

6. ОСНОВИ КОНСТРУКТОРСЬКОГО ПРОЕКТУВАННЯ

6.1 Постановка задачі

На етапі конструкторського проектування радіоелектронної апаратури (РЕА) необхідно розглядати розміри ІС, транзисторів, резисторів, конденсаторів та інших радіокомпонентів, розміри провідників та відстані між ними, розміри замінюваних блоків, число контактів роз'єму на замінюваних блоках, вид монтажу для проведення з'єднань. Крім того, слід забезпечити задані вимоги до надійності роботи пристроїв у заданих фізичних та кліматичних умовах, можливість ремонту, оптимальну вартість виготовлення та обслуговування, витримати габаритні та вагові показники.

Основним принципом конструювання РЕП є модульність виготовлення пристроїв, причому модульна структура має, як правило, ієрархічний характер. Найбільш яскраво це проявляється при конструюванні ЕОМ, яка має відносно високу ступінь уніфікації схемних рішень. Модулі різного рівня складності об'єднуються в пристроях у відповідності до їх функціональної ієрархії (рис. 6.1)

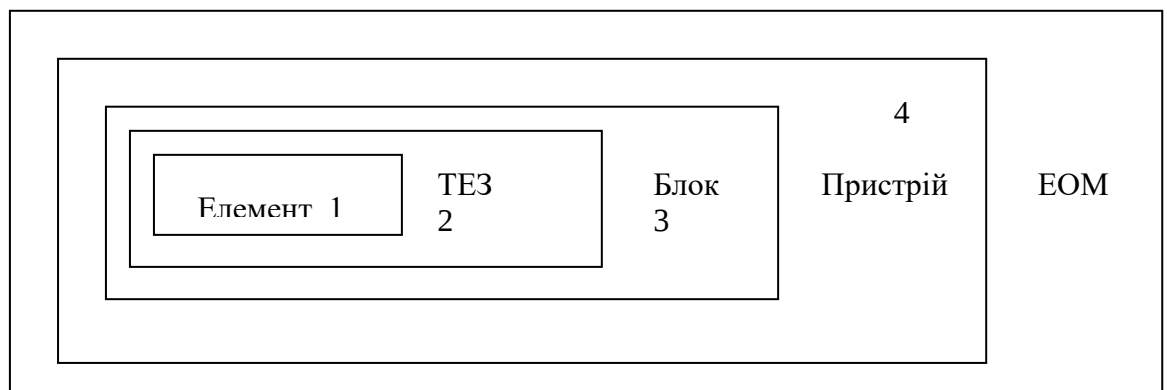


Рисунок 6.1 - Ієрархія конструктивних модулів

Модуль рівня 1 представляє собою або ІС, яка містить декілька логічних елементів типу І, АБО, НІ, або фрагмент ВІС – тригер, регістр. Модуль рівня 2 об'єднує на одній печатній платі (як правило двосторонній) декілька

десятків ІС або декілька ВІС і є типовим елементом заміни (ТЕЗ), який використовується для оперативної заміни при виникненні несправностей у пристрої. Модуль рівня 3 поєднує ТЕЗи у блоки, які конструктивно можуть бути оформлені у вигляді касети з панеллю, яка має провідний або печатний монтаж. Модуль рівня 4 представляє собою окремий пристрій і містить ряд касет, які конструктивно об'єднані в стійку або шафу, у якій міжпанельні з'єднання виконуються джгутовим монтажем.

З'єднання в РЕП в значній мірі визначають їх основні технічні параметри, такі як вагу, об'єм, надійність, швидкодію. Наприклад, при переході від вузлів найнижчого конструктивного рівня до найвищого (ІС – печатні плати – панелі) виникають значні втрати щільності компоновки елементів, що збільшує час розповсюдження електричних сигналів.

