

## Лекція 8. ВНУТРІСХЕМНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

1 Методи внутрісхемного діагностування друкованих плат

2 Математичні моделі з'єднань в друкованих платах

### *1 Методи внутрісхемного діагностування друкованих плат*

Електричний контроль друкованих плат (ДП) – важливий виробничий етап. Він призначений для перевірки цілісності ДП, що включає перевірку на цілісність друкованих провідників, відсутність коротких замикань.

Самий технічно складний компонент електричного контролю – система контакту з платою. Існує декілька методів електричного контакту: ручний, за допомогою адаптера (контактора), рухливих зондів; "матриць, що літають".

Ручний метод. При ручному методі оператор щупами послідовно проводить тест усіх кіл, проте, за статистикою, відсоток дефектів, що пропускаються, досягає 25%.

Адаптер. Під час тестування за допомогою адаптера (рис. 1) усі розміщені на ньому зонди знаходяться у контакті з контрольними точками, і швидкість контролю визначається швидкодією перемикальних ключів. Наявність тестових зондів в перехідних отворах, фізично розташованих на одній доріжці ДП, дозволяє досить точно локалізувати обриви. Перевірка навіть найскладнішої плати цим методом за пороговим рівнем 1 кОм займає всього декілька секунд.

Якщо перевірка друкованих плат здійснюється почерговим з'єднуванням з кожним контактом для контролю його відокремлення з кожним з тих, що залишилися, то такий спосіб називають максимальним, оскільки він вимагає максимального числа контрольних операцій. Дійсно, для перевірки відокремлення  $n$  кіл необхідно послідовним перебором обійти усі пари контрольованих точок :

- перший обхід: 1–2, 1–3, 1–4, ..., 1 –( $n-1$ ), 1– $n$ ;
- другий обхід: 2–3, 2–4, 2–5, ..., 2 –( $n-1$ ), 2– $n$ ;
- останній обхід: ( $n-1$ ) –  $n$ .

Можна побачити, що при такому послідовному обході кількість операцій для контролю відокремлення кіл дорівнює числу сполучень по два:

$$N_p = \frac{n(n-1)}{2!} \approx \frac{n^2}{2}$$

де  $N_p$  – кількість контрольних операцій при контролі відокремлень.

Наприклад, якщо плата має  $n = 1000$  роз'єднаних кіл, перевірка їх відокремлень складається з 500 000 операцій.

При контролі цілісності кіл кількість операцій контролю співпадає з кількістю монтажних точок – точок приєднання виводів компонентів:

$$N_C = kn,$$

де  $N$  – кількість контрольних операцій при контролі з'єднань,  $k$  – кількість ланок кола,  $n$  – кількість кіл.

Для зменшення кількості контрольних операцій для перевірки відокремлення кіл використовується інший спосіб комутації точок контакту на матриці контактів ("ложе цвяхів"). Цей спосіб перевірки друкованих плат називається інверсним або зворотним. Усі контрольовані точки з'єднуються з масою, і для перевірки окремих кіл їх відривають від маси і з'єднують з шиною вимірювання (рис. 1). Таким чином, ізоляція роз'єднаних кіл перевіряється між окремо взятим колом і усіма іншими, замкнутими між собою. Кожне коло піддається контролю на відокремлення один раз, тому кількість перевірок дорівнює числу кіл:

$$N_{PI} = n,$$

де  $N_{PI}$  – кількість контрольних операцій при інверсному способі комутації кіл для перевірки відокремлення кіл.

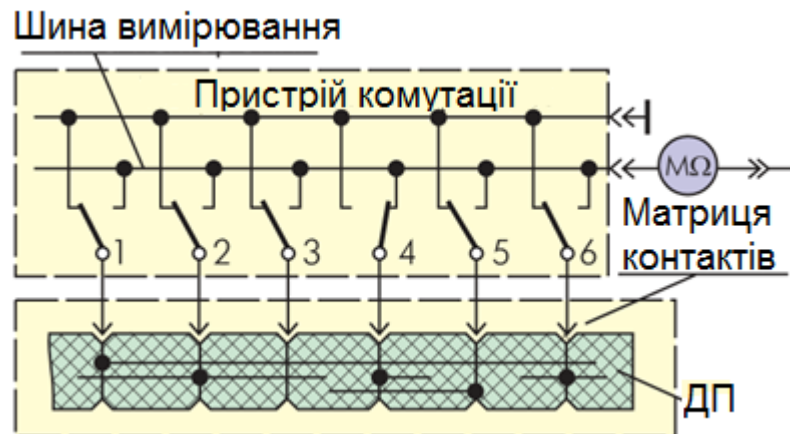


Рисунок 1 – Принцип комутації ланцюгів в тестерах з матрицею контактів : усі контакти, окрім четвертого, замкнуті на масу. На схемі в даний момент четвертий контакт приєднаний до шини вимірів

