характеризується  $C_0$  та  $L_0$ . Якщо в ланцюгу кілька **ПО** – в результаті  $C_0$  та  $L_0$  зростає.

-рівномірне розподілення трас по поверхні ДП. При нерівномірному заповненні плати провідниками немає можливості прокласти нові провідники (хоча така можливість є на іншому боці ДП), збільшується рівень взаємних наводок

-максимальна кількість провідників простої конфігурації. Це визначається вимогами технології виготовлення ДП

-мінімальна протяжність паралельних ділянок сусідніх провідників

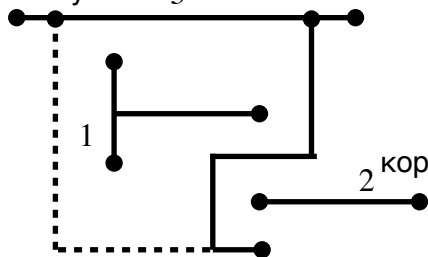
Основні труднощі, які виникають при вирішенні задачі трасування друкованих з'єднань, визначаються особливостями друкованого монтажу, при якому з однієї сторони можливе отримання провідників складних конфігурацій, а з іншої сторони конфігурація кожного провідника визначається не тільки розташування выводів але й конфігурацією всіх інших провідників (див. рис. нижче).

Задача одночасної оптимізації конфігурації всіх провідників в наш час не має алгоритмічного вирішення, а вичерпний перебір варіантів трасування даже для найпростіших монтажних схем практично неможлива.

Черговість підходу до выводів роз'єму, коли був один **Р**. Ця задача стала трохи простішою, коли на ДП використовують декілька багато- та мало- вивідних роз'ємів.

Метод проектування друкованих з'єднань оснований на послідовній побудові **локально-оптимальних** конфігурацій провідників з проведенням направленої перебору варіантів. Локальна оптимізація розуміється так. Кожен провідник будується оптимально по відношенню до деяких критеріїв тільки на данному етапі побудови (див. рис.2), тобто з

урахуванням розташування всіх раніш прокладених провідників, але без урахування наступних. 3



Провідник 3 оминає прокладені раніш провідники 1 та 2, тобто прокладається не абсолютно коротким, а локально коротким.

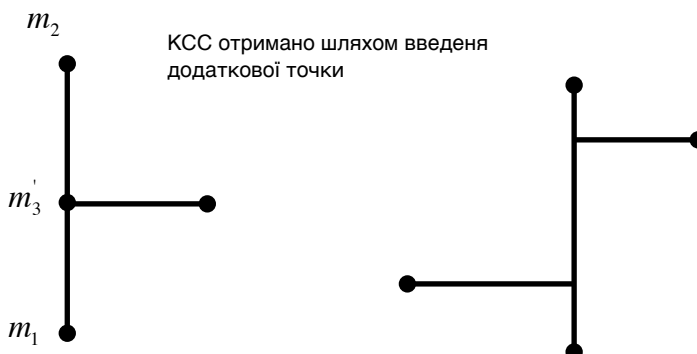
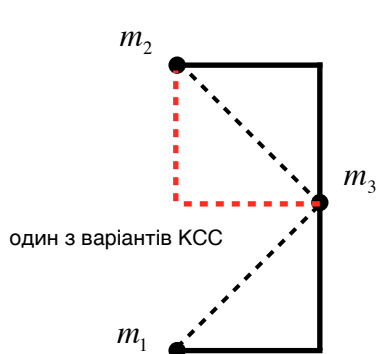
## Друкований монтаж.

Проектування друкованного монтажу є однією з самих складних задач автоматизації проектування.

- 1) Особливістю друкованного монтажу являється недопустимість пересічення трас, розташованих в одній монтажній площині (інша справа в провідному монтажі)
- 2) Другою особливістю друкованного монтажу є можливість крім з'єднань типу "вивід-вивід" (що має місце в провідному монтажі) використовувати з'єднання типу "вивід-провідник" та "провідник-провідник". Використовувати з'єднання такого припускає вирішення **задачі Штайнера**.

**Задача Штайнера** формулюється наступним чином. Для заданої множини вершин, фіксованих на площині, потрібно знайти таку систему прямолінійних відрізків, щоб будь-які дві з даних точок могли бути зв'язані системою цих відрізків. Загальна довжина системи відрізків була мінімальною.

