

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФІЗИКО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний
посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
"Інформаційно-обчислювальні засоби радіоелектронних систем" спеціальності
172 "Телекомунікації та радіотехніка"*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Фізико-теоретичні основи проєктування радіоелектронної апаратури. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» В. Г. Губар, І. О. Адаменко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 221 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 18.06.2020 р.) за поданням Вченої ради Факультету електроніки (протокол № 05/2020 від 25.05.2020 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ФІЗИКО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

Укладачі: *Губар Вячеслав Григорович, старший викладач
Адаменко Ірина Олександрівна*

Відповідальний

редактор *Кучернюк П.В., канд. техн. наук, доц.*

Рецензент: *Швець П.С., канд. техн. наук, начальник сектору ТОВ
"Радіонікс"*

Навчальний посібник містить матеріали, які використовуються як безпосередньо у теоретичному курсі, так і матеріали для самостійної роботи студентів. Посібник містить матеріали теоретичного та практичного значення пов'язані з класифікацією друкованих вузлів, ієрархічним методом конструювання, елементною базою, вибором типу друкованої плати та матеріалу, класу точності друкованого монтажу, розміщенням конструктивних елементів на друкованій платі, розрахунком елементів друкованого монтажу, надійністю конструкцій та методів її підвищення, технологією виробництва друкованих вузлів. В результаті вивчення матеріалу студенти повинні вміти розробляти друковані вузли: оптимально виконувати задачі компоновання, розміщення конструктивних елементів та трасування друкованих вузлів з урахуванням багатьох конструкторсько - технологічних обмежень, використовувати сучасні системи автоматизованого проєктування (САПР), оцінювати отримані результати у відповідності з множиною критеріїв оптимізації. Навчальний посібник призначений для студентів радіоелектронних та телекомунікаційних спеціальностей, інженерно-технічних спеціалістів та аспірантів.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

Зміст

1. СКЛАД ПРОЦЕСУ КОНСТРУЮВАННЯ	7
1.1. Місце етапу конструювання при розробці РЕА	8
1.2. Процес проектування РЕА	9
2. КЛАСИФІКАЦІЯ РЕА. ВПЛИВИ.....	14
2.1. Впливи	14
2.2. Класифікація РЕА по відношенню до впливів.....	15
3. РІВНІ КОНСТРУКТИВНИХ МОДУЛІВ РЕА	20
3.1. Структурні моделі конструкцій РЕА.....	20
4. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ.....	27
4.1. Вибір дискретних компонентів. Методи вибору серії ІС.....	27
4.2. Вибір по порівнювальним параметрам	28
4.3. Вибір ІС по узагальненим критеріям	29
4.4. Вибір ІС по матриці параметрів.....	31
Контрольні запитання	35
5. КОМПОНЕНТИ ТА КОРПУСИ.....	36
5.1. Компоненти та корпуси для поверхневого монтажу (ПМ).....	38
5.2. Безкорпусний монтаж (Chip On Board) КЕ на ДП	50
6. КОНСТРУЮВАННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ (ДП), ДРУКОВАНИХ ВУЗЛІВ (ДВ)	52
6.1. Техніка електричного монтажу	53
6.2. Технологія поверхневого монтажу (ТПМ)	56
6.3. Класифікація конструкцій ДП	59

6.4.	Товщина матеріалу основи.....	66
6.5.	Гнучкі друковані плати (ГДП).....	66
	Контрольні запитання	69
7.	ТОПОЛОГІЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ДП.....	70
7.1.	Габаритний критерій.....	71
7.2.	Критерій матеріалу основи.....	75
7.3.	Метал як основа ДП.....	81
7.4.	Критерій точності друкованого монтажу	83
7.5.	Критерій кількості шарів.....	86
7.6.	Рекомендації по конструюванню ДП.....	86
8.	КОНСТРУЮВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛУ	89
8.1.	Друкований роз'єм.....	93
8.2.	Навісний роз'єм.....	94
8.3.	Відсутній роз'єм на ДП	95
8.4.	Складання друкованих вузлів поверхневого монтажу (SMT).....	95
9.	РОЗМІЩЕННЯ КЕ.....	102
9.1.	Послідовні алгоритми розміщення.....	102
9.2.	Розташування по матриці зв'язку	104
	Контрольні запитання	109
10.	РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ДРУКОВАНОГО МОНТАЖУ	110
11.	НАДІЙНІСТЬ.....	122
11.1.	Основні поняття теорії надійності	124
11.2.	Експлуатаційні показники надійності елементів.....	128
11.3.	Розрахунок надійності.....	131

11.3.1.	Надійність елементів РЕА	131
11.3.2.	Надійність ІС	137
11.4.	Надійність систем з простою структурою.....	139
11.4.1.	Послідовно-паралельне ввімкнення	143
11.4.2.	Паралельно-послідовне з'єднання.....	144
11.5.	Показники надійності систем зі складною структурою.....	146
11.6.	Метод розкладення відносно особливого елемента.....	147
11.7.	Метод мінімальних шляхів та мінімальних перетинів.....	151
12.	ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РЕА	155
12.1.	Резервування	157
12.2.	Схемне резервування.....	161
12.3.	Компонентне резервування.....	163
	Контрольні запитання	168
13.	МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ДП	169
13.1.	Хімічний субтрактивний метод.....	173
13.1.1.	Хімічний позитивний метод.....	173
13.1.2.	Хімічний негативний метод	176
13.2.	Адитивні методи	177
13.2.1.	Хімічний адитивний метод.....	178
13.3.	Комбінований метод.....	181
13.3.1.	Комбінований негативний спосіб	181
13.3.2.	Комбінований позитивний спосіб	183
13.4.	Захисне покриття плати (паяльна маска) та фінішне покриття	186
13.5.	Друковані контакти	187

14.	КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БДП.....	192
14.1.	Основні методи отримання БДП.....	193
14.1.1.	Метод відкритих КМ.....	194
14.1.2.	Метод попарного пресування.....	195
14.1.3.	Метод металізації наскрізних отворів.....	197
14.2.	Конструктивні параметри БДП з наскрізними металізованими отворами.....	200
14.3.	Вплив методів виготовлення на конструктивні параметри.....	202
14.4.	Проектування БДП.....	203
14.5.	Особливості проектування рисунків друкованих шарів та виготовлення фотошаблонів БДП.....	206
14.6.	Вибір методу проектування БДП та панелей.....	207
14.7.	Електричні характеристики БДП.....	207
	Контрольні запитання.....	214
15.	СКЛАДНІСТЬ ТА ВАРТІСТЬ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ.....	216
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	219
	ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	221

1. СКЛАД ПРОЦЕСУ КОНСТРУЮВАННЯ

До поточного часу немає єдиної теорії конструювання, як наприклад ТОЕ та інше. Може бути, що це є добре. Але потрібно відмітити, що окремі етапи (розділи) конструювання розроблені детально.

Наприклад:

1. Задача компоновання - розбиття складної схеми на функціональні самостійні схеми;
2. Задача розміщення КЕ в монтажному просторі та інші задачі.

Тим не менш теорія конструювання розвивається, використовує сучасний математичний апарат, використовує сучасні інструменти (на той чи інший період) та пройшла довгий шлях свого розвитку та становлення.

Виділяють такі **основні етапи розвитку**:

- спроба використання поняття **негентропії** (поняття впорядкованості) в теорії конструювання. Теорія інформаційності на даний момент, як можна сказати, вичерпала себе як наука - і відповідно в конструюванні;
- **перетворювання енергії** низького рівня та широкого інформаційного спектру

$U_p=120\text{ В}; 15\text{В}; 12\text{В}; 5\text{В}; 1.5\text{В};$

- **формалізація конструкторської інформації** - конструкторської думки - повинно бути відображено в документації та “збережено на віка”. Участь в процесі великої кількості людей спонукало до великої кількості помилок, великий об’єм документації;
- надійність - основа конструювання.

60-ті характеризувалися бурхливим розвитком складних систем (атомні підводні човни, ракети, супутники), технологічних систем (автоматизовані технологічні процеси - АТП). Цей розвиток часто супроводжувався аваріями з людськими жертвами і т.д.

Розвиток складних систем потребував рішення **складних технічних та технологічних** задач надійності.

- у 80-ті в математиці бурхливо розвивається **теорія графів**. Конструювання вдало використало цю теорію. Виникло нове направлення в конструюванні - **автоматизація конструкторського проєктування**.

Конструкцію описують так:

$$K = \{X, V, C\} \quad (1.1)$$

де $\{X\}$ - множина конструктивних елементів (КЕ);

$\{V\}$ - множина зв'язків між КЕ;

$\{C\}$ - множина виводів КЕ та зовнішніх виводів.

В задачах конструювання елементами вирішення є компоненти, а рішення є комбінації цих компонентів, що створюють складні об'єкти, які задовольняють певним фізичним обмеженням, що витікають з властивостей матеріалів, параметрів компонентів або певних евристичних міркувань. *Наприклад, КЕ, що мають найбільше число зв'язків повинні розміщуватися поруч.*

На даний час вдало розвивається теорія штучного інтелекту, особливо в автоматизації конструювання - так звані **генетичні алгоритми**.

1.1. Місце етапу конструювання при розробці РЕА

Для розробки та створенню РЕА необхідно ряд передумов:

- необхідність, що виражається в постановці задачі;
- визначити можливість вирішення цієї задачі - **якість-вартість-надійність**;
- виявити підприємства для проєктування, конструювання, виробництва (наприклад, розробка в Києві, а виробництво в Дніпропетровську);
- визначення технологічної реалізованості;
- визначення економічної ефективності.

Виділяють наступні **етапи конструювання**:

1. Системно-технологічне проєктування
2. Схемотехнічне проєктування
3. Технічне проєктування
4. Технологічне проєктування

Для того, щоб задовольнити потреби, необхідно розроблене запуснути у виробництво та навчити користувача правильно експлуатувати вже створене.

1.2. Процес проєктування РЕА

Розглянемо процес проєктування РЕА детально згідно Рисунок 1.1 ТЗ (Технічне Завдання) визначає технічні вимоги до РЕА, містить множину параметрів (основних) та суттєву частину множини впливів: температура, вологість, механічні впливи та інше.

Принципова схема визначає логіку перетворення сигналу, тобто схемою задається деяка частина множини елементів та найбільш суттєва частина множини функціональних зв'язків.

Таким чином, ТЗ та СЕП (схема електрична принципова), що описана матрицею зв'язків, - являються для конструктора основою для розробки РЕА. *При цьому, параметри, що були закладені на етапі схемного проєктування будуть збережені на наступних етапах.*

Проєктування сучасної РЕА - складний процес, в якому взаємно пов'язані принцип дії РЕА, схеми та конструкція апаратури, технологія її виробництва та вона повинна задовольняти усім вимогам ТЗ.

Основна вимога при проєктуванні РЕА - створювати пристрої більш ефективні в порівнянні зі своїми аналогами, тобто перемагати по якості, функціонуванню, по масо-габаритним параметрам та техніко-економічній доцільності, а методи конструювання повинні забезпечувати функціонування РЕА з необхідною точністю та надійністю при наявності впливів зі сторони об'єкта, навколишнього середовища, оператора.

Таким чином, ми реалізували у виробі визначення.

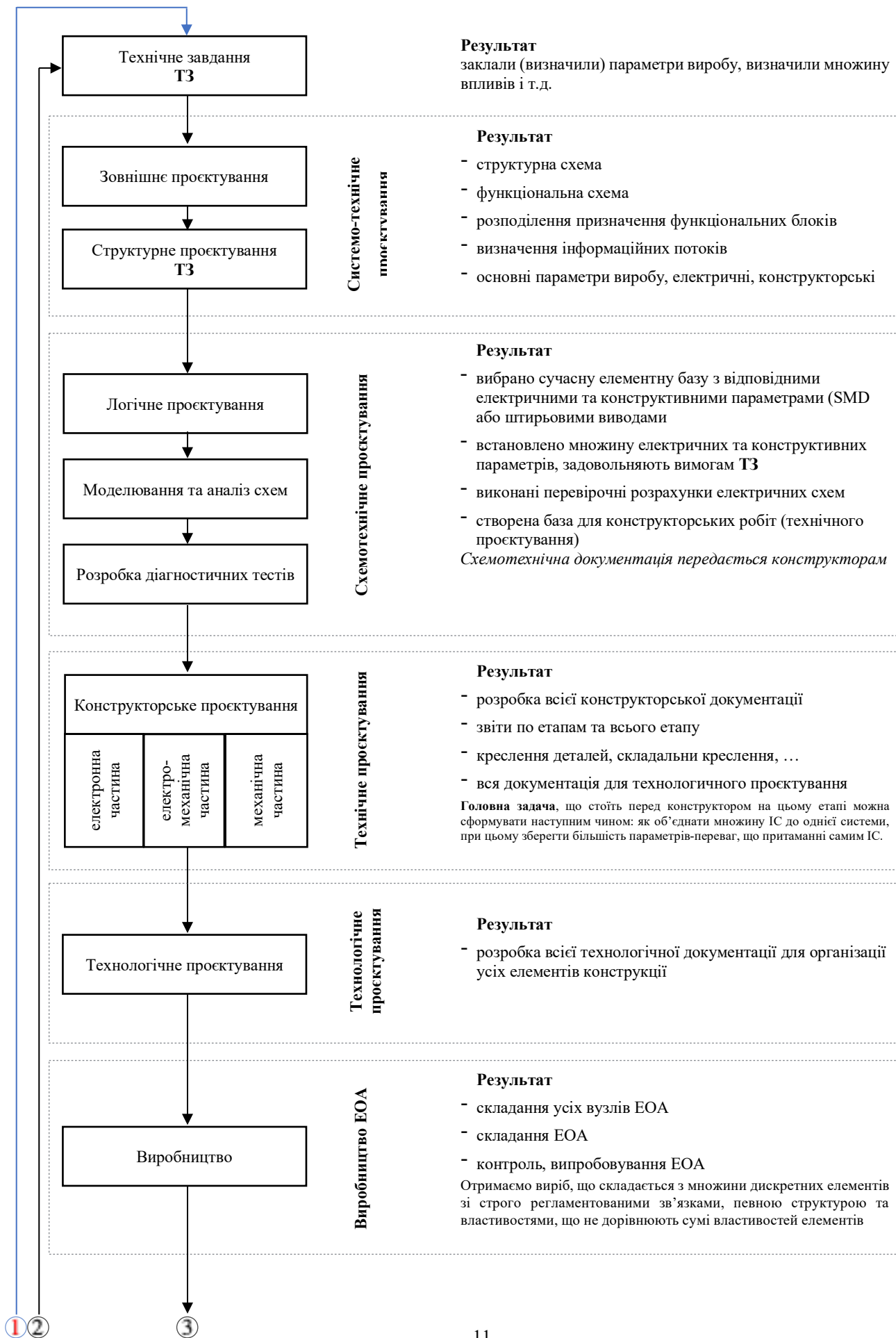
Конструкція - сукупність КЕ (компонентів) з різними фізичними властивостями, параметрами та формою, які знаходяться в певному електричному, просторовому, механічному, тепловому і т.д. взаємозв'язку. Цей зв'язок забезпечує виконання заданих функцій з необхідною точністю та надійністю в умовах як зовнішніх та й внутрішніх завад та передбачити можливість його повторення в умовах виробництва.

Конструкція представляє собою продуманий комплекс властивостей (параметрів), що потрібно надати виробам.

Конструкція - це те, що обмежує довільність виготовлення виробу та в потрібній мірі визначає характеристики виробу.

Властивості виробу в процесі виготовлення технічних засобів ні в якому випадку не можна змінювати без відповідної інформації, вихідної від проєктувальника та конструктора.

Зміни конструкції потребують вихідну інформацію від інженера, що відповідає за виробничий процес.



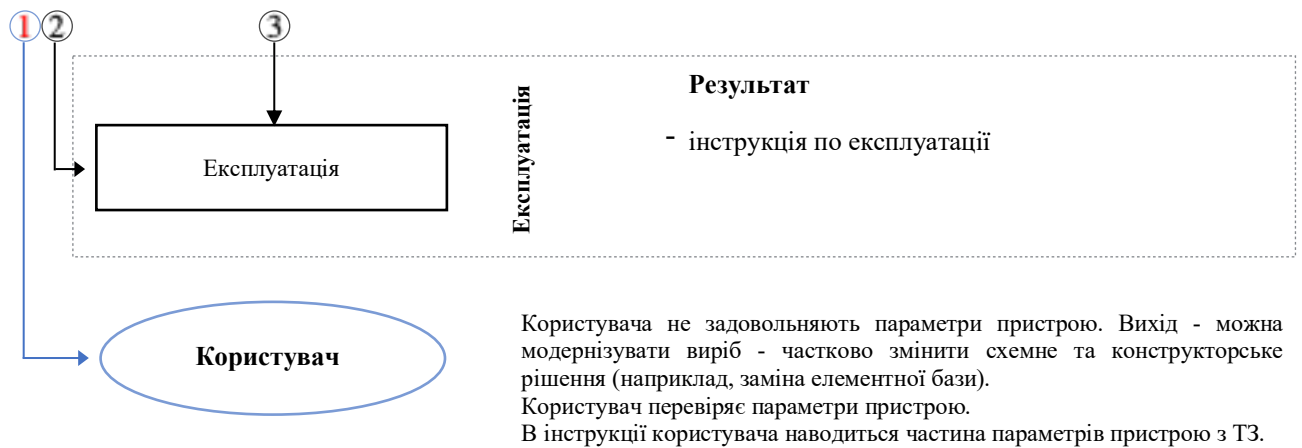


Рисунок 1.1 - Процес проєктування РЕА

Слід зазначити наступне:

Розміри ЕА. Показують наскільки погано при існуючій техніці конструкторського оформлення використовуються розміри дискретних елементів $\Sigma S_{ел} \ll \Sigma S_{моб.тел.}$.

Надійність. Чим вище компонування пристрою, тим більше $P_{роз.}$ пристрою. Тим більше число з'єднувальних провідників, що приходяться на об'єм. Ці фактори зменшують надійність та збільшують вартість. Дослідження показують, що зростання температури на 10^0C в порівнянні з 25^0C термін служби схеми зменшується на 20% - 50%.

Ремонтопридатність. У міру збільшення надійності виникає парадоксальна проблема: необхідність в обслуговуванні та ремонті з'являється настільки рідко, що стає необхідно навчати персонал техніці виявлення несправностей. Може статися, що дешевше розробити РЕА з великих дорогих модулів та викидати їх при виході зі строю.

Постачання запасними вузлами (ЗіП - запасні частини, інструменти, приналежності). Укрупнення модулів збільшує надійність та ремонтпридатність РЕА. Якщо в РЕА нема однакових модулів, то необхідно 100% комплект запасних вузлів. Тому слід шукати компроміс між збільшенням розмірів модулів та тенденцією їх зменшення з ціллю забезпечення взаємозаміни.

Устаткування тепловідводів. Число ІС, що розміщуються в одиниці об'єму, збільшується швидше, чим зменшується теплова потужність, що виділяється ними. Це потребує підвищеної уваги щодо питання тепловідводу. Важливим засобом відводу є передача тепла конструкційним елементам, що володіють високою теплопровідністю.

Вартість виробництва. Вартість ІС в перерахунку на одну функцію схеми швидко зменшується. Вартість конструктивного оформлення РЕА - зростає, тому що ускладняється виконання міжз'єднань.

Технологічність. Кількість кабелів, клемних з'єднань, роз'ємів потрібно різко зменшувати. Сам процес складання нерідко виконується під мікроскопом.

2. КЛАСИФІКАЦІЯ РЕА. ВПЛИВИ

Ціль класифікації - виявити основні особливості конструкції РЕА, а також встановити ієрархічні відношення між складовими частинами конструкції.

*Підкреслюю в основу класифікації покладено ні схемні, ні функціональні особливості і т.д., а саме **конструктивні** особливості РЕА.*

На сьогоднішній день встановилася така класифікація:

- по типу РЕА (*по типу класифікується все - ми з вами також*);
- по відношенню до впливів;
- по конструктивній завершеності.

Класифікація по типу РЕА інформативна по функціональному призначенню, по електричним параметрам, режиму роботи, а ось по конструктивним особливостям (світлина зовнішнього вигляду, блочна конструкція, стійка, одноплатна) - конструктивні параметри практично відсутні.

Хоча для крупного спеціаліста інколи і цього достатньо.

В задачах конструювання елементами вирішення є компоненти, а рішення є комбінації цих компонентів, що утворюють складні (системи) об'єкти. Ці об'єкти задовольняють певним фізичним обмеженням, що витікають з властивостей матеріалів, параметрів компонентів або певних евристичних міркувань.

2.1. Впливи

Таблиці норм кліматичних та механічних впливів наведені [О: 1].

Впливи складають множину $X = \{x_i\}, i=1, \dots, n$.

Для РЕА до множини X входять такі основні впливи: механічні, кліматичні, радіаційні, об'єкту, виробництва, оператора та інші.

Зрозуміло, що на будь-яку апаратуру діють не всі впливи. На конструкції певного типу та виду впливають певні поєднання впливів. Вплив, що виводить пристрій в неробочий стан.

Класифікація впливів призводить до розбиття множини $\{X\}$ на підмножини.

$$X = X_{\text{вир}} \cup X_{\text{експ}}$$

$$X = X_{\text{об'єкта}} \cup X_{\text{середовища}} \cup X_{\text{оператора}}$$

$$X = X_{\text{вир}} \cup X_{\text{об'єкта}} \cup X_{\text{середовища}} \cup X_{\text{оператора}}$$

де $X_{\text{вир}}$ - вплив виробництва;

$X_{\text{об'єкта}}$ - вплив об'єкта;

$X_{\text{середовища}}$ - вплив середовища;

$X_{\text{оператора}}$ - вплив на конструкцію людини-оператора;

$X_{\text{експ}}$ - вплив експлуатаційних обставин.

2.2. Класифікація РЕА по відношенню до впливів

Класифікація РЕА по відношенню до впливів обумовлена різними по характеру та інтенсивності (механічних, кліматичних, радіаційних та інших) експлуатаційних дестабілізаційних факторів. Умови експлуатації (впливу) мають різну фізико-хімічну природу та змінюються в широкому діапазоні.

Результатом всіх впливів на конструкцію є зміна параметрів, як правило, погіршення параметрів, тобто збільшується вірогідність втрати працездатності, зменшення терміна служби. При цьому особливо підкреслюється, що кожна конструкція повинна відповідати специфічним вимогам, які визначаються **місцем** експлуатації апаратури, **об'єктом** на якому встановлюється апаратура.

Тому конструкція повинна бути захищена від впливів, тобто вона повинна бути працездатною при впливі всіх перешкод, всіх дестабілізуючих факторів. Це потребує спеціальних заходів, що тягне за собою збільшення габаритів, ваги, складності і т.д. - в результаті збільшується вартість. Необхідно прийняти заходи по локалізації дестабілізуючих факторів.

Конструкцію РЕА з урахуванням впливів можна представити наступним чином.

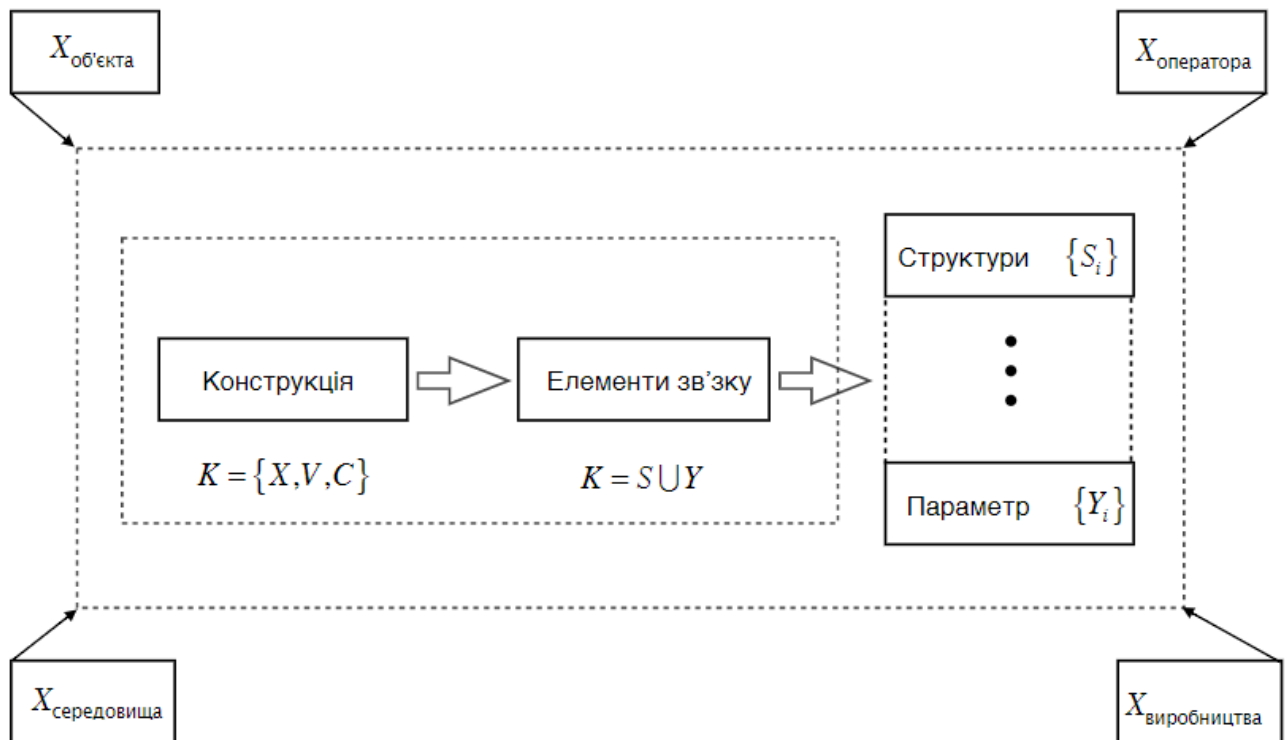


Рисунок 2.1 - Конструкція РЕА

де $X_{\text{об'єкта}}$ - ця категорія впливів настільки значна, що РЕА класифікують по цим ознакам (механічні впливи, теплові впливи, акустичні впливи та інше)

$X_{\text{середовища}}$ - вплив оточуючого середовища розуміють як сукупність природних умов або умов, що створені в результаті експлуатації. Складають наступні елементи: температура, атмосферний тиск, вологість, біологічний вплив та інше.

$X_{\text{оператора}}$ - людський фактор - погодження системи людина-машина по швидкості, точності, та надійності дій оператора (сенсорний вхід оператора та моторний вихід оператора).

$X_{\text{виробництва}}$ - сукупність впливів на елементи конструкції в процесі їх виготовлення:

- відхилення при виготовленні;
- розкид параметрів матеріалів;
- та інше.

Ці впливи постійні в часі.

Таким чином, з урахуванням впливів все різноманіття конструкцій РЕА класифікують за призначенням, за тактикою використання, за видом об'єкту встановлення. За цими ознаками РЕА підрозділяють на бортову, морську, наземну, побутову. Кожна з яких в залежності від об'єкту установки підрозділяється на групи. Тоді класифікацію можна представити наступним чином.

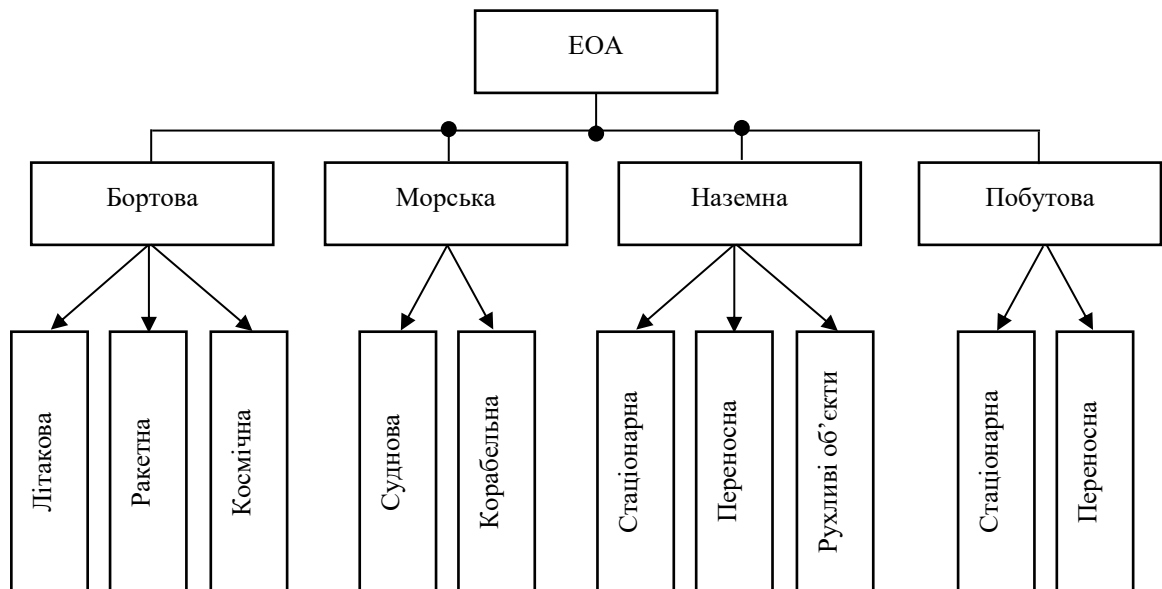


Рисунок 2.2 - Класифікація ЕОА

Кожна виділена категорія та група визначає свої специфічні вимоги до конструкції РЕА (наприклад, для літакової РЕА діють вібрації з частотою до **150Гц** та прискоренням **10g**).

Літакова РЕА проектується по блочному принципу та має свою специфіку (наприклад, компонування блоків може здійснюватися поворотними друкованими вузлами або виконуватися у вигляді блоків, що розкриваються - книжкова конструкція).

Ракетна та космічна РЕА, як правило, компонується в монолітних блоках, що мають конфігурація, яка залежить від виділеного для РЕА відсіку. Саме головне - ця РЕА повинна мати мінімальну вагу.

Бортова РЕА в основному не відрізняється від інших типів РЕА, однак має особливості, що визначаються специфікою вимог до бортової апаратури.

Морська РЕА компонується, як правило, в приладових шафах, що представляють собою каркасну конструкцію. Блочна побудова найбільш характерна. Зазвичай використовується така конструктивна схема РЕА:

ПУ - блок - стійка - об'єкт

Таким чином, специфіка роботи зумовлює підвищений вплив механічних факторів, Морське середовище містить різні активні речовини, що діють на працездатність РЕА (агресивне середовище).

Стаціонарна РЕА експлуатується в опалювальних та неопалюваних приміщеннях; приміщеннях з підвищеною вологістю, на відкритому повітрі, важких виробничих цехах. Умови експлуатації таких РЕА характеризуються широким діапазоном робочих температур ($-50\div 50^{\circ}\text{C}$); вологість до 90-98%; вібрації до 120Гц при 4-6g; ударів 5-7g.

Переносна РЕА компонується у вигляді окремих функційних пристроїв **ФП** (одноплатні РЕА), що проєктуються перш за все виходячи з умов зручності експлуатації та переносу.

До **побутової** апаратури пред'являють наступні вимоги:

- естетичне оформлення зовнішнього виду;
- досягнення високих якісних показників;
- пристосованість до експлуатації зовсім непідготовленими користувачами;
- масовість виробництва.

РЕА, що встановлюється на борту ракет різних класів та призначення, знаходиться в найбільш несприятливих умовах з точки зору впливу вібрацій, ударів та прискорень. Вібрації ракет носять складний характер, який визначається сумісним впливом працюючого ракетного двигуна та аеродинамічних ефектів.

РЕА космічна, як правило, є складовою частиною системи керування рухом об'єкту. Ця РЕА практично не піддається впливам механічного

навантаження у вільному польоті. Однак, при транспортуванні на орбіту, при роботі двигунів механічні впливи стають значними.

Висновки щодо класифікації

Впливи на конструкції завжди небажані, тому що призводять до зменшення надійності, скорочення терміну служби, збільшення вартості розробки, виготовлення, підвищується ймовірність виходу з ладу.

Тому виріб завжди повинен бути захищеним від впливів, тобто повинен бути працездатним та виконувати свої функції.

Кількість впливів безліч, але якщо рахувати, що це елементи множини - елементи, які виводять параметри виробу за допустимі межі, або виводять виріб до непрацездатного стану, - множина буде кінцевою.

Таким чином, з класифікації слідує:

- конструкція РЕА залежить від впливів зі сторони об'єкту, навколишнього середовища, оператора, виробництва;
- одна й та ж по призначенню апаратура, але встановлена на різних об'єктах, відрізняється по конструктивному виконанню, по степені захисту від впливів, по КЕ, що використовуються, вартості;
- для всіх конструкцій виділяють ціль. Ціллю будь-якої конструкції є забезпечення виконання функцій з максимально можливою надійністю при наявності впливів;
- цілісність конструкції, що проявляється в підпорядкуванні будь-якого елемента конструкції для досягнення цілі.

3. РІВНІ КОНСТРУКТИВНИХ МОДУЛІВ РЕА

3.1. Структурні моделі конструкцій РЕА

При конструюванні складних об'єктів виділяють дві проблеми:

1. необхідно отримати рішення всієї складної задачі за прийнятний проміжок часу - **часова складність** - *швидко розробити нову РЕА*;
2. потрібно організувати вирішення складної задачі в умовах, коли неможливо записати до операційної пам'яті ЕОМ повну інформацію про проектуємий об'єкт - **ємнісна задача**.

Вирішення вказаних проблем може бути отримано в рамках **ієрархічного** (функціонально-вузлового, базового) **методу конструювання**.

Згідно цього методу структура складного конструюемого об'єкту представляється у вигляді дрібних часто повторюваних **ФВ** (функціональних вузлів), що реалізуються у вигляді типових конструктивних одиниць (друкованих вузлів). Тобто конструктивно РЕА слідє розглядати, як деяке структурне об'єднання конструктивних одиниць, складові частини яких знаходяться в ієрархічному взаємному підпорядкуванні - корпус ІС, крок між выводами, ККС (крок координатної сітки) і т.д.

Таким чином, уявлення складного пристрою у вигляді сукупності блоків різного рівня визначає формальну структурну модель **конструкції** РЕА, в якій кожен блок містить конструктивні елементи нижчого рівня. Тобто конструктивний поділ пристрою володіє ієрархією. *Ціль класифікації РЕА - встановити особливості та ієрархічні співвідношення.*

Ієрархічний поділ пристрою на конструктивні одиниці різних рівнів з урахуванням поколінь елементної бази (*до речі, виділяють чотири покоління елементної бази*) умовно можна представити так як показано на Рисунок 3.1.