Для реалізації усіх перевірок монтажних з'єднань друкованих плат за допомогою тестерів з матричною системою контакту використовують такий порядок процедур:

- перевіряють цілісність з'єднань, цим одночасно перевіряється якість контакту з'єднувального пристрою з друкованою платою;
- приєднують усі кола до загальної шини – для цього використовують по одному контакту від кожного кола (як правило, перший контакт в адресі кола);
- по черзі відключають контакти, що належать контрольованим колам, від загальної шини і підключають їх до вимірювальної шини (рис. 1);

- вимірюють характеристики відокремлення чергового контрольованого кола відносно маси усіх інших: наявність або відсутність КЗ, опір ізоляції і (або) електричну міцність діелектрика);
- відключають перевірене коло від вимірювальної шини і повертають його до загальної шини.

Виконують таку процедуру послідовно з усіма колами, перевіряючи таким чином роз'єднаність усіх кіл.

Перевірка плат матричними тестерами за технологією "ложі цвяхів" (bed-of-nails) полягає в їх установці на тестові адаптери з наступною перевіркою зв'язаності (тобто виявленням коротких замикань або обривів низькою напругою близько 10 В) і контролем ізоляції на витік і пробій високою напругою (до 500 В). Наявність тестових зондів в перехідних отворах, фізично розташованих на одній доріжці друкованої плати, дозволяє досить точно локалізувати обриви.

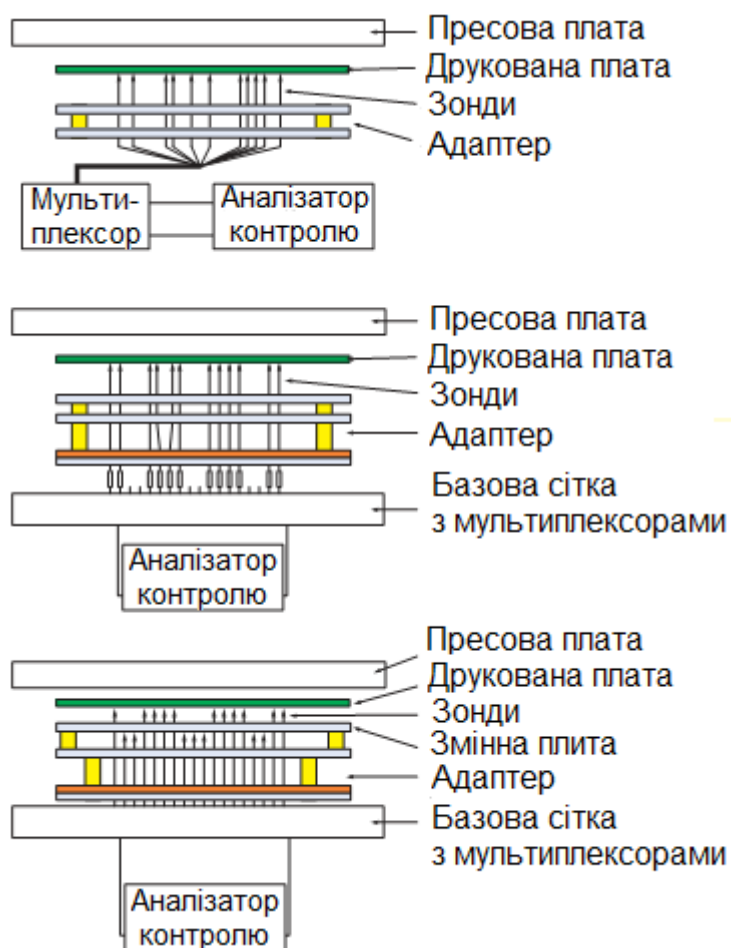


Рисунок 2 – Схеми контакту в матричних тестерах: а) система із стандартним адаптером; б) система з швидкозмінним адаптером; в) система з універсальним адаптером