Системи автоматизованого конструкторського (технічного) проектування у першу чергу були реалізовані для проектування двошарових та багатошарових печатних плат, а також для випуску технічної документації, до складу якої входять електричні схеми і складальні креслення, таблиці кіл та таблиці специфікацій, технологічна документація.

При технічному проектуванні перевага надається автоматичним системам, коли по початковому опису схеми забезпечується проектування і випуск документації без участі людини. Це значно зменшує вірогідність внесення помилок та підвищує ефективність праці проектувальників.

Задачі конструювання РЕП мають загальну природу з точки зору автоматизації проектування. Вони вирішуються із використанням загальної родини алгоритмів, при конкретній реалізації яких на ЕОМ в САПР враховується використовувана технологія виготовлення пристроїв. Такими типовими задачами виступають компоновка блоків, розміщення компонентів та трасування монтажних з'єднань. Ці задачі є оптимізаційними.

Серед алгоритмів конструкторського проектування вирізняють два основних класи: конструктивні та операційні.

Конструктивні алгоритми формують проектне рішення протягом послідовних кроків: обирається один елемент схеми рівня, який розглядається, до нього за встановленими правилами приєднується другий, до отриманого комплексу елементів – третій і т.д. Алгоритми, які використовують таку методологію називаються послідовними. Алгоритми, у яких формується декілька груп елементів в межах одного кроку, називаються паралельними. Розроблено також комбіновані послідовно-паралельні конструктивні алгоритми.

Ітераційні алгоритми вимагають завдання початкового вирішення задачі конструкторського проектування, яке потім покращується. Початкове рішення задається конструктором-проектувальником або отримується на ЕОМ як результат роботи конструктивного алгоритму.

Виділення трьох основних етапів конструкторського проектування – компоновки, розміщення, трасування – спрямоване на пониження розмірності загальної задачі. Остання задача конструкторського проектування – трасування – є найбільш важливою, але в деяких випадках вона не має повного автоматизованого рішення. Після роботи програм автоматичного трасування залишається близько 5-10% нерозведених з'єднань, які потім доопрацьовуються конструкторами.

6.2 Основні принципи моделювання конструкцій та схем

Найбільш загальною моделлю конструкцій є монтажний простір. Математична модель монтажного простору зазвичай дискретна. У цьому випадку вона представляє собою опис координатної сітки з рівномірним або нерівномірним кроком. Можливі позиції елементів характеризуються цілочисельними індексами, а не дійсними значеннями координат, що є зручним для алгоритмізації задач конструювання. Зазвичай проектуються і реалізуються двохшарові та багатошарові конструктивні елементи, до того ж кожен шар має свій номер. Тому для опису місцеположення елемента у шарі

достатньо двох індексів. При цьому відстань визначається у відносних одиницях. Прикладами фізичного відображення плоского монтажного простору можуть служити печатна плата, підложка мікрозборки, шар кристалу ВІС.

Оскільки завдання конструкторського проектування практично завжди пов'язані з оцінкою довжини з'єднань, то в монтажному просторі задаються різні метрики. Наприклад, відстань d_{ij} між i -им та j -им компонентами схеми визначають наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} d_{ij}^{(1)} &= \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \\ d_{ij}^{(2)} &= |x_j - x_i| + |y_j - y_i| \\ d_{ij}^{(3)} &= |x_j - x_i|^s + |y_j - y_i|^s \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Перший спосіб дає оцінку довжини з'єднання між двома точками з координатами (x_i, y_i) , (x_j, y_j) по найкоротшій відстані (Рис. 6.2, а, б). Другий спосіб призначений для оцінки довжини ортогональних з'єднань, які прокладено паралельно вісям координат (Рис. 6.2, в-д), коли з'єднання проводяться по магістралям або каналам. Третій спосіб є корисним, коли в задачах оптимізації виникає потреба у зменшенні не тільки сумарної, але і максимальної довжини провідників.

