

## Конструктивні та електричні характеристики БДП

### Вступ

Сучасна РЕА та особливо апаратура цифрової ОТ характеризується значним **збільшенням функції змісту** та використання сучасної елементної бази. Це обумовлено збільшенням вимог до щільності монтажу нових елементів та ІС. Природно вирішенням цієї проблеми є використання технології БДП для створення систем міжз'єднань. При цьому характеристики БДП впливають не тільки на технологічність конструкції, але й на конструктивні та електричні характеристики виробів в цілому.

Швидкодія ІС (*що постійно збільшується*) та пов'язані з нею проблеми спотворення сигналу в швидкодіючих ЕОА, потребують врахування при конструюванні апаратури конструктивних та електричних характеристик друкованих провідників в системі багатошарового друкованого монтажу.

При цьому повинні враховуватися не тільки геометричні параметри (такі як *ширина та  $I_{пр}$ , відстань між ними, відстань між провідником та КМ, розміри КМ та ПО, товщина друкованих шарів*), а й електричні характеристики, які тісно пов'язані з геометричними параметрами провідників: *омічний опір, поверхнева та міжшарова ємність,  $L_{друк.провід.}$  та їх хвильовий опір*.

Останній параметер (*хвильовий опір*) особливо важливий при побудові ЕОА на надшвидкісній елементній базі.

Тісний взаєзв'язок геометричних та електричних характеристик пред'являє особливі вимоги до ретельного та якісного виконання друкованих провідників, тобто по суті вимагає використання високоякісних фотооригіналів та фотошаблонів з достатньо жорсткими допусками на геометричні та світлотехнічні параметри. Тільки машинні методи дозволяють виготовити фотооригінали та фотошаблони та отримати друковані провідники з контролюємим імпедансом та електричними характеристиками.

## Основні методи отримання БДП

### Основні принципи та переваги БДП

Збільшення складу, безперервне ускладнення ЕОА (особливо в літальних апаратах), при одночасній вимозі *зменшення їх габаритів та маси*, зменшенню споживаної потужності та високої надійності ці вимоги забезпечуються при використанні БДП.

БДП складається з декількох ізоляційних шарів, що мають друкований рисунок. Ці шари зклеєні між собою та мають електричні зв'язки між друкованими схемами.

На зовнішніх шарах розташовуються навісні компоненти, а загальна комутація виконується на зовнішніх та внутрішніх шарах. Використання БДП дозволяє розташувати значно більшу кількість елементів в тій же області, тому що всі з'єднання виконуються в деякому об'ємі.

Багатошаровий друкований монтаж має наступні переваги:

1. БДП суттєво збільшує щільність монтажу шляхом додавання шарів
2. Розміщення екранувальних (або "земляних") шарів безпосередньо в БДП. Шар міді може бути розташованим між будь-якими внутрішніми та на зовнішніх поверхнях. При цьому частина схеми екранується від зовнішніх та внутрішніх впливів. "Земляні" шари можуть бути з'єднані з конструктивними деталями блоку, тим самим покршуючи тепловідвід.

3. Наявність “земляного” шару та можливість досить точно управляти товщиною діелектрику, постійність ширини провідників дозволяють виготовляти виготовляти провідники з постійним опором, тобто полоскові та мікрополоскові лінії таких БДП необхідні для апаратури, що працює в діапазоні в/ч та головним чином для ЕОМ 4-го та 5-го покоління.
4. БДП дозволяє в повному об’ємі використовувати переваги ІС (мала вага та габарити) та забезпечується можливість міжз’єднань з міжцентровою відстанню 1.25; 0.625 мм.
5. Застосування БД монтажу дозволяє значно скоротити довжину з’єднань, що має велике значення на в/ч.
6. БД монтаж може бути захищеним від механічних пошкоджень та зовнішніх впливів шляхом приклеювання додаткового шару діелектрика.

В цілому така трьохмірна, просторова конструкція має значні переваги тому що підвищує надійність монтажу, зменшує займаний монтажний простір, збільшує щільність монтажу.

## Класифікація методів міжшарових з’єднань в БДП

В залежності від досягнутого рівня технології, призначення та умов експлуатації ЕОА використовуються декілька різних методів міжшарових з’єднань в БДП. Найбільш використовуються наступні методи:

- відкритих КМ
- попарного пресування
- шарового нарощування
- металізації наскрізних отворів

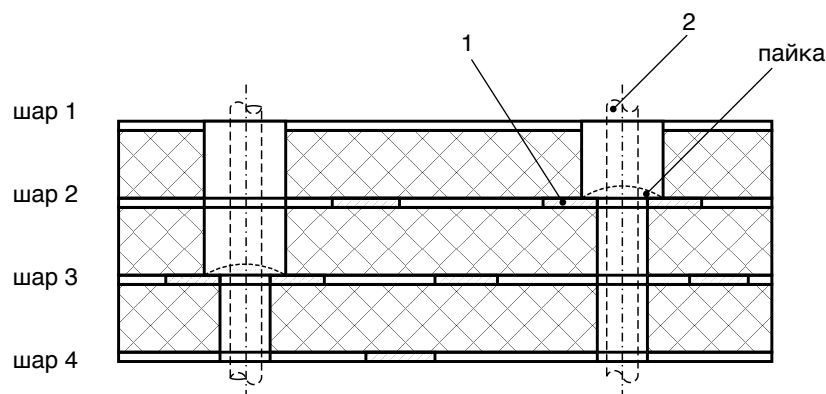
### Метод відкритих КМ

БДП з *відкритими КМ* являє собою набір ОДП, наклеєних одне на одну. При цьому діаметр отворів в платах на КМ повинен бути дещо меншим діаметру майданчиків таким чином, щоб КМ на внутрішньому шарі були доступні для пайки.