З точки зору універсальності вузьке місце в подібних установках – сама частина адаптера. Найдешевшою (але і найменш універсальною) є така конструкція адаптера, в якій дроти йдуть безпосередньо від патронів зондів до вимірювальної частини (рис. 2, а). В цьому випадку перехід від перевірки однієї плати до іншої – тривалий і трудомісткий процес. Дорожчим і універсальним є рішення, коли база частини адаптера має з'єднувач, через який до вимірювального модуля підключається змінний елемент (рис. 2, б). Така конструкція має найбільший попит у виробників з широкою номенклатурою і малою серійністю виробів. Обидва варіанти мають на увазі виготовлення адаптера для кожного типу друкованої плати, що перевіряється.

Проблема переналадки вирішується шляхом застосування стандартизованих адаптерів, в яких зонди розташовані з певним кроком (2,5 мм або 1,25 мм). Для конкретного виробу виготовляються шаблони з просвердленими отворами, через які проходять зонди до точок тестування (рис. 2, в). Проте застосування таких адаптерів ускладнене через два чинники: навіть при невеликому тиску на один зонд (50–80 гс) загальний тиск на адаптер може досягати декількох тонн. Тому дуже складно виготовити адаптери з кроком 1,25 мм. Другий чинник пов'язаний з поширенням плат з планарними контактними площадками високої щільності – в цьому випадку крок часто не дорівнює стандартному і застосування таких адаптерів стає ускладненим. Для подібних плат застосовують додаткові перехідні адаптери (з одного кроку на іншій), що виготовляються індивідуально під кожен виріб.

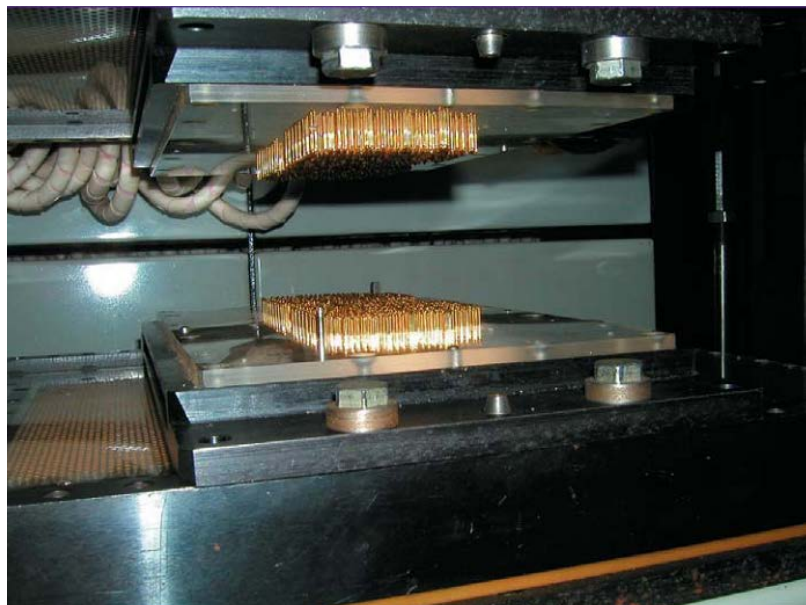


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд контактної пристрою матричного тестера

Матричні засоби електричного тестування містять контактні пристрої (контактор, адаптер), через які ланки плат, що тестуються, з'єднуються комутатором, керованим пристроєм формування адреси через пристрій узгодження (рис. 3). У комутаторі розміщується набір комірок, через які контакти з'єднуються з контрольно-вимірювальними приладами.

Програма, що вводиться в пристрій, задає послідовність контрольних операцій. Кожен цикл включає операції приєднання ряду вказаних в програмі точок до належних вимірювальних шин шляхом включення відповідних комутаційних комірок в комутаторі, виконання заданої операції контролю і наступного скидання реле, що не використовується в наступному циклі контролю. Алгоритмом контролю передбачається першочерговість контролю з'єднань – тоді можна упевнитися в приєднанні до контрольованих точок.