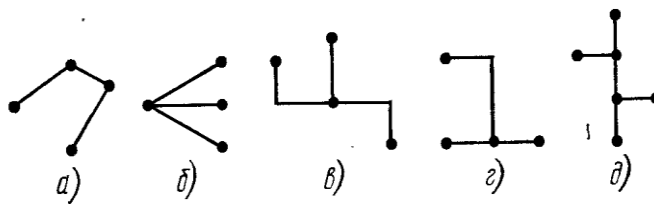


Рисунок 6.2 – Види монтажних з'єднань: а – ланцюг, б – зірка, в – д – ортогональне з'єднання

Любу вихідну схему (функціонально-логічну або принципову електричну) представляють як комутаційну. Комутаційна схема – набір елементів, пов'язаних між собою з'єднаннями, по яким подаються сигнали на полюси елементів (Рис. 6.3).

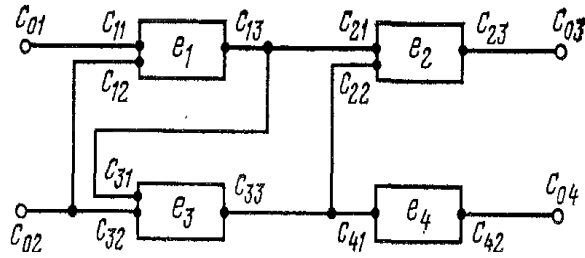


Рисунок 6.3 – Комутаційна схема

Елементи схеми і зовнішні комутації кожного елемента пронумеровуються, а з'єднання схеми, які мають однаковий потенціал, об'єднують в комплекси з'єднань, які також пронумеровують (Рис. 6.4).

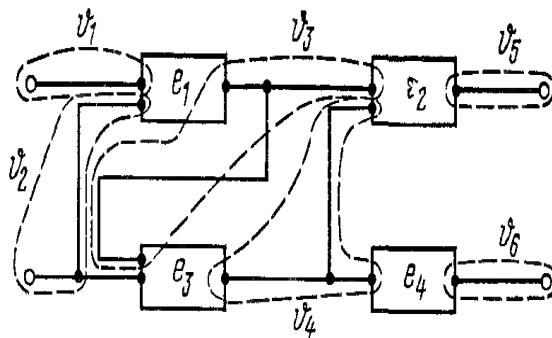


Рисунок 6.4 – Комплекси з'єднань на схемі

Пронумеровані n елементів схеми складають множину $E = \{e_i, i=0,1,2,\dots,n\}$. Зовнішні комутації елементів складають сімейство множин $\{C_i = \{c_{ij}, j=1,2,\dots, k_i\}, i=0,1,2,\dots, n\}$, де i – номер елемента; j – номер вивода у даному елементі, k_i – число виводів i -го елемента. Також слід відмітити, що елементи множини C_0 відносять до зовнішніх виводів схеми, утворюючи спеціальну групу. Комплекси з'єднань, виділені на Рис. 6.4 пунктирними лініями, утворюють сімейство множин $V = \{v_i, i=1,2, \dots, M\}$, де v_i – множина еквіпотенціальних виводів схеми; M – число комплексів.

$$C = \bigcup_{i=0}^n C_{ij} = \bigcup_{j=1}^M v_j, v_j \neq \emptyset, v_i \cap v_j = \emptyset (i \neq j) \quad (6.2)$$

Такий опис може бути представлений у вигляді графа (Рис. 6.5), якщо елементи множин E, C, V розглядати як вершини, а також ввести ребра, які визначають приналежність виводів елементам (елементні ребра F) і приналежність виводів комплексам з'єднань (сигнальні ребра W). Подібна

математична модель у вигляді графа широко використовується у задачах дискретної оптимізації.