Діаметр відкритих КМ повинен перевищувати діаметр отворів не менше ніж **400-600 мкм**. Це надає можливість багаторазовій перепайці виводів навісних елементів.

Даний метод забезпечує з’єднання шарів між собою за допомогою провідних перемичок без використання елементів друкованих схем.

Метод є одним з перших метод міжшарових з’єднань.



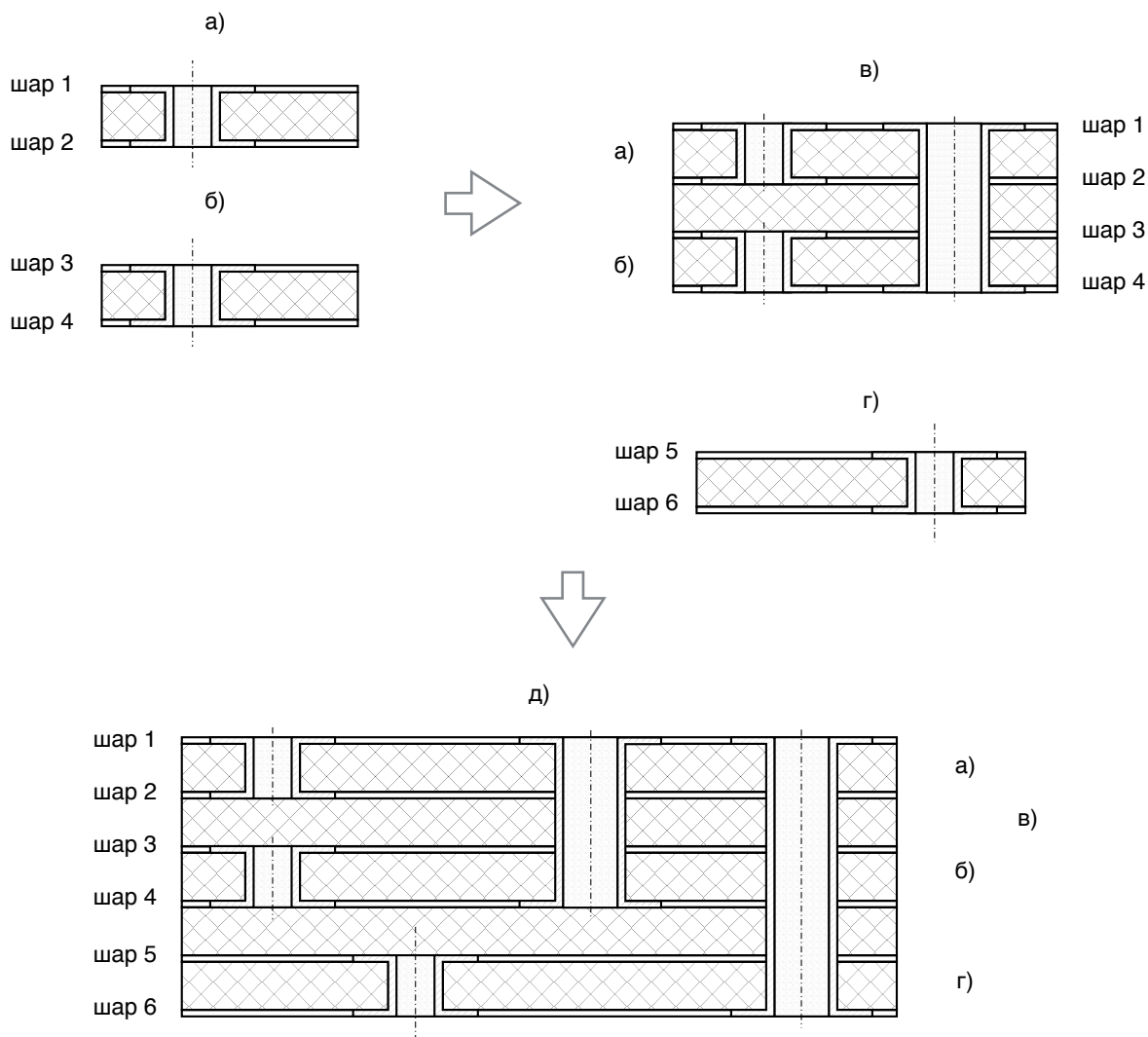
4-х шарова ДП, що виконана методом відкритих КМ.  
1 - відкрита КМ; 2 - вивід елементу.

## Метод попарного пресування

Для виконання БДМ методом попарного пресування використовують добре засвоєну технологію ДДП зі наскрізними металізованими отворами.

Суть методу полягає в отриманні спочатку ДДП (з рисунком схеми на внутрішній стороні), в яких свердлюють наскрізь отвори та металізують їх; далі дві ДДП склеюють між собою схемами всередину. Отримана структура в подальшому розглядається як звичайна ДДП, в якій виготовляють зовнішні шари, свердлюють а потім металізують отвори, що з'єднують перший та четвертий шари, не чіпаючи другого та третього шарів.