При такій постановці задачі побудова **НЗС** з'являється можливість зменшувати довжини сітки за рахунок введення довільного числа додаткових вузлів.



Найбільш складним та трудомістким етапом при машинному конструюванні ДП є трасування, основною задачею якого є проектування електричних з'єднань між виводами КЕ та роз'ємів.

Вихідними даними для трасування є СЕП та результати, отримані в процесі розміщення КЕ на ДП, При рішенні задачі трасування друкованих провідників потребується виконати ряд критеріїв:

- з'єднання повинні відповідати СЕП
- з'єднання повинні бути найкоротшими. Ця умова накладається вимогами мінімізації взаємних наводок та часом затримки сигналу, мініатюризації ЕВА та економічними міркуваннями. Крім того, провідники меншої довжини займають менше місця та відповідно, залишають більше можливостей для проведення інших з'єднань

- число перетинів трас на платі повинно бути мінімальним. Ця умова визначає мінімізацію шарів плати
- розподілення з'єднань на ДП повинно наближатися до рівномірного, тому що нерівномірна щільність друкованих провідників на поверхні плати призводить до концентрації електричних та теплових полів в місцях зі збільшеною густиною, та відповідно, до зменшення надійності ДВ. Нажаль, не один з існуючих алгоритмів трасування не задовольняє повністю всім переліченим умовам

Виконати одночасно всі ці умови важко, тому йде обмін критеріїв по ранжиру. Причиною цього є те, що цю єдину задачу конструювання ДП штучно ділять на дві послідовних етапи: розміщення КЕ та трасування з'єднань, причому обидва етапи виконуються по неузгодженим та навіть протирічним критеріям оптимізації. Існуючі алгоритми трасування та розміщення не дозволяють як правило, прокласти всі провідники на плати обмежених розмірів з обмеженим числом шарів.

При цьому в зв'язку зі зростанням числа КЕ на ДП та збільшенням вимог до компактності процент непрокладених провідників все збільшується.

Тому в якості основного критерію трасування надалі передбачається використовувати **критерій мінімуму числа непроведених з'єднань**. Введення цього критерія потребує якісно нового підходу до всіх проблем машинного конструювання ДП. Але поки **критерій мінімуму числа непроведених з'єднань** не використовується із-за складності. Цей критерій характеризує поки якість проектування систем машинного конструювання.

Дотримання цих та інших критеріїв оптимізації, як показує досвід, сприяє прокладці всіх послідовних провідників, тому що кожен провідник, що знову прокладається, створює при цьому мінімальні перешкоди для послідовних.

Крім цього можуть бути введені додаткові критерії (ортогональні трасування, направлення провідників перпендикулярні на сторонах ДП), що сприяють найбільш швидкому досягненню рішення, наприклад, задання переважного напрямку трасування в кожному шарі з ціллю спрощення конфігурацій.

**Ціль трасування** - прокладка **всіх** трас друкованих або об'ємними провідникам так, щоб всі контакти (виводи) КЕ та Р були з'єднані згідно СЕП та оптимізувалися вище названими критеріями оптимізації.

Одночасно виконати всі ці умови важко, тому йде обмін критеріїв по можливості, щоб досягнути 100% трасування.