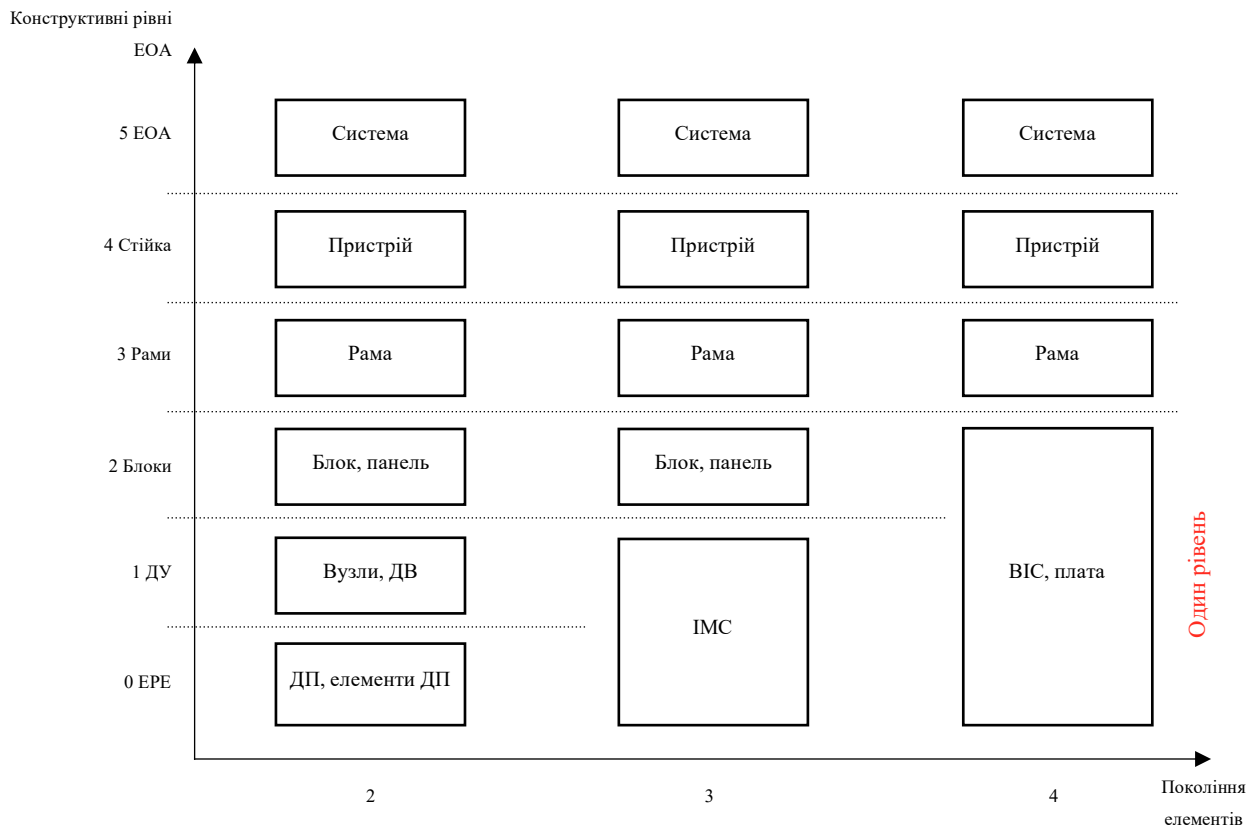


Рисунок 3.1 - Ієрархічний поділ пристрою на конструктивні одиниці різних рівнів

1-е покоління - лампи. Залишимо поки їх.

Перш за все, саме елемента база впливає на число ієрархічних рівнів - при цьому кількість рівнів зменшується.

Ієрархічна структурна модель конструкції РЕА.

В РЕА **другого** покоління **ЕРЕ** сумісно з **ДП** утворюють перший конструктивний рівень - **ДВ** (друкований вузол). При цьому **ДП** є носієм **ЕРЕ**. Логічне об'єднання **ДВ** здійснюють переважно на основі блоку (2-й рівень) - лічильник складається з декількох тригерів.

В апаратурі **третього** покоління **ІС** утворюють **перший** конструктивний рівень. **ІС** розташовуються на **ДП**. Логічне об'єднання також здійснюється також на **ДП**.

ВІС (Велика Інтегральна Схема) є основним **КЕ** апаратури **четвертого** покоління. Сам **КЕ - ВІС** відповідає **ДВ (Блок) третього** рівня, тобто містить в собі два перших рівня апаратури третього покоління.

Конструктивний поділ РЕА володіє ієрархією *функціонального поділу* схеми. Однак, конструктивна ієрархія визначається по принципу **конструктивної закінченості** і в загальному випадку не співпадає з функціональною схемою.

Коротко розкриємо зміст рівнів ієрархії.

“0” рівень

Конструктивно закінчені схеми, дискретні РЕЕ, в яких неможливо виділити окремі складові частини, не зруйнувавши цілісності їх конструкції - **DD, DA, VT, VD, R, C, ...** . ДП - деталь. При цьому ІС є вихідним уніфікованим **КЕ -> ДВ -> і т.д.**

“1” рівень

КЕ першого рівня - це об'єднання множини КЕ “0” рівня. На цьому рівні об'єднуються неподільні елементи “0” рівня в схемні поєднання створюючи друковані вузли, соти (комірки), модулі, електронні збірки, що не мають передньої панелі.

“2” рівень

КЕ “2” рівня є механічні та електричні об'єднання КЕ 1-го рівня, що утворюють блоки, субблоки, панелі та інше.

“3” рівень

КЕ “3” рівня є механічні та електричні об'єднання множини КЕ другого рівня. Рама об'єднує панелі, блоки та інше.

“4” рівень

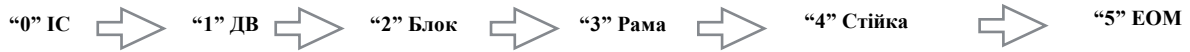
Стійка, що має книжкову конструкцію.

“5” рівень

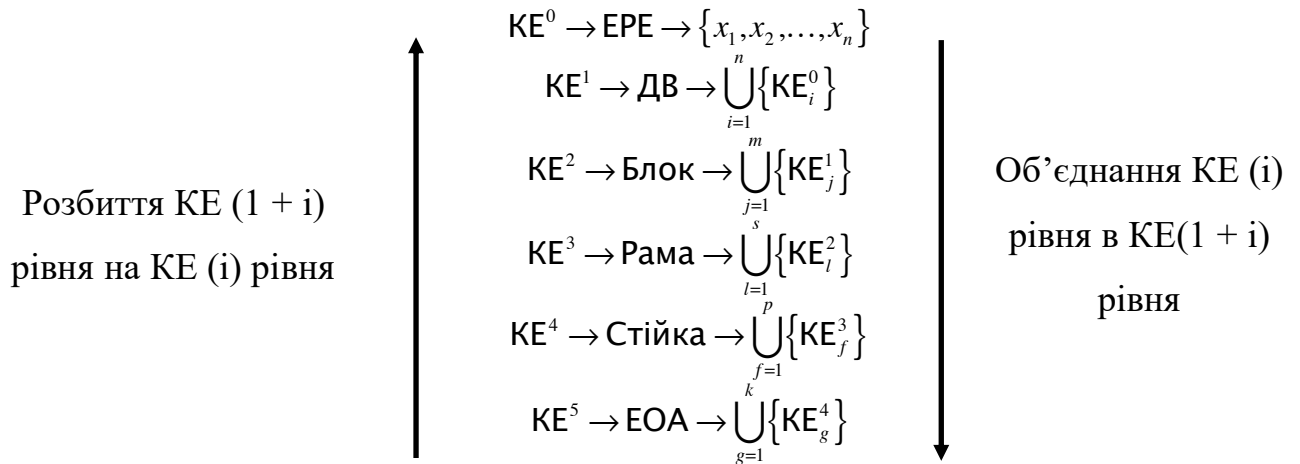
Цілісна конструкція РЕА - декілька стійок.

З аналізу ієрархічної моделі слідує, що структура РЕА залежить від покоління елементної бази, що використовується. Саме елементна база визначає кількість ієрархічних блоків.

Для РЕА 2-го покоління ієрархічну модель можна представити наступним



ЧИНОМ



Ієрархічний метод конструювання заснований на принципах агрегування функціональної та розмірної взаємозамінності, схемної та конструкторської уніфікації. Цей метод є монопольним при проектуванні РЕА, тому що має суттєві переваги

На етапі розробки:

- дозволяє одночасно вести розробку багатьох вузлів та блоків, що скорочує терміни розробки;
- спрощує налагодження, настроювання та сполучення вузлів, блоків, тому що вони вже налагоджені окремо;
- дає можливість безперервно модифікувати, удосконалювати апаратуру без корінних змін в конструкції.

На етапі виробництва:

- скорочує терміни серійного виробництва (це гроші);
- спрощує складання/монтаж;

- знижує вартість апаратури завдяки широкої автоматизації виробництва;
- організація виробництва по незалежним циклам для кожного рівня;
- модифікація необхідних змін конструкторської документації. Цей метод дозволяє робити ці зміни швидко, якісно, тому що документації мало;
- скорочує терміни освоєння серійного виробництва - випередити конкурента - це дуже важливо в наш час;
- підвищує ступінь спеціалізації виробництва. Виробництво стає вузькоспеціалізованим, але високотехнологічним.

При експлуатації:

- підвищує експлуатаційну надійність;
- забезпечує обслуговування;
- підвищує ремонтпридатність апаратури.

Таким чином, при розробці РЕА ми повинні виконати до неї вимоги, що відображені в ТЗ.

Ієрархічна структурна модель конструкції РЕА, що задана поділом всієї конструкції на функціональні друковані вузли різного рівня, забезпечує зручність проєктування, виготовлення, експлуатації і є необхідною умовою для застосування машинних методів проєктування.

Посиланням для скорочення часу вирішення складної задачі є перехід від однієї задачі великої розмірності до сукупності задач меншої розмірності, до послідовного вирішення задач компонування, розміщення, трасування (тобто виконати розбиття складного пристрою).

Якщо зберігати інформацію як показано в таблиці, то усувається ще й ємнісна складність.

Зовнішній пристрій	запам'ятовуючий	Оперативна пам'ять
Програмний проєктування	опис вирішення	Програма для вирішення підзадачі (форми схеми електричної

Зовнішній запам'ятовуючий пристрій	Оперативна пам'ять
	принципової, конструкція ДВ, розміщення, трасування та інше)
Опис ієрархічного дерева Опис усіх фрагментів	Опис кожного (окремого) фрагменту

Ієрархічний метод включає до себе такі **принципи конструювання**:

- моносхемний (однорівневий)

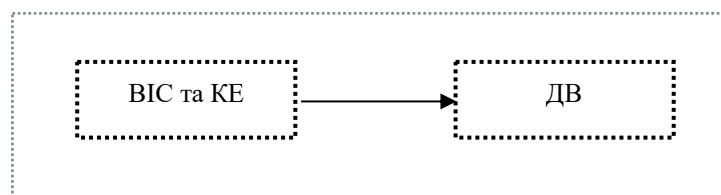


Рисунок 3.2 - Одноплатна ЕОА

багаторівневий

- схемно-вузловий
- функціонально-вузловий
- модульний

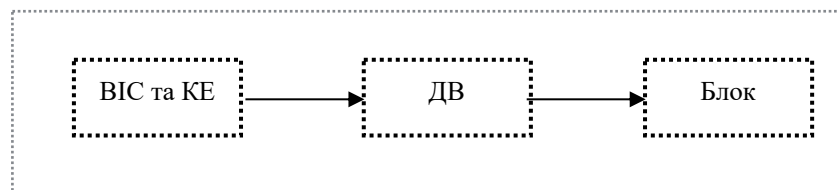


Рисунок 3.3 - Багатоплатна ЕОА

Моносхемний метод - одноплатна РЕА, що виконана на одній ДП, конструктивно закінчена.

Схемно-вузловий - функціональна схема виконується самостійно, а потім через роз'єми схеми об'єднуються в пристрій. Багатовивідні роз'єми знижують надійність, низьке використання монтажного простору.

Функціонально-вузловий. При цьому методі складна схема містить значну кількість ІС та функціональний вузол виконаний на декількох ДВ (пам'ять).

Модульний метод. Припускає, що основні функціональні вузли взаємопов'язані за допомогою одного каналу (наприклад загальна шина).

Використовуючи цей метод, можна побудувати РЕА з високою продуктивністю, при цьому використовується елемента база середньої швидкодії. Користувач може легко модернізувати конструкцію, змінюючи або добавляючи до неї модулі та отримати високі (потрібні) параметри.

Розвиток технології, елементної бази створює умови для конструкторів розробляти нові методи конструювання. Це призводить до створення нового, часто унікального варіанту конструкції.

Конструкцію РЕА розробляють з урахуванням вимог:

- зменшення співвідношення між характеристиками та габаритними розмірами (пристрої менших розмірів з тим же набором функцій або покращених характеристик в тих же розмірах) - об'ємна ефективність;
- масштабованість та сумісність - збільшення виконуваних функцій за рахунок додаткових пристроїв, що підключаються;
- модульність - єдина платформа - щоб уникнути багаторазових розробок одного й того ж продукту;
- підвищення надійності;
- здатність протистояти суворим впливам.

4. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

4.1. Вибір дискретних компонентів. Методи вибору серії ІС

Одним з важливих етапів розробки РЕА є вибір елементної бази і зокрема ІС. Від правильного вибору елементної бази залежить чи буде РЕА, що розробляється, відповідати вимогам, що описані (пред'являються) в ТЗ.

В ТЗ відображені параметри РЕА, що розроблюється. Необхідно вибрати параметри елементної бази та конструюванням доказати, що ціль при розробці РЕА досягнуто. Ви знаєте, що параметри елементної бази та параметри РЕА, що розробляється не завжди співпадають.

Вибір серії ІС. ІС є основним елементом (по суті - за складністю). Параметри цього елемента визначають параметри виробу, пристрою. При цьому елементна база не повинна бути надлишкова по параметрам.

Методики вибору ІС на всі випадки життя (оптимальної) поки що нема. Важливість цього питання очевидна. Як узгодити параметри застосовуваних ІС та параметри розроблюваних пристроїв на їх основі, тому що параметри пристроїв визначаються множиною жорстких впливів, внутрішніх та зовнішніх перешкод, конструктивним виконанням і т.д..

Виділяють такі методи:

- по зрівнюваним параметрам;
- по узагальненим параметрам;
- по матриці параметрів.

Ця задача досить трудомістка та є складною, відповідальною.

По перше, при порівнянні декількох однакових по призначенню серій логічних елементів виникають деякі труднощі при прийнятті кінцевого висновку про переваги однієї серії перед іншими. Тому що елементи, що мають переваги по всім вибраним параметрам зустрічаються досить рідко. Вони надлишкові для

широкого використання; як правило мають переваги по одному або декільком параметрам.

4.2. Вибір по порівнювальним параметрам

В пристроях РЕА використовується велика кількість типів логічних елементів, яка безперервно збільшується.

Логічні елементи та системи логічних елементів відрізняються експлуатаційними даними (діапазон температур t^o_p , відносна вологість, вібрація у визначеному діапазоні, багатократні удари з прискоренням, лінійні навантаження з прискоренням, середній тиск), електричними параметрами, складом, конструктивним оформленням.

Значна кількість різних типів елементів пояснюється різноманітністю вимог, що пред'являється до апаратури, прагненням створити апаратуру з найкращими технічними та топологічними характеристиками.

Різноманіття типів логічних елементів робить актуальною задачу їх порівняння та вибору найбільш оптимальних для побудови конкретної апаратури.

Розглянемо один з підходів до побудови Q_i - функції якості.

Нехай маємо деяку кінцеву множину КЕ – $\{X\}$. Кожен КЕ характеризується визначеною кількістю параметрів m . Тоді кожен КЕ x_i можна розглядати як деяку точку в m - просторі, що характеризується векторною функцією:

$$P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\} \quad (4.1)$$

де p_{im} - числове значення параметра m i -го КЕ.

Оскільки маємо множину КЕ, то сукупність значень p_{ij} утворює множину M точок в m - просторі.

Вказуємо ціль вибору у вигляді деякого еталонного об'єкту

Ціль вибору визначається характером практичної ситуації., для якої виконується перевірка. Вказуємо ціль вибору у вигляді деякого еталонного об'єкту. Цей об'єкт характеризується параметрами, що прийняті за еталонні.

За еталонні можна прийняти:

- максимальне значення параметру P_{imax} ;
- граничні значення - **max** або **min**, що задовольняють ціль (відхилення тільки вверх або вниз);
- деякі визначенні значення в діапазоні $P_{imin} < P_{ет} < P_{imax}$.

Розглянемо, яким чином можна визначити якість кожного виробу відносно цілі вибору.

По одному окремому параметру i якість виробу K можна визначити наступним чином:

$$a_{iK} = \frac{P_{iK}}{P_{iet}}, \quad (4.2)$$

де a_{iK} - відносний (диференційний) коефіцієнт якості об'єкту K по параметру i ;

P_{iK} - кількісне значення параметра i об'єкту K ;

P_{iet} - еталонне значення параметру i , що визначається ціллю вибору.

Враховуючи те, що в $TЗ$ вказується значення параметру $P_{iTЗ}$, тоді

$$a_{iK} = \frac{P_{iK}}{P_{iTЗ}}, \quad (4.3)$$

Дане співвідношення справедливе для тенденції збільшення, тобто .

Диференційний коефіцієнт дозволяє визначити якість кожного з порівнюваних виробів роздільно, тобто по окремим параметрам. Користуватися важко, тому що виріб має перевагу по одним параметрам, а недоліки по іншим.

4.3. Вибір ІС по узагальненим критеріям

Узагальнена (комплексна, інтегральна) оцінка враховує окремі (диференційні) оцінки.

Найбільш відомий та широко використовується узагальнений критерій - **робота (енергія)** перемикаання, що виконує ІС при перемиканні - A , та визначається

$$A = P_{\text{спож.ср}} \cdot t_{\text{затр.ср}} |_{\min} \quad (4.4)$$

$$t_{\text{затр.ср}} = L_{\text{пр}} \left(\sum L_{\text{пр}} \right) \quad (4.5)$$

Чим менше A , тим кращі параметри має ІС. В сучасних довідниках наводиться A , окремо є $P_{\text{спож.ср}}$ та $t_{\text{затр.ср}}$ - тоді необхідно аналізувати. Величина A залежить не тільки від типу ІС, але й від якості проектування топології ІС. (наприклад, довжина зв'язків у різних ІС різна) - тобто від конструкції та технології. Тому A зручна для зрівняння схем одного типу, але виготовлених на різному устаткуванні, за різною технологією.

Недолік A: не враховує завадостійкість.

Цього недоліку позбавлений другий узагальнений критерій - **добротність**, що визначається:

$$Q = \frac{\sqrt{U_n^1 \cdot U_n^0}}{A} \Bigg|_{\substack{K_{\text{роз}} = \text{const} \\ K_{\text{об}} = \text{const}}} \quad (4.6)$$

де $K_{\text{роз}}$ - коефіцієнт розгалуження по виходу;

$K_{\text{об}}$ - коефіцієнт об'єднання по входу.

Q як і A залежить від рівня технології, обладнання, конструювання. Q більш всебічно характеризує властивості ІС.

Використання узагальнених критеріїв хоч і забезпечує вибір серії ІС, однак не враховує ряд характеристик як самих ІС, так і параметрів РЕА.

Таким чином, **загальним недоліком** вибору елементів по зрівнюваним та узагальненим критеріям є відсутність одного інтегрального критерію, за допомогою якого можна виділити з розглянутої множини елементів такий КЕ, який володів би оптимальною сукупністю параметрів. Цього недоліку не має методика вибору ІС по *матриці параметрів*.

4.4. Вибір ІС по матриці параметрів

Після встановлення серій ІС, з яких необхідно вибрати оптимальну, параметри кожної вибраної ІС зводять до матриці параметрів, яка має наступний вигляд:

$$X = \begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \\ \\ b_1 & b_2 & \cdots & b_m \end{matrix}$$

де $i = \overline{1, n}$ - множина порівнюваних серій ІС;

$j = \overline{1, m}$ - кількість врахованих параметрів;

b_1, b_2, \dots, b_m - відповідний **коефіцієнт важливості** відповідного параметру.

Параметри вибираються з довідника. Параметри для всіх ІС повинні бути однаковими. Кількість параметрів для всіх ІС теж повинно бути однаковим.

Необхідно визначитися з **коефіцієнтом важливості**. Величина ваги коефіцієнта вибирається у відповідності з важливістю того чи іншого параметру. При чому більш важливому параметру повинен відповідати більший ваговий коефіцієнт. Зрозуміло, що величина **коефіцієнту важливості** повинна бути якось обмежена, наприклад:

$$\sum_{j=1}^m b_j = 1 \quad (4.7)$$

Про вибір значень вагових коефіцієнтів почитайте гарну книжку [О: 3]

Матрицю параметрів можна скласти для вибору: пристроїв, програм, систем САПР, літаків, автомобілів, ..., тобто будь-яких виробів, що характеризуються кількісними параметрами або якісними, але які можна оцінити кількісно.

Таким чином, в основі всіх методів вибору компонентів лежать *параметри*. Один метод вибору відрізняється від іншого, тим як використовується ці параметри для вибору елемента, що володіє сукупністю кращих параметрів (властивостей).

Параметри матриці $|X|$ мають кількісні значення. Приводяться до такого вигляду, щоб більшому значенню параметра відповідала краща властивість серії ІС. Параметри, що не задовольняють цій умові перераховуються по формулі:

$$y_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} - \text{матриця приведених параметрів}$$

Тоді отримаємо матрицю $|Y|$ - приведених параметрів

параметер кращий - більшому значенню параметра відповідає краща властивість, наприклад тактова частота

більшому значенню цього параметра не відповідає краща властивість - наприклад вартість

$$Y = \begin{matrix} y_{11} = x_{11} & y_{12} = \frac{1}{x_{12}} & \dots & y_{1m} = x_{1m} \\ y_{21} = x_{21} & y_{22} = \frac{1}{x_{22}} & \dots & y_{2m} = x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{n1} = x_{n1} & y_{n2} = \frac{1}{x_{n2}} & \dots & y_{nm} = x_{nm} \end{matrix}$$

Потім елементи $|Y|$ (матриці наведених параметрів) нормалізують так:

$$a_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij}} \quad (4.8)$$

Нормований параметр a_{ij} вказує на частку важливості окремого параметра серед інших параметрів

де a_{ij} - нормоване значення параметру j елемента i ;

y_{ij} - поточне значення параметру j елемента ІС i – типу;

$\max_j y_{ij}$ - максимальне поточне значення параметру в кожному зі стовпчиків $|Y|$.

Є інші методи нормування. Застосовуємо таке нормування, тому що більшому значенню параметру відповідає краща властивість.

Отримаємо матрицю нормованих параметрів A :

$$A = \left| a_{ij} \right|_{n \times m} = \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{matrix}$$

$$b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_m$$

Для узагальненого аналізу системи параметрів елементів вводять оціночну функцію (функцію якості Q), яка показує перевагу однієї серії ІС по відношенню до іншої та визначається як сума добутків елементів i рядка $|A|$ на відповідний ваговий коефіцієнт:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m a_j \cdot b_j \quad (4.9)$$

де i - кількість зрівнюваних ІС, кількість рядків.

Тобто множину зрівнюваних параметрів $|\text{обл. } T|$ ми звернули в точку, яка при своїй сукупності параметрів попадає в область T .

Визначивши Q , для кожної зі зрівнюваних серій ІС, вибирають серію, яка найбільш повно задовольняє вимогам, що пред'являються. Кращій серії ІС відповідає менше значення Q . Таким чином, Q дозволяє вибрати ІС, що володіє, з точки зору цільового призначення (по b_{ij}), найкращою сукупністю параметрів.

Тобто виходить узагальнена оцінка ІС, що враховує всі приватні оцінки (диференційні оцінки). Перехід до інтегральної оцінки в будь-якому випадку пов'язаний з необхідністю врахування важливості (ваги) кожного параметру в порівнянні з іншими параметрами. Тобто ми переходимо до створення скалярної функції, що є узагальненою для багатокритерійної оптимізації (згортання векторного критерію).

Врахування коефіцієнту дозволяє отримати узагальнений скалярний критерій шляхом утворення суми приватних критеріїв, помножених на свої вагові коефіцієнти (метод зважених сум).

Недоліком методу є те, що один критерій компенсується за рахунок інших, які можуть виявитися надмірно великими.

Q визначається сумою, тобто результат ми можемо коригувати величиною окремих доданків.

При цьому можливі два інші **шляхи вибору ІС**.

Перший оснований на аналізі функціонального складу РЕА. Цей аналіз показує, що РЕА складається:

- на 50% зі схем І;
- на 25% зі схем АБО;
- на 18% з тригерів;
- на 17% з інших елементів.

Другий шлях складається в розробці та виготовленні типового вузлу РЕА (суматора, процесора, тощо) на порівнюваних ІС. Провести дослідження для всіх ІС, зробити порівняльний аналіз та вибрати кращу серію ІС.

Деякі мікропроцесори, мікроконтролери, ПЛІС розроблені спеціально для конкретних додатків. Тоді і вибирати нема з чого. Вибір єдиний.

Ми вибрали ІС з позиції розробника. Розробник звичайно “голова”, але є технолог (виробник).

В будь-якому випадку обрана для РЕА серія ІС повинна відповідати вимогам розробника, виробника, користувача.

Для розробника обрана серія ІС повинна забезпечувати (*відповідати необхідним параметрам розроблюваної РЕА*):

- максимальну щільність монтажу;
- максимальну швидкодію (певну, але не меншу ніж того потребують вимоги до пристрою);
- мінімальну вагу, об’єм, споживану потужність;
- мати потенційні можливості для зниження собівартості та зростання параметрів;
- повинна надійно працювати у всьому діапазоні впливів.

Для виробника:

- дозволяти автоматизацію складання;
- наскрізний контроль працездатності всіх конструктивних рівнів (сота, блок, ...);
- допускати зміну однієї серії ІС на іншу з аналогічними та більш високими параметрами;
- повинна бути схемна та конструктивна сумісність.

Для користувача:

- простота обслуговування, налаштування, діагностики, ремонту;
- висока надійність та якість.

Контрольні запитання

1. Визначення конструкції
2. Опис конструкції
3. Етапи конструювання, результати
4. Класифікація РЕА
5. Впливи. Типи впливів та їх визначення
6. Категорії впливів
7. Класифікація РЕА за впливами
8. Складності при конструюванні РЕА
9. Ієрархічний метод конструювання. Визначення
10. Рівні ієрархії конструктивних елементів
11. Принципи конструювання ієрархічного методу
12. Методи вибору радіоелементів (серії ІС): по зрівнювальним параметрам, по узагальненим параметрам, по матриці параметрів
13. Функції, що використовуються для формалізації вибору радіоелементів (серії ІС)
14. Функція якості
15. Недоліки методів вибору радіоелементів

5. КОМПОНЕНТИ ТА КОРПУСИ

Сьогодні електронні продукти та зв'язаний з ними потенціал розвитку формує життя всіх індустріальних націй. В повсякденному житті практично нема місця, на яке електроніка не надавала б значного впливу: побутова електроніка, автомобільна електроніка, мобільний зв'язок і т.д..

Паралельно з прогресом в області напівпровідників розвивалися все більш мініатюрні та все більш дешеві дискретні компоненти. А поряд з усім цим розвиток ефективної та рентабельної виробничої та складальної техніки для електронних збірок стало наріжним каменем “масової електронізації суспільства”.

Тому вирішальним фактором успіху стає всеосяжне та узгоджене по всьому ланцюгу **“маркетинг - (розробка, схемотехніка, конструкція) - виробництво - вихід на ринок - сервіс”** технологічна майстерність.

З точки зору кінцевого користувача важливо визначити ті фактори, що приведуть до масових продажів та відповідному розвитку РЕА.

Фактори, що важливі для розробки електронних збірок (ДВ) ділять на такі основні групи:

1. набір функцій;
2. форм-фактори (габарити та дизайн);
3. операційна надійність;
4. спроможність протидіяти складним впливам оточуючого середовища;
5. вартість (операційні затримки).

Ці фактори встановлюють вимоги до РЕА., електронних збірок (ДВ), що входять до його складу, та компонентів, що вже напряму зв'язані з технологією, що використовується.

В загальному випадку кожна збірка складається з **підкладки-носія (друкована плата)**, встановлених на її електронних компонентів і т.д. по рівням.

Вимоги до електронних збірок, що пов'язані з технологією, поділяють на такі категорії:

- покращення співвідношення між характеристиками (параметрами) та розмірами (пристрої менших розмірів з тим же набором функцій або покращення характеристик в тих же розмірах - **об'ємна ефективність**);
- зниження ваги (особливо для портативних, бортових пристроїв);
- зменшення споживання енергії або інших "системних утримок";
- розширення/інтеграція властивостей;
- підвищення надійності;
- здатність протидіяти складним кліматичним та механічним впливам.

На даний час розробка **ДВ** відразу оптимізована для виробництва. Це призводить до зниження виробничих витрат.

Ще раз на закінчення згідно ієрархічного методу. Всі рівні ієрархії більш чим успішно розвиваються і, відповідно, конструюються, виробляються, експлуатуються, тобто збільшують нашу технічну оснащеність. Ми все стали робити швидше, якісніше, надійніше, отримувати задоволення від праці і т.д..

Звертаю вашу увагу, що все конструювання починається з компонентів, розміщених (розташованих) на підкладці - **ДП**.

В задачах конструювання елементами вирішення є **компоненти**, а самі рішення є **комбінації** цих компонентів, що утворюють складні об'єкти, що задовольняють визначеним фізичним обмеженням, що витікають з властивостей матеріалів, параметрів компонентів.

Пропоную розглянути роль компонентів в конструкторському середовищі, тобто як один з основних елементів будь-якої конструкції. Тобто покажемо з вами, що конструкція самого елемента (компоненту) впливає на конструкцію простого або складного виробу, його параметри, технологію і т.д..

Далі ми будемо розглядати методи, принципи конструювання РЕА згідно розглянутої моделі, по рівням ієрархії. Почнемо з вами з **"0" рівня**.

Електронні компоненти “0” рівня

- 1) компоненти для монтажу в отвори;
- 2) компоненти та корпуси для поверхневого монтажу (ПМ).

Ці питання впливають з класифікації множини компонентів на штирьові та так званні **SMD** (surface mounted device) компоненти (елементи для поверхневого монтажу).

5.1. Компоненти та корпуси для поверхневого монтажу (ПМ)

Корпуси для ПМ в декілька разів менші своїх аналогів, що встановлюються в отвори, але всі вони на 25%-50% дорожче. В теперішній час є більше 25000 типоміналів компонентів у виконанні, що підходить для ПМ. Всі основні виробники пристосували свої складальні лінії для встановлення таких корпусів.

Стандарти встановлені на chip резистори та конденсатори в **K** типорозміру **1206** та **SOT-89**, на мікрокорпуси IC, на кристалоносій з числом виводів від 28 до 84 з кроком виводів 1.25мм, 0.625мм і менше.

Давайте розглянемо стан техніки корпусування компонентів, параметри корпусів найбільш використовуваних елементів.

Корпуси для ПМ. Основні групи корпусів.

На теперішній час встановлено таку класифікацію корпусів елементів для ПМ.

1. Прості корпуси для пасивних компонентів:
 - безвыводні **K** прямокутної форми (типу 1206)

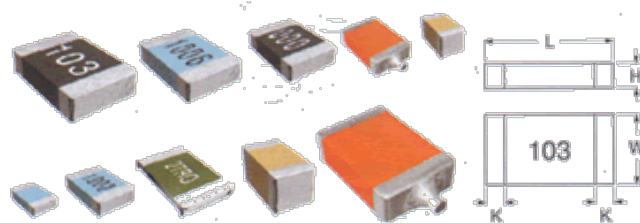


Рисунок 5.1 - Приклад корпусу типу 1206

- **К** з електродами у вигляді металізованих торців: типу 2012 (0805), 3216 (1206), 1812 - геометричні розміри: довжина 0.12in (3.048 mm) та ширина 0.06in (1.524 mm)

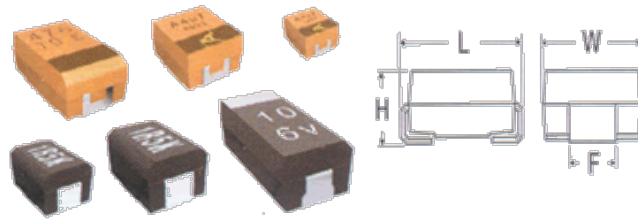


Рисунок 5.2 Приклад корпусу з електродами

- **К** з електродами у вигляді “крило чайки” (діоди, стабілітрони, конденсатори):

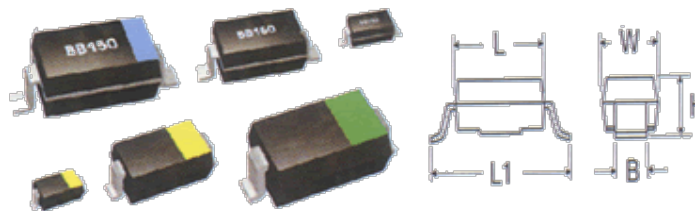


Рисунок 5.3 Приклад DO-215AA, DO-215AB

- **К** у вигляді металевого електрода з безвиводними торцями MELF (Metal Electrode Leadless Face)



Рисунок 5.4 - Приклад корпусу з безвиводними торцями MELF

2. Складні **К** для багато-вивідних напівпровідникових приборів:

- малогабаритний транзисторний корпус **SOT** (small outline transistor)

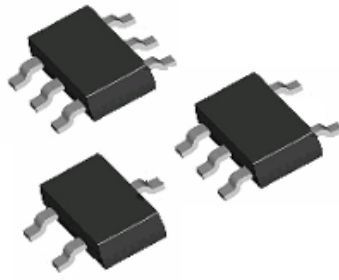


Рисунок 5.5 - Приклад транзисторного корпусу SOT

- малогабаритний корпус для ІС: **SO** (small outline), збільшений корпус для ІС - **SOL** (small outline large)

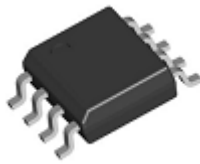


Рисунок 5.6 - Приклад корпусу SO

- версія корпусу SOIC, але з загнутими виводами: **SOJ** (small outline package J leads)

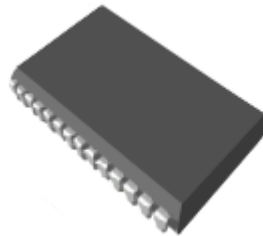


Рисунок 5.7 - Приклад корпусу SOJ

- пластмасові кристалоносії з виводами по чотирьох сторонах - **PLCC** (plastic leaded chip carrirer)



Рисунок 5.8 -Приклад PLCC

- **QFP** (quad flat package) тип К, в яких виводи розташовано по усім 4-м сторонам. Зазвичай мають квадратну форму корпусу. **BQFP** (bumpared quad flat pack) мають розширення основи по кутам, які захищають від механічних пошкоджень до запаювання.

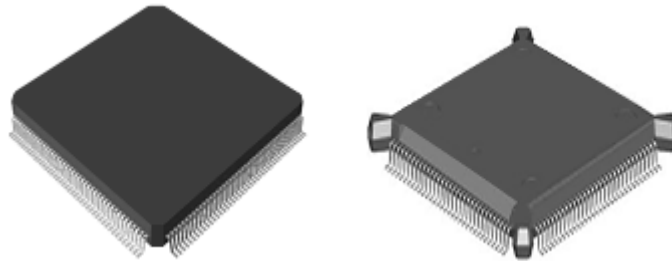


Рисунок 5.9 - Приклад QFP, BQFP

- корпуси 5-го типу **BGA**

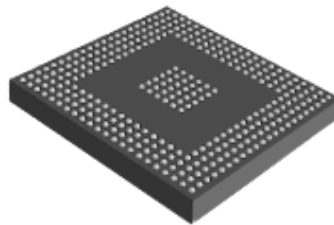


Рисунок 5.10 - Приклад BGA

3. Різні інтегральні корпуси для компонентів неправильної форми, наприклад перемикачі, роз'єми та ін.

Переваги та недоліки малих компонентів

- потребують мало місця;
- мають покращені частотні властивості (малі C_0 , L_0);
- більш стійкі до механічних впливів (при вібрації);
- менш чутливі до флуктуації тепла.

Однак є декілька недоліків:

- електричні параметри гірші – мають великий розкид;
- **К** вимагають вищі вимоги до технології установки;
- збільшуються проблеми пайки особливо ефект “гробового каменю”.

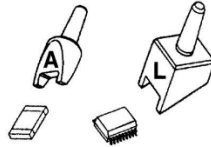


Рисунок 5.11 - Чіп-насадки для пайки компонентів

Використовують спеціальні чіп-насадки, що дозволяють виконувати пайку компонентів з двостороннім розташуванням виводів в один рух. Забезпечує рівномірний прогрів корпусу компоненту, що попереджує перепад температур в корпусі, і як результат, його пошкодження - мікротріщини та ефект “гробового каменю”.