### Схема виготовлення 6-ти шарової ДП



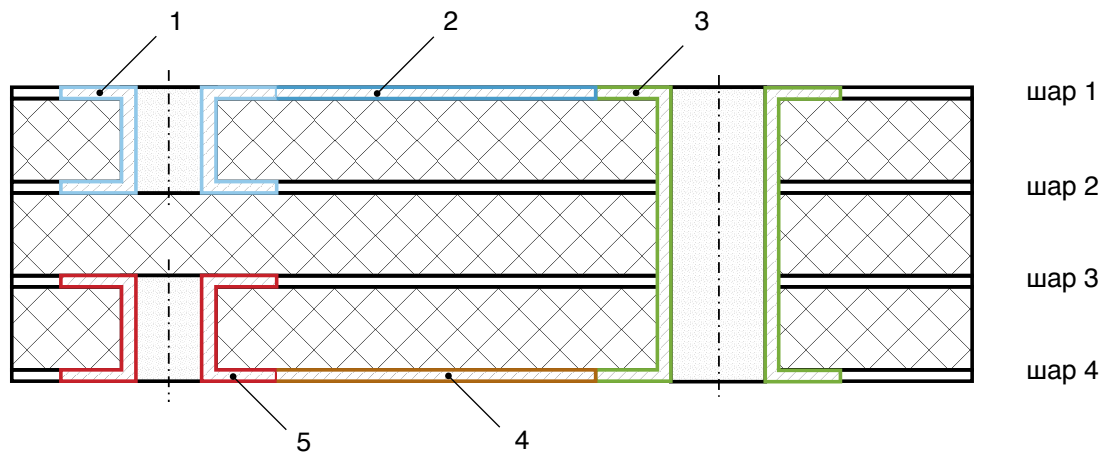
До такої структури можна підклеїти ще одну ДДП - отримаємо 6-ти шарову структуру. Ця структура знову розглядається як ДДП, в якій свердлюють та металізують отвори, що з'єднують між собою 1-й та 6-й шари, не торкаючи 2, 3, 4, 5 шари.

*Недоліком* такої БДП є те, що безпосередньо з'єднується тільки суміжний шар на ДДП.

Для того, щоб з'єднати наприклад 2-й та 3-й (сусідні) шари в БДП такого типу, необхідно:

1. з'єднати другий шар з першим
2. провідник по першому шару
3. отвір з першого шару на четвертий
4. провідник по четвертому
5. накінець, отвір з четвертого шару на третій.

### Схема з'єднання 2-го та 3-го шарів в 4-х шаровій ДП, метод попарного пресування



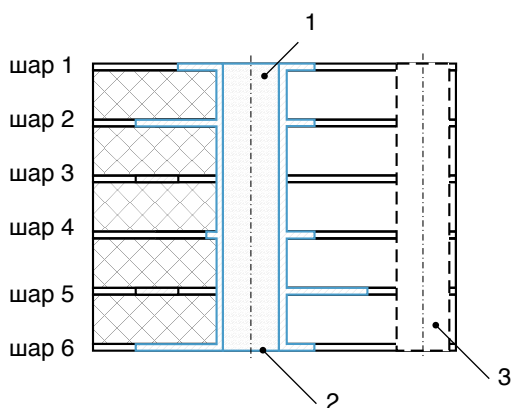
- 1 - з'єднання 1-го та 2-го шарів
- 2 - провідник по першому шару
- 3 - з'єднання 1-го та 4-го шарів
- 4 - провідник по четвертому шару
- 5 - з'єднання 4-го та 3-го шарів

Таким чином, певна простота технологічного процесу досягається в даному випадку за рахунок ускладнення схеми з'єднань та поганого використання поверхні плати, на які встановлюються КЕ.

Суттєвим недоліком методу є велика кількість зайвих по сутності з'єднань, що обумовлені специфікою технології. Даний метод був розроблений при використанні мікромодулів та гібридних ІС.

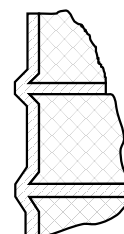
### Метод металізації наскрізних отворів

Сутність цього методу полягає в тому, що необхідну кількість шарів, на котрих тим чи іншим способом виконана друкована схема, склеюють між собою, після чого в отриманій БДП свердлюють наскрізь та металізують отвори. При цьому ті шари, які повинні бути з'єднані між собою, мають КМ, торцеві частини яких з'єднуються з металізованими отворами.



- 1 - наскрізний металізований отвір
- 2 - з'єднання 2-го, 4-го та 6-го шарів
- 3 - з'єднання інших шарів

Наскрізний отвір з підтравленим діелектриком



6-ти шарова ДП, що виконана методом металізації наскрізних отворів

Оскільки надійність міжшарових з'єднань в значній мірі визначається якістю з'єднання стінки металізованого отвору з торцювою частиною КМ, використовують підтравлювання діелектрику внутрішніх шарів до металізації (*зворотнє травлення*).

При цьому чатина КМ оголюється (рис.) і при металізації отворів виходить більш якісне з'єднання стінки отвору з КМ даного шару. Процес *зворотнього травлення* широко використовується при промисловому виробництві БДП для підвищення їх надійності.

Одним з його недоліків є *необхідність* виведення отвору на поверхню плати даже в тому випадку, коли необхідно з'єднати тільки внутрішні шари.