Слідє відмітити деяке протиріччя критеріїв - наприклад

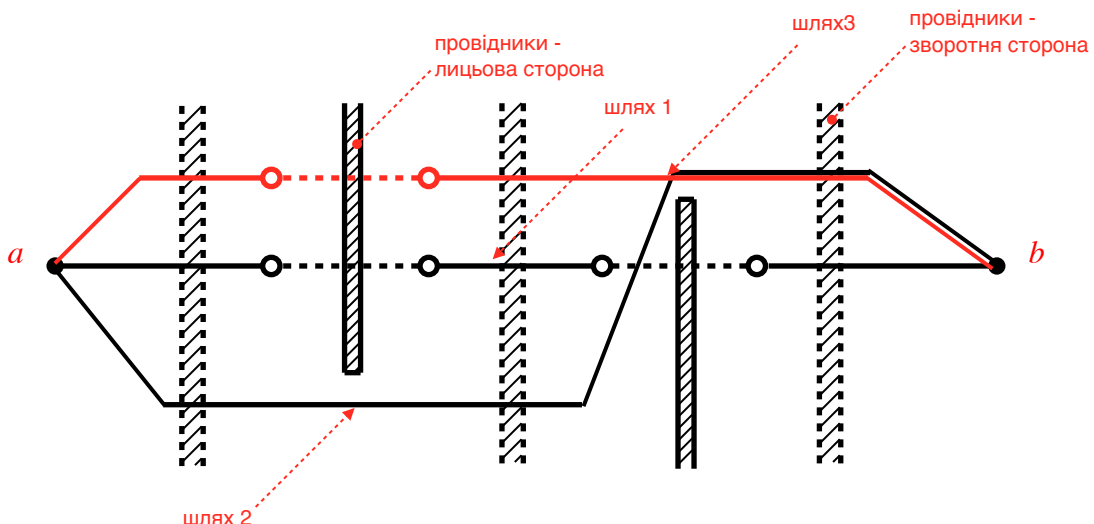


Рис.2

Фрагмент ДП, провідники розташовані на лицьовій та зворотній стороні ДП. Потрібно побудувати трасу  $ab$ .

Приклад знаходження оптимального шляху при різних способах задання функції  $F$

Два критерія оптимізації:

$$L_{зв} = \min$$

$$N_{по} = \min$$

- **шлях 1:** дійсно  $L_{зв} = \min$ , але провідники простої конфігурації - кількість ПО оптимізувати складно
- **шлях 2:** ПО нема, але  $L_{зв}$  значно збільшилося,  $N_{по} = 4$  - провідники складної конфігурації
- **шлях 3:** найбільш оптимальний - незначне збільшення шляху ( по зрівнянню зі **шлях 1**) та кількість ПО зменшилося в двоє  $N_{по} = 2$  (**шлях 1**)

Для вирішення задач автоматичного трасування, запропоновано значне число різноманітних алгоритмів, але не одні з них не може реалізувати **тактику** та **стратегію** людини-конструктора.

Основним недоліком всіх використовуваних алгоритмів в автоматизованих системах програм є закладений в них принцип **послідовного** та **пофрагментного** перегляду монтажного простору. Локалізація задачі в межах одного фрагменту не забезпечує оптимізації монтажу в цілому, тому що якість послідууючого прокладення суттєвим чином залежить від раніш проведених трас.

Виділяють такі алгоритми трасування:

1. Хвильові алгоритми та їх модифікації:
  1. Хвильові алгоритми
  2. Променеві алгоритми
  3. Маршрутні
2. Канальні
3. Лабіринтові
4. Гнучкі

Існуючі алгоритми трасування не дозволяють проводити всі провідники на платі обмеженого розміру та з обмеженим числом шарів. Збільшення КЕ на платі збільшує процент нереалізованих трас при збереженні розмірів ДП.

Тому для оцінки ефективності різноманітних алгоритмів використовується процент проведених трас від загального числа.

## Загальні положення дискретних алгоритмів трасування

При трасуванні моделлю ДП є двувірна координатна сітка з сотами правильної форми. Соти можуть бути різними за формами та розміром - що визначає технологію виготовлення монтажу.



Розміри сот визначаються класом точності друкованого монтажу.

Використовують розбиття плати на квадратні соти, тому що добре описується кожен дискретний елемент в ортогональній системі координат.

Розмір сот визначається [2.5 x 2.5 mm, 1.25 x 1.25 mm, 0.625 x 0.625 mm] визначається:

- кроком виводів елементів (IC)
- розмірами КЕ та їх кількістю на платі
- кількістю проектуємих трас - щільність монтажу
- технологією виготовлення друкованих провідників
- обчислювальною потужністю ЕОМ

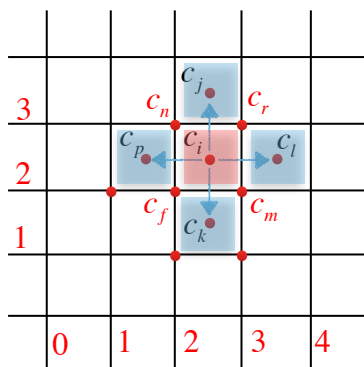
### Побудова

Кожній соті (квадрату) ставиться у відповідність одна вершина графа трас  $G_T = \{C, L\}$

$C$  - множина сусідніх сот

$L$  - множина трас

Вершини  $c_i \in C$  та  $c_j \in C$  з'єднуються ребром  $L$  ( $L$  - множина ребер - трас), якщо відповідні їм **соти є сусідніми**. Тобто проведення траси виконується послідовно від однієї соти сусідньої соти до іншої. Для Ортогонального монтажу сусідніми соті  $c_i$  є соти  $\{c_j, c_l, c_k, c_p\}$ . Тобто ті, що мають загальну сторону.