- збільшується кількість **ПО** (перехідних отворів), якщо контакт необхідно перевести на зворотню сторону **ДП**.

Прості корпуси

Безвыводні **К** прямокутної форми є найбільш розповсюдженими для **ПМ** пасивних компонентів - **Р, С**.

Для вказівки геометричних розмірів таких **К** використовується коротке позначення, наприклад **1206**. Це означає, що $L = 0.12\text{in}$ (3.048mm) та ширину 0.06in (1.524mm). *Особливо зверніть увагу на тисячні долі розміру.*

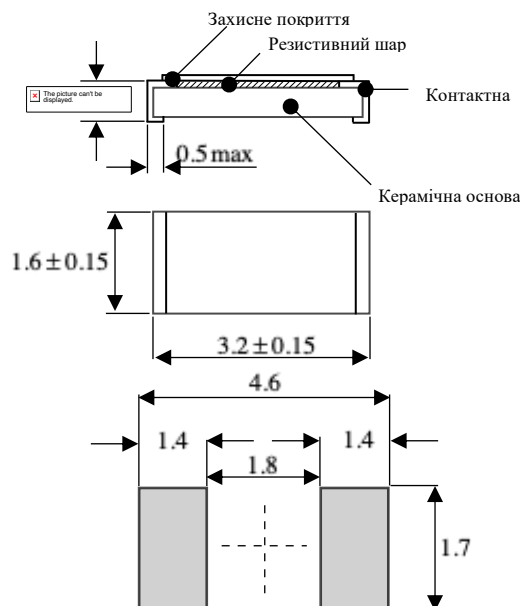


Рисунок 5.12 - Посадкове місце простого корпусу

Параметри для знакомісця залежать від методу пайки. На малюнку представлено знакомісце для резисторів та конденсаторів у випадку пайки методом розплавлення дозованого припою. При пайці методом хвилі припою параметри знакомісця дещо відрізняються.

Для порівняння С2-23-0.125 (МЛТ - 0.125)

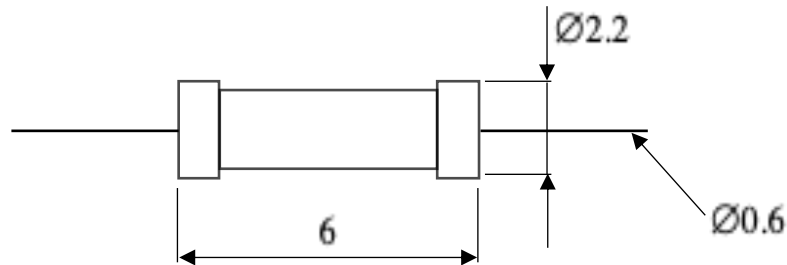


Рисунок 5.13 - Приклад С2-23-0.125 (МЛТ - 0.125)

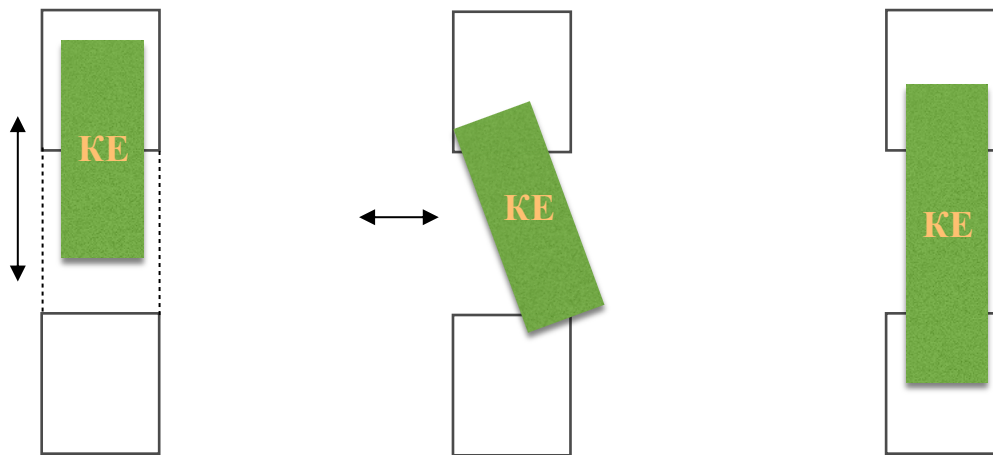
Резистори виготовляються методом товсто-плівкової технології, яка включає відпал сумішей оксидів металів та кераміки, нанесених на керамічну підкладку тіло резисторів покривається пасивуючим шаром скла.

Основні параметри резисторів в таких корпусах (0201, ..., 2010):

- номінальна потужність розсіювання $P_{роз}$ від 0.05 Вт до 2 Вт при $t = 70^{\circ}C$;
- номінальна напруга 220В;
- допуск на номінали резисторів від 0,01% до 5% - висока точність;
- діапазон опорів від 0 Ом до 100 ГОм

При монтажі таких типів **К** особливу увагу слідє уділяти вирішенню проблем їх пайки. Топологія **КП** залежить від методу пайки - пайка хвилею або пайка розплавлення дозованого припою. На поверхні **КП** шари покриття розташовані так: (знизу вверху) срібло-нікель-припій або олово-паладій-срібло.

Точність установки **КЕ**



ідеальний (оптимальний) варіант

Рисунок 5.14 - Варіанти монтажу компонента

КП повинна бути ширше ширини виводу мінімум на $0,1 \div 0,2$ мм, а довжина на $0,3 \div 0,4$ мм більше довжини виводу.

Також в цих же корпусах випускають конденсатори.

Конденсатори

1 тип. Керамічні багат шарові також використовуються в **К 1206** (прямокутні) для номіналів середнього діапазону.

Діелектричні матеріали, що використовуються в конденсаторах у відповідності до стандартів на компоненти, поділяються на два класи:

- Клас 1. Володіє низькою діелектричною проникністю, але хорошою температурною стабільністю. Типові значення ємностей конденсаторів, що виготовлені з цього матеріалу, складають 10000 пФ (при робочій напрузі 50В) та 4700пФ (при робочій напрузі 100В)
- Клас 2. Має більш високу діелектричну проникність, але меншу температурну стабільність, чим попередній. Значення ємностей досягають 0.47мкФ, а з менш стабільними матеріалами можна отримати і більш високі значення.

2 тип. Отримують широке розповсюдження циліндричні пластмасові корпуси (MELF). Цей корпус нагадує варіант стандартного резистора з виводами.

Цей корпус має вигляд

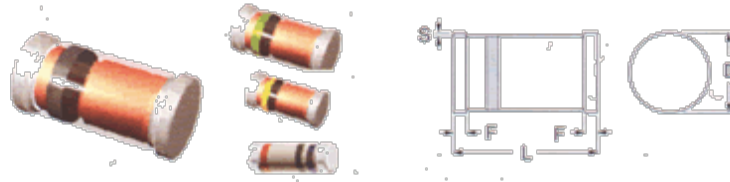


Рисунок 5.15 - Приклад MELF

В таких корпусах випускаються танталові конденсатори ємністю до 33000пФ $\pm 5\%$.

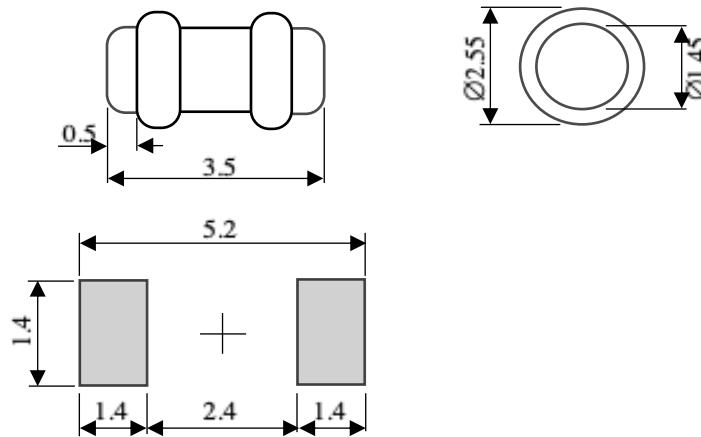


Рисунок 5.16 - Приклад розмірів корпуса типу MELF

В таких корпусах також випускаються діоди, високочастотні котушки індуктивності.

Складні корпуси для н/п приладів

Транзисторний мінікорпус має наступні стандартні конструкції

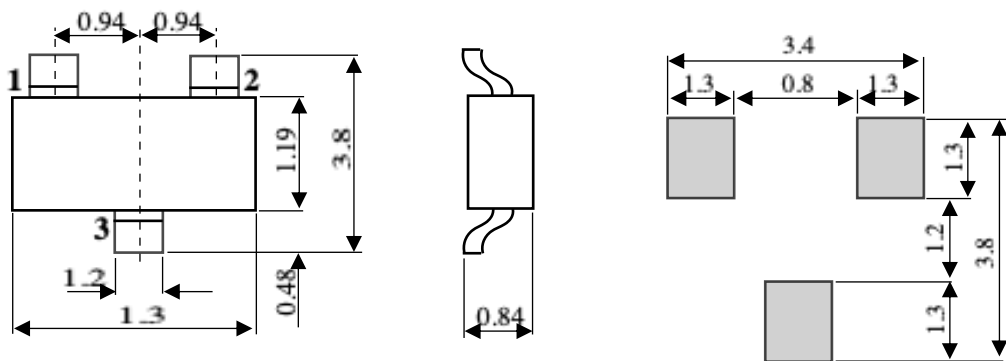


Рисунок 5.17 - Корпус SOT-23

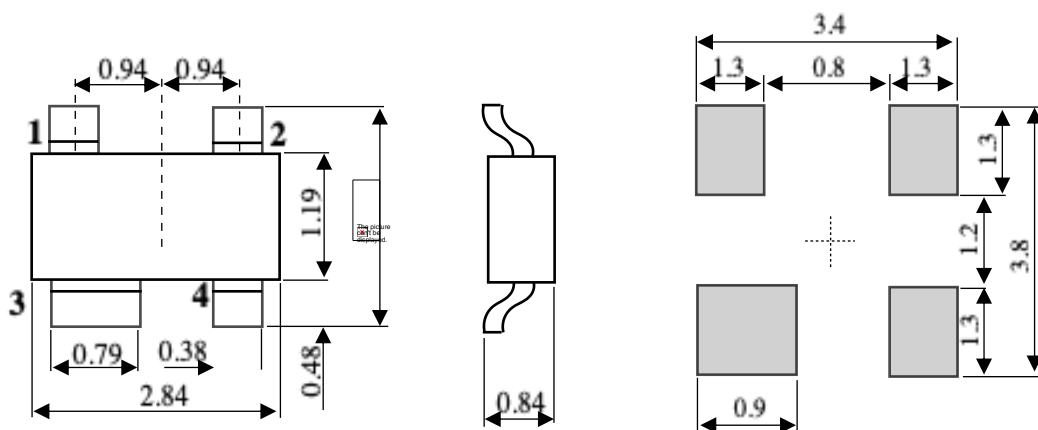


Рисунок 5.18 - Корпус SOT-143

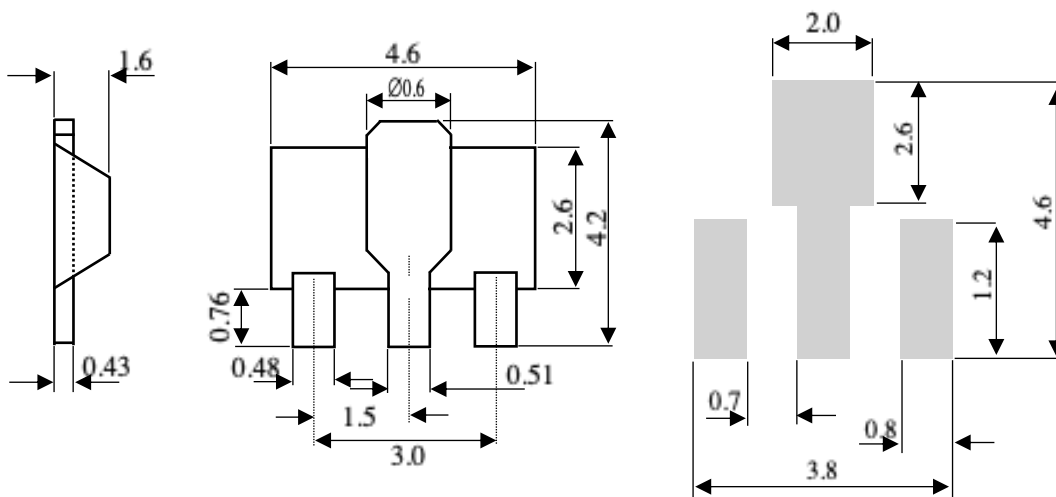


Рисунок 5.19 - Корпус SOT-89

Вибір типу **К** визначається розсіюваною потужністю $P_{роз}$ та розмірами кристалу. Для **SOT-23** та **SOT-143** складає 200мВт, для **SOT-89** $P_{роз}=500\text{мВт}\div 1$ Вт. Корпуси мають просту конструкцію з 3-ма (4-ма) виводами. У **SOT-23** та

SOT-143 виводи розташовані з обох сторін, у **SOT-89** з однієї сторони; центральний вивід має збільшений розмір для кращого тепловідводу.

При розробці таких корпусів намічається тенденція до зростання рівня $P_{роз}$. Це дає можливість збільшувати розсіювану потужність ДВ без яких-небудь особливих змін в конструкції ДВ з ціллю покращення його тепловідводу.

Є сенс також відмітити цілеспрямовану тенденцію відводу великої кількості тепла на рівні елементів, в яких раніше розсіювалося завдяки великих виводів, а зараз за рахунок матеріалу корпусу. **K** становляться тільки на плату, сама плата має малий тепловий опір.

Дискретні напівпровідникові компоненти

Перша SMD-модель **SOT-23** з'явилася в 1970 році. в 80-х роках методи виробництва, техніка вимірів та технологія встановлення для такої конструкції були адаптовані настільки, що економічне виробництво дискретних напівпровідників та їх подальший розвиток стало можливим тільки в комбінації з технологією поверхневого монтажу (ТПМ).

Вимоги користувачів до все більшої електричної потужності та більш високим частотам задовольнялися розробкою та освоєнням нових типів корпусів.

Задачі майбутніх розробок будуть включати зменшення паразитних зв'язків, зменшення розмірів та покращення навантажувальної здатності.

Таким чином, корпуси для напівпровідників будуть характеризуватися:

- високою вихідною потужністю ($P_{роз}$);
- високою тактовою частотою;
- малими габаритами.

Малогабаритний корпус для ІС

ІС в міні-корпусі (**SO(IC)/SOL**) нагадує зменшений варіант традиційного корпусу з дворядним розташуванням стрічкових виводів (тип **DIP**). Зазвичай корпуси поставляються у 8-, 14-, 16-виводному виконанні, при цьому виводи

мають форму крила чайки та розташовані з кроком 0.050дюйма (1.27мм) (Рисунок 5.20).

Великою перевагою цього добре освоєного корпусу є покращені значення основних масогабаритних характеристик по зрівнянню з його аналогом **DIP**:

- він на 70% менше по об'єму;
- на 30% менше по висоті;

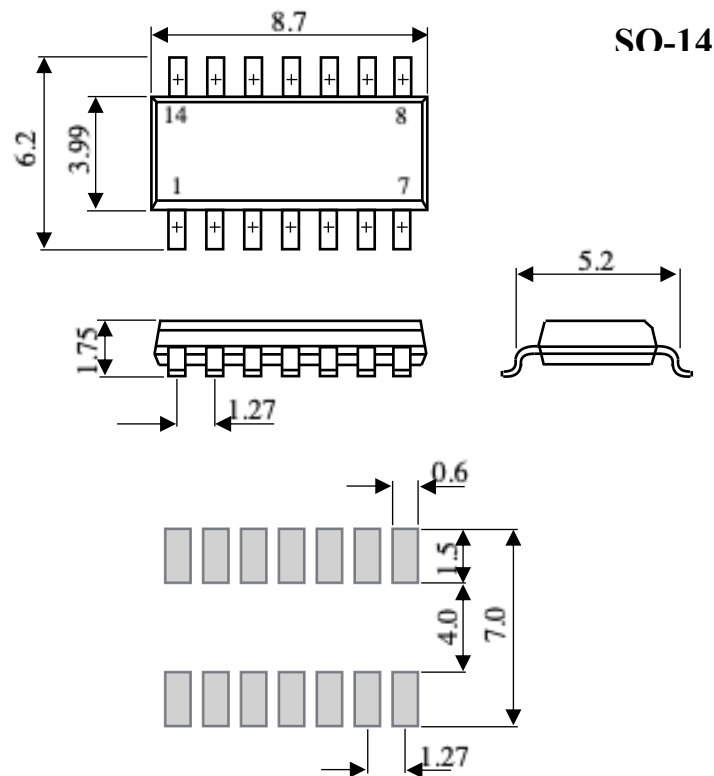


Рисунок 5.20 - Корпус SO-14

- маса такого **К** складає всього тільки 10% від маси аналогу в **DIP** корпусі.

Крім того, мінікорпус має кращі електричні характеристики, що підвищують швидкодію (зменшується довжина внутрішніх зв'язків). До того ж для переробки топології схем **DIP** в мінікорпус потрібно зробити тільки невеликі зміни, тому що розводка виводів однакова - повна взаємозамінність.

В теперішній час в цьому **К** випускається більшість типів ІС малої та середньої степені інтеграції по ТТЛ-технології, надвисокошвидкісні на діодах Шоттки та КМОП-технології.

Точність встановлення

Необхідно, щоб центр **КМ** елемента попадав в центр монтажного майданчика (**ТПМ** - технологія поверхневого монтажу). Це потребує завищеної точності позиціонування (розташування) компонента.

Тому важливо, щоб контактні майданчики були однакової форми та розміру, особливо для чіп-компонентів. В протилежному випадку нерівномірність сил поверхневого натягнення на кожному майданчику буде сприяти зміщенню компонента зі встановленої позиції. Це може підняти компонент, перевернути на торець (бік).

Якщо довжина майданчиків перевищує їх ширину, то компонент може зсунутися та зайняти тільки один з них (майданчиків). Тоді буде обрив електричного ланцюга.

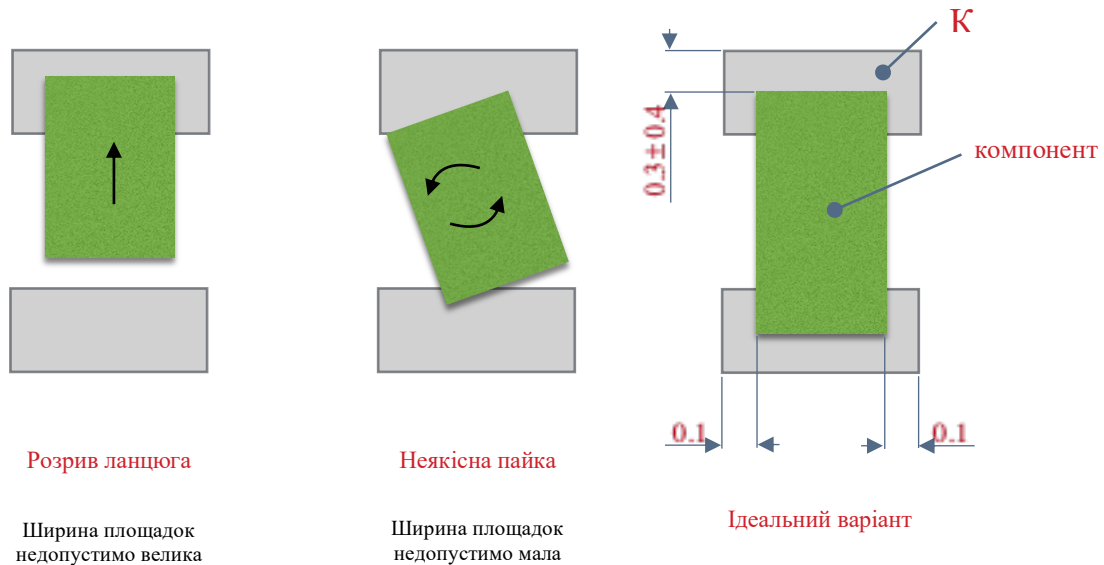


Рисунок 5.21 - Варіанти встановлення КЕ

Коли майданчики широкі, то компонент може загубити орієнтацію.

Для ІС з кроком виводів не менше 0.625мм можна керуватися нескладними правилами: КМ повинен бути ширше виводу на 0.1 - 0.2мм (по 0.1мм на сторону 0.2мм), а довжина на 0.3-0.4мм більше ніж місце прилягання виводу до КМ. Але при визначенні ширини КМ обов'язково слід врахувати відповідні допуски та перевірити, щоб відстань між сусідніми майданчиками не була меншою допустимої відстані між елементами друкованого монтажу.

Імпортні мікросхеми дуже часто поставляються з відформованими виводами, тому розміри КМ не обираються, а розраховуються, використовуючи наведені вище правила. Деякі виробники в документації на свої елементи вказують розміри КМ для різних режимів пайки.

Розрахуємо розміри КМ для контролера АТmega32, користуючись вище наведеними правилами.

З Рисунок 5.22 видно, що частина виводу, що прилягає до КМ має розмір 0.4x0.75мм

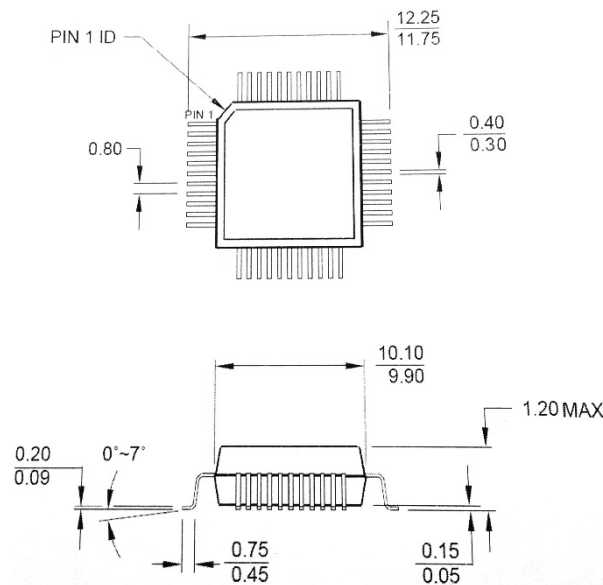


Рисунок 5.22 - Корпус контролера АТmega32

Відповідно розміри КМ будуть:

- ширина: $a=0,35+0,1=0,45$ mm;
- довжина: $b=0,75+0,4=1,15$ mm

Визначаємо мінімальну відстань між двома сусідніми КМ для даної ІС:

$$s_{\min}=0,8-0,45=0,35$$
 mm

5.2. Безкорпусний монтаж (Chip On Board) КЕ на ДП

З розвитком високошвидкісних цифрових виробів проблеми паразитної індуктивності контактів, «брязкіту» землі почали проявляти себе у більшому

масштабі, погіршуючи електричні характеристики. Таким чином, було розроблено нові технології монтажу безкорпусних мікросхем (один кристал):

- на стрічці носієві – береться гнучка підкладка, де зображено тонкий провідний малюнок (для з'єднання кристала з трасуванням на ДП), туди наноситься припій та встановлюється кристал ІС. Після цього гнучка підкладка з кристалом припаюється на ДП та герметизується (капля герметика або кришка, що запаюється). Таке рішення використовують у автоматизованому серійному виробництві;

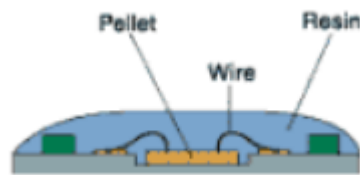


Рисунок 5.23 - Безкорпусний монтаж (Chip On Board) КЕ на ДП

- провідний монтаж – на друковану плату кладуть мікросхему (кристалом уверх) та за допомогою сварки та тонких перемичок (за звичай використовується золота фольга) з'єднують кристал з доріжками на друкованій платі. Після цього герметизують. Таке технологічне рішення використовують у малосерійних виробках.

6. КОНСТРУЮВАННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ (ДП), ДРУКОВАНИХ ВУЗЛІВ (ДВ)

Зі схеми монтажу слідує, що з'єднання елементів різних рівнів (розводка з'єднань) виконується такими видами монтажу:

- провідний (навісний, об'ємний) монтаж;
- друкований монтаж штирьових компонентів (**К** типу 1, 2, 3, ЕРЕ) та SMD компонентів (ІС, чіп резистори та конденсатори і т.д.).

Провідний монтаж - (до 50-х років минулого століття був єдиним) традиційний, відрізняється простотою технологічних процесів. На даний час вирішуються певні задачі для зменшення L_0 та C_0 .

Провідному монтажу притаманні такі основні недоліки:

- не забезпечується висока надійність;
- низька продуктивність ручної праці для КЕ високого рівня;
- займає великий об'єм - джгути в міжблочних з'єднувачах (наприклад в цифрових АТС, комп'ютерних мережах - кабельні канали);
- важко забезпечити одноманітність монтажу;
- обмежує можливості висошвидкісної елементної бази, тому що різко зростає L_0 та C_0 , в зв'язку з тим, що самі довгі провідники мають велике власне значення C та L . Вони входять в загальну довжину лінії зв'язку;
- важко уявити як монтувати SMD компоненти провідним монтажем.

Провідний монтаж має одне незаперечну перевагу $\sum L_{зв} = \mathit{min}$, тому що дозволяється накладувати, перетинати провідники.

Не думайте, що провідний монтаж не розвивається: при провідному монтажу використовується нефольгований діелектрик, немає хіміко-гальванічних процесів, тобто нема втрат міді, не витрачаються цінні метали, провідники наклеюються на поверхню плати та припаюються до КМ.

6.1. Техніка електричного монтажу

Однією з важливих проблем практичної реалізації ЕА є пошук оптимальної технології електромонтажу, що відповідає сучасним технічним можливостям та вимогам. Цієї проблеми не уникнути при сучасних методах конструювання, при яких реалізація схем досягається за допомогою ЕРЕ та ІС. Більш того, неминучим є поділ складного пристрою на невеликі конструктивні одиниці (ієрархічний метод - той, що ми з вами розглядали). Тому монтаж РЕА виконується у вигляді послідовних етапів, що представлені на Рисунок 6.1.

Виграш, досягнутий на окремих етапах, наприклад максимальна щільність упаковки, не призводить до аналогічним переваг відносно усього приладу, якщо не враховується наступна технологія складання та монтажу. Тому необхідно розглядати технологічний ланцюг виготовлення електронних приладів як систему з ціллю пошуку оптимального техніко-економічного рішення.

Кожен з цих етапів має специфічні **особливості**, при чому всі вони пов'язані один з одним в конструктивно-технологічному відношенні.

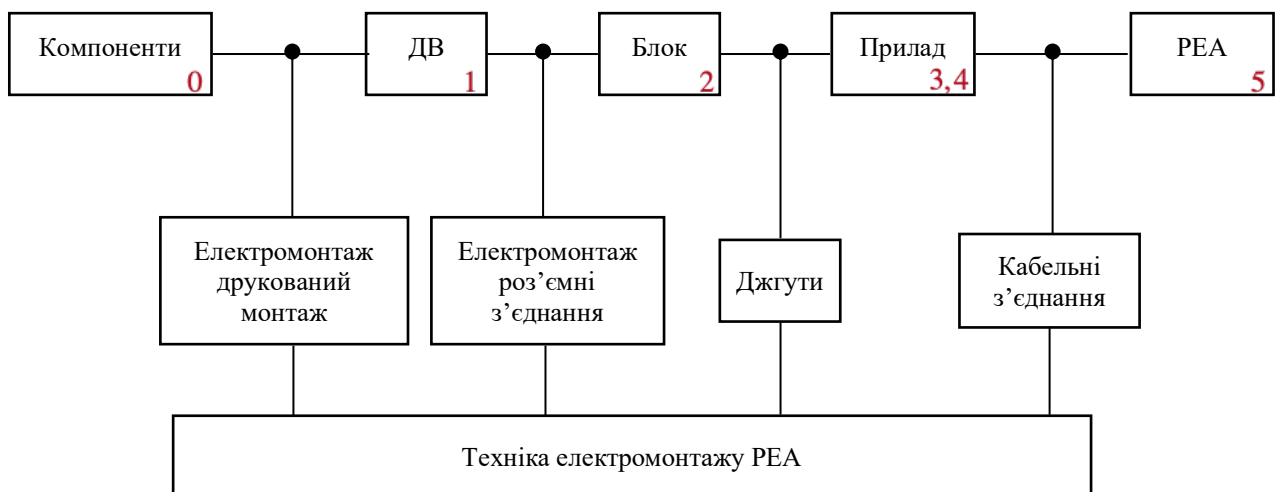


Рисунок 6.1 - Етапи монтажу РЕА

Для електричного з'єднання ЕРЕ між собою служать **друковані провідники** (друкований монтаж). Таким чином, **друкований провідник** є основним комутаційним елементом при створенні будь-якої складної

конструкції. При цьому істотною перевагою друкованого провідника є можливість **одночасного** виготовлення всіх друкованих провідників всіх елементів друкованого монтажу та групового конструювання всіх виводів, тобто одночасної пайки виводів, встановлюваних виводів на основі пайки хвилею припою або іншими методами пайки.

Для електричного з'єднання вузлів між собою служать провідники, що технологічно вибираються по електричним параметрам, що вимагаються.

Для з'єднання цих провідників з **ДВ** використовуються в більшості випадків електричні з'єднувачі - **роз'єми** - з різними методами конструювання (компоненти, елементи друкованого монтажу - ламелі), що придатні для електромонтажу приладів.

Необхідні роз'ємні та нероз'ємні з'єднання є в монтажному ланцюгу критичними у відношенні надійності.

Особливу увагу при цьому слід приділити вибору технології складання та монтажу на першому етапі, тобто при **виготовленні ДВ**, тому що безпосередньо тут виникають найбільші витрати. Оптимальні параметри друкованого вузлу з конструкторсько-технологічної та експлуатаційної точки зору визначають оптимальну технологію складання та монтажу всього пристрою.

З ієрархічної моделі конструювання слідує, що на всіх рівнях ієрархії необхідно КЕ з'єднувати.

Як "витрачається" надійність при переході від типу з'єднання/роз'єму:

- контакт роз'єму $\lambda = 0,2 \times 10^{-7}$ 1/г;
- навісний 124-контактний роз'єм - $\lambda = 0,248 \times 10^{-5}$ 1/г. Ще додайте до цього пайку кожного виводу;
- паяні з'єднання ніжок ІС $\lambda = 0,5 \times 10^{-9}$ 1/г.

З 1952 року в промисловості (СРСР) все в більшому об'ємі знаходить застосування **ДП** - друкований монтаж, що став в теперішній час домінуючим в процесі виробництва РЕА та РЕА.

Піонером в області винаходу методу виготовлення ДП був Едісон. Він в 1906 році описав спосіб виготовлення провідників на ізоляторі за допомогою металевого порошку.

Подальшим технологічним вирішенням стала розробка компанією Telefunken в 1927 році методу монтажу з відштампованих відповідним чином смужок латунної фольги, що з елементами накладалися на ізоляційну основу.

В 1924 році в США був виданий патент на спосіб виготовлення ДП, що й до поточного часу успішно використовується в промисловості - хімічний метод.

Запровадження ДП (друкованого монтажу) для техніки електромонтажу перший крок на шляху прогресивних інтегральних процесів. Для електромонтажу став використовуватися **КЕ-ДП**, що виконує роль одночасно функції несучої основи для розміщення ЕРЕ та їх монтажу.

Найважливішою ознакою ДП є її багат шарова структура, що дозволяє здійснювати економічне, масове виробництво при хорошому відтворенні параметрів виробів.

Тільки великі техніко-економічні переваги дозволили друкованому монтажу зайняти монопольне становище в технології монтажу.

Друкований монтаж має ряд суттєвих **переваг**, основні з яких наступні:

- висока масовість виробництва та висока продуктивність праці - використовується автоматичне виробництво;
- висока ступінь механізації виконання монтажу (установка елементів, пайка, випробовування, тощо);
- висока надійність друкованого монтажу ($\lambda = 0,5 \times 10^{-9}$ 1/г), висока стійкість до впливів (це вже властивість матеріалу ДП);
- висока відтворюваність від зразка до зразка;
- має мале значення L_0 та C_0 , високу електричну міцність при високій вологості та температурі ;
- висока щільність установки РЕ, висока щільність монтажу;
- автоматизація проектування ДП.

Однак друкований монтаж має ряд **недоліків**, типові з них такі:

- потребується спеціальне технологічне обладнання та матеріали (цінні метали - контакти роз'ємів), великі виробничі площі, підвищена витрата кольорових металів;
- робота в агресивному середовищі;
- достатньо великий час розробки;
- труднощі ремонту (особливо при використанні КЕ з великою кількістю виводів);
- складність внесення змін до готової топології ДП;
- провідники не можуть перетинатися в одній площині, що збільшує монтажний шлях ($\sum L_{зв}$);
- необхідно мати фотошаблони, фотошампи, трафарети. Для їх виготовлення необхідні тривалі попередні роботи. Автоматизація цього процесу стикається з певними труднощами - точність виготовлення, збільшення роздільної здатності

6.2. Технологія поверхневого монтажу (ТПМ)

Недоліки друкованого монтажу КЕ зі штирьовими виводами створили умови (благодатні умови) для стрімкого розвитку ТПМ (SMT)

SMT - нове направлення в області електроніки, що включає і техніку корпусування компонентів, тобто змінилася власне елементна база, змінилася під елементи сама технологія.

ТПМ по зрівнянню з існуючою технологією володіє *критеріями прогресивності* (не переваги, а саме прогресивності).

ТПМ компонентів

Промислово розвинені країни, дякуючи кардинальним зусиллям вчених та виробників, лідирують в освоєнні техніки ДМ при **масовому виробництві** ЕА. Стрімкий розвиток **ТПМК** пояснюється насамперед економічними міркуваннями, тому що дозволяє в процесі конструювання РЕА зменшити

габарити, знизити витрати матеріалів (масогабаритні параметри) та енергії, об'єм, масу корпусів та стійок, в яких повинні розміщуватися ЕОС та, відповідно, знизити виробничі площі.

ТПМК дозволяє створити більш швидкодіючі, більш завадостійкі та більш надійні РЕ та РЕА.

Ця обставина спонукає фірми-виробники проводити кардинальні організаційно-технічні заходи.

Подібна технологія в нашій країні на сьогоднішній день є. Передова технологія - це об'єктивний процес, магістральний шлях розвитку технології виробництва ЕА в епоху мікроелектроніки.

ТПМК по зрівнянню з існуючою технологією володіє найважливішими критеріями прогресивності: *забезпечує мініатюризацію апаратури при одночасному зростанні її функціональної складності.*

Це відповідає вимогам ринку електронних виробів та особливості вимог ринку обчислювальної техніки.

Процес **ДМ** (Друкований Монтаж) охоплює:

- позиціонування та встановлення компонентів;
- пайку;
- контроль, випробовування;
- ремонт.

Термін **ТПМ** є загальним позначенням нового напрямлення в області електроніки, що включає і техніку *корпусування*, компоненти, виконанні в нових корпусах, призначених для **ДМ** набагато менші, чим їх традиційні еквіваленти, що монтуються в отвори. Замість довгих виводів або штирів, для елементів що монтуються в отвори, вони мають короткі виводи або просто зовнішні **КМ**. Такі елементи безпосередньо закріплюються на поверхні плати при суміщенні їх з **КМ**.