Проте метод широко використовується, забезпечує високу щільність монтажу, надійне міжшарове з'єднання. Дозволяє використовувати наскрізні отвори для встановлення роз'ємних з'єднань, що зумовило широке використання ВІС з великою кількістю виводів, ДВ потребують багатовивідні роз'єми.

При цьому методі окремі шари склеюються між собою за допомогою листів недополімеризованого метріалу. Склеювання виконується при високій температурі та тиску. Щоб забезпечити точність суміщення, використовують спеціальні фіксуюче приладдя. Для великих плат накопичена помилка повинна бути  $\leq \pm 125$  мкм, для малих  $\pm 75$  мкм.

Недоліками БДП, що виготовлені методом металізації наскрізних отворів є:

1. Порушення провідного шару в наскрізних отворах після металізації
2. забруднення стінок отворів смолю в процесі свердлування, тобто перед металізацією.

При свердлуванні отворів в БДП виникає пом'якшення смоли та її наступне затвердіння на відкритих торцях внутрішніх провідних шарів, тобто створюється нерегулярна ізоляційна плівка між внутрішніми провідними шарами та шаром міді, гальванічно осадженою на стінки наскрізних отворів. Прсутність нерегулярної ізоляційної плівки призводить до порушення електричного ланцюга в наскрізному отворі, що визиває руйнування металізації стінок на наступних стадіях технологічного процесу.

Видалити останки пом'якшеної смоли можна шляхом промивання отворів після свердлування будь-яким активним хімреактивом. При цьому поряд з вимиванням смоли з отворів відбувається витравлювання на деяку глибину ізоляційного шару. Це призводить до оголення додаткової поверхні внутрішніх провідних шарів навколо наскрізних отворів.

Тому контакт металізації наскрізного отвору буде в даному випадку виконуватися не тільки с торця внутрішнього провідного шару, але й з відкритими (дякуючи травленню діелектрика) верхньої на нижньої частин внутрішнього провідного шару (див. рис).

## Конструктивні параметри БДП з наскрізними металізованими отворами

---

### Загальні зауваження

БДП з наскрізними МО отримали широке розповсюдження в якості конструктивної основи міжз'єднань різних вузлів та елементів схем -головним чином ІС.

Головним чином, основними матеріалами для виготовлення шарів плати сужить склоепоксидні діелектрики. В якості зв'язуючих використовуються недополімеризовані склоепоксидні матеріали, що дозволяють виконувати як діелектричну ізоляцію шарів, так і склеювання їх в монолітну структуру при відповідній технологічній обробці.

В якості струмопровідних покриттів найбільш часто використовують мідь, золото, нікель, олово-свинцеві сплави, При цьому мідь використовується безпосередньо для проведення струму, золото ,нікель, та прпої використовуютьсяяінколи в якості резистів при травленні міді.

Конструктивне виконання БДП, тобто розміщення та розмір друкованих провідників, ПО та шарів, визначається з однієї сторони досконалим рівнем технології, а з іншої сторони - видом компонентів що встановлюються (використовуються), корпусів ІС.

---

БДП з наскрізними металізованими отворами, що розташовані з кроком не менше 2.5мм.

Одним з суттєвих конструктивних параметрів БДП є співвідношення між товщиною ДП та мінімальним діаметром наскрізного металізованого отвору.

Як правило загальна товщина БДП не повинна перевищувати *потрійного* мінімального діаметру отвору після покриття. Це обмеження визначається вимогами процесу зворотнього травлення діелектрика та процесу гальванічного осадження міді.

Товщина провідника на внутрішніх шарах повинна бути не менше 62.5мкм, якщо не використовується процес зворотнього травлення. Така велика товщина диктується необхідністю отримати достатню площу контактної поверхні стику внутрішнього провідного шару з металізованими отворами.

Якщо використовується зворотнє травлення, то товщина внутрішнього провідного шару повинна бути не менше 25-35 мкм, тобто така ж, як і на зовнішніх шарах.

Ширина провідників визначається вимогами до величини струму та щільності розміщення. Вимоги до відстані між провідниками в БДП значно менш жорсткі, ніж у звичайних ДП, тому що області між шарами заповнені епоксидною смолою і провідники не підпадають під вплив атмосфери, який може неоднаково впливати на електричні характеристики.

Розташування отворів на БДП визначається прийнятим ККС (крок координатної сітки). Розкид розташування вісей отворів в межах загального розміру 15см не повинен перевищувати  $\pm 125\text{мкм}$ , для плат з розмірами  $> 15\text{см}$   $\pm 175\text{мкм}$ .

Мінімальний діаметр металізованого отвору визначається діаметром виводу і для того щоб забезпечити надійне паяне з'єднання. Діаметр МО повинен бути на 250мкм більше діаметру виводу елемента. По друге, діаметр отвору обмежується знизу технологією процесу металізації. Загальна товщина плати не повинна бути більшою за потрібний мінімальний діаметр наскрізного отвору. *Ця вимога обмежує або розмір отворів, або загальну товщину плати і тим самим число шарів в платі.*

В якості матеріалів для металізованих покриттів в БДП використовують мідь, нікель, золото або припої.

**Мідь** є основним матеріалом для металізації отворів товщиною біля 25мкм.

**Нікель** забезпечує додаткову структурну міцність та сприяє отриманню більш гладких бокових поверхонь. Мінімальна товщина нікельованих покриттів становить 5мкм.