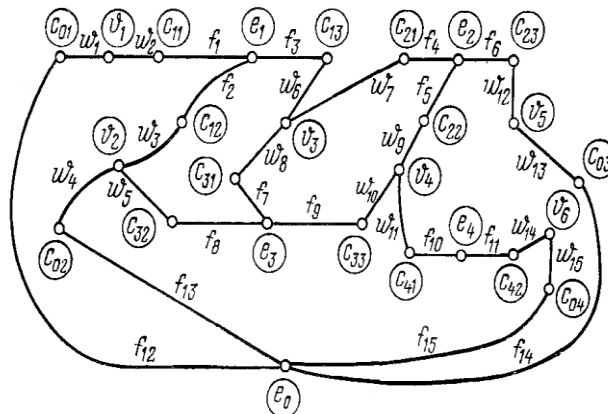
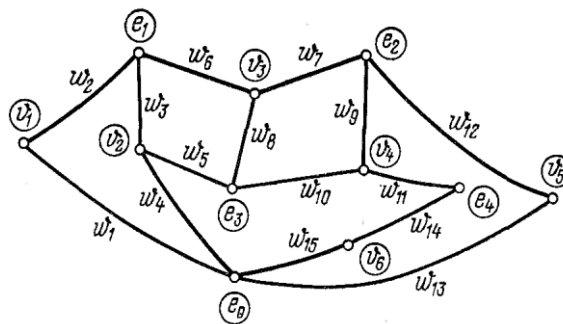


Рисунок 6.5 – Граф схеми

Граф з вершинами трьох типів (E,C,V) та ребрами двох типів (F,W) дає найбільш детальне представлення схеми. Цей граф використовується при завданні повної інформації про схему в процесі автоматизованого проектування. Однак, у деяких задачах та алгоритмах можливо скористатись меншим обсягом інформації про схему, наприклад, використовуючи граф, отриманий після витягування вершин C_i у вершини E та видалення елементних ребер F (Рис. 6.6).



саму інформацію, дозволяє скоротити об'єм вихідних даних, а також підвищити ефективність алгоритмів як по пам'яті, так і за часом.

Приклад матричного та списочного опису повної моделі (Рис. 6.5) комутаційної схеми представлений на Рис. 6.7.

	c_{01}	c_{02}	c_{03}	c_{04}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{31}	c_{32}	c_{33}	c_{41}	c_{42}
v_1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
v_3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
v_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
v_5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
v_6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

$v_1\{(0,1),(1,1)\}; v_2\{(0,2),(1,2),(3,2)\}; v_3\{(1,3),(2,1),(3,1)\};$

$v_4\{(2,2),(3,3),(4,1)\}; v_5\{(0,3),(2,3)\}; v_6\{(0,4),(4,2)\}$

Початкові елементи комплексів - $\{1, 3, 6, 9, 12, 14\}$

$v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$

Рисунок 6.7 - Матричний та списочний опису комплексів з'єднань

Найбільш компактний спосіб запису інформації про комутаційну схему дає опис графа за допомогою звернутої матриці, рядки якої відповідають елементам схеми, стовбці – номерам виводів елементів, а елементами матриці виступають номери комплексів з'єднань, яким належать виводи (Рис. 6.8).

$$T = \|t_{ij}\|_{n \times k} = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} l_0 \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 2 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & - \\ 3 & 4 & 5 & - \\ 3 & 2 & 4 & - \\ 4 & 6 & - & - \end{matrix} \right\| \end{matrix}$$

Рисунок 6.8 – Скорочений табличний опис графа схеми

Останнє представлення є зручним для підготовки вихідної інформації, так як забезпечує отримання любого іншого графа схеми шляхом програмного перетворення.

6.3 Критерії алгоритмів компоновки

Задача компоновки елементів пристрою в блоки, зазвичай, ставиться як задача оптимального розбиття пристрою, для якого задана функціональна, логічна або принципова схема. Це означає, що відомо набір елементів та їх з'єднань в апаратурі, що проектується.