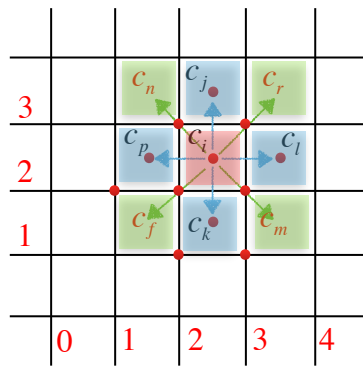


дискретизація монтажного простору

При цьому граф **трас** має структуру решітки. При такому визначенні сусідньої соти можливе прокладання трас тільки в ортогональних напрямленнях.

У випадку **ортогонального трасування** кожній вершині  $c_i$  інцидентні 4 ребра - з соти (центру або лівого нижнього угла) є можливість прокласти 4 траси.

Якщо допускається прокладка трас під кутом  $45^\circ$ , то сусідніми квадрату  $c_i$  є квадрати  $\{c_i, c_r, c_l, c_m, c_k, c_f, c_p, c_n\}$ . Для цього випадку граф трас показано на рис (див. нижче). При проведенні провідників під кутом  $45^\circ$  вершині  $c_i$  інцидентні 8 ребер. Тобто сусідніми в даному випадку є соти, які мають загальну сторону та вершину

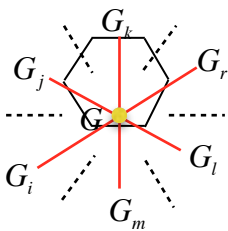


Фрагмент графа трас під кутом  $90^\circ$  та  $45^\circ$

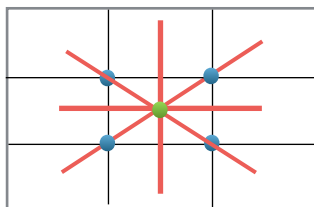
Як зміниться трасування, якщо дати таке визначення сусідньої соти - загальну сторону та вершину.

Тобто для квадратної соти можна трасувати по лініям координатної сітки - ортогональне трасування або кратним  $45^\circ$  та відповідно 4 та 8 ребер графа трас.

Якщо потрібно проводити провідники під кутом, кратним  $60^\circ$ , то потрібна інша форма соти - правильний шестикутник - буде 6 сусідніх сот та 6 трас. При кратності кута  $30^\circ$  - буде 12 сусідніх сот та 12 трас.



або дати інше визначення сусідньої соти.