Покриття поверхні провідників можна виконувати золотом чи олово-свинцевим припоєм. Мінімальна товщина покриття золотом 1.25мкм.

В схемі з високою щільністю монтажу дуже небажано використовувати зовнішні шари для розміщення рисунку схеми. Повністю герметичні БДП мають кращі електричні характеристики, тому що всі провідники знаходяться в середині суцільного матеріалу і тому володіють кращими характеристиками.

В багатьох випадках в БДП бажано мати тепловідводи. Вони можуть бути отримані гальванічним осадженням металу на поверхню плати або шари міді можуть бути наклеєні на поверхню плати.

Герметизована земляна площа в середині БДП є ефективним тепловідводом. БДП можуть мати одну або декілька внутрішніх земляних площин та, крім того, на одній або обох зовнішніх поверхнях плати можуть бути суцільні шари для екранування.

Земляні площини можуть бути ефективно використані в якості полоскових або мікрополоскових ліній передачі.

Внутрішні земляні площини повинні розташовуватися в платі рівномірно, щоб не виконувалася концентрація механічної напруги, що може визвати механічну деформацію.

---

БДП з наскрізними металізованими отворами, що розташовані з кроком менше 2.5мм.

Збільшення щільності упаковки елементів вимагає створення БДП з кроком розташування отворів 1.25мм.

Загальні конструктивні вимоги до таких БДП аналогічні вимогам до плат з кроком 2.5мм, однак із-за зменшення кроку змінилися вимоги до розмірів друкованих провідників, їх розташування відносно одне одного, відносно отворів. Точність суміщення шарів лежить в межах 87.5мм.

---

Вплив методів виготовлення на конструктивні параметри

В зв'язку з тим, що мідні провідники в БДП розподілені по різним шарам, проблема передачі тепла під час пайки для цих плат виявилася значно більш складною, ніж для звичайних ДДП. Тому повинні бути застосовані запобіжні заходи. *БДП повинні витримувати і пайку зануренням на протязі 10с при температурі припою  $\approx 280^{\circ}\text{C}$  і пайку хвилею.*

Для перепайки використовуються паяльники малої потужності. Є можливість робити до 10 циклів перепайки без розшарування або порушення міжз'єднань.

Багатовиводні елементи впаюються спеціальним паяльником, який нагріває всі виводи одночасно або відсмоктується розплавлений припой.

Для визначення розміру плати та числа модлів, які повинні бути розміщені на ній нема жорстких правил. Тому в кожному конкретному випадку необхідно приймати деяке компромісне рішення, вибираючи найбільш ефектну конструкцію БДП.

## Проектування БДП

БДП використовуються в першу чергу в складних швидкодійних ЕОА. Елементна база - ІС мають час затримки  $\approx 1\text{-}2\text{нс/каскад}$  при  $\tau_0 = 2 - 3\text{нс}$ . Тоді, при розповсюдженні сигналу зі швидкістю світла (30см/нс) міжз'єднання довжиною 50-100см вже не можна рахувати короткими. Час розповсюдження сигналу в міжз'єднаннях являється одного порядку або даже більше часу проходження сигналу через каскад ІС, тому такі міжз'єднання повинні вже розглядатися та проектуватися як "довгі лінії", тим паче, що за допомогою друкованого монтажу практично не вдається отримати швидкість розповсюдження сигналу, що б наближалася до швидкості світла.

Максимальна швидкість розповсюдження сигналу у звичайних БДП складає біля 15-20 см/нс. Це означає, що друковані провідники починають себе вести як "довгі лінії" вже при довжині 20-50см, а в деяких випадках 5-10см.

Щоб уникнути віддзеркалень, що спотворюють передаваний сигнал, такі друковані сигнальні провідники повинні бути спроектовані та виготовлені як однорідні довгі лінії, а ІС повинні мати відповідні характеристики, що сприяють погодженню сигналу на передавальних та приймаючих кінцях лінії.

Таким чином **першою задачею**, яку повинен вирішити багат шаровий монтаж, є задача створення міжз'єднань з контрольованим імпедансом, що володіють властивостями однорідних довгих ліній.

Але збільшення щільності монтажу призводить до зростання *перехресних* наведень на сусідні друковані сигнальні провідники, додатково спотворюючи передавані по провідникам сигнали. Таким чином **другою задачею**, що стоїть перед друкованим монтажем є задача створення міжз'єднань з контрольованими перехресними (завадами) наведеннями, рівень яких можна було б розрахувати при проектуванні, а головне витримати при проектуванні.

Найкращим чином вирішувати обидві задачі дозволяє застосування в якості друкованих міжз'єднань *мікрополоскових ліній*, що отримані чергуванням сигнальних друкованих вузлів з екранувальними суцільними шарами “землі” або напруги живлення, на-коротко з'єднаних з шаром “землі” по змінному струму.

Мікрополоскові лінії міжз'єднань утворюють сигнальні ланцюги з постійним  $Z_0$  та контрольованими перехресними наведеннями, величина яких залежить від матеріалу, що використовується для БДП, властивостей діелектрика, геометричних розмірів друкованих провідників та їх взаємного розташування, а також розташування цих провідників відносно екранувальних шарів.