При формулюванні задачі компоновки використовуються наступні умови (критерії оптимізації або обмеження):

1. Кожен блок містить не більше P компонентів і не більше Q виводів.
2. Кожен блок розміщується у заданому об'ємі V_i і має довжину зовнішніх зв'язків не більше E_i .
3. Загальна кількість з'єднань між блоками N мінімальна.
4. Число блоків N мінімальне.
5. Блоки обираються із числа стандартних еталонних елементів, які складають бібліотеку.
6. Число типів блоків, які використовуються, є мінімальним.
7. Число блоків Q_i у кожному блоці мінімальне.
8. Виконуються задані обмеження на затримки розповсюдження сигналів.
9. Забезпечується зручність тестування, доступність елементів у блоках і низька вартість ремонту.

При розв'язанні задач компоновки використовуються математичні формулювання задач цілочисельного (дискретного) лінійного або нелінійного програмування. Комбінаторні алгоритми, як правило, не використовуються із-за великого розміру задачі. Тому використовуються наближені алгоритми компоновки послідовного, послідовно-паралельного або ітераційного типу.

Після виконання компоновки і визначення реальних затримок, а також корегування схеми бажано провести тимчасове логічне або схемотехнічне

моделювання з ціллю перевірки функціонування пристрою, який проектується.

6.4 Критерії алгоритмів розміщення

Після компоновки РЕП потрібно здійснити для кожного стандартного та унікального блоків оптимальне розміщення компонентів в монтажному просторі.

В задачах розміщення використовуються наступні критерії якості:

1. Мінімальна сумарна довжина провідників з'єднання.
2. Мінімальна довжина провідників, які з'єднують дві найбільш віддалені точки кожного кола.
3. Мінімальна довжина провідників, які з'єднують джерело сигналу із найбільш віддаленим навантаженням.
4. Мінімальна сумарна площа зон реалізації усіх кіл.
5. Мінімальна кількість провідників, довжина яких перевищує задану величину.
6. Мінімальна найбільша довжина провідників з'єднання.
7. Максимально близьке розміщення компонентів, які мають найбільшу кількість спільних кіл з урахуванням допустимої відстані між елементами.

У регулярному монтажному просторі із числом позицій m при наявності у схемі n компонентів ($n \leq m$), кожний із котрих займає одну позицію, число можливих розміщень визначається наступним чином:

$$N_p(m, n) = n! C_m^n = \frac{m!}{(m-n)!} \quad (6.3)$$

При вирішенні практичних завдань розміщення широко використовуються евристичні процедури, алгоритми яких мають конструктивний або ітераційний характер.

Конструктивні алгоритми формують розміщення, починаючи від деякого заданого послідовним додаванням елементів із урахуванням критерію

оптимальності і заданих обмежень до тих пір, поки усі елементи не буде встановлено. Конфігурація розміщення при використанні конструктивних алгоритмів визначається тільки після повного завершення роботи алгоритму.

Ітераційні алгоритми мають перевагу перед конструктивними алгоритмами. Ця перевага проявляється в тому, що на будь-якому етапі роботи ітераційного алгоритму вже існує закінчений варіант розміщення, що відповідає практичним цілям.

Як правило, на практиці використовують комбінацію методів, а також враховують специфіку технології виготовлення схем, що призводить до збільшення кількості як постановок задач, так і програмних реалізацій, які мають достатньо складний характер.

6.5 Критерії алгоритмів трасування

Задача трасування полягає в побудові з'єднань між виводами розміщених в заданому монтажному просторі елементів у відповідності із принциповою схемою пристрою з урахуванням конструктивних обмежень. Зазвичай траса формується у вигляді множини пов'язаних відрізків, які з'єднують точки електричного кола.

При розв'язанні задачі трасування використовують наступні критерії та умови:

1. Мінімальна сумарна довжина з'єднань.
2. Мінімальна кількість з'єднань, довжина яких перевищує задане значення.
3. Мінімальне число переходів між шарами.
4. Мінімальна кількість шарів
5. Мінімальні шкідливі перешкоди.
6. Максимальна віддаленість трас з'єднань.
7. Число шарів не перевищує задане значення.
8. Довжина з'єднання не перевищує заданого значення.