З точки зору швидкодії, габаритів і надійності найбільш відповідними для застосування в комутаторі являються транзисторні ключі. Швидкість комутації ланцюгів при використанні безконтактних напівпровідникових елементів складає декілька тисяч перемикачів в секунду. Як правило, стенди контролю мають апаратні засоби і тести для виявлення несправностей комутатора. Усі сучасні автоматичні засоби контролю друкованих плат забезпечені комп'ютером для управління комутатором і вимірювальними комірками, а також для роботи в режимі само програмування, коли програма контролю задається опитуванням з'єднань в платах, вибраних як еталонні.

Рухливі зонди. Засоби контролю з послідовним контактом (маніпулятори) позбавлені багатьох недоліків матричних тестерів. Вони дозволяють контролювати з великою точністю практично усі електричні параметри друкованих плат. Контакт в таких пристроях здійснюється парами зондів, об'єднаних з вимірювальними голівками, що переміщуються по полю плати. Зонди переміщуються своїми індивідуальними координатними системами з приводами, керованими програмними засобами. Число контрольованих точок та їх місце розташування практично не обмежені. Послідовність перевірки визначається програмою контролю, що враховує топологію зв'язків в друкованих платах.

Тестування зондами, що переміщуються, дало поширену назву їх апаратної реалізації – тестери з "щупами, що літають" (Flay Probes Testing System).

Відстань між точками контакту ці тестери можуть забезпечити аж до відстані зближення зондів – до 0,3 мм. Розміри друкованих плат обмежені згори полем переміщення зондів, знизу – елементами кріплення плат в полі рами тестера, на практиці ж вони можуть бути будь-якими. Тому системи тестування з щупами, що літають придатні для контролю багатошарових друкованих плат (БДП) розміром 610x914 мм, внутрішніх шарів МДП будь-якого класу щільності, керамічних модулів, керамічних МДП, гібридних плат. Похибка позиціонування контактних зондів – не гірше 0,05 мм. Конструкція зондів, виготовлених з берилієвої бронзи, забезпечує надійний електричний контакт з контрольними точками друкованих плат без

застосування пружин, що необхідні для контактних штирів пристроїв з'єднування засобів контролю з одночасним контактом.

Засоби контролю з "щупами, що літають" можуть здійснювати діагностику з'єднань та ізоляції, вимірювати будь-який опір ізоляції, опір кіл, індуктивність, ємність і т. д.

Сучасні установки такого типу мають декілька головок зонду з приводами по осях X, Y, Z, на кожній з яких встановлена головка тестування. Головки по черзі, за заздалегідь розробленою програмою, здійснюють контакт з платою. Під час контакту відбувається подача та вимірювання сигналу. Для контролю цим методом не вимагається додаткових адаптерів, а для переходу від однієї плати до іншої досить лише змінити програму тестування. Відсутність необхідності виготовлення матричних контактних пристроїв, а також розробка програми переміщення зондів методом трансляції з систем CAD/CAM значно скорочують час підготовки тестової програми і переходу від однієї плати до іншої. В той же час цей метод не забезпечує високої продуктивності тестування.

Для збільшення продуктивності тестерів з "щупами, що літають" застосовують ємнісний метод опитування тестових кіл. Для цього спочатку з партії однотипних плат відбирають і тестують еталонну плату, вимірюють і фіксують в пам'яті тестера електричні ємності кожного кола та встановлюють допустимий діапазон відхилень ємності кіл. При тестуванні плат цієї партії зонди контактують тільки з однією точкою кожного з кола для виміру їх ємності. При відхиленні ємності кола тестування за межі встановленого допуску тестер перевіряє це коло та сусідні в нормальному режимі тестування. Оскільки "зонди, що літають" торкаються кожного кола тільки в одній точці та вимірюють тільки один параметр (ємність кола), продуктивність тестерів з "літаючими щупами" зростає пропорційно кількості щупів, якими озброєний тестер.