Типові параметри мікрополоскових ліній наступні:

- $Z_0 = 50 - 100 \text{ Ом}$
- ширина ліній  $w = 0.2 - 0.3 \text{ мм}$
- товщина  $t = 0.004 - 0.08 \text{ мм}$
- відстань між лініями  $s = 0.2 - 0.8 \text{ мм}$
- відстань до екранувального шару  $h = 0.3 - 0.8 \text{ мм}$

При цьому важливо щоб параметри ліній повині вибиратися одночасно з вибором типу ІС.

---

## Особливості проектування рисунків друкованих шарів та виготовлення фотошаблонів БДП

В обчислювальній техніці широке розповсюдження отримав **4-х шаровий друкований монтаж**. При цьому зовнішні шари (1й та 4й) для сигнальних провідників, а два зовнішніх (2й та 3й) є екранувальними шарами та служать один для “земля” а інший для подачі напруги живлення.

При цьому виділяють *три рівня монтажу*:

- **на першому рівні** (в стійочних платах) ІС з'єднуються за допомогою багат шарового друкованого монтажу
- **на другому рівні** (в панелях змінні плати) панелі що вставляються з роз'єми панелі, з'єднуються між собою за допомогою багат шарового друкованого монтажу та монтажу мікронакруткою
- **на третьому рівні** (в шафах або стійках) панелі з'єднуються між собою за допомогою кабельних роз'ємів



Враховуючи те, що більшість ІС в ДВ використовують один рівень напруги, вона може бути легко підведена до всіх ІС, використовуючи відповідний внутрішній екранувальний шар. Відповідно два зовнішні шари дозволяють з'єднати практично всі ІС в змінних платах та виконати за допомогою друкованого монтажу  $\approx 80\%$  з'єднань в панелі. Решту з'єднань виконують кручиним двожильним проводом або трьохжильним з контрольованим  $Z_0$  та преєхресними наведеннями.

При 4х шаровому друкованому монтажу мікрополоскові лінії знаходяться на поверхні плати. Це дозволяє їх легко контролювати, а в деяких випадках їх виправляти.

---

## Вибір методу проектування БДП та панелей.

Необхідно врахувати, що в змінних БДП якість прокладення сигнальних провідників має першочергове значення, тому що від цього залежить кількість розміщених елементів. Також змінні плати як правило виконують прості функції і тому вони рідко перепроєктуються.

В багатошарових друкованих панелях навпаки -, якість прокладення сигнальних провідників не має настільки великого значення, тому що не впливає на число змінних плат, що вставляються в роз'єми панелі, а визначається тільки кількість додаткових навісних сигнальних провідників. З іншої сторони, логічні функції, достатньо складні тому що в панелі міститься біля 100 змінних плат, тобто до 3000 ІС. Тому проектування міжз'єднань панелей значно складніше, сім проектування міжз'єднань змінних плат, і крім того, зміни в схемі панелей вносяться значно частіше.

# Електричні характеристики БДП

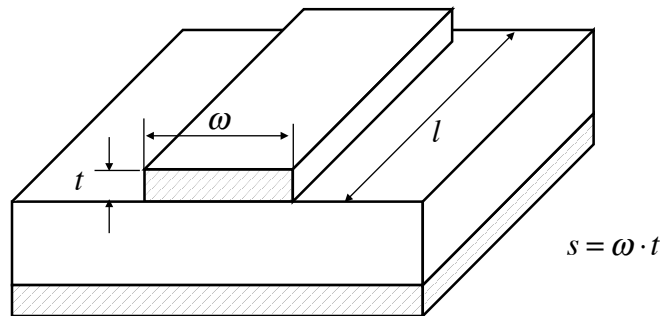
## Загальні зауваження

До електричних характеристик відносяться:

- омичний опір провідників
- струмонесуча здатність провідників
- допустима відстань між друкованими провідниками
- розподілена ємність між друкованими провідниками, що розташовані на різних шарах
- індуктивність друкованих провідників
- омичний пір наскрізних з'єднувальних отворів та інше

## Омичний опір та струмонесуча здатність друкованих провідників

Розміри плат збільшуються. Збільшення щільності монтажу призвело до збільшення довжини друкованих провідників при значному зменшенні їх ширини. В результаті збільшується загальний омичний опір з'єднань.



$$R = \rho \left( \frac{l}{s} \right) = \rho \left( \frac{l}{\omega t} \right)$$

$s$  - поперечний розріз

$l$  - довжина

$\omega$  - ширина

$t$  - товщина

$\rho$  - питомий опір

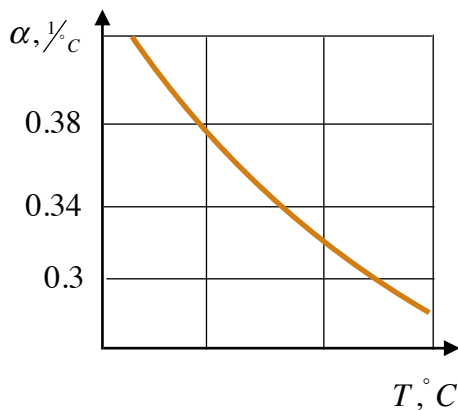
$\rho_{\text{міді}} = 17.3 \frac{\text{МОм} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , а для мідного провідники, якого отримали хімічним або

електрохімічним способом  $\rho = 50 \frac{\text{МОм} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

Для визначення  $R_{T_2}$ , якщо відомо  $R_{T_1}$ , використовують наступне співвідношення

$$R_{T_2} = R_{T_1} [1 + \alpha (T_2 - T_1)]$$

$\alpha$  - температурний коефіцієнт зміни опору при температурі  $T$ . Визначається за наступним графіком.