Малі розміри компонентів для **ТПМ** забезпечують:

- більш високу щільність монтажу на одиницю площі **ДП** та, отже, дають зниження масогабаритних показників при тому же рівні функціональних можливостей;
- збільшення числа виводів корпусів ІС, збільшує функціональні можливості на одиницю поверхні плати;
- створення компонентів нового покоління для **ДМ** безсумнівно дає цілий ряд переваг. Використання **К** з короткими виводами зменшує паразитні індуктивності та ємності, не потребують формування, обрізки виводів.

Відмічаючи переваги конструкцій, розроблених на базі **ТПК** не слід замовчувати про складний комплекс проблем, що виникають на етапі виробництва:

- відвід тепла, як показує практика - одна з найбільш розповсюджених та важких. Збільшення щільності монтажу веде до істотного росту виділеного тепла. Це потребує нетрадиційних методів відводу тепла. Наприклад, виготовити плати на основі інвару, плакованого міддю;
- нові матеріали з малим значенням ϵ та високою теплопровідністю;
- нова технологія пайки та виготовлення елементів друкованого монтажу (глухі отвори для корпусів 5-го покоління **BGA**).

Технологія пайки потребувала кардинальної переробки методу пайки хвилею. Форма хвиль **T, J**, зустрічна хвиля. Розробка нових методів - пайка розплавленням дозованого припою в парогазовому середовищі, пайка розплавленням дозованого припою з інфрачервоним нагрівом, застосування лазерів.

Таким чином, нам необхідно вирішити задачі, що для неї були традиційно складними:

- масогабаритні параметри, що визначають параметри елементної бази та пристроїв;
- технологія.

Перспектива така: навіть в цьому випадку успіх прийде тоді, коли спеціалісти, техніка та технологія будуть готові втілити в життя цю нову технологію.

Дамо визначення елементам друкованого монтажу комутаційних плат.

Друкований провідник - ділянка металізованого шару, нанесеного на ізоляційну основу, еквівалентний звичайному провіднику.

Друкована плата - елемент конструкції, що складається з плоских провідників, нанесених на ізоляційну основу, які забезпечують необхідне електричне з'єднання елементів електричного ланцюгу (необхідне з'єднання елементів забезпечує конструктор).

Друкований монтаж - система друкованих провідників, що забезпечує електричні з'єднання елементів ланцюга.

Монтажний отвір (МО) - отвір, що призначений для закріплення виводів ЕРЕ.

Монтажний (контактний) майданчик - металізована ділянка, що має електричний контакт з друкованим провідником, та забезпечує можливість електричного з'єднання дискретного елемента з друкованим монтажем.

Координатна сітка (КС) - прямокутна сітка, що складається з паралельних рівновіддалених ліній, умовно або фактично накладених на ДП для визначення розташування отворів та розмірів провідників.

Крок координатної сітки (ККС) - відстань між двома найближчими паралельними лініями КС.

Вузол КС - точка перетину двох ліній КС

База сітки - вузол сітки, що приймається за точку початку відліку. Як правило, це лівий нижній кут або ліве нижній МО ДП.

6.3. Класифікація конструкцій ДП

Основні задачі:

- збільшити міцність від механічних впливів, тепловіддачу, та стійкість до кліматичних впливів;

- механізувати операції складання та монтажу РЕА, зменшити працемісткість та знизити вартість виробу;
- автоматизація проектування ДП (проектування ДП - тривалий та болісний процес).

В теперішній час розроблена велика кількість різних по конструкції та технології виготовлення комутаційних плат (друкованих плат, монтажних плат).

Один з варіантів класифікації комутаційних плат приведено на Рисунок 6.2. Класифікація не охоплює все різноманіття ДП, в ній приділена основна увага платам, які широко використовуються в теперішній час.

В залежності від числа провідних шарів комутаційні плати поділяються на ОДП, ДДП, БДП. По комутаційному виконанню: на жорсткі та гнучкі.

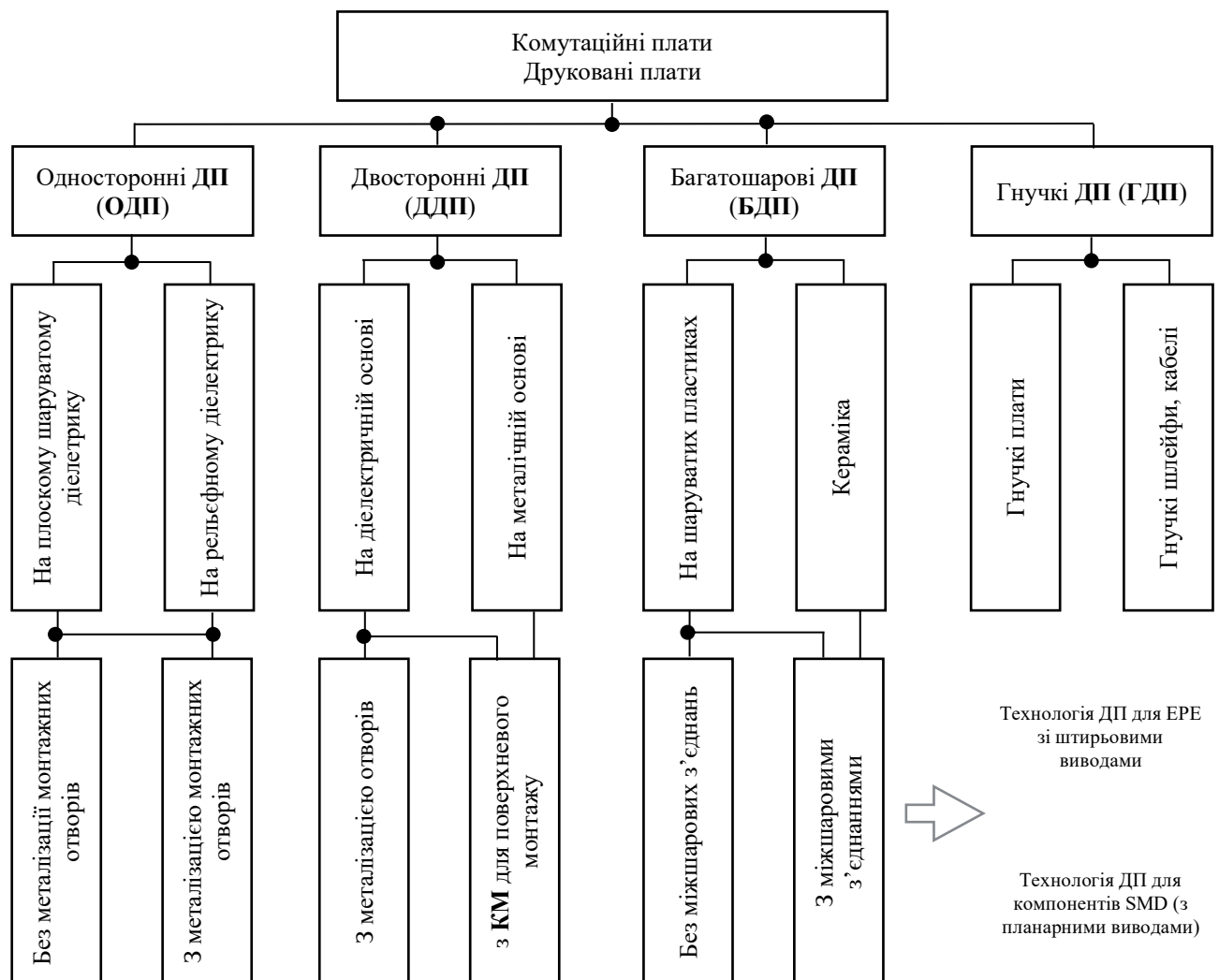


Рисунок 6.2 - Класифікація комутаційних (друкованих) плат

Коротко охарактеризуємо кожен з різновидів ДП.

ОДП - виконується на шаруватій пресованій або рельєфній литій основі без металізації отворів (для силової електроніки використовується металізація).

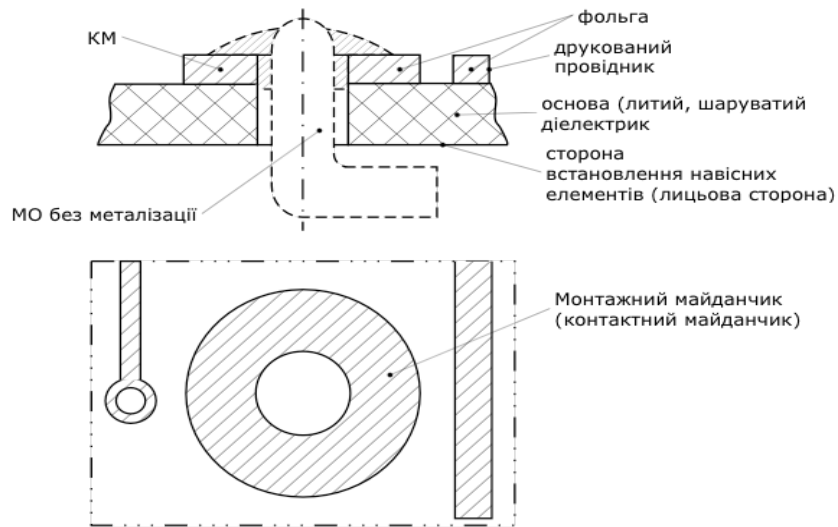


Рисунок 6.3 - Приклад отвору на ОДП

Для ПМ

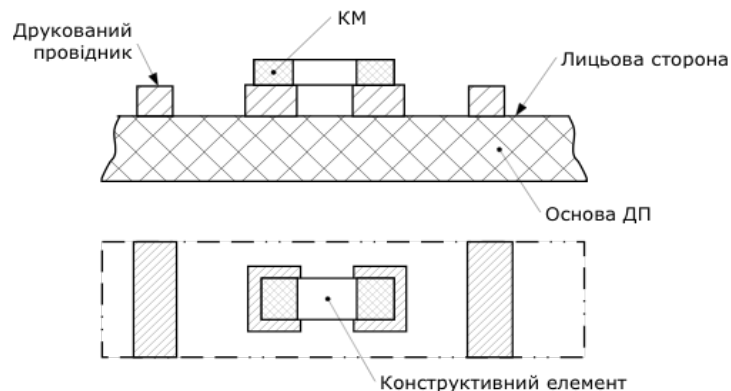


Рисунок 6.4 - Приклад контактної майданчика на ОДП

З металізацією МО

Для збільшення міцності кріплення елементів можливе виготовлення ОДП з металізацією отворів. Монтажні та трасувальні можливості таких плат низькі. Надійність ОДП та вихідна міцність кріплення компонентів також низька. Щоб уникнути відшарування друківаних провідників усі елементи слід монтувати без зазорів між корпусом елемента та ДП.

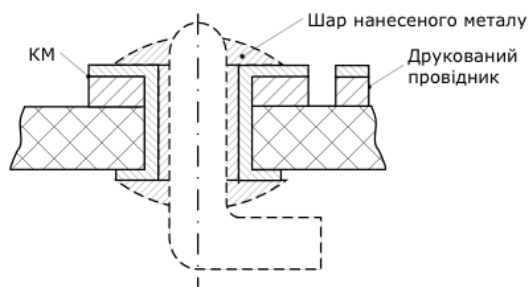


Рисунок 6.5 - Монтажний отвір з металізацією

ОДП виконуються на шаруватій пресованій або рельєфній литій основі без металізації або з металізацією МО. Плати на шаруватому діелектрику прості по конструкції та економічні у виготовленні. Їх використовують для монтажу побутової РЕА, в силовій електроніці (БЖ), в н/ч пристроях техніки зв'язку.

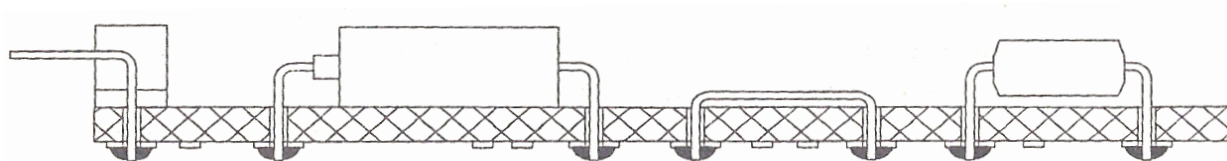


Рисунок 6.6 - Плата з встановленими в отвори компонентами

Нагадаю, що загально-прийнято рахувати першим (верхнім) шаром той, на якому розташовані компоненти. При двосторонньому розміщенні елементів за верхній приймається шар, на якому знаходиться з'єднувач або інші пристрої зовнішньої комутації (монтажні контакти, колодки, плати з'єднувальні і т.д.).

МО - є отвір (металізований), призначений для закріплення виводів дискретних елементів.

Контактний майданчик (КМ) - металізована частина монтажного простору, що має електричний контакт з друкованим провідником та забезпечує можливість електричного з'єднання дискретного елемента з друкованим монтажем.

Для ПМ КМ – металізована ділянка, що має електричний контакт з друкованим провідником та забезпечує електричне з'єднання дискретного елемента з друкованим монтажем.

З ціллю збільшення щільності монтажу використовують ДДП - двосторонні друковані плати (ДДП). ДДП мають провідний рисунок на обох сторонах діелектричної основи

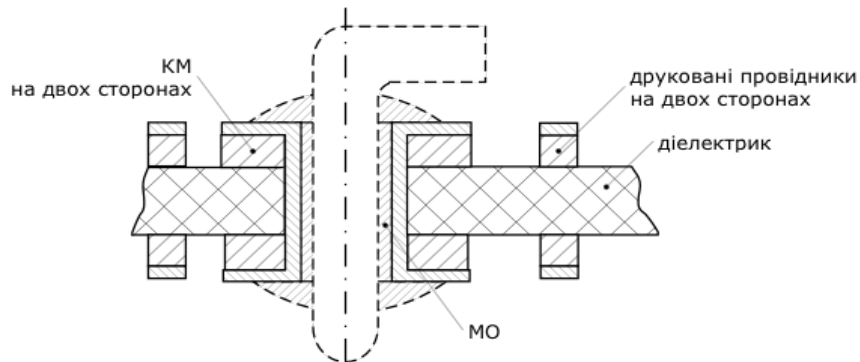
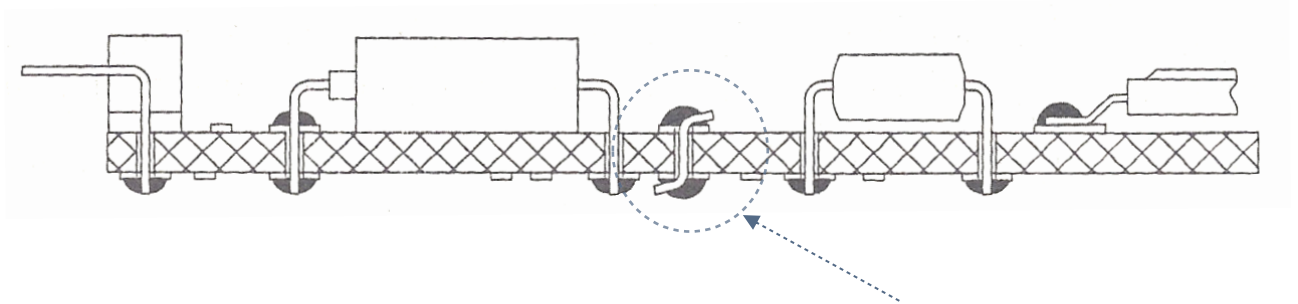


Рисунок 6.7 - Двостороння друкована плата

Елементи встановлюються на одній - лицьовій стороні діелектричної або металевої основи. Електричний зв'язок шарів друкованого монтажу виконується за допомогою металізації отворів.

ДДП мають високу трасувальну здатність, високу надійність з'єднань, забезпечують високу щільність монтажу елементів та хорошу механічну міцність їх кріплення, використовуються для **поверхневого монтажу (ПМ)**.

без металізації отворів



зверніть увагу, яким чином виконується перехід на іншу сторону плати

Рисунок 6.8 - Приклад ДДП без металізації отворів

з металізацією отворів

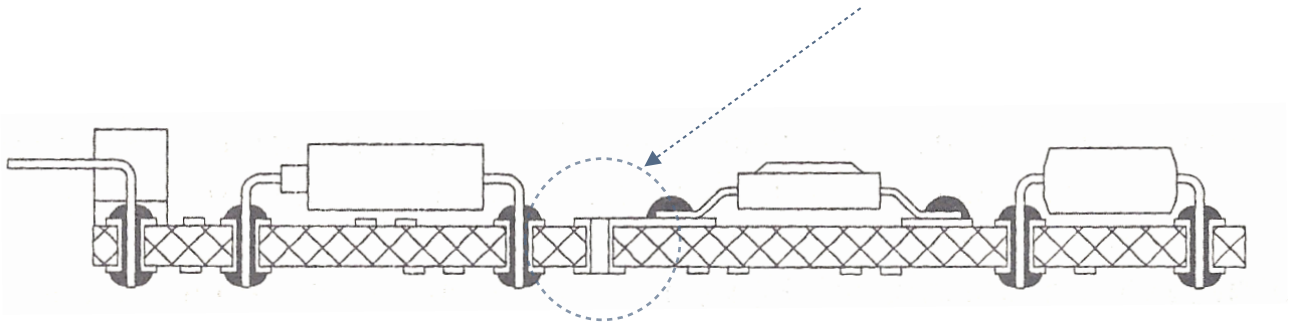


Рисунок 6.9 - Приклад ДДП з металізацією отворів

Розглянемо коротко поняття **металевої основи**. Металева основа використовується для спецапаратури. Це новий рівень друкованих плат.

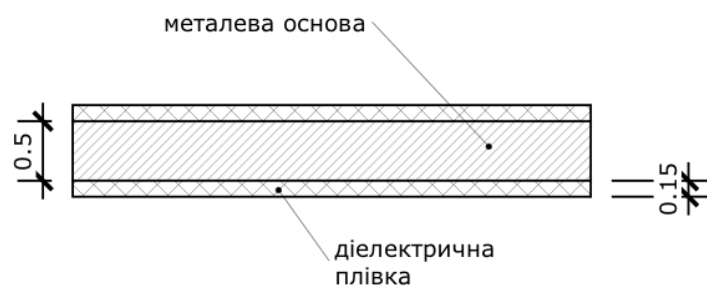


Рисунок 6.10 - Друкована плата на металевій основі

Ці плати прекрасні для поверхневого монтажу. **КМ** наносяться електрохімічним способом. **ЕРЕ** з планарними виводами. Ніяких **ПО** в таких **ДП нема**. Ніяких **МО нема**.

ДПП з металевою основою мають кращий тепловідвід, але потребують нанесення ізоляційного покриття та складні у виготовленні (своя технологія).

Багатошарові друковані плати (БДП)

БДП відрізняються високою трасувальною здатністю та щільністю монтажу елементів. Варіантів виготовлення **БДП** багато, але практичне використання мають два.

Чотирьох-шарові ДП попарного пресування. При виготовленні таких плат використовується технологія **ДДП** з металізацією наскрізних отворів. Ці ДП відносно прості у виготовленні та є самим дешевими з багатошарових плат. Вони мають більш високу трасувальну здібність у порівнянні з аналогічними

двошаровими платами. Часто такі плати використовують у варіанті, коли два шари відводяться для ланцюгів “земля” та “живлення”, а решта - для трасування функціональних ланцюгів.

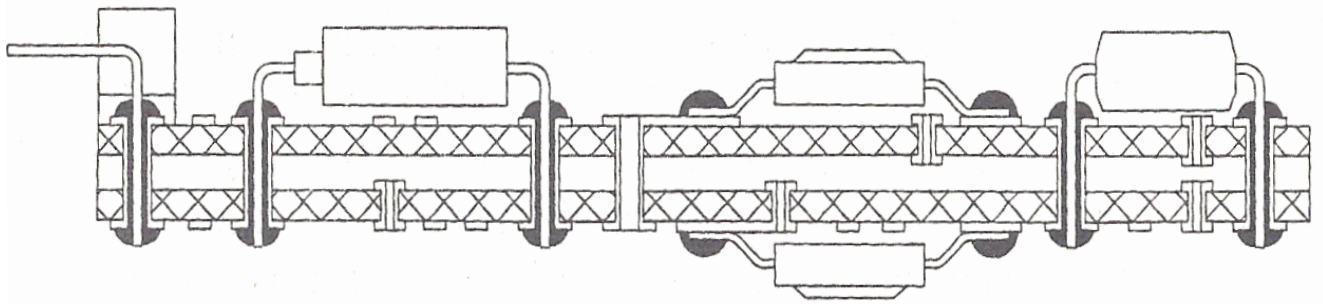


Рисунок 6.11 - Чотирьох-шарова ДП попарного пресування

З появою інших прийомів виготовлення **БДП** технологія попарного пресування стала використовуватися рідко.

Багатошарові ДП з металізацією наскрізних отворів. Дані плати теоретично володіють безмежною трасувальною здатністю та дозволяють монтувати будь-які елементи з однієї або з двох сторін.

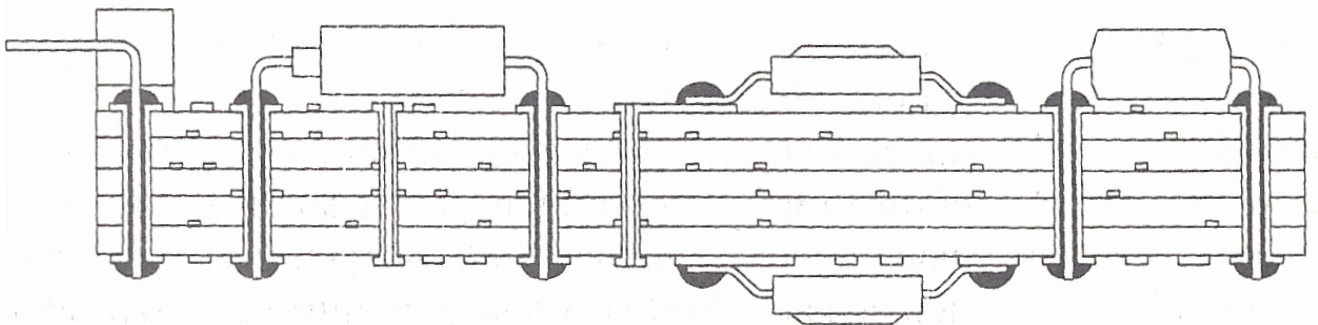


Рисунок 6.12 - Багатошарова ДП з металізацією наскрізних отворів

Вартість **БДП** висока та залежить від кількості шарів та технології. **БДП** часто використовують у високошвидкісній ЕА та там, де потрібно забезпечити мінімальні габарити та вагу.

6.4. Товщина матеріалу основи

Вибір марки та товщини матеріалу основи надає великий вплив на властивості ДП: жорсткість, об'єм, теплопровідність. При виборі матеріалу треба враховувати технологічні потужності виробника ДП.

Наприклад, вітчизняні виробники друкованих плат (ОДП, ДДП, БДП) використовують переважно FR4 з наступними параметрами:

Матеріал	Товщина	Фольга (мкм)
FR4	0.125	18/18 - 35/35 - 00/35
FR4	0.20	35/35
FR4	0.36	35/35
FR4	0.50	18/18 - 35/35
FR4	0.71	35/35
FR4	0.80	18/18
FR4	1.00	35/35 - 18/18
FR4	1.50	18/18 - 35/35 - 00/35 - 00/70 - 70/70
FR4	2.00	18/18 - 35/35
FR4	3.20	35/35

Найбільше розповсюдження отримали $h_{ДП}=0,5; 1,0; 1,5$, які допускають отримати мінімальний діаметр металізованого отвору 0,25; 0,5; 0,75 мм.

Закордонні виробники використовують матеріали із наступного ряду: 0,2 мм; 0,4 мм; 0,6 мм; 0,8 мм; 1,0 мм; 1,2 мм; 1,6 мм; 2,0 мм; 2,4 мм; 2,6 мм; 2,8 мм; 3,0 мм; 3,2 мм. Таким чином, забезпечити виготовлення перехідного отвору розміром від 0,1мм.

6.5. Гнучкі друковані плати (ГДП)

Виготовлення ГДП засновано на використанні в якості вихідного матеріалу багатошарової підкладки, що складається з мідної фольги, клею та гнучкої ізоляційної плівки на основі поліаміду. Цей матеріал широко використовується в електроніці, особливо в апаратурі військового призначення.

Він забезпечує стабільність розмірів плати, має високі електричні характеристики, витримує температуру, необхідну для пайки хвилею.

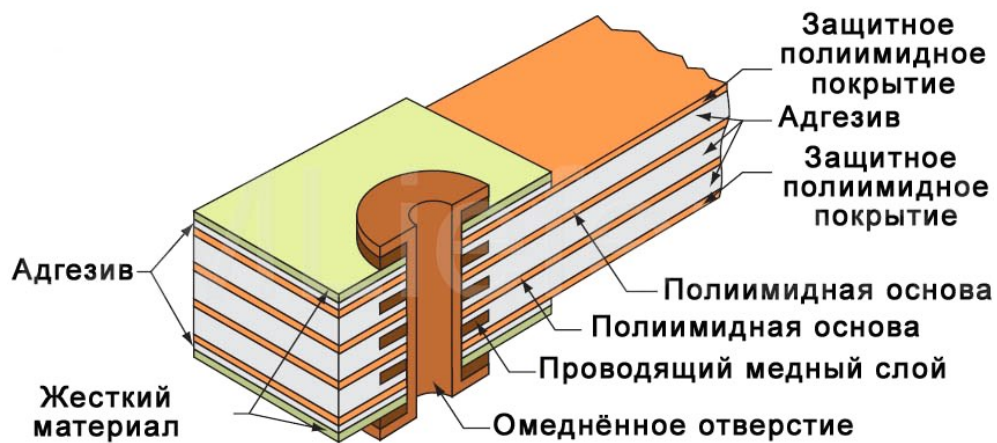


Рисунок 6.13 - Гнучка друкована плата

На тій стороні підкладки, де знаходиться шар міді, витравлюється рисунок елементів друкованого монтажу. Отримана структура може бути використана як друкована плата, як плоский друкований кабель або як їх комбінація, тобто гнучка БДП.

ГДП використовуються в першу чергу у виробках, в яких жорсткі обмеження на об'єм та масу, в літальних апаратах та переносній апаратурі. Наступною перевагою ГДП є її здатність вигинатися більш ніж в одній площині або приймати форму корпусу складної конфігурації (наприклад, циліндричного).

ГДП мають малу товщину. Вона складає від 0.1мм до 0.28 мм. Тоді як товщина широко використовуваних в РЕА жорстких ДП - 1.5мм. Така мала товщина в поєднанні з невеликою питомою масою ізолювальної плівки забезпечує малу масу ГДП.

При проектуванні ГДП треба враховувати особливості трасування на гнучкій частині плати. Найкращий варіант, коли провідники проходять на області, де виконується вигін (на рисунку між пунктирними лініями), паралельно сторонам або з малою кількістю плавних викривлень (Рисунок 6.14).

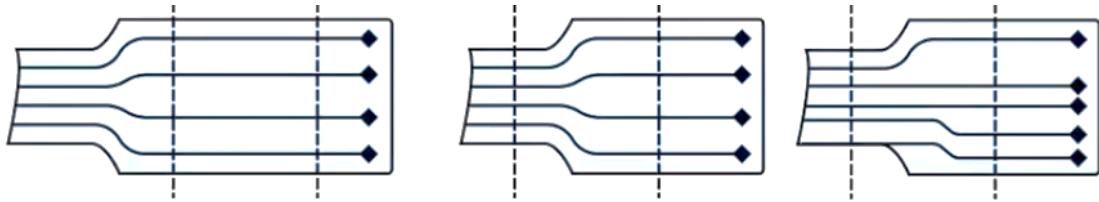


Рисунок 6.14 - Варіанти трасування гнучкої частини ГДП

І завжди для забезпечення цілісності доріжки лінії вигину плати повинні бути перпендикулярні доріжкам, тобто зображене трасування на Рисунок 6.15 категорично заборонено.

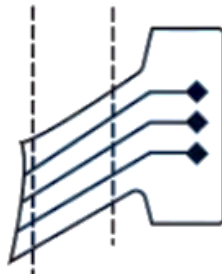


Рисунок 6.15 - Недопустиме трасування ГДП

Слід зазначити, ще одну перевагу ГДП - їх ударостійкість. Вібрації та удари, що привели б до появи тріщин в жорстких ДП, надають слабкий вплив на ГДП або зовсім не впливають на них. Саме по цій причині вони знайшли застосування в апаратурі, що піддається механічним впливам.

Зрозуміло, ГДП мають і свої недоліки. Один з них полягає в тому, що на високих частотах важко забезпечити стабільність характеристичного опору ліній передачі, що утворюється багатошаровою структурою. Другий основний недолік - висока коштовність матеріалу.

Співвідношення трудомісткості виготовлення таке - ОДП, ДДП, БДП 1, 4,

Контрольні запитання

1. Об'ємна ефективність. Визначення, використання
2. Задачі конструювання. Елементи вирішення
3. Типи монтажу
4. Вимоги до електронних збірок
5. Елементи поверхневого монтажу. Переваги та недоліки
6. Чутливість до флуктуації тепла
7. Ефект «гробового каменю». Методи вирішення
8. Класи діелектричних матеріалів для конденсаторів
9. Корпуси конструктивних елементів для поверхневого монтажу
10. Точність установки конструктивних елементів при поверхневому монтажу
11. Види монтажу. Переваги та недоліки
12. Етапи монтажу
13. Типи комутаційних плат
14. Односторонні друковані плати для друкованого монтажу
15. Двосторонні друковані плати для друкованого монтажу
16. Багатошарові друковані плати для друкованого монтажу
17. Гнучкі друковані плати для друкованого монтажу
18. Габаритний критерій
19. Типорозміри. Вимоги до вибору
20. Матеріали основи для друкованого монтажу
21. Класи точності друкованого монтажу. Параметри друкованого монтажу, що регламентуються класами точності
22. Параметри друкованого монтажу

7. ТОПОЛОГІЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ДП

При конструюванні ДП необхідно визначити (оцінити) місце ДВ у всій конструкції РЕА. При цьому ретельно аналізується:

1. Класифікація РЕА по відношенню до впливів (що впливає на РЕА):

- призначення проєктуємого ДВ (в ТЗ є розділ “призначення”);
- місце встановлення (об’єкт встановлення), умови експлуатації;
- кліматичні, механічні, електричні - величини, характер впливів, діапазон (ці дані є в ТЗ на виріб).

2. Аналіз схеми

- особливості та характер вхідного та вихідного сигналів – $U_{вх}$, $U_{вих}$, $f_{такт}$, $\tau_{зам}$, τ_0 параметри пристрою;
- внутрішні джерела нестабільності роботи схеми;
- величина напруги живлення, кількість джерел живлення;
- шляхи можливих паразитних зв’язків та наведень;
- наявність невказаних на схемі КЕ (контрольні гнізда, екран та ін.);
- координати центру ваги ДВ (стійкість до механічних впливів) та багато іншого.

Перш ніж приступити до конструювання конкретної друкованої плати, необхідно вирішити ряд конструкторських та технологічних питань, від яких багато в чому залежить, які вихідні дані повинні вводитися до програми проєктування друкованої плати. Частина параметрів регламентована державними стандартами та визначається рівнем виробництва. При цьому більшість параметрів ДП встановлюється або розраховується для кожного конкретного проєкту. Однак деякі проєктувальники воліють при розробці друкованих плат користуватися визначеним набором усереднених параметрів, що помітно спрощує розробку, але не завжди забезпечує високі компоновальні характеристики пристрою.

При цьому при конструюванні ДП використовуються чотири головні критерії:

1. габаритний критерій;
2. критерій матеріалу основи;
3. критерій точності ДП;
4. критерій кількості шарів.

Також, враховуються допоміжні критерії - електричні обмеження по паразитним параметрам, теплові обмеження, обмеження по вазі та ін.

7.1. Габаритний критерій

Габаритні розміри ДП зв'язані з розбиттям електричної схеми пристрою на функціонально закінчені частини, тобто числом елементів на платі та кроком їх розташування.

- Максимальний розмір сторін ДП, як ОДП та і ДДП має багато обмежень (фотошаблони, гальванічні ванни, прес обладнання, ...) не повинен перевищувати **380x480мм** для вітчизняних виробників та **620x813мм** для закордонних виробників
- На практиці зазвичай ДП зі стороною до 100 товщин матеріалу діелектрика виготовляють без додаткових деталей, що підвищують їх жорсткість. Чим більше розмірів ДП, тим більше деформації під час механічних впливів
- Співвідношення розмірів сторін ДП для спрощення компоновання вузлів та уніфікації розмірів ДП рекомендується вибирати **1:1, 2:1, ...** але **не більше 4:1**. Розмір кожної сторони ДП повинен бути кратним **2.5мм** при довжині **100мм**, **5мм** при довжині **350мм**, **10мм** при довжині більше **350мм**.
- З ціллю максимального використання фізичного об'єму конструкції РЕА та спрощення її виготовлення доцільно розробляти ДП прямокутної форми.

Для кожного конкретного пристрою розміри ДП залежать від конструкції, що також диктує і форму плати, точки кріплення, заборонені зони для встановлення компонентів та для прокладання друкованих провідників.

Тому підхід проектування, коли визначається площа ДП, на якій можна фізично розмістити необхідну кількість ЕРЕ, а потім компонуються пристрій в цілому - рахується нормальним. Далі розробляється корпус, вибираються елементи кріплення, місця розташування роз'ємів і т.д.. І тільки після цього всього конструюється ДП. Цикл довготривалий і трудомісткий, але він забезпечує високі показники виробу.

Використовуються стандарти на розміри ДП в дюймовій та метричній системі МЭК 917 (IEC 917-2-2).

Є ряд вітчизняних стандартів, що також містять дані про розміри ДП та несучих конструкцій, причому окремі типорозміри плат співпадають з приведеними стандартами (ОСТ 4.010.020-83 Плати друковані. Основні розміри.)

Більш номенклатуру розмірів ДП містить ГОСТ 23752 - 86. Слід відмітити, що в цьому стандарті суворої системи розмірів немає.

ДП малого розміру з рекомендованого ряду вигідно поєднують такі переваги:

1. малі деформації ДП (зміна форми);
2. хороший теплообмін в центрі ДП;
3. висока ремонтпридатність.

Слід зауважити, що переваги малих ДП є недоліками великих ДП

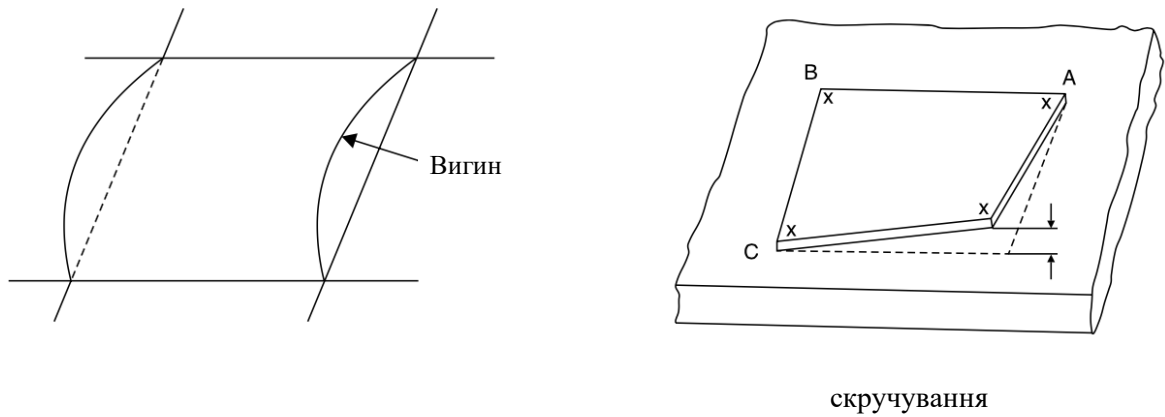


Рисунок 7.1 - Деформації друкованих плат

Деформації друкованих плат виникають в наслідок шарової структури основи ДП, яка змінює свої розміри при нагріві та охолодженні. Зрозуміло, що чим більше розміри ДП, тим більше деформації, тим більша небезпека обриву провідників, обриву паяних контактів при температурних впливах.