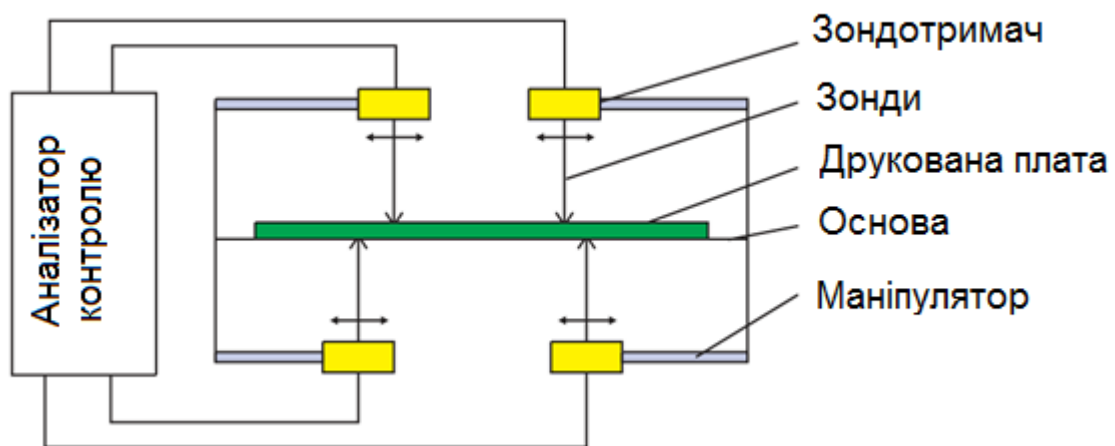


Рисунок 4 – Схема методу тестування друкованих плат "щупами, що літають"



"Матриці, що літають". Метод відносно новий. При його розробці передбачалося вирішити основні проблеми існуючих систем тестування : складність переналадки (системи з адаптером) і низька продуктивність (системи з рухливими зондами). При цьому методі на кожній каретці розміщується матриця щупів, кожен щуп якої може незалежно переміщатися по осі Z. Кожна матриця складається із зондів, розташованих з певним кроком (2,5 мм). Як правило, тестові установки мають чотири матриці, по дві на кожну сторону, між якими розташовується тестована ДП (рис. 5). Завдяки цьому можливе проведення 100%-го контролю для будь-якого варіанту розміщення контактних площадок, що тестуються (на верхній стороні, на нижній стороні, на різних сторонах ДП). Матриці переміщуються на короткі відстані по осях X і Y з високою швидкістю, при цьому найбільш близько розташований до точки тестування зонд активізується і виробляє подачу сигналу або вимірювання. Середня відстань переміщення дуже мала (близько 1 мм), що дає величезну перевагу в швидкості тестування.

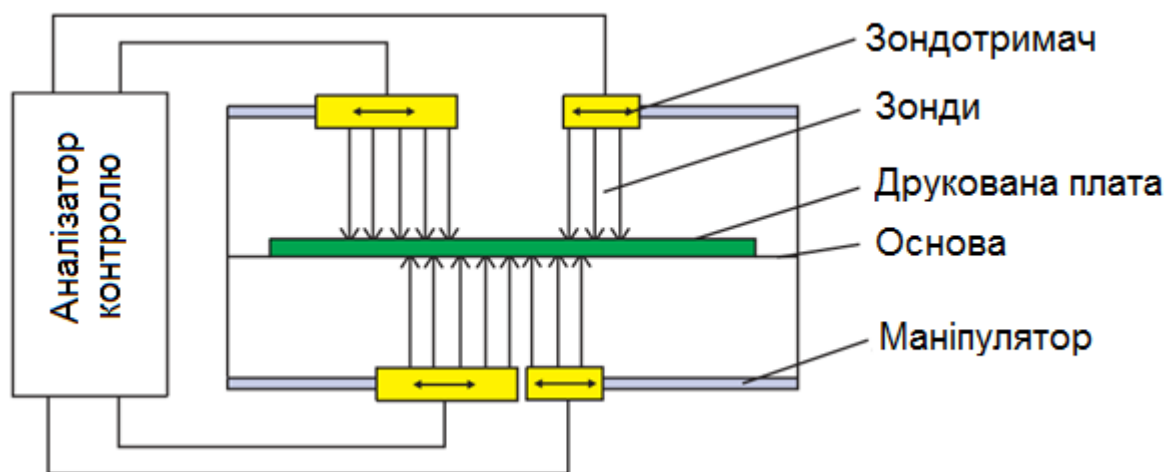


Рисунок 5 – Схема тестування "матрицями, що літають"

Для реалізації методу вистачає двох великих матриць і двох маленьких. Наприклад, в установці New System S24 кожна велика матриця має 285 зондів (19 стовпців, 15 рядів), а кожна маленька – 75 зондів (рис. 5). Таким чином, сумарне число зондів для кожної сторони – 360, а загальне – 720. Число зондів можна збільшити за рахунок зменшення відстані між ними, і, отже, створити більш швидкодіючі системи тестування. Це важлива відмінність від установок з рухливими зондами, де збільшення числа зондів ускладнене, оскільки для кожного щупа необхідно додати приводи по двох осях. Іншими словами, додавання нових зондів в матрицю не підвищує складність механізму.