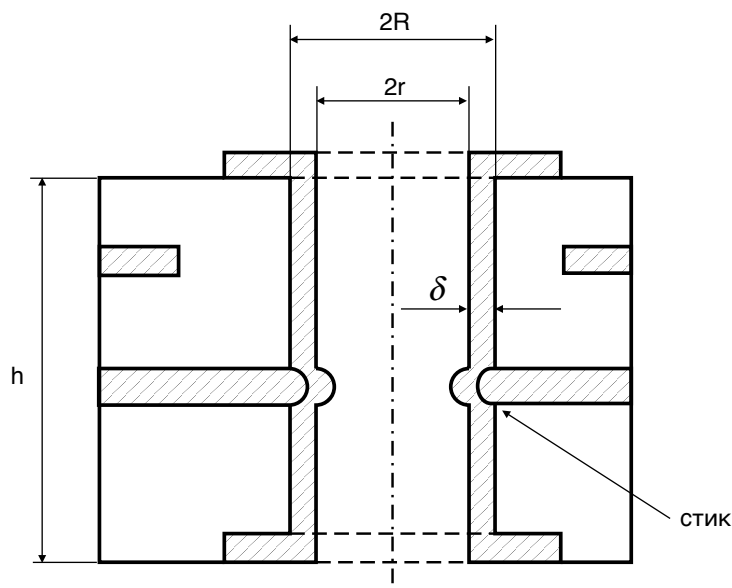
Залежність  $\alpha$  міді від температури

Провідник  $l = 70\text{см}$  ДП розміром  $30 \times 40\text{ см}$  складе біля  $4.2\text{Ом}$ , що при струмі біля  $100\text{мА}$  зумовить омичне падіння напруги біля  $0.42\text{В}$ , тобто порядку гарантованої завадостійкості сучасних ІС.

Оскільки для одного й того ж типу БДП товщина провідника залишається постійною, для оцінки омичного падіння напруги в друкованих провідниках зручно користуватися таким же узагальненим параметром, як прфнято користуватися для інтегральних дифузійних резисторів, тобто питомим опором квадрату поверхні провідника при відповідній його товщині, Ця величина позначається  $R_s$ .

$$\text{При } l = \omega \quad R_s = \frac{\rho}{t}, m\text{Ом}/\square$$

## Омичний опір наскрізних металевих отворів



**Металізований отвір** - основний елемент багатошарового монтажу. При проектуванні плат необхідно враховувати омичну провідність та обмежену струмонесучу здатність в металізованому отворі, а також неоднорідності, що обумовлені їхніми конструкціями та які впливають на на лінію передачі в/ч сигналу.

$$R_{наск} = \rho' \frac{h}{\pi} (R^2 - r^2) = \rho' \frac{h}{\pi} (2\pi R\delta - \delta^2), mOm$$

При товщині БДП 1.5мм опір металізованого покриття перехідного отвору буде

$$R_{наск} = 0.59 \times 1.5 = 0.89 mOm$$

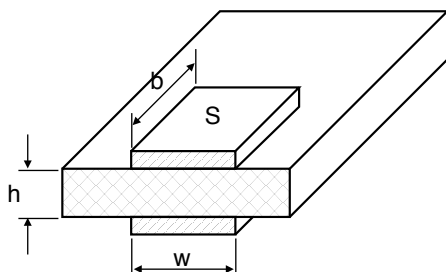
тобто омичний опір ПО має порядок одиниць міліом.

## Розподілена ємність та індуктивність друкованих провідників

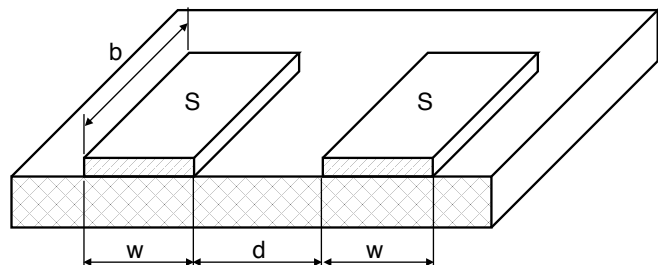
Збільшення щільності розміщення провідників в БДП, що призводить до збільшення (зростання) міжпровідникових паразитних ємностей, як для різних шарів, так і для одного шару. Оцінка величини цих ємностей має суттєве значення при проектуванні в/ч ланцюгів з  $\tau < 5$  нс.

При цьому по суті потрібно виконати не розрахунок конкретного значення ємності, а виконати оцінку порядку її величини, тому що при виготовленні ДП неминучі деякі варіації ширини провідників та зазору між ними впродовж довжини. Нестабільність вузьких провідників (ширина 250мкм) складає  $\pm 20\%$ , таким чином точність визначення величини ємності складає  $\approx 30\%$ , що є достатньою для розрахунків.

Розподілена ємність складається з двох складових: *міжшарової* та *поверхневої*.



Шари розташовані на суміжних шарах



Ємність між суміжними провідниками на одному шарі

**Міжшарова** ємність представляє собою результат електростатичної взаємодії між суміжними провідниками, розташованими на різних шарах по вертикалі.

**Поверхнева** ємність представляє собою результату електростатичної взаємодії між суміжними провідниками, що розташовані на одному й тому ж шарі.