Температурні деформації ДП відносять до повільно діючих механічних впливів.

Величина вигину ОДП та ДДП зі співвідношенням сторін **1:2 = 1.5мм** та **1:4 = 2мм** на 100мм довжини (максимальна довжина > 400мм тому великі зміни лінійних розмірів).

Погіршення теплообміну з центру ДП спостерігається зі збільшенням розмірів ДП. Це викликано збільшенням шляху теплостоку до краю ДП, де виконується основний контакт ДП з корпусом блоку.

Ремонтопридатність великих по розміру ДП пов'язана з ускладненням пошуку несправностей, а при *агрегатному* ремонті (заміна ДВ, що вийшли з ладу) - достатньо висока вартість (*в наш час в основному агрегатний ремонт*).

З вищесказаного не можна робити висновок, що великі по розміру ДП можна замінити декількома малими, тому що в цьому випадку явно проявляються два негативні моменти:

1. Збільшується число роз'ємних з'єднань, число міжблочних з'єднань, паяних, зварних з'єднань і т.д., що неминуче веде до зменшення надійності (*пам'ятаєте інтенсивність відмови роз'ємів та паяних з'єднань?*).
2. Потребує більше арматури кріплення, ускладняється складання, збільшується вага.

Тому в технічно обґрунтованих випадках рекомендовані типорозміри ДП допускають збільшення сторін або однієї зі сторін. В останній час усе це особливо очевидно, коли на ДП збираються функціонально закінчені вузли (ПК).

Таким чином, у загальному випадку типорозміри ДП вибираються виходячи з **двох вимог: функціональної та технологічної**.

Функціональна вимога визначається щільністю монтажу $N^{\text{пров}} / \text{см}^2$, що залежить від розмірів ДП, розмірів корпусів ІС та їх кількістю, складністю схеми.

Технологічна вимога визначається обмеженням типорозмірів з точки зору технологічних можливостей виробництва, фотолітографії, механічної міцності.

Таким чином, виходячи з вимог на габаритні розміри виробу, вказаних в ТЗ, орієнтовно визначають типорозмір ДП для ДВ - КЕ першого ієрархічного рівня. При цьому бажано використовувати уніфікований ряд розмірів ДП (ОСТ 4.010.020-83 Плати друковані. Основні розміри).

Основні розміри ДП (Н - висота та В - ширина) вибираються зі стандарту **МЕК 297** (ІЕС 297-3) на дюймові конструкції та метричний: **МЕК 917** (ІЕС 917-2-2), що замінює дюймовий. Ці стандарти встановлюють типорозміри так званих **європлат**. Кількість можливих значень розмірів та їх поєднання багатоманітне.

До 100мм можна застосовувати будь-які розміри кратні 2.5мм; до 350мм - кратні 5мм та вище 350мм кратні 10мм. Однак найбільший розмір повинен бути не більше 820мм в будь-якому напрямлені. Встановлюється також обмеження на співвідношення сторін - не більше 1:4.

Вихідним типорозміром прийнято $H \times V = 100 \times 100 \text{мм}$. Висота 100мм відповідає висоті передньої панелі блоку або комплектного корпусу - 132.5мм.

В останні роки широке розповсюдження отримали типорозміри європлат **100x160мм (С)** та **233.4x160мм (F)** .

Розвиток типорозмірів ДП в основному відбувається за рахунок зміни розміру В, що дозволяє їх використовувати в одному типорозмірі блоку.

Наприклад **Intel Corp** використовує ДП 305x171мм S=521 см²; 305x216мм S=659 см²; 305x271мм S=837 см².

Таким чином, пункти 1-3 характеризують габаритний критерій вибору конструкції ДП.

7.2. Критерій матеріалу основи

Фізико-механічні властивості матеріалів повинні задовольняти вимогам, що встановлені ТУ та забезпечувати виготовлення ДП у відповідності до типових техпроцесів.

1. Для виготовлення ДП використовують шаруваті пластики та литі діелектрики плаковані (фольговані) електролітичною мідною фольгою товщиною **5; 18; 35; 40; 50 мкм**. Чистота міді не менше **99.5%**, а шерехатість поверхні не гірше **0.4мкм**. Фольговані діелектрики (або «ламінати») виготовляються у вигляді листів товщиною **0.127 – 3,2мм**.

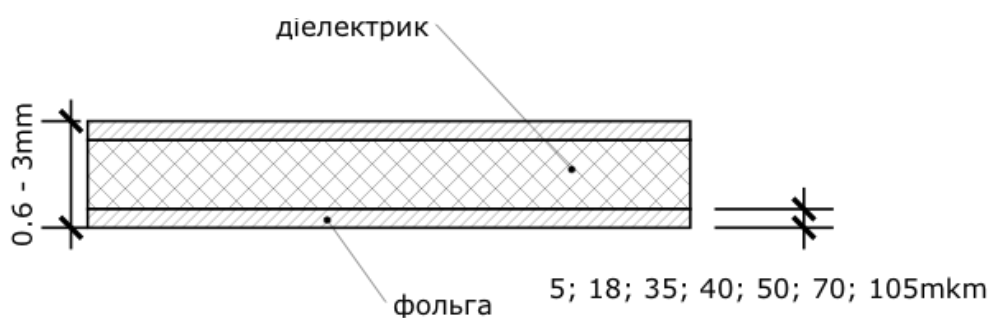


Рисунок 7.2 - Друкована плата

2. Шаруваті пластики повинні володіти високою хімічною та термічною стійкістю з малим волого-поглинанням (**0.2 - 0.8%**), витримувати температуру до **260 °С** на протязі **5-20с** (температура пайки до 300 °С).

3. Поверхневий опір діелектриків при 40 °С та відносній вологості 93% на протязі 4 діб повинно бути **не менше 10⁴ МОм**. Питомий опір діелектриків повинен бути **не менше 5·10¹¹ Ом·см**.

4. Висока міцність зчеплення фольги з основою: **смуга шириною 3мм від 12 до 15МПа**.

5. Термостійкість матеріалу **протягом 1000 год**.

6. Діапазон робочих температур: **-60 °С ... +150 °С**.

В якості основи в шаруватих пластиках використовується **гетинакс**, що являє собою спресовані шари електроізоляційного паперу, які просочено фенольною смолою.

Склотекстоліти, що являють собою спресовані шари склотканини, які просочено епоксіфенольною смолою.

В якості матеріалів основи ДП використовують листові електротехнічні та листові фольговані матеріали, кераміку, гнучку фторопластову плівку.

Найбільше розповсюдження при виготовленні ДП в РЕА отримав фольговий склотекстоліт, інколи, гетинакс.

Фольговий склотекстоліт представляє собою пластик, виготовлений з склотканин та облицьований з однієї чи з обох сторін мідною фольгою.

Основні матеріали для виготовлення ДП наведені в Таблиця 7.1

Таблиця 7.1 Основні матеріали ДП

Матеріал	Марка	Товщина		Тип ДП
		Фольги, мкм	Матеріалу, мм	
Гетинакс фольговий	ГФ-1-35(50) ГФ-2-35(50) ГОСТ 10316-78	35(50)	1-3	ОДП, ДДП
Склотекстоліт фольговий	СФ-1-35(50) СФ-2-35(50)	35(50)	0.5-3	ОДП, ДДП

Матеріал	Марка	Товщина		Тип ДП
		Фольги, мкм	Матеріалу, мм	
	ГОСТ 10316-78			
Склотекстоліт фольговий підвищеної теплостійкості	СФПН-2(1)-35(50)	35(50)	1-1.5	ДДП
Склотекстоліт теплостійкий фольговий	СТФ-1(2)	35	0.13-3	ДДП, БДП, ГДП
Діелектрик фольговий для БДП	ФДМ-1(2)	5, 18 - внутр. 35 - зовн.	0.25-0.35	БДП, ГДП
Діелектрик гнучкий фольговий	ФДГ	35(50)	0.06-0.12	ГДП
Фторопласт фольговий	ФФ-1	50	1.5-4.5	ОДП
Кераміка алюмооксидна	22ХС		0.2-2.0	ОДП, ДДП, БДП
Алюміній армований плівкою				ДДП

Таким чином, матеріали, що використовуються в якості основи для ДП повинні мати високі електроізоляційні властивості, достатню механічну міцність і бути стійкими до кліматичних впливів. Цим критеріям відповідають електротехнічні матеріали:

- склотекстоліт;
- кераміка;
- гнучка фторопластова плівка;
- ситал;
- сапфір та ін..

Шаруваті пластики. В наш час встановилися такі категорії (індекси) шаруватих матеріалів: **FR** (*Flame Resistant* - опірність до займання), **G**.

Матеріали з індексом FR-1 володіють найбільшою горючістю, а FR-5 найменшою. Матеріал G-10 та G-11 володіють особливими характеристиками.

Параметри матеріалів ДП з категоріями FR та G наведено в Таблиця 7.2.

Таблиця 7.2 Параметри матеріалів ДП

Категорія	Компоненти	Коментар
FR-1	Папір, фенольна композиція	Пресування та штамповка при кімнатній температурі. Високий коефіцієнт гігроскопічності
FR-2		Можливе використання для односторонніх друкованих плат побутової техніки. Невисокий коефіцієнт гігроскопічності
FR-3	Папір, епоксидна композиція	Розробки з хорошими механічними та електричними характеристиками
FR-4		Прекрасні механічні та електричні властивості
FR-5		Висока температурна міцність при підвищених температурах. Відсутність займання.
G-10	Склотканина, епоксидна композиція	Високі ізоляційні властивості. Найбільш висока міцність склотканини. Низький коефіцієнт гігроскопічності.
G-11		Висока міцність на вигин при підвищених температурах, висока опірність розчинникам.

*Не використовуйте друковану плату категорії **FR1**. Є багато прикладів використання друкованих плат **FR1**, на яких є ушкодження від теплового впливу потужних компонентів. Друковані плати цієї категорії більш схожі на картон.*

FR4 часто використовують при виготовленні промислового обладнання, в той час як **FR2** використовується у виробництві побутової техніки. Ці дві

категорії стандартизовані в промисловості, а друковані плати **FR2** та **FR4** часто підходять для більшості задач. Але інколи неідеальність характеристик цих категорій примушує використовувати інші матеріали. Наприклад, для понад-високочастотних задач (пристроїв) в якості матеріалу друкованих плат використовується фторопласт та навіть кераміка. Однак, чим екзотичніший матеріал ДП, тим вище може бути ціна.

При виборі матеріалу друкованої плати звертайте особливу увагу на його **гігроскопічність**, оскільки цей параметр може надати сильний негативний ефект на бажані характеристики плати - поверхневий опір витoku, високовольтні ізоляційні властивості (пробої та іскрення) та механічну міцність. Також звертайте увагу на **робочу температуру**. Ділянки з високою температурою можуть зустрічатися в несподіваних місцях, наприклад, поряд з ВІС, перемикачів яких виконується на високій частоті. Якщо такі ділянки розташовані безпосередньо під аналоговими компонентами, підвищення температури може позначитися на зміні характеристик аналогової схеми.

Після того, як матеріал друкованої плати обраний, необхідно визначити товщину фольги друкованої плати. Цей параметр в першу чергу вибирається виходячи з максимальної величини викликаного струму. По можливості необхідно уникати використання дуже тонкої фольги.

Товщина фольги: 5 мкм (1/8oz); 9 мкм (1/4oz); 18 мкм (1/2oz); 35 мкм (1oz); 40мкм; 50мкм; 70; 105 мкм.

Цей параметр в першу чергу обирається виходячи з максимальної величини протікаючого струму.

Товщина ДП обирається з наступного ряду значень: 0,125;0,2; 0,36; 0,5; 0,71; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм

Гнучкі ДП: 0.1 - 0.5 мм

У вітчизняній практиці найбільше розповсюдження отримала товщина 1.0мм та 1.5мм, що допускає отримання металізованих отворів в основі відповідно 0.32мм та 0.48мм (мінімальний допустимий діаметр). Якщо товщину

ДП обирають з точки зору жорсткості друкованого вузлу, то потрібно враховувати, що жорсткість пропорційна товщині в кубі.

ГФ - X - YY - ZZ

- * X - кількість шарів
- * YY - товщина фольги, мкм
- * ZZ - товщина ДП, мм

Для виготовлення ДДП обираємо **СФ2 - 35 - 1.5 ГОСТ 10316-78** або **FR402 - 35 - 1.5**

Товщина ОДП та ДДП напряму залежить від матеріалу, що використовується. Цей матеріал обирається конструктором з міркувань механічної міцності та жорсткості. Якщо вихідним матеріалом є фольговий діелектрик, то товщина ДП визначається саме нам.

Основні імпортні матеріали для виготовлення ДП та БДП представлено в Таблиця 7.3.

Таблиця 7.3 Імпортні матеріали для виготовлення ДП

Марка	Коментар	Товщина, мм	
		підкладки	фольги
Izola Duraver-E-CU 104	Склотекстоліт фольговий. Тип FR4.	0.860	0.018 - 0.035
		0.510	
		0.460	
		0.250	
		0.200	
		0.150	
		0.125	
Izola Duraver-E-104-ML Prepreg 1080 05 AT 01	Склотканина прокладна. Тип FR4	0,063	-

Матеріали відомих фірм: Izola (Німечина), Молдавізоліт (Молдова, м.Тираспіль), Мосізоліт (Московський завод ізоляційних матеріалів) та ін.. Ці підприємства пропонують FR4 товщиною від 0.8 до 3.2мм.

Вибір конструкції ДП є важливим фактором, що визначає механічні характеристики пристрою в цілому. Для виготовлення ДП використовують матеріали різного рівня якості. Потрібно знати основні параметри матеріалу: питомий опір та діелектричну постійну.

7.3. Метал як основа ДП

Цікавість до заміни традиційного склотекстоліту листовим металом помітно зростає останнім часом. Листовий метал як основа ДП - сплав алюмінію, міді, вуглецевої сталі. Плата товщиною 0.8мм представляє собою лист металу товщиною 0.5мм з полімерною плівкою, товщиною 0.15мм, що накатана з обох сторін.

Використання металевої основи дозволяє значно збільшити теплопровідність ДП при значному збільшенні потужності, яка виділяється елементами схеми. Якщо тепловий опір ДП зробити достатньо малим, то охолодження можна виконувати методом теплопровідності, тому що вдається отримати малий тепловий опір на шляху ДП - корпус пристрою.

Таблиця 7.4 Теплопровідність матеріалів основи ДП

Матеріали	Мідь	Алюміній	Сталь низьковуглецева	Склотекстоліт
Теплопровідність, Вт/мК	320	200	50	0,2

З Таблиця 7.4 слідує, що теплопровідність склотекстоліту дуже мала - в 1000 разів нижче чим в алюмінію та майже в 2000 разів менше ніж у міді.

По цій причині в ДП з склотекстоліту тепловий потік, в основному, розповсюджується по металу провідного рисунку. Тому, щоб збільшити R_T провідного рисунку, спеціально змінюють його форму та сам рисунок. Для того, щоб він виступав у ролі тепловідвідних шин (згадайте посадкове місце для SOT-

89 - корпусу для транзисторів поверхневого монтажу). При цьому елементи за допомогою теплопровідної мастики кріпляться до цих шин або припаюються.

Тому радикальним методом зниження R_T є заміна склотекстоліту основи на алюмінієвий (металевий) сплав. При цьому R_T зменшується в 3-4 рази.

Металева система тепловідводу (металічна основа) забезпечує працездатність РЕА в температурному режимі $-55 - +95$ С.

Згадайте - кожен ДВ знаходиться в металевому корпусі, що збільшує жорсткість та служить тепловідводом.

Плати з металу та з металевим корпусом збільшують питоме розсіювання потужності в 13 разів по зрівнянню з платами з склотекстоліту. Це означає, що на такій платі можна розташувати набагато більше тепловідвідних елементів схеми не використовуючи радіатори, а також виключити примусове повітряне охолодження.

(Л.Н.Преснухин, В.А.Шахнов. Конструирование электронных машин и систем)

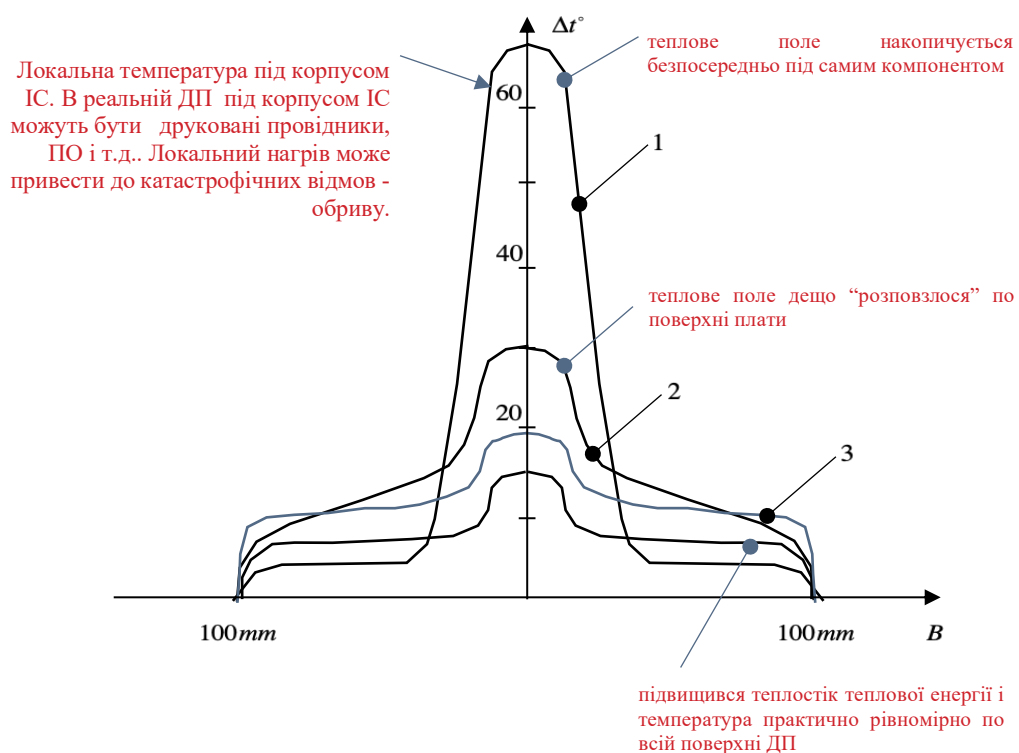


Рисунок 7.3 - Розподілення теплового поля по ширині ДП від точкового джерела в залежності від матеріалу основи

- де 1 – склотекстоліт;
 2 – сталь;
 3 - алюмінієвий сплав;

Розподілення Δt° :

1. висока температура сконцентрована біля джерела, а решта поверхні має низьку температуру;
3. температура дещо збільшилася по всій поверхні ДП, але чітко виражений максимум ще присутній;
4. температура практично рівномірно розподілена по всій поверхні ДП, причому температура ДП нижче, чим у другому випадку.

7.4. Критерій точності друкованого монтажу

Точність виготовлення друкованої плати залежить від комплексу технологічних характеристик та з практичної точки зору визначає основні параметри елементів друкованої плати (друкованого монтажу).

Згідно ГОСТ 23.751-86 передбачено п'ять класів точності друкованої плати. В конструкторській документації на ДП повинно бути вказано відповідний клас, що обумовлений тільки рівнем технологічного оснащення виробництва. Тому вибір класу точності завжди пов'язаний з конкретним виробництвом. *Спроба вирішити цю задачу в зворотньому порядку може призвести до того, що Ваш проєкт не буде реалізований.*

Параметр	Клас точності				
	1	2	3	4	5
Ширина друкованого провідника $b_{пр}, \text{мм}$	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10

Параметр	Клас точності				
	1	2	3	4	5
Відстань S між краями сусідніх елементів провідного рисунку, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Гарантований поясок $b_{по}$, мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,03
Відношення $f_{дг}$ номінального діаметру найменшого металізованих отворів до товщини друкованої плати, мм	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20
Щільність монтажу	мала	середня	середня	висока	висока а

Виготовлення ДП п'ятого класу потребує використання унікального високоточного устаткування, спеціальних (як правило, коштовних) матеріалів, безусадної фотоплівки і навіть створення в виробничих приміщеннях "чистої зони" з термостатуванням. Таким вимогам відповідають далеко не кожне виробництво. Але ДП невеликого розміру можуть виконуватися по п'ятому класу на устаткуванні, що забезпечує виробництво плат четвертого класу. Комплексно вирішити всі ці проблеми вдається тільки на реальному виробництві.

ДП четвертого класу випускаються на високоточному устаткуванні, але вимоги до матеріалів, обладнання та приміщень нижче ніж для п'ятого класу.

Друковані плати третього класу найбільш розповсюджені, оскільки з однієї сторони забезпечується достатньо щільність трасування та монтажу, а з іншої для їх виробництва потребується звичайне спеціалізоване обладнання.

Для викреслювання взаємного розташування друкованих провідників, елементів монтажу (КМ, МО, ПО) використовують координатну сітку КС в

прямокутній системі координат з кроком **2.5мм (основний)**, **1.5мм (додатковий)**, **0.625 (для особливо малих елементів)**.

Всі отвори, в тому числі і для кріплення розташовуються у вузлах КС, тобто необхідна заготовка креслення ДП з КС.

Часто схемотехнічне проєктування, а відповідно і технічне проєктування, виконується на імпортній елементній базі. За кордоном прийнята інша класифікація ДП по рівню точності.

Параметр	Рівень					
	0	1	2	3	4	5
Ширина провідника та зазор, мм	0,20	0,15	0,10	0,08	0,05	0,05
Крок проєктування, мм (зовнішні шари)	1,25	0,63	0,63	0,50	0,50	0,25
Крок проєктування, мм (внутрішні шари)	0,63	0,63	1,00	1,00	0,50	0,25
Крок виводів, мм (планарні)	0,63	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25
Крок виводів, мм (матричні)	2,50	1,25	1,00	1,00	0,50	0,50

Тут регламентуються не тільки конструктивні параметри, але й крок трасування, що фактично зв'язує рівень виробництва з параметрами друкованих плат та степінь інтеграції елементної бази.

Обраний клас точності необхідно перевірити на норми допустимих робочих напруг для провідників, що лежать в одній площині, а також по щільності струму (з розрахунку граничної допустимої щільності струму в друкованому провіднику 20 А/мм^2 та допустимим втратам на постійному струмі).

7.5. Критерій кількості шарів

Вибір конструктором кількості шарів означає вибір між ОДП, ДДП та БДП для конкретної поставленої перед ним задачі. Можливості трасування ростуть вздовж ряду **ОДП-ДДП-БДП**, але зростає і трудомісткість та економічні затрати. При цьому слід враховувати, що на мікромініатюризацію РЕА впливає не тільки сучасна SMD елемента база, але й малогабаритні БДП.

Таким чином, вибір числа шарів ДП в кожному конкретному випадку виконує конструктор з точки зору технологічності конструкції та вище зазначених особливостей.

7.6. Рекомендації по конструюванню ДП

Правила конструювання ДП розроблені стандартами, що керуються технічними матеріалами і т.д.. Нижче наведені основні з правил конструювання ДП та ДВ:

- площа монтажного простору визначається кількістю розміщуваних компонентів, їх габаритними розмірами, кроком розташування по координатним вісям, габаритними розмірами корпуса;
- співвідношення розмірів сторін плати для спрощення розміщення елементів рекомендується: 1:1, 2:1, 3:1 і т.д.;
- з метою максимального використання монтажного простору та спрощення її виготовлення доцільно розробляти ДП прямокутної форми;
- вибір матеріалу ДП та методів її виготовлення суттєво впливає на конструкторсько-технологічні, електричні, експлуатаційні та техніко-економічні характеристики розроблюваної ДП;
- для розташування друкованих провідників, контактних майданчиків, монтажних та перехідних отворів і т.д. використовують координатну сітку в прямокутній системі координат. **Крок координатної сітки** може дорівнювати **1,25мм** (основний) та при розробці ДП визначається **класом**

точності, кроком виводів ІС. Початок КС рекомендовано встановлювати в лівому нижньому куті ДП;

- по краям плати слід передбачити технологічну зону шириною, що дорівнює не менше товщини ДП. Розташування елементів друкованого монтажу в цій зоні не допускається. Всі отвори, контактні майданчики повинні розташовуватися у вузлах КС. Якщо крок виводів ІС не співпадає з кроком КС, то монтажний майданчик під перший вивід потрібно розташовувати в вузлі КС та використовувати ще додаткову КС;
- для правильної орієнтації ІС при їх встановленні на ДП на останній повинні бути передбачені “ключі” , що визначають положення першого виводу ІС;
- усі навісні елементи слід розташовувати паралельно лініям КС. Відстань між їх корпусами повинна бути не менше 1мм, а відстань між ними по торцю - не менше 1.5мм;
- на ДП потрібно передбачити орієнтуєчий паз (або зрізаний лівий нижній кут або технологічні базові отвори), необхідний для правильної орієнтації під час монтажу та налаштуванні ДВ;
- друковані провідники не повинні мати різких перегинів та гострих кутів. Переходи при розгалуженому провіднику або переходи провідника до контактного майданчика необхідно виконувати плавно. Коли провідник повертає на кут 90^0 може виникнути віддзеркалення сигналу. Це виникає із-за зміни ширини шляху проходження струму. Кут перегину повинен відповідати 45^0 та 90^0 . Ширина друкованих провідників визначається допустимим струмом (щільність струму) ширину друкованих провідників рекомендовано витримувати однаковою по всій довжині.

Ширина траси в вершині куту збільшується в 1.41 рази, що призводить до неузгодженості характеристик ліній передачі, особливо розгалуженої ємності та власної індуктивності траси.

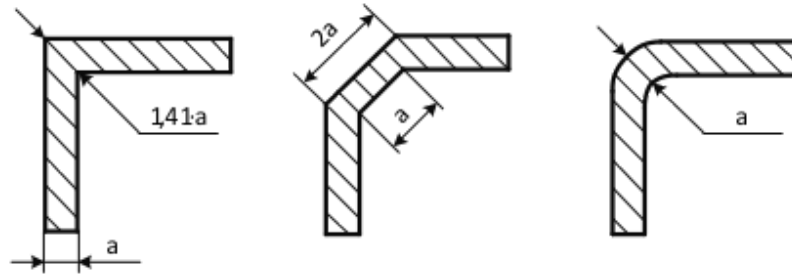


Рисунок 7.4 - Варіанти зміни ширини провідника

Сучасні CAD пакети дозволяють згладжувати кути проведених трас або проводити траси у вигляді дуги. На малюнку показані два кроки покращення форми дуги.

- друковані провідники слід по можливості виконувати мінімально короткими. Прокладати поряд вхідних та вихідних друкованих провідників паралельно один одному не рекомендується щоб уникнути паразитних наведень (зв'язків). Як правило, з ціллю зменшення паразитних ємностей та індуктивностей, друковані провідники прокладають перпендикулярно одне одному на різних сторонах ДП;
- провідники вхідних та вихідних ланцюгів повинні прокладатися в першу чергу та повинні бути мінімально короткими;
- потенціальні провідники (шина живлення та шина “землі”), по яким протікають сумарні струми всіх ланцюгів, слід робити максимально широкими

Таким чином, процес топологічного конструювання ДП включає конструювання ДВ, при якому вирішуються задачі розташування КЕ та трасування друкованих провідників.

Пам'ятайте, що плата буде виготовлена з використанням того технологічного процесу, який потрібен для відтворення самого вузького провідника, неначе трасування всієї плати складається з таких вузьких провідників. Наявність вузьких провідників потребує більшої обережності, збільшує об'єм контрольних операцій та підвищує вартість плати.

8. КОНСТРУЮВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛУ

Давайте визначимося, що таке друкований вузол (ДВ). ДВ є *першою складною багатоелементною складальною* одиницею (ДВ - перший рівень ієрархії) РЕА, що об'єднує множину елементів електричної схеми функціонального вузлу. Ці елементи повинні бути не тільки електрично з'єднані між собою в складні сполучення, але й закріплені механічно, щоб протидіяти механічним впливам під час експлуатації. Крім того, з'єднання елементів повинні забезпечувати використання групових технологічних операцій.

Конструктивна закінченість та ідентичність технології виготовлення незалежно від функціонального складу та призначення ДВ однієї РЕА, визначає загальні для цих ДВ конструктивні особливості та загальні правила для конструювання. Топологічне конструювання ДВ включає розташування дискретних компонентів на робочій поверхні ДП та трасування з'єднань між выводами, згідно схеми.

Рисунок топології розробляється для однієї з типів друкованої плати (ДП): ОДП, ДДП, БДП.

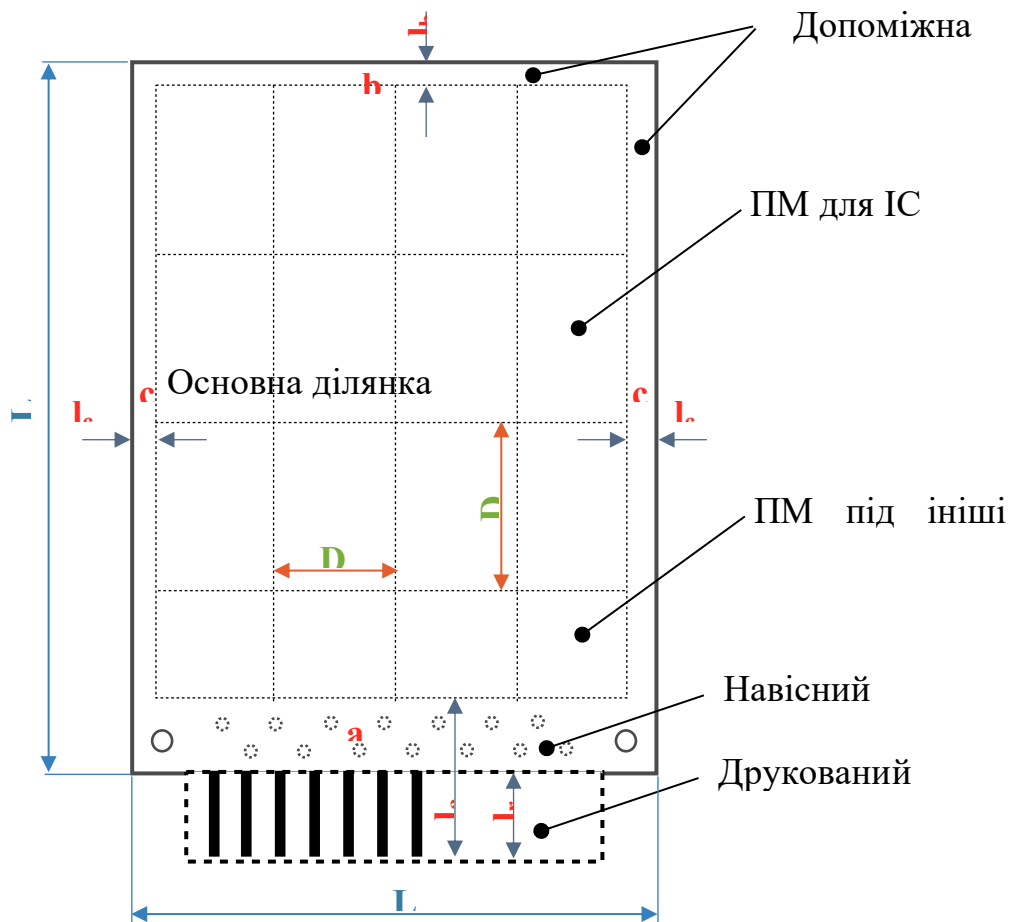


Рисунок 8.1 - Приклад розбиття ДП

Основа ДВ - прямокутна (може бути довільної форми, в залежності вимог до конструкції) ДП (з одно або двостороннім друкованим монтажем або БДП), на поверхні якої (з однієї або обох сторін) кріплять всі або необхідні деталі - ІС, роз'єми, ручки, фіксатори, контрольні гнізда і тому подібне.

Поверхню ДП поділяють на дві ділянки:

- *основна* для монтажу ЕРЕ (ІС) та інших дискретних компонентів;
- *допоміжна* - для монтажу контрольних гнізд, роз'єму, ручки та інших.

В залежності від типу використовуваного роз'єму *форма* ДП може бути:

- *плата прямокутна* (загальний випадок) - таким чином, готують відповідні монтажні отвори або контактні майданчики (для планарних роз'ємів) для встановлення роз'єму;



Рисунок 8.2 - Навісний роз'єм

- плата з друкованим роз'ємом

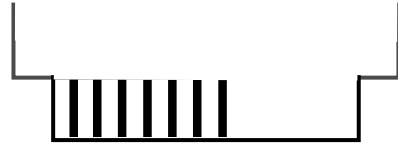


Рисунок 8.3 - Друкований роз'єм

Допоміжна ділянка розташована по краям вздовж контуру плати поділяють на під-ділянки: a , b , c .

Основну ділянку умовно поділяють на зони, в кожній з яких знаходяться ПМ для ІС (КЕ). Координати зони задають цифрами та буквами. Тобто положення кожної ІС на ДП має відповідні координати. Буквено-цифрове позначення компонентів можуть витравлятися на платі разом з рисунком друкованого монтажу або наноситись фарбою.

Розміри зони визначають число розташування ІС по координатним вісям.

Максимальне число ПМ на ДП визначається

$$N_{max} = n_x \cdot n_y \quad (8.1)$$

де n_x , n_y - число ПМ відповідно в строчці та стовпчику, округлюється до цілого числа в сторону зменшення

$$n_x = \frac{L_x - 2 \cdot l_c}{D_x} \quad (8.2)$$

$$n_y = \frac{L_y - (l_a + l_b)}{D_y} \quad (8.3)$$

Можна й так. Знаючи n_x та n_y , а також D_x та D_y , є можливість визначити розміри L_x та L_y .

Розглянемо призначення допоміжних під-ділянок.

Під-ділянка a призначена для розташування на ній роз'єму:

$$l_a \geq (l_r + (2.5 \div 10)mm) \quad (8.4)$$

та визначається типом роз'єму, кількістю задіяних контактів роз'єму.

Під-ділянка b призначена для розташування на ній контрольних гнізд, ручки, з'ємника і т.д. Встановлення КЕ на цій під-ділянці не дозволяється або дуже оснований.

$$l_b \leq (h_{\text{дп}} \div 10)mm \quad (8.5)$$

На допоміжних **під-ділянках c** розташовується маркування, штампи ОТК та інша службова інформація.

$$l_c \leq (h_{\text{дп}} \div 5)mm \quad (8.6)$$

Мінімальна відстань між краєм провідника та краєм плати рекомендується вибирати рівним товщині плати [О: 3].

При виборі числа шарів ДП враховується не тільки число ІС та складність схеми, але й необхідна швидкодія.

При $f_T \leq 1\text{GHz}$ використовують зазвичай ДП на основі FR4. На лицьовій стороні плати розташовують ЕРЕ, сигнальні провідники, шина живлення (ШЖ); на зворотній стороні - сигнальні провідники, шина землі (ШЗ).

На ДП прагнуть розташувати більше число ІС (БДП мають високу щільність монтажу), оскільки це веде до зменшення числа задіяних виводів роз'єму, що приходить на 1 ІС.

По даним ІВМ число виводів ДВ на роз'єм, що приходять на одну ІС, зменшується зі збільшенням кількості монтуємих ІС.

Число ІС	1	5	10	20	40	50	100	250
Число входів/виходів виводів ДВ, що приходяться на одну ІС	16	5	4	35	3	2	1	0,8

Поговоримо про роз'єми [О: 2].