Один з основних показників систем тестування друкованих плат – мінімальний крок, з яким система може тестувати. Для його забезпечення крайній ряд зондів розташовується на невеликій відстані від межі матриці, що дозволяє тестувати ланцюги з близько розташованими контактними площадками. В цьому випадку матриці сходяться близько один до одного.

Важливою якістю систем з "матрицями, що літають" є можливість одночасного тестування декількох ланцюгів на платі (для нескладних ДП). В цьому випадку тестування виконується паралельно з використанням двох вимірювальних систем. Усе це призводить до швидкодії до 70 тест/с, що в 10 разів перевищує аналогічні характеристики систем з рухливими щупами. А застосування автоматичних завантажувачів дозволяє використовувати установки цього типу у три зміни, забезпечуючи необхідну продуктивність і окупність.

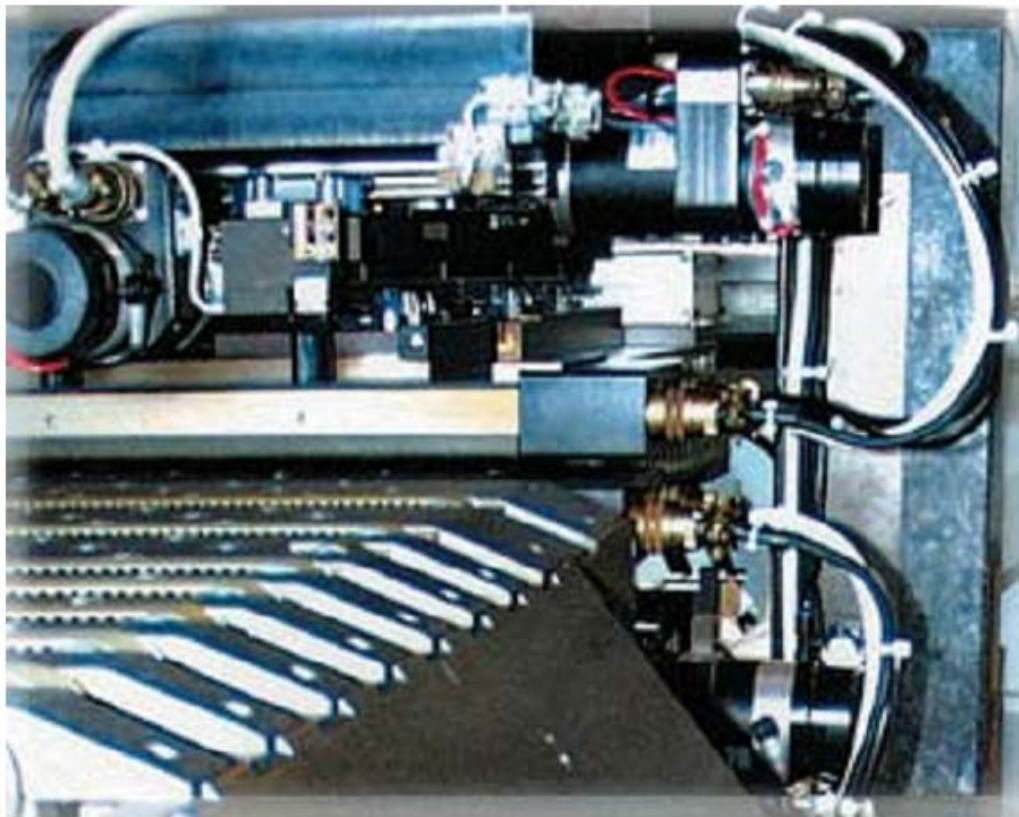


Рисунок 6 – Матриця зондів в установці New System S24



## 2 Математичні моделі з'єднань в друкованих платах

Об'єктами діагностування є друковані вузли радіоелектронної апаратури. Друкований вузол являє собою друковану плату (ДП) із змонтованими на ній електрорадіоелементами. При внутрісхемного діагностуванні друкованих плат розрізняють два види елементів, що діагностуються: параметричні елементи та елементи зв'язку. До елементів зв'язку відносяться з'єднання між точками підключення радіоелементів. Фізичними аналогами з'єднань є друковані провідники.