9. Рівень шумів, які наводяться на кожній трасі, не перевищую допустимого значення.

10. Число з'єднань (припоїв) до одного вивода не перевищує заданого значення.

11. Встановлюється переважаючий напрямок трас у кожному шарі.

Алгоритмічні методи трасування, незважаючи на їх різноманітність, не гарантують проведення 100% з'єднань. По способу побудови трас методи трасування розділяються на конструктивні та ітераційні.

У послідовних конструктивних алгоритмах траси кіл проводяться в установленому порядку одна за іншою. Вибір черговості – евристичний. Зазвичай розпочинають прокладку трас або із самих довгих з'єднань, так як у сильно заповненому монтажному просторі їх важче формувати, або із самих коротких з'єднань, які щільніше заповнюють монтажний простір. Розташування траси фіксується і при подальшому трасуванні розглядається як перешкода. Таким чином, у послідовних алгоритмах здійснюється локальна оптимізація при прокладенні кожної траси. Але в результаті після проведення ряду трас деякі ділянки можуть бути заблоковані, що не дозволяє виконати трасування автоматично.

У ітераційних алгоритмах після формування усіх трас, яке здійснювалось без урахування взаємного впливу трас, визначається функція якості трасування. Ця функція представляє собою зважену суму параметрів траси (довжина, число перетинань, число перегинань). Найгірші траси видаляються, і процес трасування повторюється з урахуванням множини кращих з'єднань як перешкод. Останнє відображення є зручним для підготовки вихідної інформації, так як забезпечує отримання любого іншого представлення графа схеми шляхом програмного перетворення.

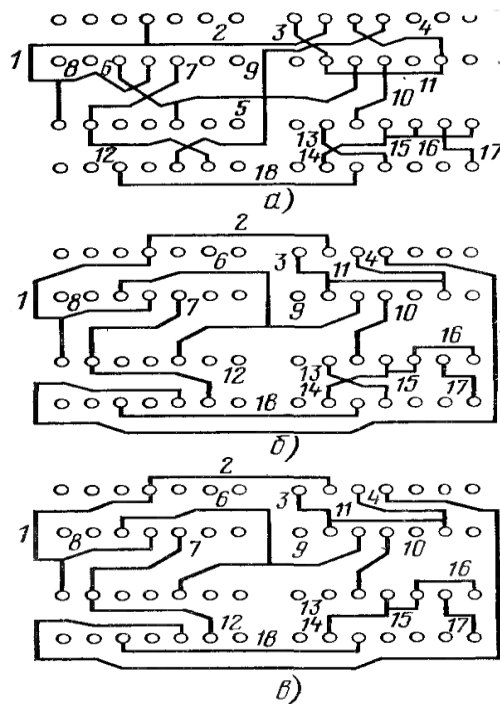


Рисунок 6.9 - Приклад трасування елементів: а) найкоротшими шляхами; б) мінімізація числа перетинань; в) усунення перетинань.

Більшість відомих універсальних алгоритмів трасування базуються на хвильовому алгоритмі визначення шляху.

Інший відомий алгоритм – це променевий алгоритм. Існують також алгоритми, що використовують каналний вигляд магістралей з'єднань.

Але великим недоліком систем автоматизованого конструкторського проектування є потреба у великій кількості вихідної інформації, яка може готуватися деякий час. Для подолання цього недоліку виникає потреба у САПР, які поєднують усі етапи проектування РЕП та мають інтегровані бази даних. Інформація цих баз постійно поповнюється у процесі розробки. Також необхідно проводити стандартизацію раціональних схемотехнічних та конструктивних рішень. Однією із таких систем є система проектування РЕП P-CAD.