8.1. Друкований роз'єм

В останній час знову набирає актуальність використання **друкованого роз'єму** - в якості вилки в ДДП використовують крайове поле самої плати з друкованими ламелями. Друковані ламелі виконані на обох сторонах ДДП. Допускається одностороннє розташування друкованих контактів. Кількість друкованих ламелей визначається числом контактів розетки, що використовується для сполучення.

Друкований роз'єм має переваги. Роз'єм стає не покупним КЕ, тобто роз'єм не потрібно перевіряти окремо, встановлювати і т.д. як у випадку навісного роз'єму.

Число контактів в роз'ємі визначається наступним чином:

$$N_p = (N_{\text{ел.ланц.роз'єму}} + N_{\text{конт.живлення}}) \times 10\% \quad (8.7)$$

де $N_{\text{ел.ланц.роз'єму}}$ - кількість електронних з'єднань схеми, що виходять на роз'єм;

$N_{\text{конт.живлення}}$ - кількість виводів, що задіяні для підводу живлення для всіх джерел;

≈10% - запас для наступної модернізації.

Контакт, нанесений на відстані 0.79мм не руйнується.

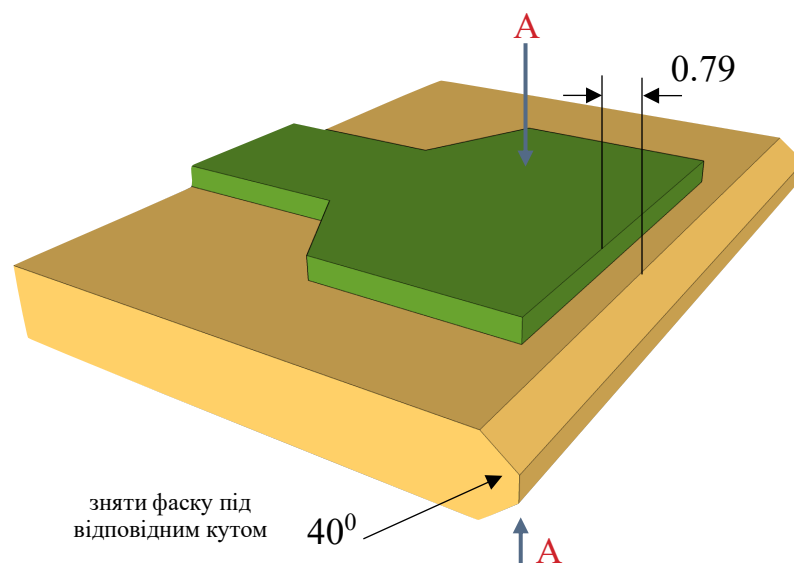


Рисунок 8.4 - Контакт

A-A:

- шар золота;
- гальванічно осаджений нікель;
- гальванічна мідь;
- хімічно осаджена мідь;
- фольга;
- діелектрик.

8.2. Навісний роз'єм

В залежності від числа виводів, призначення, конструкції існує велике різноманіття роз'ємів. Наприклад, дуже часто на дослідних платах використовують штирьові роз'єми типу PLS. Вони можуть на платі встановлюватись у отвори, паятися на контактні майданчики, мати різні розміри, крок, бути прямими або кутовими і т.д..

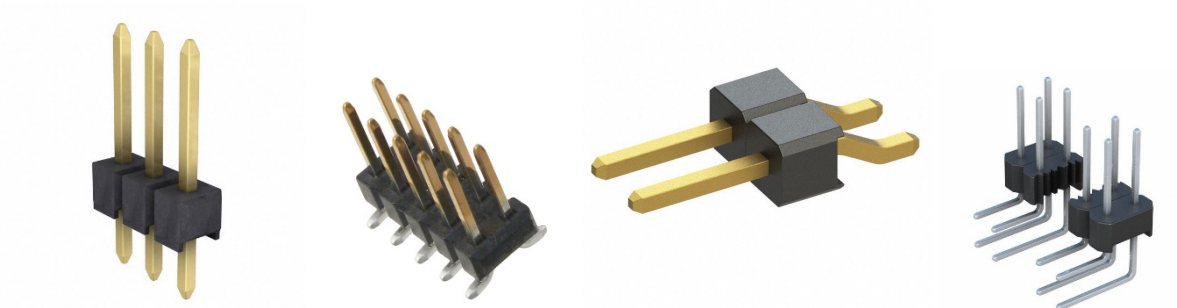


Рисунок 8.5 - Приклади штирьових роз'ємів

При виборі роз'ємі необхідно багато уваги приділяти призначенню роз'ємів. Роз'єми для живлення повинні витримувати необхідне навантаження.



Рисунок 8.6 - Роз'єми

Наприклад, використання звичайних роз'ємів не підходить для сигнальних ланцюгів з високими частотами. У такому випадку краще обирати коаксіальні роз'єми типу SMA, SMP і т.п.



Рисунок 8.7 - Коаксіальні роз'єми

8.3. Відсутній роз'єм на ДП

В не роз'ємних конструкціях зовнішні електричні з'єднання виконуються провідним монтажем та гнучкими кабелями, гнучкими ДП, шлейфами.

Конструктивне оформлення, параметри, позначення роз'ємів дивіться відповідні datasheet, довідники і т.д.

8.4. Складання друкованих вузлів поверхневого монтажу (SMT)

Типи SMT (surface mounted technology) збірок

В електронній промисловості існує шість типів SMT збірок. Кожному з цих типів відповідає свій порядок виробництва. Тип збірки вибирається по мінімальному числу технологічних операцій, тому що кожна технологічна

операція підвищує вартість виробництва. Існує спеціальний стандарт, в якому регламентуються основні типи збірок, що розбиті на класи.

SMT- та IPC- документація по поверхневому монтажу на плати **IPC-7070, J-STD-013.**

Наступні **класифікаційні типи** вузлів поверхневого монтажу:

- **Тип 1.** Компоненти що монтуються встановлюються тільки на **верхню** сторону ДП;
- **Тип 2.** Компоненти що монтуються встановлюються на обидві сторони плати.

Кожен тип в свою чергу розбивається на **6 класів:** А, В, С, Х, Y, Z

- **Клас А** – тільки компоненти, що монтуються в отвори (through-hole) – традиційні штирьові компоненти;
- **Клас В** – тільки компоненти поверхневого монтажу (SMD);
- **Клас С** – змішаний: компоненти що монтуються в отвори та компоненти поверхневого монтажу;
- **Клас Х** – комплексно-змішане складання: through-hole, SMD, fine pitch, BGA;
- **Клас Y** – комплексно-змішане складання: through-hole, surface mount, ultra fine pitch, CSP
- **Клас Z** – комплексно-змішане складання: through-hole, ultra fine pitch, COB, Flip chip, TSP

Операції, що використовуються при різних типах складання:

- нанесення пасти та установка SMD компонентів на верхню сторону плати;
- нанесення пасти та установка SMD компонентів на нижню сторону плати;
- нанесення клею та установка SMD компонентів на нижню сторону плати з послідувачим його висиханням;
- автоматичне встановлення DIP компонентів;

- автоматичне встановлення координатних компонентів (наприклад світлодіодів);
- ручне встановлення інших компонентів;
- пайка хвилею припою або пайка інфрачервоним випромінюванням;
- промивання плати;
- ручна пайка компонентів.

Розглянемо більш детально найбільш вживані варіанти розміщення компонентів на платі

Тип 1В: SMT тільки верхня сторона



Рисунок 8.8 - Приклад плати типу 1В

IPC Type 1B. Цей тип не є загальним, тому що більшість розробок потребує DIP компоненти.

Порядок проведення процесу:

- нанесення припайної пасти;
- встановлення компонентів;
- пайка;
- промивання.

Тип 2В: SMT верхні та нижні сторони

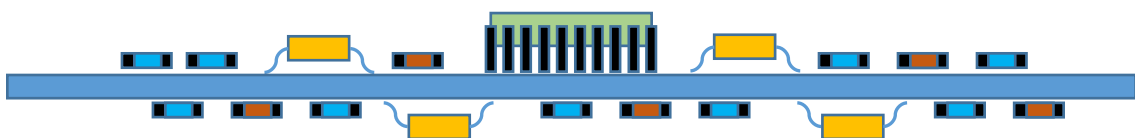


Рисунок 8.9 - Приклад плати типу 2В

IPC Type 2B. На нижній стороні зазвичай встановлюють чіп-резистори та інші малогабаритні компоненти. При установці великих компонентів (наприклад PLCC), підвищуються витрати виробництва за рахунок того, що компоненти, що прикріплюються на нижню сторону повинні установлюватися на спеціальний струмопровідний клей.

Порядок проведення процесу:

- нанесення припайної пасти, встановлення компонентів, пайка, промивка нижньої сторони;
- нанесення припайної пасти на верхню сторону друкованої плати, встановлення компонентів, повторна пайка, промивання верхньої сторони.

Тип 1С. SMT тільки верхня сторона та РТН (Plated Through Hole) тільки верхня сторона

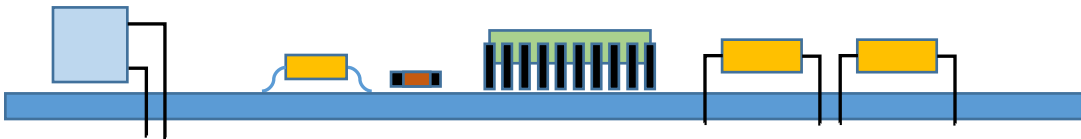


Рисунок 8.10 - Приклад плати типу 1С

Даний метод є змішаною технологією складання. Всі модулі SMT та РТН встановлені на верхній стороні плати. Допускається встановлення деяких компонентів, що монтуються в отвори (РТН) на верхній стороні плати, до розташовані SMT компоненти для збільшення щільності. Даний тип складання називається **IPC Type 1С**.

Порядок проведення процесу:

- нанесення припайної пасти, встановлення, оплавлення, промивка верхньої частини SMT;
- автоматичне встановлення DIP, потім осьових компонентів (резистори, світлодіоди, і т.д.);
- ручне встановлення інших компонентів;

- пайка хвилею PTH компонентів, промивка.

Тип 2С: SMT верхня та нижня сторони або PTH на верхній стороні та на нижній стороні

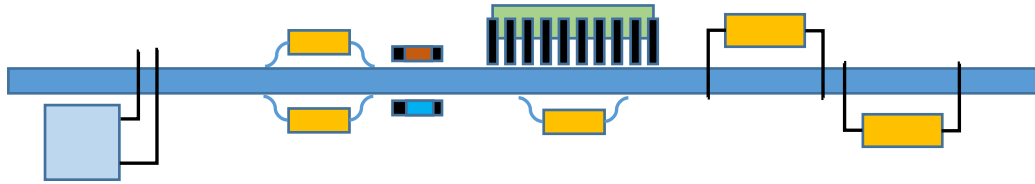


Рисунок 8.11 - Приклад плати типу 2С

Встановлення компонентів що монтуються поверхнево та що монтуються в отвори (DIP) з обох сторін плати не рекомендується із-за високої вартості складання. Ця розробка може потребувати великого об'єму ручної пайки. Також не використовується автоматичне встановлення PTH компонентів із-за можливих конфліктів з SMT компонентами на нижній стороні. Даний тип називається **IPC Type 2С**.

Порядок проведення процесу:

- нанесення припайної пасти, встановлення, пайка, промивання верхньої сторони SMT;
- нанесення спеціального струмопровідного клею через трафарет, встановлення, фіксація SMT;
- автоматичне встановлення DIP та осьових компонентів;
- маскування всієї нижньої сторони PTH компонентів;
- ручне встановлення інших компонентів;
- пайка хвилею PTH та SMT компонентів, промивання;
- ручна пайка нижньої сторони PTH компонентів.

Тип 2С: SMT тільки нижня сторона або PTH тільки верхня

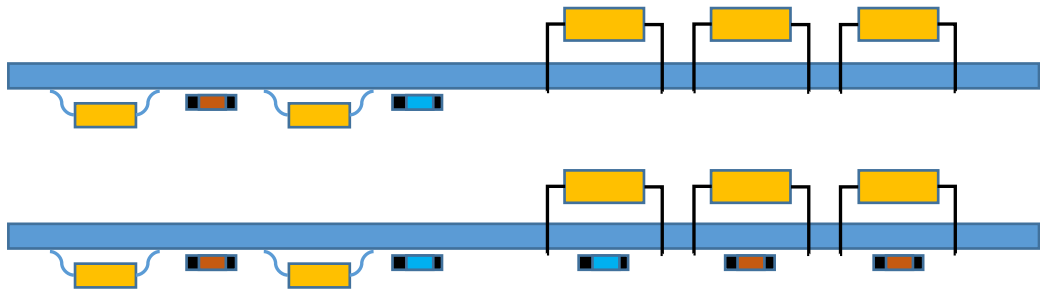


Рисунок 8.12 - Приклад плати типу 2С

Даний тип допускає розміщення поверхневого кріплення з нижньої сторони плати та РТН на верхній стороні. Він також є одним з дуже популярних видів розташування, тому що значно підвищує щільність розташування компонентів. Тип має назву **IPC Type 2C**.

Порядок обробки (РТН компонентів на нижній стороні немає):

- нанесення клею через трафарет, встановлення, висихання клею на нижній стороні SMT;
- автоматичне встановлення DIP, а потім осьових компонентів;
- ручне встановлення інших компонентів;
- пайка хвилею РТН та SMT компонентів, промивання.

Альтернативний порядок обробки (РТН конфліктів на нижній стороні):

- автоматичне встановлення DIP, потім осьових компонентів;
- точкове нанесення клею (дисперсійний метод), встановлення, висихання клею на нижній стороні SMT;
- ручне встановлення компонентів;
- пайка хвилею РТН та SMT компонентів, промивання.

Тип 2У: SMT верхня та нижня сторони або РТН тільки на верхній стороні

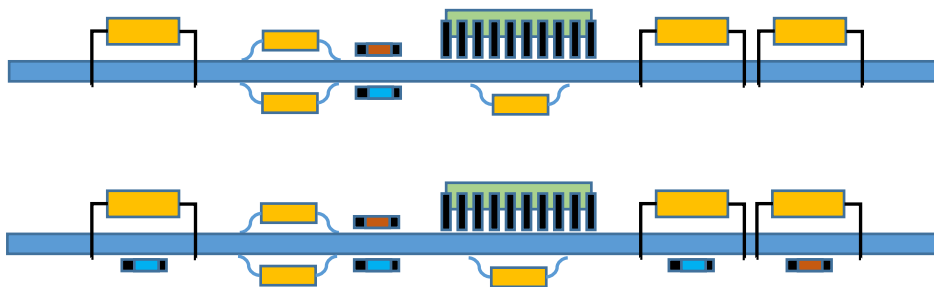


Рисунок 8.13 - Приклад плати типу 2У

Даний тип дозволяє розташовувати планарні компоненти з обох сторін плати, а DIP компоненти тільки на верхній. Це дуже популярний вид складання у розробників, який дозволяє розмістити компоненти з високою щільністю. Нижня сторона SMT компонентів залишається вільною від осьових елементів та ніжок DIP компонентів. Наприклад, неможна розміщувати мікросхеми між ніжками DIP компоненту.

Порядок проведення процесу (без розташування SMT між ніжками PTH компонентів на нижній стороні плати):

- нанесення припайної пасти, встановлення, пайка, промивка верхньої сторони SMT;
- нанесення клею через трафарет, розташування, висихання клею SMT на нижній стороні;
- автоматичне встановлення DIP, потім осьових компонентів;
- ручне встановлення інших компонентів;
- пайка хвилею PTH та SMT компонентів, промивання.

Альтернативний порядок проведення процесу (на нижній стороні плати SMT компоненти розташовані між ніжок PTH компонентів):

- нанесення припайної пасти, розташування, пайка, промивання верхньої сторони частини SMT;
- автоматичне встановлення DIP, потім осьових компонентів;
- точкове нанесення клею (дисперсійними методом), встановлення, висихання клею на нижній стороні плати;
- ручне встановлення інших компонентів;
- пайка хвилею припою PTH та SMT компонентів, промивання.

9. РОЗМІЩЕННЯ КЕ

9.1. Послідовні алгоритми розміщення

Множина методів вирішення задачі розміщення пояснюється бажанням їх розробників створити найбільш сприятливі умови для виконання складних етапів проєктування, вчасності трасування.

В результаті вирішення задачі компоновки буде отримано необхідну кількість та згідно схеми електричної принципової - склад КЕ, що необхідно розташувати в монтажному просторі з числом зовнішніх зв'язків не більше необхідного.

Розміщення елементів на платі, плат в блоці і т.д. є наступною конструкторською задачею.

В будь-якому випадку задача розташування полягає у визначенні місця для встановлення, посадкового місця для КЕ рангу i в КЕ рангу $(i+1)$, щоб оптимізувати деякі критерії або узагальнені цільові функції (згідно ієрархічній моделі).

Критерії оптимізації

Задача розташування (P) передуює задачі трасування (Tr) з'єднань та тісно з ним пов'язана. Тому в якості показників оптимальності P зазвичай використовують *теоретичні та топологічні* критерії, що також використовують при трасуванні.

Виділяють такі *групи критеріїв* розташування:

- конструкторсько-технологічні: метричні та топологічні;
- електромагнітної сумісності: якщо є паразитні зв'язки, то їх необхідно рознести, щоб зменшити їх вплив;
- температурні: якщо елемент з високою температурою корпусу впливає на інший елемент (нагріває його), то їх необхідно рознести.

При цьому розташування виконується з урахуванням основних геометричних форм та розмірів КЕ.

В конструкторсько-технологічних критеріях виділяють метричні та топологічні.

До метричних відносять:

- мінімум сумарної довжини з'єднань;
- мінімальну кількість найбільш протяжних з'єднань;
- мінімально близьке розташування КЕ, що мають найбільше число зв'язків між собою.

До топологічних критеріїв відносять:

- мінімум перетинів з'єднань (мінімальна кількість ПО);
- рівномірне розподілення з'єднань по шарах плати;
- мінімальне число комутаційних шарів (для БДП);
- максимальне число провідників простої конфігурації.

Більшість алгоритмів розташування (P) використовують критерій $\Sigma L_{зв.} = \min$, що прямо або побічно враховує численні вимоги, що пред'являються до розташування елементів та з'єднанням їх виводів, і в той же час простий з математичної точки зору.

Найбільше розповсюдження в алгоритмах P критерію $\Sigma L_{зв.} = \min$ роз'яснюється ще й тим, що зменшення довжин з'єднань покращує електричні параметри пристрою:

- спрощує трасування друкованих провідників;
- понижує працемісткість у проєктуванні ДП;
- критерій простий в реалізації.

До другої групи критеріїв входять:

- мінімальні паразитні зв'язки між елементами та провідниками;
- мінімальний рівень завад.

До третьої групи:

- рівномірне розподілення температурних полів по поверхні ДП (Рисунок 7.3);
- зменшення температурного впливу найбільш нагрітих компонентів на сусідні.

Тоді під сумарною довжиною всіх зв'язків розуміють деяку усереднену довжину, яка визначається як відстань між центрами з'єднаних КЕ (ПМ)

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (9.1)$$

$$L_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (9.2)$$

Сутність послідовного алгоритму складається в наступному.

Спочатку задається або вибирається по повним правилам підмножини (ядро) *розташованих* елементів. Далі аналізується підмножина *нерозміщених* елементів. З підмножини нерозміщених елементів вибирається один елемент, що “відповідає” найкращому розташуванню. Нерозташованих елементів стало на один менше. Потім знову вибирається один нерозташований елемент та розташовуємо його і, таким чином, повторюємо до повного розташування всіх елементів.

Після розташування елементів на ДП вони більше не перерозташовуються (результат аналізується та покращується).

Ці алгоритми прості, знаходять практичне використання, потребують незначні затрати машинного часу.

9.2. Розташування по матриці зв'язку

Дана множина КЕ згідно переліку елементів на принциповій схемі $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.

Дана множина вільних позицій $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$.

Множину ПМ необхідно заготовити згідно КЕ. На монтажній площині необхідно розташувати по матриці зв'язків КЕ по ПМ. Критерієм якості розташування є максимальна зв'язність.

Необхідно перейти від схеми до матриці зв'язку (таблиця з'єднань).

Розміщення КЕ по ПМ може бути будь-яким, тобто можна розміщати спочатку елементи по вертикальним рядам або по горизонтальним рядам. При цьому необхідно пам'ятати, що розміщення по вертикальним рядам є сприятливим для прокладки вертикальних трас.

Тоді розміщення по матриці зв'язку зводиться до послідовного пошуку (вибору) відповідних елементів a_{ij} в $\|A\|$, що відповідають визначеним КЕ та закріпленню їх на відповідних посадкових місцях.

Задача вирішується наступним чином:

- необхідно скласти $\|A\|$ на всю вашу схему;
- коректно спростити схему. Основними при розташуванні є багатовивідні елементи, тобто ми з багато-вимірної матриці $\|A\|_{n \times n}$ видаляємо рядки та стовпчики маловивідних елементів;
- працюємо з $\|A\|$ меншої розмірності, зате вона описує головні елементи схеми.

Матриця зв'язку

$$A = \begin{array}{cccccccc}
 & x_1 & x_2 & \cdots & x_i & \cdots & x_k & \cdots & x_n & \rho(x) \\
 x_1 & 0 & a_{12} & \cdots & a_{1i} & \cdots & a_{1k} & \cdots & a_{1n} & \rho(x_1) = \sum_{i=1}^n a_{1i} \\
 x_2 & a_{21} & 0 & \cdots & a_{2i} & \cdots & a_{2k} & \cdots & a_{2n} & \rho(x_2) = \sum_{i=2}^n a_{2i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\
 x_i & a_{i1} & a_{i2} & \cdots & 0 & \cdots & a_{ik} & \cdots & a_{in} & \rho(x_i) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & 0 & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\
 x_k & a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{ki} & \cdots & 0 & \cdots & a_{kn} & \rho(x_k) = \min(\max) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & 0 & \vdots & \vdots \\
 x_n & a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{ni} & \cdots & a_{nk} & \cdots & 0 & \rho(x_n)
 \end{array}$$

В $\|A\|$ включити елементи з великою кількістю зв'язків (багато-вивідні КЕ). КЕ з малою кількістю зв'язків можна не включати, а розмістити їх по результатам розташування багатовивідних елементів.

- визначити локальну ступінь кожної вершини (елементу);
- вибираємо вершину (елемент) з \max (\min) локальною степінню. Нехай $\rho(x_k) = \min(\max)$;
- x_k елемент розташовуємо в позицію $P_1[x_k \rightarrow P_1]$. Враховуючи те, що x_k елемент має максимальну кількість зв'язків з іншими елементами, то є сенс розмістити його в центрі ДП;
- аналізуємо x_k рядок та вибираємо в ньому елемент $a_{ki} = \max$. КЕ x_i , що відповідає x_i - стовпчику розташовуємо в сусідню вільну позицію $P_2[x_i \rightarrow P_2]$;
- переходимо до x_i рядка та вибираємо в ньому максимальний елемент a_{in} . x_n КЕ розташовуємо в $P_3[x_n \rightarrow P_3]$;

Процес послідовного перебору рядків продовжується до тих пір, поки всі рядки матриці $\|A\|$ будуть переглянуті (вірніше переглянуті (n-k) рядків - тобто завжди залишається останній рядок) та всі КЕ будуть розташовані по ПМ плати. Розташування можна виконувати і по стовпчикам.

Можуть зустрічатися такі варіанти.

Якщо переглядаючи матрицю $\|A\|$ в якомусь рядку є декілька елементів з рівними максимальними значеннями, то можна вибрати будь-який.

Після вибору елемента з $\|A\|$ замість нього записується 0 або запам'ятовується звертання. Тому на кроці t може зустрітися рядок зі всіма нульовими елементами - (частина нулів була, а частину вибрали). В такому випадку необхідно вернутися до попереднього кроку та вибрати інший елемент з меншим але максимальним значенням.

Таким чином, розміщення по матриці зв'язку зводиться до послідовного вибору певних елементів a_{ij} в $\|A\|$, що відповідають певним стовпчикам, і КЕ

закріплюються за ПМ. Вибране ПМ в загальному випадку може бути неоднозначне.

Звертаю вашу увагу, в послідовному алгоритмі визначаються:

- КЕ по $\|A\|$ більш менш обґрунтовано, тобто по зв'язності, тобто по числу зв'язків КЕ з іншими КЕ. Вибираємо максимальну кількість зв'язків;
- а ось вибір ПМ є дещо умовним, тому що розміщений КЕ має чотири сусідні ПМ. В яке розміщувати? Щоб визначити в якому ПМ розташовувати вибраний КЕ необхідно визначити довжину L між розміщеним КЕ та вільним ПМ. $L = \min$ та визначити ПМ.

Тобто в загальному випадку КЕ ми вибираємо обґрунтовано, по числу зв'язків, а ось ПМ вибираємо дещо умовно з ПМ вже розташованого КЕ, а їх може бути декілька. Тоді потрібно визначити для кожного ПМ довжину L та вибрати $L = \min$.

Розташування по матриці зв'язку

Дана схема.

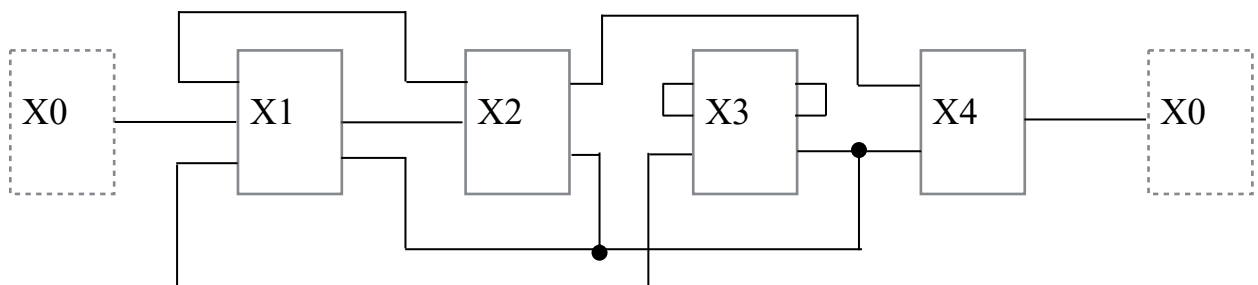


Рисунок 9.1 - Приклад схеми

Проаналізуємо:

1. Будемо роз'єм як КЕ включати до $\|A\|$. Не включаємо роз'єм до $\|A\|$, а розташовуємо на краю ДП. Коли розташуємо всі елементи, тоді врахуємо їх зв'язки з роз'ємом.

Більш правильніше буде, якщо роз'єм включити до $\|A\|$, але розмістити його першим, і КЕ будемо розміщати з урахуванням зв'язків з роз'ємом.

2. Не враховувати зв'язки живлення, тому що кожен КЕ (ІС) має як правило два зв'язки щодо живлення.

Граф схеми буде мати вигляд.

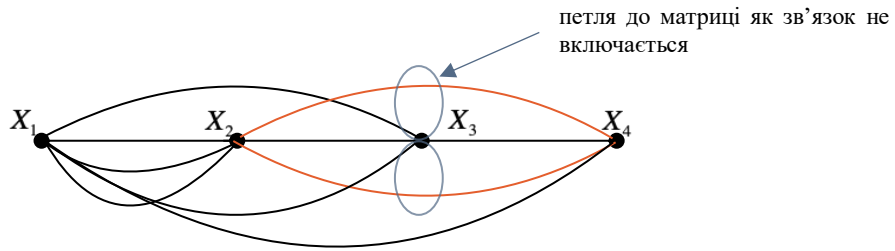


Рисунок 9.2 - Граф схеми

Намалюємо граф по іншому

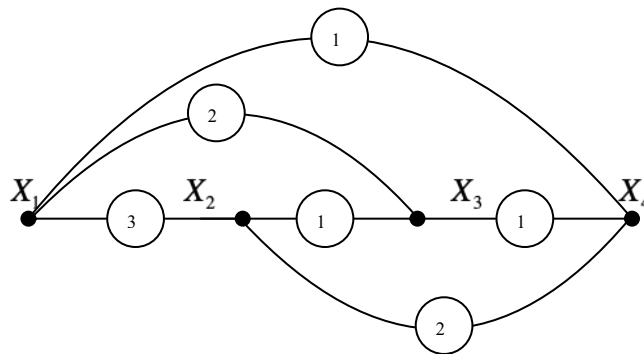


Рисунок 9.3 - Граф схеми

Матриця сформована, як по ній розташовувати - знаємо

	x_1	x_2	x_3	x_4	$\rho(x)$
$A = x_1$	0	3	2	1	6
x_2	3	0	1	2	6
x_3	2	1	0	1	4
x_4	1	2	1	0	4

Контрольні запитання

1. Склад топологічного конструювання.
2. Зони поверхні друкованої плати.
3. Типи роз'ємів з точки зору конструювання друкованих вузлів. Переваги та недоліки.
4. Обчислення кількості виводів роз'єму.
5. Види виконання зовнішніх з'єднань друкованого вузлу.
6. Класифікаційні типи вузлів для поверхневого монтажу.
7. Класи типу вузлів для поверхневого монтажу.
8. Задача розміщення. Ціль.
9. Задача компоновання. Ціль.
10. Сутність послідовного алгоритму розміщення.
11. Критерії оптимізації для вирішення задачі розміщення.
12. Критерії якості при розміщенні елементів по матриці зв'язку.

10. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ДРУКОВАНОГО МОНТАЖУ

Повірочний розрахунок

При конструюванні ДП вирішуються наступні задачі:

- визначаються габаритні розміри, співвідношення сторін, форма ДП, вибирається матеріал, кількість шарів, клас точності друкованого монтажу, метод виготовлення ДП - тобто користуємося розглянутими критеріями;
- визначають мінімальну та максимальну довжину провідників $l_{пр}$ ширина $b_{пр}$ та товщина $t_{пр}$ параметри провідника; діаметри МО, ПО, КМ, розміри КМ для SMD; мінімально допустиму відстань між друкованими провідниками, друкованими провідниками та МО, друкованими провідниками та КМ;
- виконується розміщення КЕ по ПМ з урахуванням їх встановлення;
- виконується трасування друкованого монтажу;
- оформлюється конструкторська документація: текстова - по результатам розрахунків та графічна - по результатам конструювання.

При цьому виконують:

1. конструкторсько-технологічний розрахунок;
2. електричний розрахунок ДП;
3. розрахунок по змінному струму .

Розрахунки виконуються в наданій послідовності в різних комбінаціях.

Конструкторсько-технологічний розрахунок ДП виконують з урахуванням виробничого рисунку провідних елементів, фотошаблону, базування, свердління, експонування, тобто з урахуванням технології виготовлення.

Кожен клас точності друкованого монтажу характеризується Граничними параметрами. Тому при розрахунку використовують граничні значення елементів друкованого монтажу з урахуванням похибки їх виконання.

Таблиця 10.1 Граничні значення основних параметрів друкованого монтажу

Параметр	Клас точності				
	1	2	3	4	5
Ширина друкованого провідника $b_{пр}$, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Відстань S між краями сусідніх елементів провідного рисунку, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Гарантований поясок $b_{по}$, мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,03
Відношення $K_{дт}$ номінального діаметру найменшого з металізованих отворів до товщини друкованої плати, мм	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20
Щільність монтажу	мала	середня	середня	висока	висока

По цим параметрам ви, як спеціалісти, можете визначити необхідний клас точності виконання друкованого монтажу.

Значення параметрів в “вузьких місцях” - це ті значення параметрів, менше котрих ми не маємо право робити для даного класу точності друкованого монтажу (*менше граничних значень*).

Класи точності:

- 2 - не використовується в сучасному виробництві
- 3 - штирьові компоненти (найбільш розповсюджений)
- 4 - багатовиводні SMD (мікромініатюризація).

Зрозуміло, що при розміщенні елементів друкованого монтажу (провідники, КМ, ПО, МО і т.д.) відносно ліній та вузлів КС ми робимо похибки. При виконанні, виготовленні елементів друкованого монтажу ми також робимо похибки. Ці похибки обмежені зверху (знизу) і ми не маємо права перевищувати їх відповідних значень.

Таблиця 10.2 Допустимі похибки виконання елементів друкованого монтажу

Похибка	Позначення	Максимальне значення, мм
Зміщення провідників відносно ліній КС	$\delta_{сп}$	0,05
Розташування отворів (всіх) відносно вузлу КС	δ_o	0,07
Розташування КМ відносно вузлу КС	$\delta_{км}$	0.015
Фотокопії та фотошаблону	$\delta_{фф}$	0,06
Розташування КМ відносно вузлу КС на фотошаблоні	$\delta_{фш}$	0,05

Похибки різні на різних виробництвах та залежать від технологічних можливостей підприємства.

Значення параметрів в цих таблицях повинні бути уточнені на підприємстві згідно технологічного процесу конкретного виробника (обладнання).

Визначаємо параметри основних елементів друкованого монтажу.

- вибір кроку координатної сітки

Один з варіантів послідовності вибору кроку КС наступний:

1. Розглянути усі міжцентрові відстані у використаних компонентах. Наприклад, ряд таких 2,54мм; 1,27мм; 1мм; 0,5мм; 0,4мм;
2. Прибрати з ряду кратні числа. Залишається 1,27мм; 0,5мм; 0,4мм;
3. Кожне число поділити на 2 та провести розрахунок мінімальна відстань між провідником та КМ з МО.

Наприклад, $1,27/2 = 0,635\text{мм}$ - можна провести провідник (з розрахунків), тому $0,635\text{мм}$ залишаємо як ККС

$0,5/2 = 0,25\text{мм}$ - не можна провести провідник (з розрахунків), тому $0,5\text{мм}$ залишаємо як ще одна ККС

$0,4/2 = 0,2\text{мм}$ - не можна провести провідник (з розрахунків), тому $0,4\text{мм}$ залишаємо як ще одну ККС

- Після розрахунку можна сітки $0,4$ та $0,5$ замінити на $0,1\text{мм}$, для зменшення кількості сіток;
 - У результаті отримаємо основну сітку $0,635\text{мм}$ та додаткову сітку $0,1\text{мм}$
- визначимо **мінімально допустимий діаметр металізованого отвору** з урахуванням товщини ДП. Цей параметр важливий для поверхневого монтажу

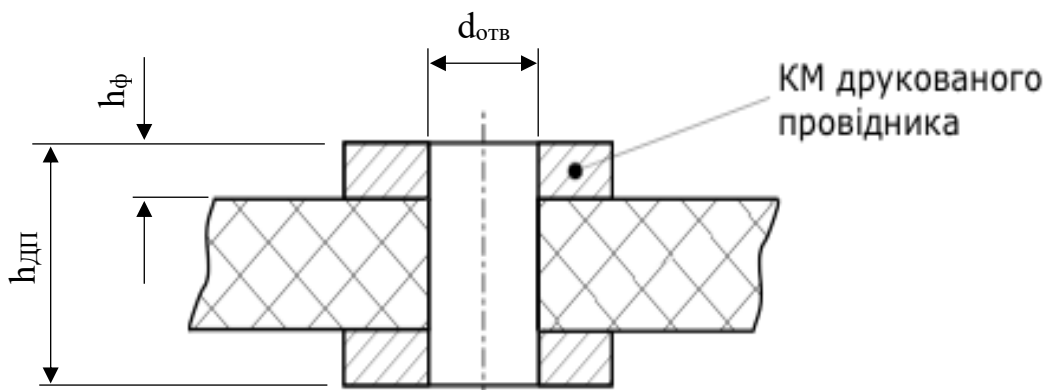


Рисунок 10.1 - Визначення мінімально допустимого діаметру металізованого отвору

$$d_{\text{отв}} \geq K_{\text{дт}} \cdot h_{\text{дп}} \quad (10.1)$$

де $K_{\text{дт}}$ - див. Таблиця 10.1 граничних значень

$h_{\text{дп}}$ - товщина друкованої плати, обирається з ряду допустимих товщин

Нагадую $h_{\text{дп}}$ обирають (розраховувати непотрібно)

Діаметр ПО виконують аналогічно МО. При хорошому оснащенні виробництва можуть бути виконані отвори з діаметром $0,3\text{мм}$.