Усі виводи, що з'єднані одним провідником, є еквіпотенціальні. У кожному провіднику може бути виділено по одній точці, що називається вузловою. Решта точок провідника вважаються кінцевими. Ефективність підготовки та організації процесу діагностування залежить від способів опису ДП. Вихідна інформація міститься в принципових електричних схемах. Однак такі схеми не можуть безпосередньо сприйматися персональним комп'ютером.

Для автоматизації підготовки діагностичних процедур потрібно формалізувати опис об'єкта контролю і діагностування. Порядок функціонування ДП, що діагностуються, залежить не тільки від характеристик елементів, що входять до неї, але і від способів їх взаємного з'єднання, тобто від елементів зв'язку.

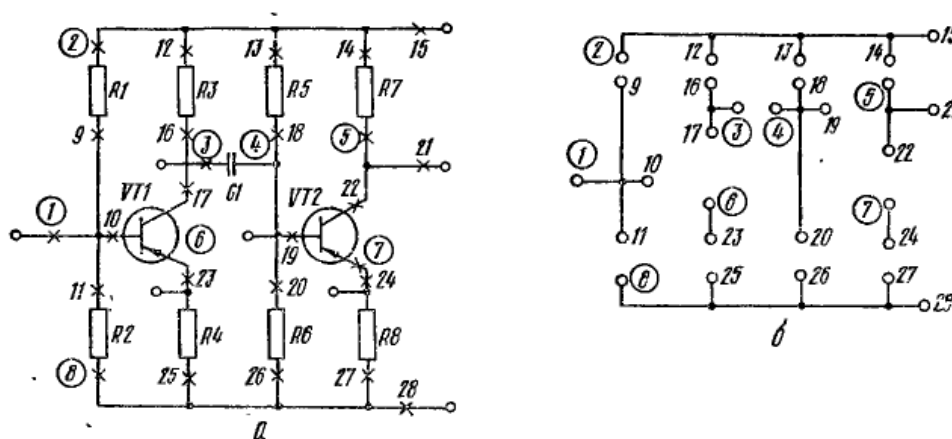


Рисунок 7 – Аналоговий вузол: а) схема електрична принципова вузла; б) елементи зв'язку

На рис. 1, а зображена принципова схема аналогового друкованого вузла, на якій відзначені точки підключення радіоелементів. На рис. 7, б окремо показані елементи зв'язку в схемі. Всього є 8 провідників (наприклад, провідник, що з'єднує точки 1, 9, 10, 11). У кожному провіднику виділяється по одній вузловій точці (номери вузлових точок, обведені колами).

Провіднику присвоювати номер відповідної йому вузлової точки. У деяких системах точки нумеруються так: вузлові точки – в порядку зростання чисел натурального ряду (рис. 7, а), потім у порядку зростання – кінцеві точки кожного з провідників.

Послідовність вибору чергового провідника збігається з послідовністю нумерації вузлових точок, а номер першої кінцевої точки на одиницю більше числа вузлових точок. Так, для схеми, зображеної на рис. 7, б перша кінцева точка має номер 9 (всього 8 вузлових точок), інші кінцеві точки перших провідників нумеруються в зростаючому порядку (10, 11). Кінцеві точки другого провідника мають такі номери: 12, 13, 14, 15. Кінцеві точки інших провідників нумеруються аналогічно.

Всі кінцеві точки, що пов'язані з провідником, електрично зв'язані з відповідною вузловою точкою і між собою. Отже, в провіднику завжди є хоча б один шлях між будь-якими двома точками. Іноді між двома точками є кілька різних шляхів. У цьому випадку обрив одного з них не призводить до порушення електричного зв'язку між точками.

При контролі і діагностуванні дефектів топології з'єднань в друкованих платах перевіряється наявність саме електричних зв'язків, тому обрив одного з декількох шляхів між двома точками звичайними способами перевірки виявити не вдається. З метою формалізації алгоритмів контролю та діагностування використовуються різні види математичних моделей з'єднань в друкованих платах. Більшість з них ґрунтується на встановленні електричних зв'язків між точками і не враховує форму реальних фізичних шляхів.