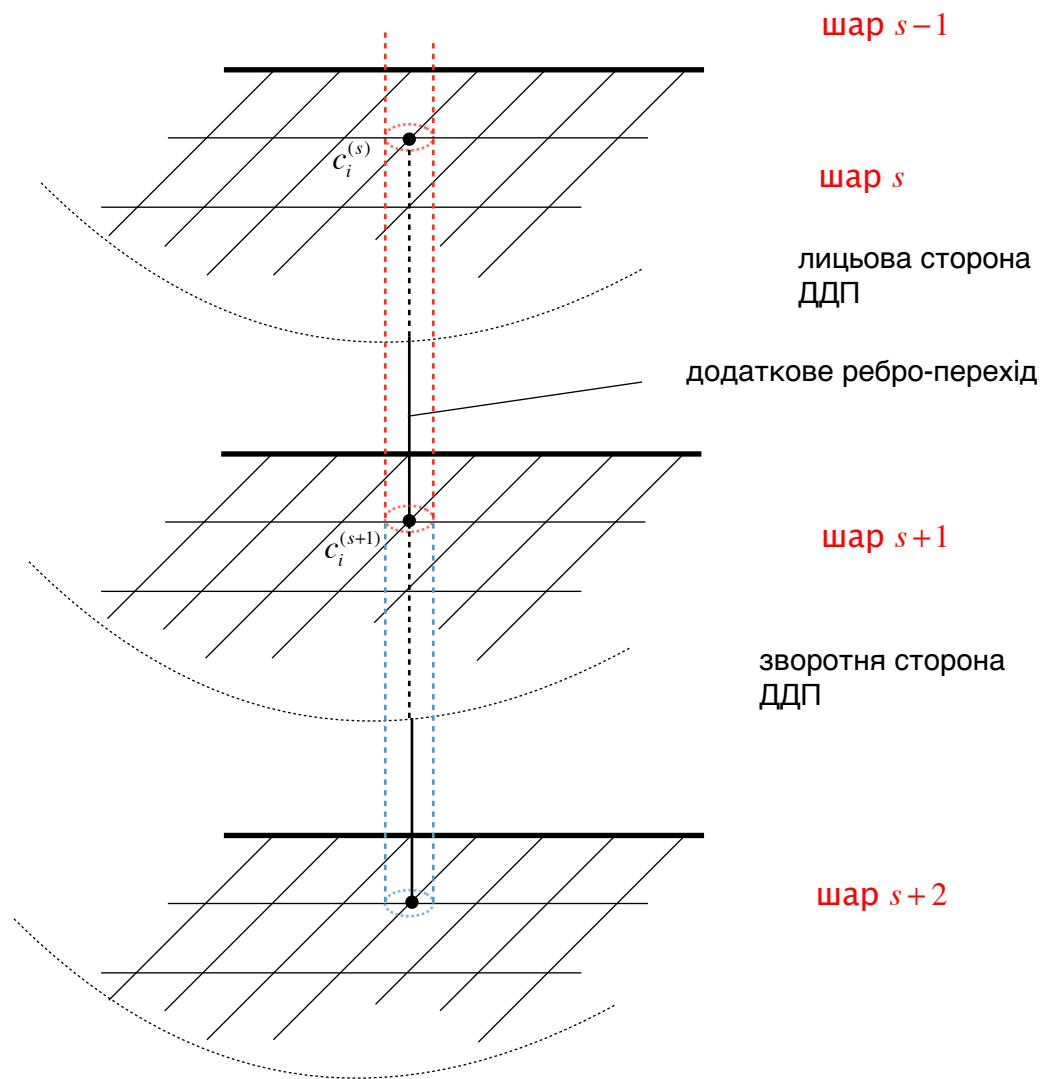


кратність  $45^\circ$  - вдале визначення сусідньої соти - **точка-сторона**

з'єднувальні траси можуть проходити тільки по ребрам  $C_i, C_j, \dots, C_n$  графу трас. При цьому довжина траси визначається сумарною довжиною ребер графа  $G$ , по яким проходить траса. Для графа трас також задається система обмежень на прокладку трас, що визначається типом монтажу. Так для друкованого монтажу траси різних електричних ланцюгів не повинні пересікатися, тобто не мати загальних вершин.

у випадку двостороннього багат шарового монтажу граф трас  $G$  створюється об'єднанням графів трас окремих шарів шляхом введення додаткових ребер переходів між шарами у відповідності до технології виготовлення монтажу.

В БДП (багат шарова друкована плата) до ребер, інцидентним вершині в одному шарі, додаються ще два ребра (і більш - в залежності від кількості шарів), які вказують на можливість переходу в соти верхнього  $(s-1)$  та нижнього шару  $(s+2)$ .



Фрагмент графа трас багатошарової структури

З цих моделей МП видно переваги по трасуванню ДДП, БДП:

БДП: вершині графу трас інцидентні велика кількість ребер (ДДП та ортогональні траси інцидентні 8, 45° - інцидентні 16 ребер).