В якості ПО часто використовуються МО - це добре. Але коли приходить спеціально виготовляти ПО - тоді вони повинні мати мінімальний діаметр.

- діаметр монтажного отвору (МО)

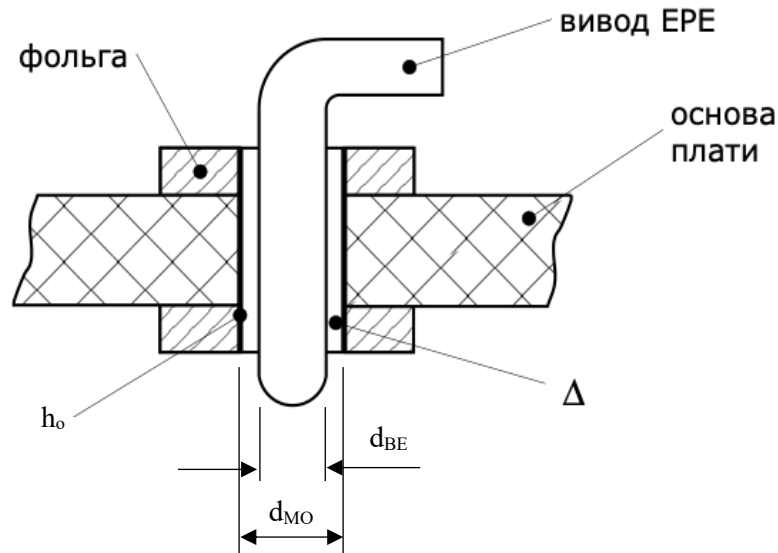


Рисунок 10.2 -Визначення діаметру монтажного отвору

$$d_{MO} \geq d_{BE} + 2(h_o + \Delta') + \delta_o \quad (10.2)$$

де $\Delta = 2 \cdot \Delta'$

d_{BE} - діаметр виводу елемента (див. довідник);

$\Delta = (0,1 \div 0,2)mm$;

h_o - товщина осадженої міді;

δ_o - похибка розташування виводу елемента.

Оскільки обираємо комбінований позитивний метод виготовлення ДП:

$$h_o = h_{ГМ} + h_{ХМ} \quad (10.3)$$

де $h_{ГМ}$ - товщина гальванічно осадженої міді;

$h_{ХМ}$ - товщина хімічно осадженої міді.

Діаметр МО рекомендується вибирати таким чином, щоб різниця між мінімальним значенням діаметру отвору та максимальним значенням діаметру виводу встановленого елемента була в межах (0.2 - 0.4) мм. При цьому

переважно діаметри МО вибираються з ряду 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; ... мм.

- **розміри прямокутного КМ**

Щоб пайка мала вигляд ввігнутої форми галтелі ширина КМ при будь-якому способі пайки зазвичай робиться на 0,2мм більше відповідного розміру елемента (його виводу) - тобто по 0,1мм на кожну зі сторін.

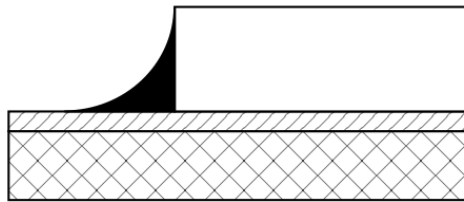


Рисунок 10.3 - Пайка компонента

По довжині площадка повинна виступати з-під елемента. Величина виступу залежить від способу пайки. Якщо пайка хвилею, то цей розмір повинен бути не менш (0,3 - 0,4)мм.

З іншого боку, збільшення розміру більше 1мм недоцільно: припій розтікається та капля великого розміру (катет більше 1мм) не створюються - *це дуже важливо*.

ІС може мати плоский вивід шириною 0,5мм.

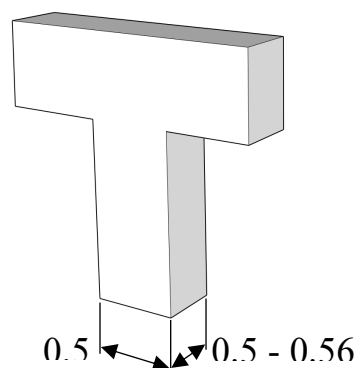


Рисунок 10.4 - Визначення розміру КМ для плоского виводу

Мінімальний діаметр МО для ІС в корпусі типу 2 визначається за формулою [О: 9]:

$$d_{\text{МО}} = d_{\text{В}} + \frac{T_1}{2} + (v_1 + v_2) \cdot \sqrt{2} \quad (10.4)$$

де T_1 - допуск на діаметр просвердленого отвору МО, $T_1 = \pm 0,05$;
 v_1 - похибка розташування отворів, $v_1 = \pm 0,025$ - для аксіальних виводів;
 v_2 - похибка для виводів, $v_2 = \pm 0,05$ - для монтажних отворів.

- визначимо діаметр КМ монтажного отвору з урахуванням похибки та підтравлювання фольги.

КМ знаходиться навколо МО на обох сторонах ДП. Підвищується надійність пайки. Розміщення КМ для SMD елементів визначається параметрами КЕ.

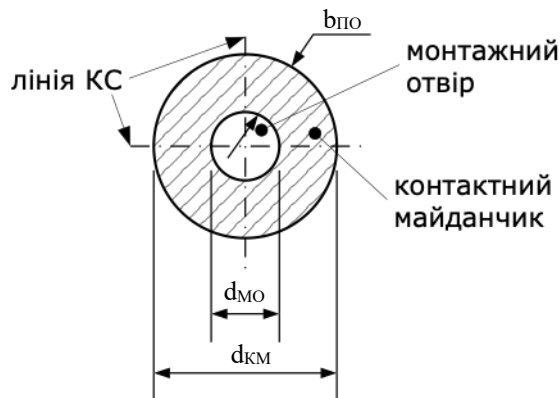


Рисунок 10.5 -Визначення діаметру КМ монтажного отвору

$$d_{\text{КП}} = 2 \cdot \left(b_{\text{ПО}} + \frac{d_{\text{МО}}}{2} \right) + \delta_{\text{КМ}} + \delta_{\text{фф}} + 1,5 \cdot h_{\text{ф}} \quad (10.5)$$

де $\delta_{\text{КМ}}$ - похибка розташування КМ (Таблиця 10.2);
 $\delta_{\text{фф}}$ - похибка фотокопії та фотошаблону (Таблиця 10.2);
 $1,5 \cdot h_{\text{ф}}$ - враховує підтравлювання матеріалу фольги. $h_{\text{ф}}$ береться з позначення матеріалу.

КМ можуть мати довільну форму, але переважно круглу. До КМ підходить звичай провідник, але не більше двох.

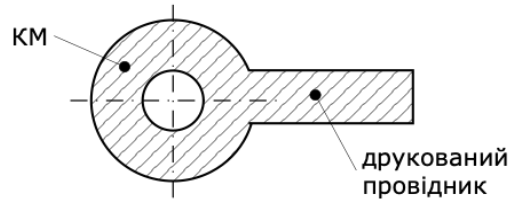


Рисунок 10.6 - Приклад КМ з провідником

Всі отвори на ДП виконуються без зенковки. Допускається у металізованих отворах ДП притуплення гострих кромek та часткового затягування фольги до неметалізованих отворів.

в сторону збільшення

- визначимо **мінімальну ширину провідника** з урахуванням підтравлювання та максимальної міцності зчеплення з основою.

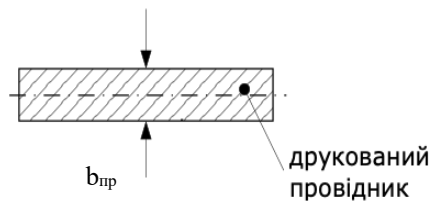


Рисунок 10.7 - Друкований провідник

Провідники виконуються по можливості однакової ширини для вільного місця на всьому протязі.

$$b_{\text{пр min}} = b_{\text{пр}}^{\Gamma} + \delta_{\text{фф}} + \delta_{\text{сп}} + 1,5 \cdot h_{\text{ф}} \quad (10.6)$$

де $b_{\text{пр}}^{\Gamma}$ - вибираємо з Таблиця 10.1, згідно класу точності;

$\delta_{\text{фф}}$ – див. Таблиця 10.1;

$\delta_{\text{сп}}$ - похибка зміщення провідників (Таблиця 10.1).

Звужувати провідники до мінімального значення допускається тільки в вузьких “місцях” на мінімальній відстані.

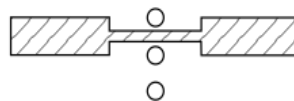


Рисунок 10.8 - Звуження друкованого провідника

Номинальна ширина провідників визначається:

$$b_{\text{пр н}} = b_{\text{пр min}} + |\delta_{\text{T}}| \quad (10.7)$$

де δ_{T} - граничне відхилення ширини провідника в сторону зменшення: $\delta_{\text{T}} = 0,03$ мм для комбінованого позитивного методу (Таблиця 10.3).

Таблиця 10.3 Таблиця відхилень для комбінованого позитивного методу

Тип ДП	Клас точності			
	2	3	4	5
Без метал. покриття	+ 0,1	+ 0,05	+ 0,03	0
	-0,1	-0,05	-0,03	-0,03
З метал. покриттям	+ 0,15	+ 0,1	+ 0,05	+0,03
	-0,1	-0,1	-0,05	-0,03

Одні відхилення збільшують ширину провідників, інші - зменшують.

- **мінімальна відстань між провідником та КМ з МО**

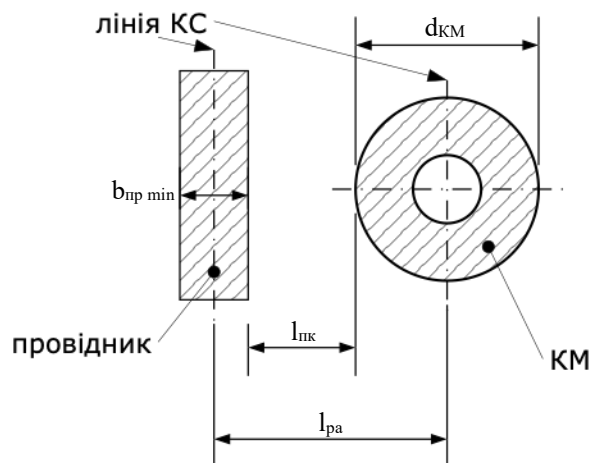


Рисунок 10.9 - Визначення мінімальної відстані між провідником та КМ з МО

$$l_{\text{пк}} = l_{\text{ра}} - \left(\frac{d_{\text{км}}}{2} + \delta_{\text{км}} + \frac{b_{\text{пр min}}}{2} + \delta_{\text{сп}} \right) \quad (10.8)$$

де $l_{\text{ра}}$ - відстань між центрами отвору та друкованого провідника, що є кратним кроку КС. Центр КМ знаходиться у вузлі КС; друкований провідник прокладається по лінії КС.

Для SMD елементів - **аналогічно**.

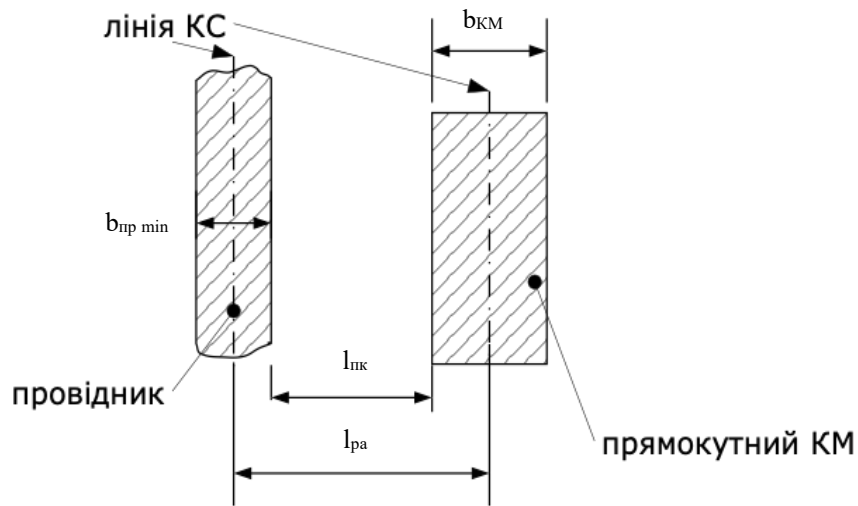


Рисунок 10.10 - Визначення мінімальної відстані між провідником та КМ

$$l_{пк} = l_{ра} - \left(\frac{b_{км}}{2} + \delta_{км} + \frac{b_{пр\ min}}{2} + \delta_{сп} \right) \quad (10.9)$$

Тобто формула аналогічна для провідника та круглого КМ.

- визначимо мінімальну відстань між двома сусідніми КМ

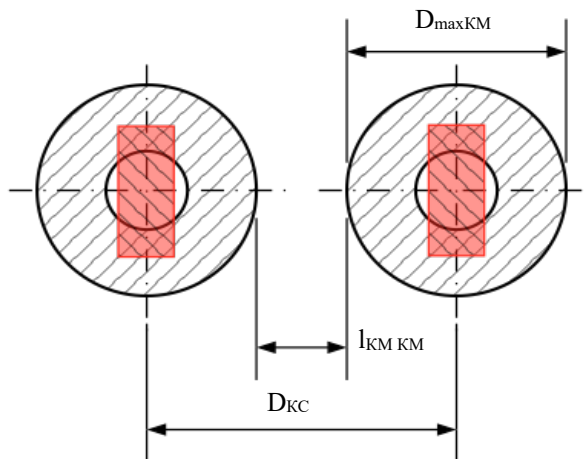


Рисунок 10.11 - Визначення мінімальної відстані між двома сусідніми КМ

$$l_{км\ км} = D_{кc} - (D_{маx\ км} + 2 \cdot \delta_{км}) \quad (10.10)$$

де $D_{маx\ км}$ - коли діаметри КМ рівні. У випадку, коли вони різні, то цей параметр розраховується як сума 1/2 діаметрів КМ, між якими виконується розрахунок.

Для SMD елементів розрахунок є аналогічним (на рис. виділено червоним).

- визначимо **мінімальну відстань між друкованими провідниками - краями**

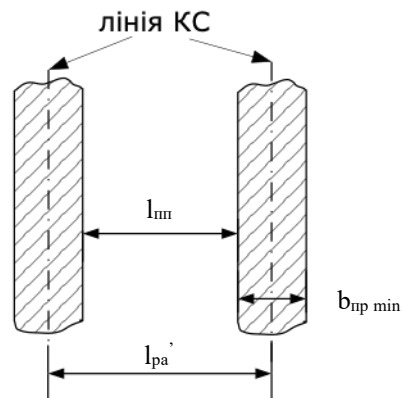


Рисунок 10.12 - Визначення мінімальної відстані між друкованими провідниками

$$l_{пп} = l_{ра} - (b_{пр min} + 2 \cdot \delta_{сп}) \quad (10.11)$$

- визначимо **мінімальну відстань прокладання** n провідників між двома КМ металізованих отворів.

Повинно забезпечуватися при максимальних діаметрах КМ та максимальній ширині друкованих провідників з урахуванням похибки діаметру КМ та ширини провідника ($b_{пр}$).

Аналогічно розрахунки проводяться для поверхневого монтажу.

Якщо між центрами МО розташовується декілька ліній КС, то необхідно перевіряти по кожній з них чи є можливість прокладання провідника.

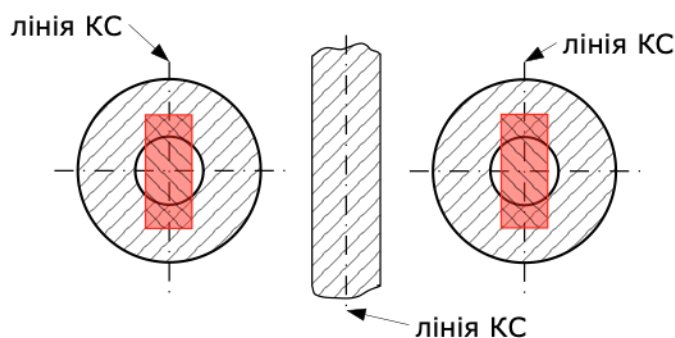


Рисунок 10.13 - Визначення мінімальної відстані прокладання провідників

Провідники під корпусом ІС (для прикладу візьмемо DIP корпус)
При **ККС** (крок КС) = **2.5 мм** під корпусом ІС під корпусом допускається
проведення **двох провідників**, між виводами **не прокладається**.

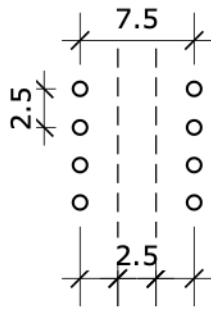


Рисунок 10.14 - Координатна сітка

При $ККС = 1.25$ мм під корпусом ІС допускається проведення 5
провідників. Між виводами прокладається один провідник.

11. НАДІЙНІСТЬ

Надійність - це властивість РЕА (і не тільки) виконувати свої функції, зберігаючи експлуатаційні показники на протязі заданого часу та можливості відновити функціонування втрачених можливостей.

або

Надійність є властивість виробу безвідмовно (справно) працювати протягом заданого часу у відповідних експлуатаційних умовах.

Висока надійність виробів досягається на стадії їх проектування та реалізується в процесі виробництва, зберігання та експлуатації виробів. Недостатньо отримати хороше конструкторське рішення, що забезпечує високу запроєктовану надійність комплектуючих елементів РЕА, необхідна також їх ефективна реалізація на практиці, яку досягають на основі узгоджених наукових, інженерно-конструкторських та організаційних заходів.

За період з 1950р. надійність елементів збільшена на 2-4 порядки, але безперервно йдучий процес ускладнення РЕА потребує подальшого підвищення їх надійності.

Поняття “надійні” та “ненадійні” елементи завжди відносні. Елементи, що надійні в одних умовах та режимах, можуть стати ненадійними в інших.

Надійність подібно будь-якій фізичній властивості проявляється завжди конкретно в часі та безпосередньо зв'язана з умовами навколишнього середовища та режимом роботи елемента.

Задачі теорії та практики надійності можуть вирішуватися двома методами.

Перший метод полягає у вивченні статистичних закономірностей появи відмов елементів. При цьому відмови розглядаються як випадкові події, а всі різноманітні стани елементів зводяться до двох станів - **справний** та **несправний**. Ці стани описуються функціями надійності, що отримані статистичними методами.

Другий метод полягає у вивченні фізико-хімічних властивостей матеріалів, елементів та процесів, що в них відбуваються. Ці властивості та процеси описуються функціями, що відображають фізико-хімічні залежності появи відмов.

Простіше досліджувати сумарний вплив багатьох факторів на стан елементів. Тому в теперішній час найбільш розроблені **статистичні ймовірнісні методи**. Але вони не зв'язують показники надійності безпосередньо з фізичними характеристиками елементів та факторами, що на них впливають.

Актуальною задачею є встановлення прямої залежності основних показників надійності елементів від випадкових факторів:

- фізичних властивостей та параметрів матеріалів і елементів;
- фізико-хімічних процесів зміни їх властивостей та параметрів;
- рівнів електро-експлуатаційних навантажень;
- рівнем зовнішніх експлуатаційних впливів.

Використання ІС дозволяє підвищити надійність РЕА, тому що безвідмовність ІС наблизилася до безвідмовності одного елементу. Тому **збільшення степені інтеграції** ще більш **збільшує** надійність.

Висока надійність роботи комплектуючих елементів досягається:

- правильним вибором типів КЕ з урахуванням особливостей електричної схеми та умов експлуатації;
- проектуванням схем зі зворотними зв'язками (самонастроювальних), компенсуючими та стабілізуючими **дрейф параметрів** елементів;
- введенням навантажувального резервування шляхом зниження рівня електричних навантажень елементів;
- захистом елементів від зовнішніх експлуатаційних впливів.

11.1. Основні поняття теорії надійності

З точки зору теорії надійності, будь-який **виріб** можна *характеризувати* його **властивостями** (параметрами), **технічним станом** та пристосованістю до **відновлення справності**.

Найважливішим комплексом властивостей виробу є його надійність.

Надійністю називають властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах, що відповідають заданим режимам та умовам використання, технічного обслуговування (ТО), зберігання та транспортування.

Надійність включає в себе наступні властивості:

- безвідмовність;
- довговічність;
- збереженість;
- ремонтпридатність.

Справним станом виробу називають такий стан, при якому він відповідає всім вимогам, що встановлені ТУ (технічними умовами). Якщо виріб не відповідає хоча б одному з вимог ТУ, то він знаходиться у **несправному стані**.

Якщо виріб знаходиться в стані, при якому він здатен *виконувати задані функції*, зберігаючи значення заданих параметрів визначених ТУ, то він знаходиться в **працездатному стані**.

Непрацездатним станом виробу називається стан, при якому значення хоча б одного параметру не відповідає ТУ.

Поняття **справності** ширше поняття **працездатності**. Виріб може бути несправним (*погнули кожух корпусу, ...*), але працездатним. *Справні* вироби завжди працездатні.

Відновлюваний виріб - виріб у випадку виникнення відмови підлягає відновленню у розгляданій ситуації.

Відмова - це подія, що полягає в порушенні працездатності виробу.

Кількісні параметри надійності характеризуються **комплексом показників** або **одиничним показником**, тому що при визначенні надійності апаратуру поділяють на *невідновлювану* та *відновлювану*, то відповідно невідновлювана та відновлювана апаратура характеризується різними показниками.

До першої відмови вся апаратура однакова, а потім відновлення - можемо / не можемо.

Невідновлювана РЕА характеризується такими показниками:

- щільність розподілення часу безвідмовної роботи - $f(t)$;
- ймовірність безвідмовної роботи - $P(t)$;
- ймовірність відмови - $Q(t)$;
- інтенсивність відмов - $\lambda(t)$;
- середній час напрацювання до першої відмови – $T_{\text{ср}}$;

На практиці достатньою характеристикою надійності визначається $\lambda(t)$ та $T_{\text{ср}}$.

$\lambda(t)$ визначається експериментально випадковим чином. З виробів, що виготовляються, вибирається партія виробів в кількості N_0 штук, встановлюється час випробовування - t . Встановлюються проміжки часу Δt , в яких буде перевірятися працездатність виробів. буде якась кількість виробів працездатних та що вийшли з ладу - не працездатних.

Якщо в досліджений час t_x буде N_x працездатних виробів, то $n_x = N_0 - N_x$, що вийшли з ладу.

Дослідна статистична **ймовірність безвідмовної роботи** визначається:

$$P^* = \frac{N_x}{N_0} \quad (11.1)$$

Дослідна статистична **ймовірність відмов** визначається

$$Q^* = \frac{N_0 - N_x}{N_0} = \frac{n_x}{N_0} \quad (11.2)$$

де P^* , Q^* - характеризують частоту. Відповідно в даному досліді випробуванні та є оцінками відповідних математичних ймовірностей.

Математичні ймовірності характеризують не окрему вибірку, а всю генеральну сукупність виробів, що випускаються.

Інтенсивність відмов визначається:

$$\lambda(t) = \frac{dQ^*}{dt} \cdot \frac{1}{P^*} \quad (11.3)$$

і представляє собою ймовірність відмов виробів, що випробовуються в одиницю часу при умові, що до моменту t відмов не було. Для випробовування були завідомо вибрані всі справні вироби.

Таким чином, по результатам статистичних випробувань інтенсивність відмов в загальному випадку визначається наступним чином:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} \quad 1/\text{год} \quad (11.4)$$

де $N(t)$ та $N(t + \Delta t)$ - кількість виробів працездатних до моменту t та $t + \Delta t$ відповідно.

Δt - тривалість інтервалу випробовування

Залежність $\lambda(t)$ для раптових (1) та поступових (2) відмов має наступний вигляд:

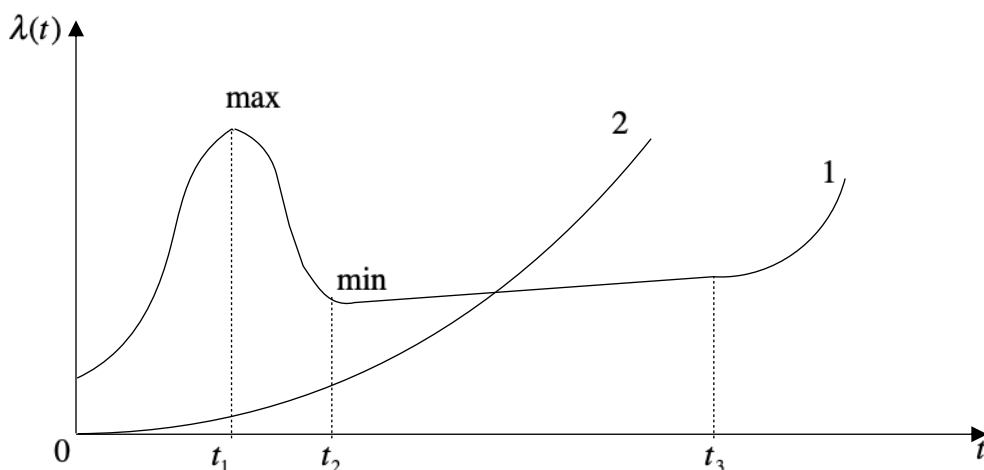


Рисунок 11.1 - Залежність $\lambda(t)$

$[0-t_2]$ - час напрацювання (вигорає все зайве). Для цього проміжку $\lambda(t)$ змінюється в широких межах.

$[t_2-t_3] - \lambda(t) \approx const$ та відповідає мінімальному значенню. Цей проміжок часу відповідає нормальній роботі виробу з найвищою надійністю.

з t_3 $\lambda(t)$ різко росте, що пов'язано зі старінням та зносом деталей

Розрахунок надійності виконується для проміжку $[t_2-t_3]$, якому відповідає експоненціальний закон щільності розподілення напрацювання до відмови.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (11.5)$$

Ймовірність безвідмовної роботи, тобто ймовірність того, що не буде відмови в межах заданого напрацювання

$$P(t) = 1 - \int_0^{\infty} f(t) dt \quad (11.6)$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (11.7)$$

$$Q(t) = 1 - P(t) \quad (11.8)$$

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} \quad (11.9)$$

Відновлення РЕА характеризується такими показниками надійності:

- параметр потоку відмов – $w(t)$
- напрацювання на відмову – T_0
- напрацювання на збій – $T_{сб}$
- ймовірність безвідмовної роботи – $P(t, \tau)$
- середній час відновлення – T_v
- коефіцієнт технічний іспитів – $K_{т.і}$
- коефіцієнт готовності - K_r

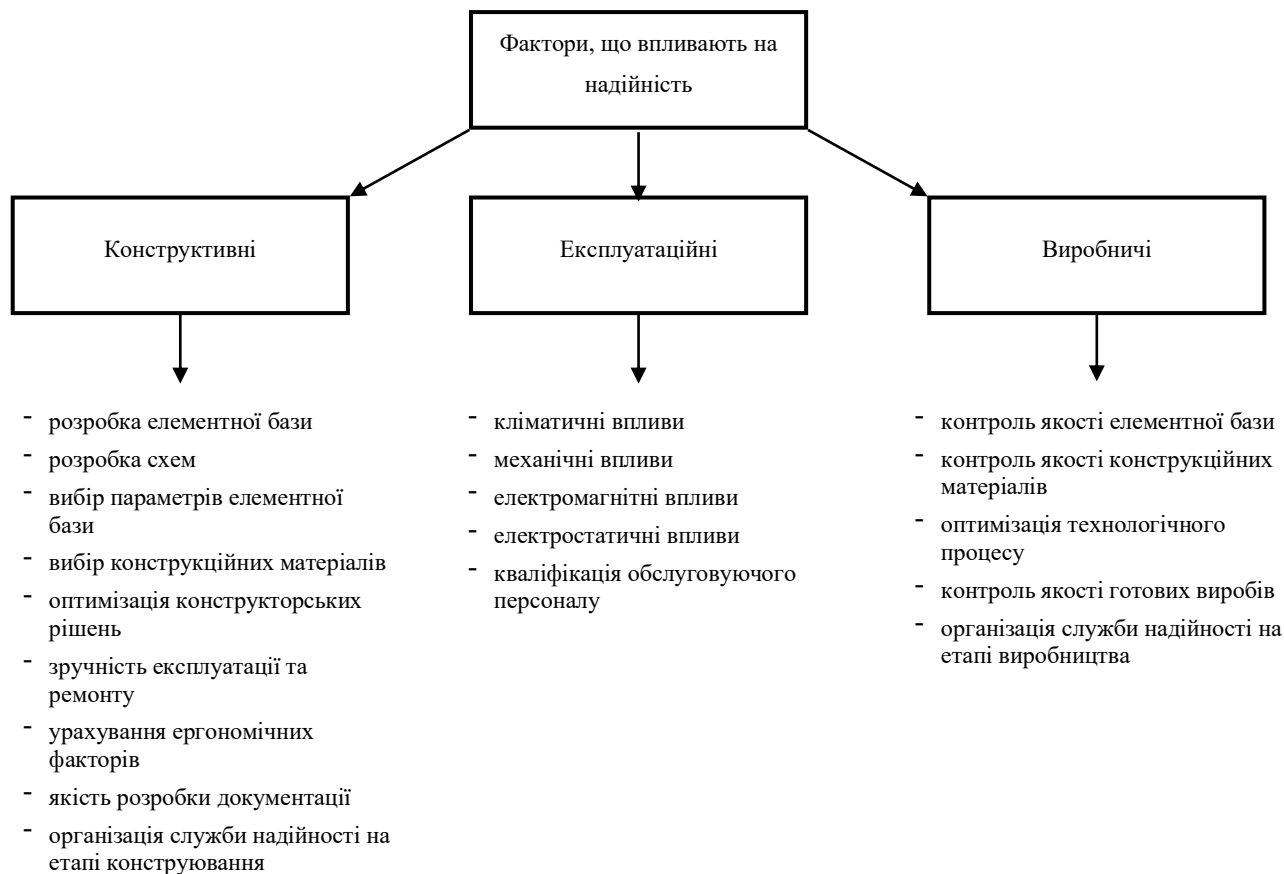


Рисунок 11.2 - Впливи на надійність

11.2. Експлуатаційні показники надійності елементів

Під *експлуатаційними показниками надійності* елементів розуміють численні значення показників, що визначені в реальних умовах експлуатації РЕА.

Номінальна інтенсивність відмов λ_n елементів визначається шляхом випробувань їх при *електричних на зовнішніх навантаженнях* заданих ТУ.

Електричне навантаження характеризується робочими напругами та струмами, що протікають через елементи, а **зовнішні навантаження** - рівнем кліматичних, механічних та інших впливів.

Але в умовах реальної експлуатації елементів в складі РЕА рівні навантажень можуть істотно відрізнятись від тих, при яких виконувалося визначення λ_n , тому експлуатаційна інтенсивність λ_e може значно відрізнятись від λ_n .

На надійність елементів може надавати істотний вплив також циклічність їх роботи (кількість циклів вмикання під навантаження та вимкнення).

При оцінці безвідмовності елементів необхідно враховувати інтенсивність відмов $\lambda_{\text{ц}}$ на один цикл ввімкнення/вимкнення, інтенсивність відмов $\lambda_0 \geq \lambda_{\text{н}}$, що визначається напрацюванням при заданих умовах експлуатації у ввімкненому стані. Інтенсивність відмов λ_x зберігання (вимкнений стан). Для випадку, коли $\lambda_{\text{ц}}$, λ_0 та λ_x постійні в часі та не залежать від $N_{\text{ц}}$, тоді можна показати, що

$$P_e(t) = e^{-(\lambda_0 t_p + \lambda_x t_x + \lambda_{\text{ц}} N_{\text{ц}})} = e^{-\lambda_e t} \quad (11.10)$$

де t_p - сумарний час роботи у ввімкненому стані

t_x - сумарний час знаходження елемента у вимкненому стані за $N_{\text{ц}}$

$$t = t_p + t_x \quad (11.11)$$

З формули випливає λ_e відношення до часу t визначається сумою

$$\lambda_e = \lambda_0 \frac{t_p}{t} + \lambda_x \frac{t_x}{t} + \frac{\lambda_{\text{ц}} N_{\text{ц}}}{t} = \lambda_0 \frac{t_p}{t} + \lambda_x \frac{t_x}{t} + \lambda_{\text{ц}} F_{\text{ц}} \quad (11.12)$$

де $N_{\text{ц}}$ - число циклів ввімкнення-вимкнення на час t ;

$F_{\text{ц}}$ - частота цих циклів, що визначена за той же час;

$\lambda_{\text{ц}}$ - умовно має назву інтенсивність відмов на цикл роботи елемента, 1/цикл.

Якщо елементи працюють в складі РЕА, то λ_e називають **експлуатаційною інтенсивністю** відмов в масштабі часу роботи РЕА.

Формулу (11.12) можна представити так:

$$\lambda_e = \frac{\lambda_0}{1 + \frac{t_x}{t_p}} + \frac{\lambda_x}{1 + \frac{t_p}{t_x}} + \lambda_{\text{ц}} F_{\text{ц}} \quad (11.13)$$

та впевнитися, що λ_e є функцією t_x/t_p та $F_{\text{ц}}$.

З формули (11.12) видно, що при збільшенні числа циклів $N_{\text{ц}}$ роботи елементів за фіксований t , навіть при малому значенні $\lambda_{\text{ц}}$, що викликано циклічним режимом роботи, третя складова (11.12) може суттєво перевищити

перші дві. При цьому безвідмовність елементів в основному буде визначатися циклічним режимом роботи та знижуватися зі збільшенням числа $N_{ц}$.

Оскільки, безвідмовність елементів в неперервному режимі роботи вище, чим при циклічному, то можна зробити висновок, що РЕА доцільно використовувати в режимі **тривалого ввімкнення**.

Для сучасних елементів та РЕА граничним значенням $F_{ц}$, вище якого циклічність роботи стає основною причиною відмов, рахують $F_{ц.гр.} = 1 \text{ цикл/год}$.

Оскільки, зазвичай $\lambda_x = (0,01 \div 0,001)$, то вплив другої складової в (11.12) на λ_e стає помітним лише при дуже тривалому зберіганні та при великих рівнях впливів в цей період.

На значення λ_0 , λ_x та $\lambda_{ц}$ елементів, а відповідно й λ_e , істотно впливають умови експлуатації. Уявлення про цей вплив дають приведені в Таблиця 11.1 відношення λ_e елементів в РЕА різного призначення до $\lambda_{ел}$, що визначається в лабораторних умовах, які відповідають найменшим рівням експлуатаційних впливів.

Таблиця 11.1 Відношення інтенсивності відмов елементів ЕА різного призначення до інтенсивності відмов елементів лабораторної ЕА

Тип РЕА	$\lambda_e / \lambda_{ел}$
стаціонарна наземна	10
корабельна	17
автомобільна	95
залізнична	25-30
високогірна	80
літакова	120-150

З Таблиця 11.1 випливає, що надійність елементів РЕА може істотно знизитися зі збільшенням рівня експлуатаційних навантажень.

Інші показники експлуатаційні показники визначаються:

$$P_e(t) = e^{-\lambda_e t} \quad (11.14)$$

$$Q_e(t) = 1 - e^{-\lambda_e t} \quad (11.15)$$

$$t_{\text{ср.е}} = \frac{1}{\lambda_e} \quad (11.16)$$

Величини λ_0 , λ_x та $\lambda_{\text{ц}}$ є складні функції характеру внутрішніх та зовнішніх навантажень, їх рівнів та комбінації видів навантажень, визначити які складно. Тому в літературі для більшості типів елементів наводяться тільки дані про залежність інтенсивності відмов $\lambda_e = \lambda_0$ при $\lambda_x = 0$ та $F_{\text{ц}} = 0$ від різних рівнів електричного навантаження та температури навколишнього середовища. Ці фактори є головними, що визначають безвідмовність елементів.