		Вузлові точки								Кінцеві точки							
		1 2 7 9 10 11 12 13 14 15 24															
1	1	1				1	1	1									
2	1	1							1	1	1	1					
7	1		1													1	
9	1				1	1	1										
10	1				1	1	1										
11	1				1	1	1										
12	1							1	1	1	1						
13	1							1	1	1	1						
14	1							1	1	1	1						
15	1							1	1	1	1						
24	1		1													1	

B	C
$C^T$	D

а)

		9 10 11 12 13 14 15 24							
1	1	1	1	1					
2	1				1	1	1	1	
7	1								1

E =	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 2px;">1</td><td style="padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;">6</td><td style="padding: 2px;">7</td><td style="padding: 2px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">9</td><td style="padding: 2px;">12</td><td style="padding: 2px;">16</td><td style="padding: 2px;">18</td><td style="padding: 2px;">21</td><td style="padding: 2px;">23</td><td style="padding: 2px;">24</td><td style="padding: 2px;">25</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">11</td><td style="padding: 2px;">15</td><td style="padding: 2px;">17</td><td style="padding: 2px;">20</td><td style="padding: 2px;">22</td><td style="padding: 2px;">23</td><td style="padding: 2px;">24</td><td style="padding: 2px;">28</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	18	21	23	24	25	11	15	17	20	22	23	24	28
1	2	3	4	5	6	7	8																		
9	12	16	18	21	23	24	25																		
11	15	17	20	22	23	24	28																		

б)

в)

Рисунок 8 – Матриця електричних з'єднань: а) матриця суміжності; б) укорочена матриця суміжності; в) матриця з'єднань

Проілюструємо формування матриці  $A$  для електричного кола, складеної, наприклад, з трьох провідників 1, 2, 7 (рис.7, б). Нумерацію клітин матриці виконаємо так: спочатку в порядку зростання проставляються номери всіх вузлових точок, а потім у тому ж порядку – номери всіх кінцевих точок провідників. Відповідна матриця суміжності наведена на рис. 8, а. Матриця  $A$  складається з чотирьох блокових матриць, які мають такі властивості:  $B$  – завжди одинична діагональна матриця;  $C^T$  – транспонована матриця  $C$ ;  $D$  – квазидіагональна матриця, що складається "з окремих під блоків, розташованих на головній діагоналі.

Елементи матриці  $D$  не є взаємозалежними. Їх значення цілком визначаються значеннями матриці  $C$  (якщо точки 9,10, 11 з'єднані з вузловою точкою 1, то всі вони електрично з'єднані між собою).

Отже, матриця  $A$  є надлишковою, і для повного опису з'єднань достатньо інформації, що міститься в матриці  $C$ . Назвемо матрицю  $C$  укороченою матрицею суміжності (рис. 8, б). Номери рядків матриці суміжності  $C$  відповідають вузловим точкам, а номери стовбців – кінцевим точкам. Наявність елемента  $b_{ij} = 1$  вказує про належність точки  $j$  до провідника  $i$ ,  $b_{ij} = 0$  вказує про зворотне.

Матриця  $C$  набагато компактніше повної матриці  $A$  та при реалізації алгоритмів діагностування вимагає для розміщення в персональний комп'ютер меншого обсягу пам'яті. Прийнятий спосіб нумерації вузлових і кінцевих точок забезпечує подальше скорочення матричного опису з'єднань друкованої плати. Зауважимо, що номери кінцевих точок кожного провідника зростають в послідовності натурального ряду чисел.

Це дозволяє представити матрицю з'єднань  $E$  для всієї схеми рис. 8, б у вигляді, зображеному на рис. 8, в. Кожен стовпець матриці  $E$  відповідає провіднику, а номери, зазначені в клітинах, означають молодший і старший по порядку номера кінцевих вершин, що відносяться до даного провідника. Зокрема, для провідника із номером 7 є всього лише одна кінцева точка 24. Тому число 24 повторюється двічі.

Матриця  $E$  легко представляється в персональному комп'ютері у вигляді двовимірного масиву, дуже компактно описує схему з'єднань розглянутої друкованої плати.