$L_n = n \times 4$  -  $n$  - число шарів; 4 - кількість ортогональних трас

$L_n = n \times 8$  - для транс 45°

$L_n = n \times 6$  - для транс 60°

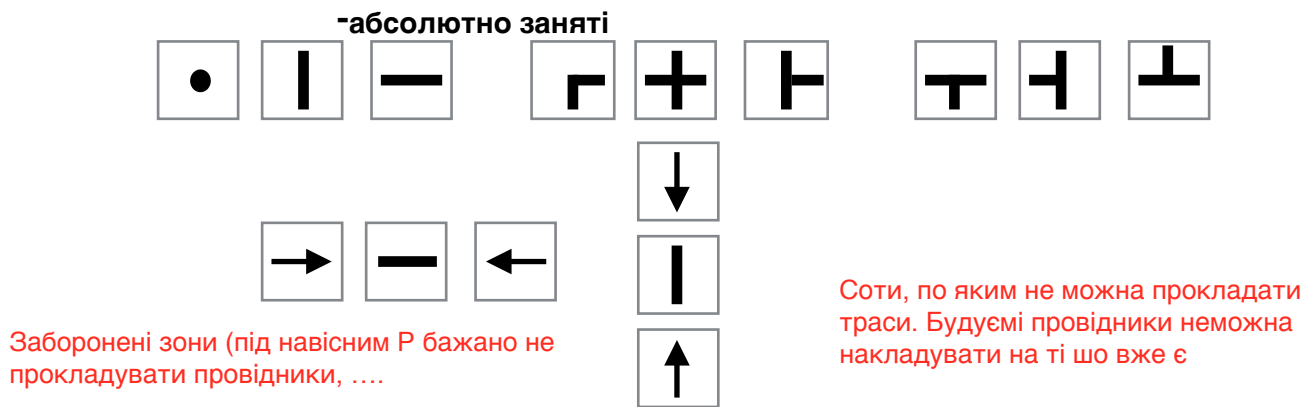
$L_n = n \times 12$  - для транс 30°

Серед загальної множини сот монтажного поля (ми будемо розглядати квадратні соти) розрізняють соти:

- а б с о л ю т н о вільні

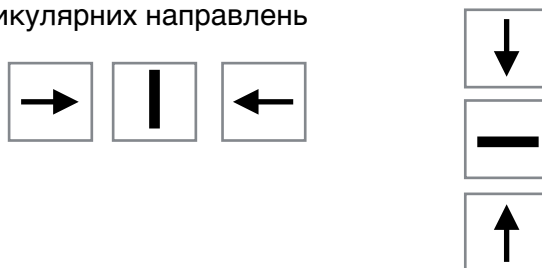






технологічні зони, заборонені соти, крайові соти, соти з виводами - МО, соти з провідниками, що міняють напрямлення, соти соти з провідниками для інших провідників паралельного напрямлення, тобто в соті є провідники, а в сусідніх сотах будуються провідники такого ж напрямлення, тоді на наступному кроці ми повині змінити це напрямлення ( накладувати в одній соті провідник на провідник не можна).

- **відносно вільні** (заняті) рахуються соти з провідниками, а в сусідніх сотах будується провідник перпендикулярного напрямлення - для інших провідників перпендикулярних напрямлень



Тобто в соті є провідник, а в сусідній соті будується провідник перпендикулярного напрямлення.

Можна будувати провідник, якщо пересічення провідників допустимо - сота відносно вільна, Якщо перетин не допускається - сота абсолютно занята - необхідно змінити напрямлення провідників.

Стан соти на кожній ітерації відслідковується, аналізується. Можна сказати це динамічний стан сот на кожному кроці.

Таким чином, вибрана система станів сот визначає середовище, в якій виконується побудова з'єднань (трас).

Прокладати траси дозволяється тільки по вільним сотам. Тільки в деяких випадках допускається використовувати відносно вільні соти.

Природно, після прокладки траси число вільних сот зменшується, а отже ускладнюються умови побудови послідовних нових трас. Особливо труднощі збільшуються при побудові трас без перетинів в кінці трасування, тому що **останніми**, як правило, **прокладаються довгі провідники**.

Якість трасування значно залежить від того, в якій послідовності будуть прокладатися траси (більш того траси мають різну довжину, або значно відрізняються по довжині). Тому визначення порядку трасування є **першим етапом** роботи будь-якого алгоритму трасування.

Найбільш раціональним визнано такий порядок.

Спочатку з'єднуються найближчі **КМ**, а потім більш віддалені. Рахується, що в цьому випадку створюються найбільш сприятливі умови для прокладки всіх з'єднань. При цьому ПМ розглядають як підмножини **КМ**, в яких виконують трасування між найближчими **МО (КМ)**. Потім виконують трасування між підмножинами. В цьому випадку оптимізують кількість пересічень (ПО).

Важлива інша послідовність; спочатку в ручну з'єднують найбільш віддалені **КМ**, ці траси розташовують по краям плати, щоб вони не були перешкодами - не перегороджували робочу частину плати. Потім прокладають короткі траси.

Провідники прокладають тільки по лініям КС або кратним  $45^\circ$ .