Міжшарова ємність визначається

$$C_m = \frac{\epsilon S}{4\pi h} = \frac{\epsilon w b}{4\pi h}$$

формула справедлива для випадку  $w/h \gg 10$

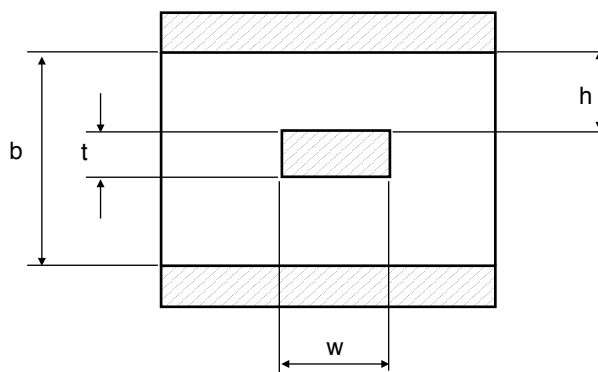
$$C_m \text{ на одиницю поверхні оцінюється формулою } C_{mp}' = \frac{\epsilon 10}{4\pi h}, pF/cm^2$$

$C_m$  на одиницю довжини провідника оцінюється за формулою  $C'_{md} = \frac{\epsilon 10w}{4\pi h}, \text{ pF/cm}$

Розрахунок поверхневої розподіленої ємності більш складний, тому що на відміну від міжшарової розподіленої ємності, коли електростатичне поле практично рівномірне (якщо знехтувати крайовим ефектом), в даному випадку електростатичне поле має *нерівномірний характер* - тому величину цієї ємності можна оцінювати тільки наближено. Накладається ряд обмежень при розрахунку.

Для рисунку: провідники нескінченної довжини, шириною  $w$ ,  $d$  - відстань між ними,  $h$  - товщина ДП,  $\epsilon$  - діелектрична проникність (для склотекстоліту).

Для полоскової лінії міжшарова погонна ємність відносно земляних площин визначається



$$C'_{ml} = 0.355\epsilon \frac{w/b}{1 - t/h^2}, \text{ pF/cm}$$

якщо  $\epsilon = 6$ , тоді

$$C'_{ml} = 2.12 \frac{w/b}{1 - t/h^2}, \text{ pF/cm}$$

Слід зауважити, що практично ємносний зв'язок між провідниками враховувати *дуже важко*, тому що кожен провідник з групи провідників, що розташовані в найближчому оточенні, буде мати деякий прекрасний зв'язок з іншими провідниками. Тому обчисленні величини ємностей можуть в деякій степені відрізнятися від реальних значень. Для того щоб мінімізувати міжпровідниковий ємносний зв'язок, бажано міняти напрямлення прокладання провідників на наступних одне за одним шарах.

**Розподілена індуктивність** друкованих провідників в БДП на в/ч надає все більшого впливу на параметри лінії передачі сигналу. **Індуктивність** провідників в загальному випадку визначається з *двох складових*:

- індуктивності всередині провідника
- індуктивності контуру, що йде від поверхні провідника до поверхні "зворотнього провідника", тобто проводу, по якому протікає струм, що замикає коло.

в ТОЕ приводиться наступний розрахунковий вираз для *власної індуктивності* усамітненого проводу:

$$L_{pr} = 0.2l \left[ 2.31 \lg \left( \frac{4l}{d} \right) - 0.75 \right], \mu H$$

усамітненого друкованого провідника

$$L_{pech.pr} = 0.2l \left\{ 2.31 \lg \left[ \frac{4l}{0.56w + 0.67t} \right] - 0.75 \right\}, \mu H$$

Друкованого провідника  $L_{0\text{ др.пр.}}$ , поблизу якого знаходиться зворотній провідник

$$L_{0\text{ др.пр.}} = 0.2 \cdot 10^{-2} \cdot l \cdot 2.3 \cdot \lg \left[ \frac{4h}{0.56w + 0.67t} \right], \mu H$$

$d$  - діаметр проводу

$l$  - довжина проводу, м

$w$  - ширина друкованого провідника

$t$  - товщина друкованого провідника

$h$  - висота розташування друкованого провідника над земляною площиною

## Динамічні параметри ліній передачі інформаційний сигналів в БДП

Для визначення придатності конфігурації ліній передачі для використання в конкретній апаратурі необхідно оцінити:

- характеристичний імпеданс (хвильовий опір) лінії передачі
- затримку розповсюдження сигналу
- омичне падіння напруги (н/ч послаблення сигналу в лінії)
- в/ч послаблення сигналу або еквівалентну смугу пропуску
- наведення між сусідніми лініями як групами провідників

найбільш важливим є  $Z_0$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

$R'$  - омичний опір на одиницю довжини

$L'$  - індуктивність на одиницю довжини

$G'$  - провідність на одиницю довжини

$C'$  - ємність на одиницю довжини

Для ліній без втрат

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Для полоскової лінії

$$Z_0 = \frac{G_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{4b}{d_0}$$

$d_0$  - ефективний діаметр круглого провідника, який може бути зв'язаний з розмірами друкованої полоскової лінії визначається  $d_0 = 0.56w + 0.67t$

Для мікрополоскової лінії  $Z_0 = \frac{n}{w} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r}} = \frac{n}{w} \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}}, \text{Om}$

Затримка розповсюдження сигналу визначається

$\tau = 3.33\sqrt{\epsilon_r}$  та залежить від ширини провідника