11.3. Розрахунок надійності

11.3.1. Надійність елементів РЕА

Найбільш масові елементи РЕА: DD, R, C, VT, VD, роз'єми і т.д. Відмова одного чи декількох елементів веде до відмови всієї складної РЕА, при чому *ці елементи фактично є невідновлюваними.*

по інтенсивності відмов вони між собою не рівноцінні. Для визначення інтенсивності відмов в реальних умовах необхідно враховувати режими та умови, в яких працює та експлуатуються елементи, а відповідно і весь пристрій.

При номінальних умовах $\lambda_e = \lambda_{0e}$

Таблиця 11.2 Інтенсивність відмов елементів λ_{0e} при номінальних умовах

Елементи	$\lambda_{0e} \cdot 10^{-7} \text{ 1/год}$
Резистори С2-23-0.125	0,02
Конденсатори К50-6	0,5
Конденсатори керамічні	0,3
Транзистори: малопотужні	0.15 - 0.37

Елементи	$\lambda_{0e} \cdot 10^{-7} \text{ 1/год}$
середньої потужності	1,21
великої потужності	1,59
Транзистор КТ315	0,88
Мікросхеми К555	0,2
Контакт роз'єму (друкований роз'єм - контакт роз'єму; навісний роз'єм - контакт + пайка одного виводу)	0,2
Друкована плата (1 сторона)	1
Пайка виводів дискретних компонентів	$0.5 \cdot 10^{-9}$

Надійність друкованого вузлу визначається надійністю **всіх елементів**, що встановлюються для ДП, власне самою ДП на пайкою елементів.

Визначимося з номінальними умовами.

Під **номінальними умовами** розуміють роботу елемента при $K_n=1$, $t_{cp}=25\pm 5$, вологість повітря $65\pm 5\%$, $P=760\text{мм}$. Певне середовище не містить пилу, вільна від руйнівальної дії газів, солей. Елементи не випробовують ударів та вібрацій. З визначення слідує номінальні умови.

Елементи працюють в реальних режимах та умовах.

Режим роботи елемента визначається:

$$\lambda_e = \varphi(W, I, U) \quad (11.17)$$

Режим роботи елементів оцінюється коефіцієнтом навантаження K_n , що дорівнює відношенню величини параметру, що визначає навантаження елемента в схемі пристрою, до номінального значення цього параметру по паспорту або ТУ (datasheet).

Для різних елементів коефіцієнт навантаження визначається по різним параметрам (розсіювана потужність, протікаючий струм, прикладена напруга) або їх сукупність. Частіше за все коефіцієнт навантаження визначається в статичному режимі, рідше по змінному струму.

$$K_H = \frac{N_{роб}}{N_{ном}} = \frac{\text{навантаження робоче}}{\text{навантаження номінальне}} \quad (11.18)$$

де $N_{роб}$ - визначається зі схеми;

$N_{ном}$ - визначається з довідника.

Коефіцієнт навантаження елементів визначається (для конкретних елементів):

$$K_H = \frac{W_{роб}}{W_{ном}} - \text{для VT, R, IC}$$

$$K_H = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} - \text{для C, VD}$$

$$K_H = \frac{I_{роб}}{I_{ном}} - \text{для VD, IC, VT}$$

K_H не повинен перевищувати 1, бажано K_H зменшувати, однак при малих (наприклад $K_H=0,1$ маємо значний запас по надійності, але при цьому значно зростають габарити та вага. Рекомендується брати $K_H=0,5 \div 0,8$.

Для елементів $N_{роб}$ визначається по результатам схемотехнічного проектування. $N_{ном}$ - з довідника. Тоді

$$\lambda_e = \lambda_{oe} \cdot K_H \quad (11.19)$$

Таблиця 11.3 Залежність інтенсивності відмов германієвих та кремнієвих транзисторів від K_H

K_H	не більше 0.1	0.1 - 0.4	0.4 - 0.8
Германієві	$\lambda = 0,3 \cdot 10^{-7}$	$0,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Кремнієві	$\lambda = 0,15 \cdot 10^{-7}$	$0,3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$

На надійність елементів **впливають** не тільки електричні режими, а також зовнішні фактори:

- температура
- вологість
- тиск

тобто **кліматичні впливи**.

Дискретні компоненти проєктуються з урахуванням, що вони можуть використовуватися в пристроях різного призначення, в різних режимах та різних умовах експлуатації. *Умови експлуатації* суттєво впливають на надійність елементів, а відповідно на надійність всього виробу, тобто $\lambda_e = f(T, P, F)$ - температура, тиск, вологість.

Зовнішні впливи враховуються відповідно a_t, a_p, a_F .

Приблизно можна рахувати, що середній час напрацювання (T_{cp}) до першої відмови зменшується на 10% при збільшенні температури оточуючого середовища на $\approx 5\%$. Ця залежність зберігається в діапазоні 10-60 $^{\circ}C$.

В літературі приводять значення поправочних коефіцієнтів a_t , що показують в скільки разів інтенсивність відмов **при даному** K_H відрізняється від інтенсивності відмов при номінальних умовах при зміні температури.

$$a_t = \frac{\lambda_e(t_p)}{\lambda_e(t = 25^{\circ}C)} \Big|_{K_H=const} \quad (11.20)$$

Залежність інтенсивності відмов ІС від температури має вигляд

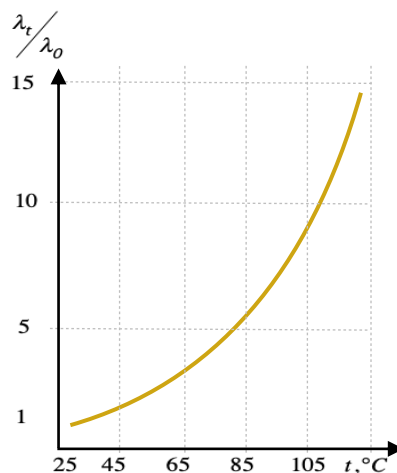


Рисунок 11.3 - Залежність інтенсивності відмов ІС від температури

Савельєв А.Я., Овчінніков В.А. Конструювання ЕОМ та систем (с.119)

Такі графіки a_t для резисторів, для конденсаторів різних типів, для діодів та транзисторів також наведені у Савельєва.

Також прийдеться враховувати температуру, оскільки

$$T_p = T_{\text{навк серед}} + \Delta t_{\text{нагр зони}} \quad (11.21)$$

$\Delta t_{\text{нагр зони}}$ якщо збільшується на $10 \div 15^\circ \text{C}$, то значення a_t може збільшуватися в 10 разів (див. на графік)

$$\lambda_e = \lambda_{oe} \cdot K_H \cdot a_t \quad (11.22)$$

Ми з вами навели приклади інтенсивностей відмов деяких окремих елементів (Таблиця 11.2). Можна додати, що $\lambda(t)$ для R та VT за останні 20 років зменшилося в 300 разів.

Побудова РЕА III та IV поколінь на ІС дозволило **на порядок збільшити** їх надійність. за прогнозами вчених $\lambda(t)$ ІС може знизитися до $1 \cdot 10^{-11} \text{ 1/год}$.

В Літературі наводяться значення коефіцієнтів в залежності від коефіцієнту навантаження [О: 2].

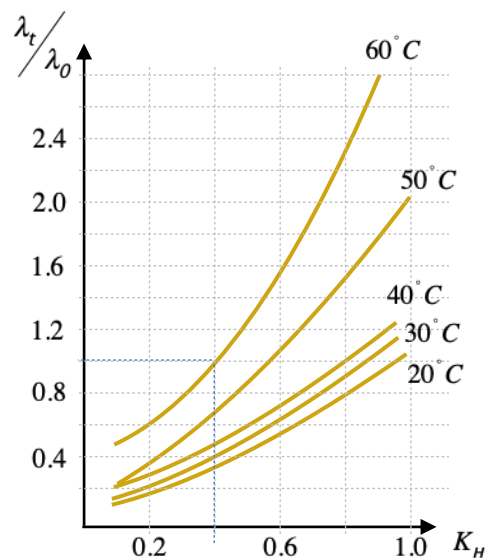


Рисунок 11.4 - Залежність відносної інтенсивності відмов від температури роботи та коефіцієнту навантаження для резисторів

$$\lambda_{T_p=50^\circ \text{C}} < \lambda_{T_p=60^\circ \text{C}} \quad \text{при} \quad K_{HT_p=50^\circ \text{C}} < K_{HT_p=60^\circ \text{C}}$$

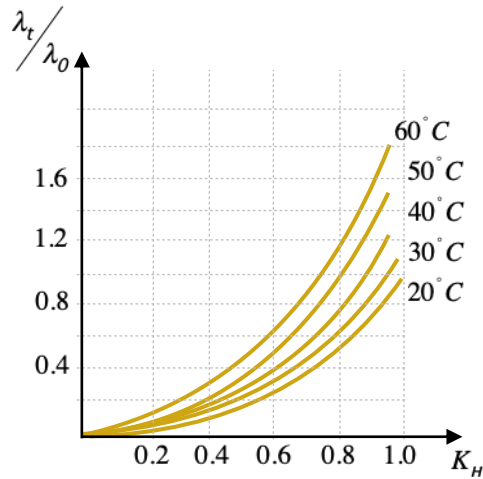


Рисунок 11.5 - Залежність відносної інтенсивності відмов від температури роботи та коефіцієнту навантаження для керамічних конденсаторів

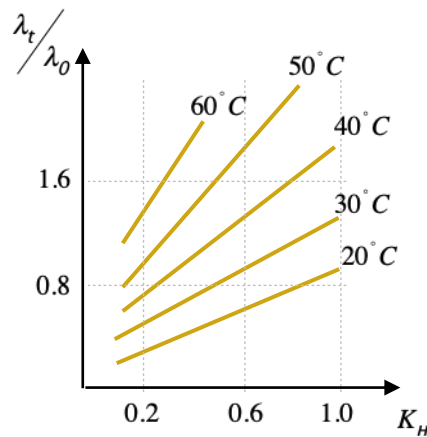


Рисунок 11.6 - Залежність відносної інтенсивності відмов від температури роботи та коефіцієнту навантаження для германієвих транзисторів

Таким чином, в цих графіках враховується, що

$$a_t = f(t_p, K_H) \quad (11.23)$$

Умови експлуатації включають не тільки температурні впливи, але й механічні впливи. Механічні впливи враховуються поправочним коефіцієнтом a_b . Фізичний зміст є аналогічним до a_t , тобто a_b показує в скільки разів інтенсивність відмов при даному K_H відрізняється від інтенсивності відмов при номінальних умовах при зміні впливів.

Узагальнений коефіцієнт, що враховує механічні впливи (вібрації, лінійні прискорення, удари і тп.) представляють наступним чином:

$$a_e = \frac{\lambda_e}{\lambda_{e\text{лаб}}} \quad (11.24)$$

де a_e є відношення λ_e в РЕА різного призначення до $\lambda_{e\text{лаб}}$ елементів РЕА, що використовується в лабораторних умовах, що відповідають найменшим рівням експлуатаційних впливів.

Таблиця 11.4 Відношення інтенсивності відмов елементів ЕА різного призначення до інтенсивності відмов елементів лабораторної РЕА [О: 2]

Тип РЕА	$\lambda_e / \lambda_{e\text{лаб}}$
стаціонарна наземна	20
корабельна	40
автомобільна	50
залізнична	25-30
високогірна	80
літакова	120-150
лабораторна	1

З Таблиця 11.4 слідує, що надійність елементів РЕА суттєво знижується зі збільшенням рівня механічних навантажень.

Таким чином, результуюча інтенсивність відмов елементів і-го типу (одного й того ж типу) з урахуванням впливів можна представити так:

$$\lambda_{PE} = \lambda_{oe} \cdot K_n \cdot a_t \cdot \dots \cdot a_{\text{експ}} \quad (11.25)$$

для даного типу елемента λ_{PE} буде стільки, скільки типів елементів в схемі.

11.3.2. Надійність ІС

ІС - основний елемент сучасних РЕА, що найбільш використовується по зрівнянню з іншими елементами. Можна стверджувати, що **надійність ІС визначається** надійністю в цілому апаратурою, що випускається на їх основі. Тому знання причин появи відмов в ІС є основою для підвищення їх надійності.

В наш час ІС - цілий самостійний пристрій - *ваш мобільний телефон, приймач космічного зв'язку та ін..*

Експлуатація РЕА виявила наступні найбільш вірогідні причини відмов:

- розрив з'єднань між контактною зоною на поверхні підкладки ІС та виводами корпусу (всередині ІС);
- розрив з'єднань ДП з виводами корпусу (поганий контакт);
- порушення з'єднань всередині ІС (типу “обрив”, типу “коротке замкнення”);
- дефекти БДП.

В ІС відмови типу “відхід” різних параметрів транзисторів за межі заданих норм відступають на другий план, а основними, домінуючими є катастрофічні відмови міжз'єднань. А ще, з аналізу відмов виходить, що надійність РЕА визначається її пасивними “деталлями” як ДП, БДП, тобто надійністю паяного, зварного термокомпресійного контакту та не залежить від ІС як такої (тобто активного елементу).

Питома вага катастрофічних відмов в загальному балансі можливих несправностей значно більше по зрівнянню з відмовами, що характерні для дискретних компонентів.

Досягнутий рівень надійності ІС характеризується для різних випадків використання $P=0,999 \div 0,9999$ на 10000 годин. По деяким даним $\lambda = 7 \cdot 10^{-9} \text{ 1/год}$ при достовірності 0.5.

Таблиця 11.5 Дані надійності ІС по результатам випробувань

Вид випробовування	Температура	Об'єм іспитів, схемогодина	Найбільше значення λ_0 при достовірності 0.6
Експлуатація РЕА	-	$> 3.5 \cdot 10^8$	$(0.7 \div 90) \cdot 10^{-8}$
Іспит ІС на строк служби	25°	$> 1 \cdot 10^7$	$(0.6 \div 6.7) \cdot 10^{-7}$
-//-	85 - 125	$> 7 \cdot 10^7$	$(0.16 \div 18) \cdot 10^{-6}$

Вид випробовування	Температура	Об'єм іспитів, схемогодина	Найбільше значення λ_0 при достовірності 0.6
-//-	150 - 200	$> 6 \cdot 10^6$	$(0.02 \div 5) \cdot 10^{-5}$

З аналізу Таблиця 11.5 можна зробити такі висновки:

- надійність ІС при експлуатації РЕА значно вище, в порівнянні з надійністю при випробовуванні безпосередньо ІС.

Це пояснюється тим, що виробник ІС виконує іспити на надійність в граничних режимах по електричному навантаженню та температурі. При експлуатації РЕА ІС працює в кращих умовах - "легкі", оптимальні режими $\lambda = f(T^\circ)$.

Поступові відмови складають незначну величину. Так під час випробувань ІС при $t^\circ = 125^\circ\text{C}$ об'ємом 12 733 000 схемогодин тільки у 0.68% дрейф параметрів перевищує норму.

На ІС такі впливи, як вологість, механічні навантаження, радіоактивні випромінювання надають гранично малий вплив.

Таким чином, надійність ІС визначається в основному інтенсивністю катастрофічних відмов, а найбільшу питому вагу мають відмови отримані через неякісні з'єднання.

Тому є реальні можливості підвищення надійності ІС. Це в першу чергу - відпрацювання технологічних операцій, удосконалення корпусного захисту.

В літературі часто наводяться дані, що $\lambda_{IC} = 1 \cdot 10^{-9} 1/\text{год}$

Надійність вузлів.

Надійності вузлів (або всього приладу) повинна відповідати надійність використовуваних ІС. Поки прилад розділяють на змінні ДВ, то без роз'єму не обійтися. Необхідні роз'ємні та не роз'ємні з'єднання є в монтажному ланцюгу *критичними* місцями по відношенню до надійності.

11.4. Надійність систем з простою структурою

При аналізі апаратури на надійність, при більш точному визначенні показників надійності складають структурну, функціональну схему. Тобто складають схему, в якій виділяють елементи не по конструктивному принципу, а по функціональній ознаці та з таким розрахунком, щоб кожному функціональному елементу забезпечувалася незалежність, тобто, щоб відмова одного функціонального елемента не призводила до зміни ймовірності появи відмови в інших елементах.

Тому при складанні функціональної схеми (пристрою, вузлу, блока) слід об'єднувати ті КЕ, відмови яких взаємопов'язані, але не впливають на відмови інших елементів. Це дозволяє правильно вирішити питання вибору найбільш надійних функційних елементів, вузлів, блоків, визначити надійні конструкції блоків, панелей і т.д., раціональний порядок експлуатації, ремонту, вибору ЗВП (запасні вироби та приналежності).

При побудові структурних схем виділяють *послідовне, паралельне, послідовно-паралельне* та більш складне включення елементів.

При **послідовному** включенні елементів.

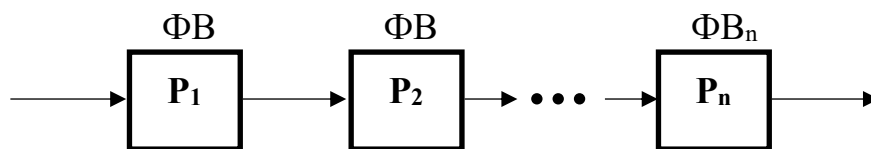


Рисунок 11.7 -Послідовне включення елементів

Ймовірність безвідмовної роботи

$$P_p = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i \quad (11.26)$$

Зверніть увагу - це не сума

Враховуючи те, що показники надійності ФВ вирівнюють, то можна записати при $P_1 = P_2 = \dots = P_n \rightarrow P_p = P^n$

де n - число послідовно з'єднаних функціональних вузлів.

Для надійності роботи схеми потрібна надійна робота кожного з елементів, що входять до схеми послідовного з'єднання.

Навіть для такого простого з'єднання часто потрібно забезпечити задану ймовірність безвідмовної роботи системи - P_c , що складається з n - послідовно з'єднаних ФВ.

Потрібно визначити $P_{\Phi E}$, що входять в систему, при умові, що $P_{\Phi E_1} = P_{\Phi E_2} = \dots = P_{\Phi E_n}$. Тоді P_c визначається наступним чином:

$$P_c = (1 - q_{\Phi E})^n \cong 1 - nq_{\Phi E} \quad (11.27)$$

де q - ймовірність відмови.

При різних значеннях $q_{\Phi E}$, тобто $q_{\Phi E_1} \neq q_{\Phi E_2} \dots$

$$P_c \cong 1 - \sum_{i=1}^n q_{i\Phi E} \quad (11.28)$$

Приклад. Розрахунок необхідної надійності елемента від заданої в ТЗ.

Нехай необхідно забезпечити $P_c=0,99999$. Система складається з $n = 20$ послідовно з'єднаних ФВ.

Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи ФВ, щоб забезпечити необхідну P_c пристрою.

Тоді

$$\begin{aligned} P_c &\cong 1 - nq_{\Phi E} \\ 0,99999 &= 1 - 20 \cdot q_{\Phi E} \\ q_{\Phi E} &= 0,0000005 \\ P_{\Phi E} &= 0,9999995 \end{aligned}$$

При такій ймовірності безвідмовної роботи кожного з 20 ФВ ми отримаємо $P_c=0,99999$.

Прикладів послідовно з'єднаних елементів безліч: очевидне для нас - метро та інші види транспорту.

При паралельному включенні елементів.

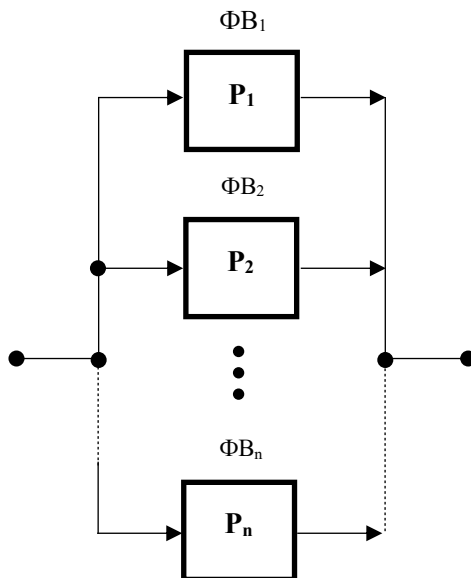


Рисунок 11.8 - Паралельне включення елементів

По принципу функціонування: відмова i -го елемента не впливає на працездатність. Наприклад, тому що спрацьовує захист і блок що відмовив не закорочує своїм виходом загальний вихід ФУ.

$$Q_P = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i \quad (11.29)$$

$$P_P = 1 - Q_P \quad (11.30)$$

$$P_P = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (11.31)$$

Зі збільшенням числа паралельно ввімкнених елементів P_P збільшується (метод підвищення надійності: якщо відмова з ФЕ не впливає на показники надійності іншого ФЕ).

При такому ввімкненні елементів відмова схеми буде мати місце тоді, коли всі елементи схеми вийдуть з ладу, якщо відмови будуть типу “обрив”, а от відмова типу “КЗ” - катастрофа.

Якщо $P_1 = P_2 = \dots = P_n$, то для такого ввімкнення:

$$P_P = 1 - Q_P = 1 - [1 - P]^n \quad (11.32)$$

$$Q_P = q_i^n \quad (11.33)$$

Зустрічається змішане з'єднання ФЕ - послідовно-паралельне, паралельно-послідовне з'єднання елементів.

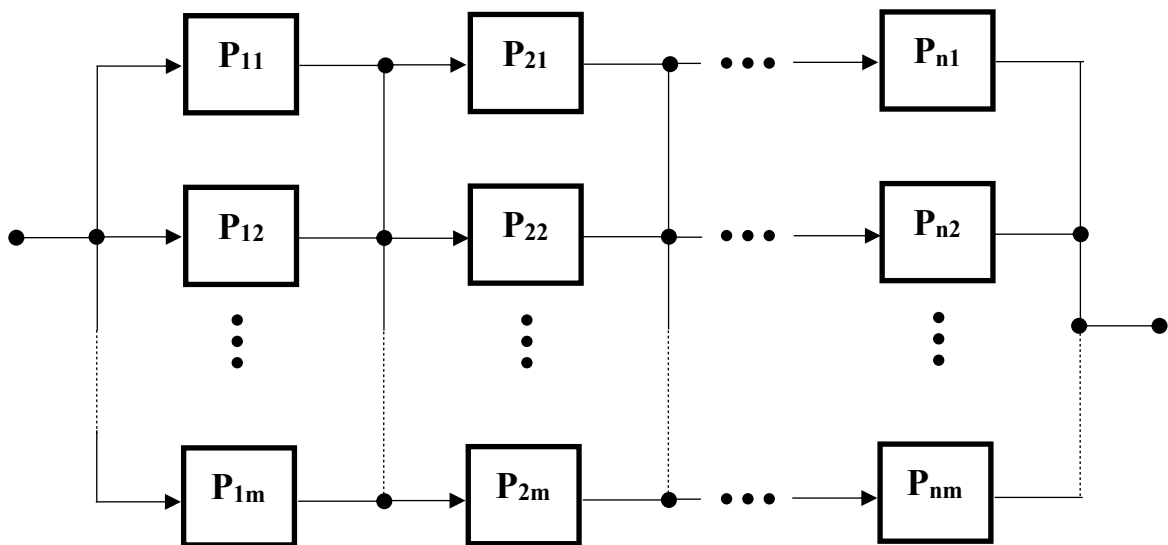


Рисунок 11.9 - Змішане включення елементів

де n - кількість ФЕ, що включенні послідовно;

m - кількість ФЕ, що включенні паралельно.

Спочатку визначається ймовірність безвідмовної роботи паралельно з'єднаних Ф. Далі визначається P_p всієї схеми - послідовне з'єднання ФЕ, що включенні паралельно.

$$P_p = [1 - q_{11} \cdot q_{12} \cdot \dots \cdot q_{1m}] \cdot [1 - q_{21} \cdot q_{22} \cdot \dots \cdot q_{2m}] \cdot \dots \cdot [1 - q_{n1} \cdot q_{n2} \cdot \dots \cdot q_{nm}]$$

Для прикладу розглянемо прості комбінації ввімкнення ФВ. *Давайте впевнимся чи ввімкнення елементів впливає на показники надійності.*

11.4.1. Послідовно-паралельне ввімкнення

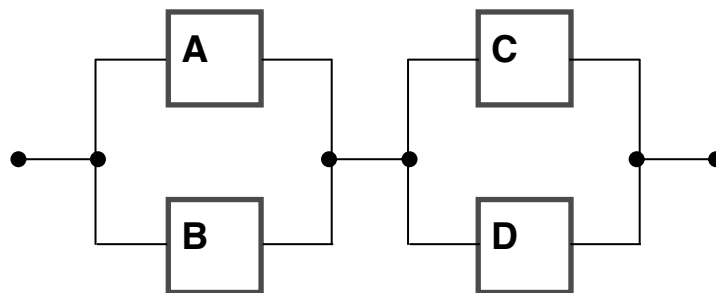


Рисунок 11.10 - Послідовно-паралельне включення елементів

Плечі з'єднані послідовно, а в плечах елементи з'єднані паралельно.

Для обчислення надійності такого ввімкнення елементи спочатку об'єднаємо паралельно з'єднані ФЕ, а потім будемо розглядати послідовне з'єднання, тобто еквівалентна модель буде така:

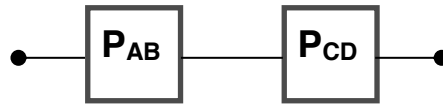


Рисунок 11.11 - Послідовне включення елементів

Рахуємо, що показники надійності відомі та складають:

$$P_A = 0,9; P_B = 0,8; P_C = 0,7; P_D = 0,6$$

Тоді

$$P_{AB} = 1 - q_A q_B = 1 - (1 - P_A) \cdot (1 - P_B) = 1 - 0,1 \cdot 0,2 = 0,98 \quad - \quad \text{при}$$

паралельному включенні P_{AB} **більше** ніж P_A та P_B .

$$P_{DC} = 1 - q_D q_C = 1 - 0,3 \cdot 0,4 = 0,88$$

При паралельному включенні елементів **надійність дійсно збільшується.**

На закінчення

$$P_P = P_{AB} \cdot P_{CD} = 0,98 \cdot 0,88 = 0,8624$$

P_P менше меншого $P_P < P_{CD}$ при послідовному включенні елементів.

Послідовне включення елементів дійсно зменшує надійність.

11.4.2. Паралельно-послідовне з'єднання

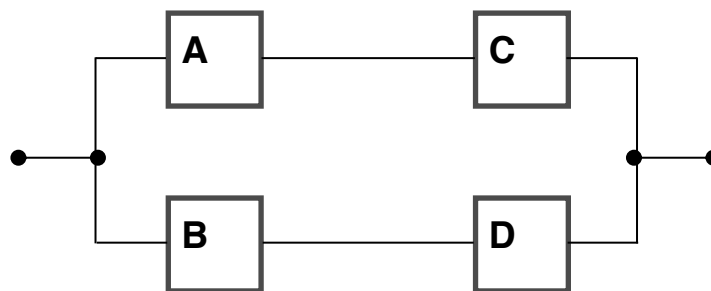


Рисунок 11.12 - Паралельно-послідовне включення елементів

В даному випадку перетворення полягають в наступному - спочатку об'єднуються послідовні з'єднання ФЕ, а потім розглядаються паралельні з'єднання, тобто

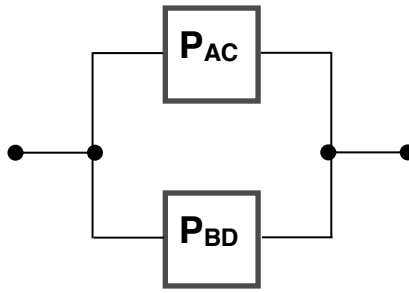


Рисунок 11.13 - Паралельне включення елементів

$P_{AC} = P_A \cdot P_B = 0,9 \cdot 0,8 = 0,63$ - результат менше найменшого $P_{AC} < P_C = 0,7$

$P_{BD} = P_B \cdot P_D = 0,8 \cdot 0,6 = 0,48$ - результат менше найменшого $P_{BD} < P_D = 0,48$

$$P_P = 1 - q_{AC}q_{BD} = 1 - (1 - P_{AC}) \cdot (1 - P_{BD}) = 1 - 0,37 \cdot 0,52 = 0,8076$$

P_P суттєво вище чим P_{AC} та P_{BD} , що відповідає паралельному включенню.

Різниця показників надійності для першої та другої схем пояснюється різним включенням компонентів. Тобто в першому випадку один елемент вийшов з ладу - то три працюють. В другому випадку: один вийшов з ладу - працюють тільки два.

Таким чином, схемними рішеннями ми включенням елементів можемо впливати на показники надійності.

Підсумуємо

$$P = e^{-\lambda T}$$

λ

T_{cp}

Q

Показники надійності визначаються надійністю елементів ФУ

λ_{oe} - залежить від режимів роботи елемента

λ_{oe} - при оптимальних умовах ($t=20^\circ C$, $p=700$ мм рт.ст) та знаходиться у відповідних довідниках

$$\lambda_{oe} = f(t^\circ)$$

$$\lambda(t) = \lambda_{oe} \cdot a_t$$

$$a_t = \frac{\lambda(t)}{\lambda_{20}}$$

$$\lambda_B = \lambda_{oe} \cdot a_B$$

$$a_B = \frac{\lambda_B}{\lambda_{lab}}$$

Це все для кожного типу елементів

$$\lambda_p = \sum \lambda_{oe} \cdot K_H \cdot a_t \cdot \dots \cdot a_B$$

а де з'єднання? Чи залежить надійність від з'єднання елемента?

Схемні рішення:

- послідовне з'єднання
- паралельне з'єднання
- змішане з'єднання: послідовно паралельне та паралельно-послідовне.

11.5. Показники надійності систем зі складною структурою

Багато реальних систем, складних систем, великих систем, до яких відносять багатомашинні системи, радарні системи, системи слідкування мають таку структуру з'єднань, яка не може бути зведена до відомих з'єднань, тобто *послідовним, паралельним, змішаним*.

Показники надійності таких з'єднань ми знаємо як визначати, а ось як визначити показники надійності, наприклад таких з'єднань:

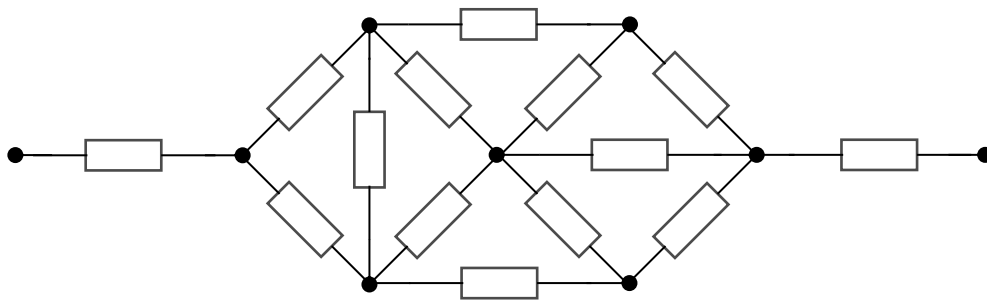


Рисунок 11.14 - Складна структура

Зрозуміло, щоб визначити показники надійності потрібно звести їх схеми до вже відомих і тоді задача буде вирішена.

Схеми складних систем можна звести до *мостових схем* типу:

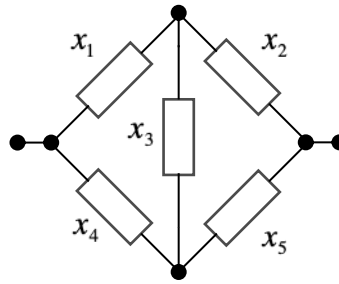


Рисунок 11.15 - Приклад мостової схеми

де x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 - самостійні складні системи.

В теорії ланцюгів виділяють з'єднання типу *зірка*, *трикутник*.

Для таких мостових схем показники надійності визначаються наступними методами:

- метод розкладення відносно особливого елемента;
- метод мінімальних шляхів та мінімальних перетинів;
- метод прямого перебору;
- аналітично-статистичний метод.

Детально розглянемо перші два методи.

11.6. Метод розкладення відносно особливого елемента

Для визначення показників надійності складних схем використовують метод розкладення відносно особливого елемента. Цей метод оснований на *теоремі про розкладення функції логіки по будь-якому аргументу*.

Стосовно задач надійності цю теорему формулюють наступним чином:

$$P_p(P_c) = P_{x_i}(P_{x_i=1})Q_{x_i}(P_{x_i=0}) \quad (11.34)$$

де: $P_p(P_c)$ - результуюча ймовірність безвідмовної роботи системи;

P_{x_i} - ймовірність безвідмовної роботи x_i елемента (ФВ), відносно якого виконується розкладення;

$P_{x_i=1}$ - ймовірність безвідмовної роботи системи при умові, що x_i елемент (ФВ) є абсолютно надійним (тобто буде нова схема з'єднань елементів (ФВ) в системі; показники надійності нової схеми потрібно визначати);

Q_{x_i} - ймовірність відмови x_i елементу (ФВ);

$P_{x_i=0}$ - ймовірність безвідмовної роботи системи при умові, що x_i елемент (ФВ) відмовив - вийшов з ладу, тобто буде нова схема з'єднань елементів в системі, показники надійності цієї нової системи потрібно визначати.

Ймовірність безвідмовної роботи можна визначити по теоремі розкладення функції відносно декількох елементів, при цьому процедура розкладення зводиться до перебору комбінацій елементів з урахуванням їх надійності.

При розкладенні функції по двом елементам:

$$P_p = P_{x_i} P_{x_j} (P_{x_i} = 1, P_{x_j} = 1) + P_{x_i} Q_{x_j} (P_{x_i} = 1, P_{x_j} = 0) + Q_{x_i} P_{x_j} (P_{x_i} = 0, P_{x_j} = 1) + Q_{x_i} Q_{x_j} (P_{x_i} = 0, P_{x_j} = 0)$$

слід відмітити, що конкретних рекомендацій по вибору елементів, відносно яких виконується розкладення, нема. Необхідно перебрати всі комбінації.

На основі теореми про розкладення визначають показники надійності для мостової схеми виду:

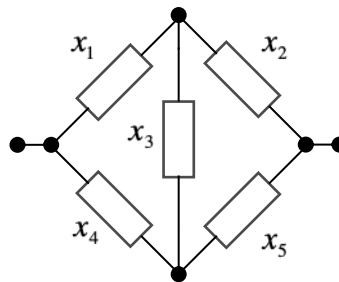


Рисунок 11.16 - Приклад мостової схеми

Теорема не дає рекомендації відносно якого елемента робити розкладання

Розкладення будемо виконувати відносно одного елемента, наприклад x_3 .

Тоді, згідно загальної формули

$$P_p = P_{x_3} (P_{x_3} = 1) + Q_{x_3} (P_{x_3} = 0)$$

$P_{x_1}, P_{x_2}, P_{x_3}, P_{x_4}, P_{x_5}$ - відомі - це ймовірність безвідмовної роботи пристроїв (систем x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), що входять до складної системи.

Далі з'ясуємо, що означає, $P_{x_3} = 1$ та $P_{x_3} = 0$. Ми з вами вказували, що при $P_{x_3} = 1$ та $P_{x_3} = 0$, будуть нові схеми, показники надійності яких потрібно визначити.

$P_{x_3} = 1$ означає, що x_3 елемент є абсолютно надійним і працює по принципу ключа та знаходиться в замкнутому стані

Тобто x_3 елемент буде коротко замкненим.



Рисунок 11.17 – Елемент x_3

Моделлю x_3 є ключ, який при $P_{x_3} = 1$ замкненим, а при $P_{x_3} = 0$ - розімкненим. В цьому випадку і виходять нові схеми.

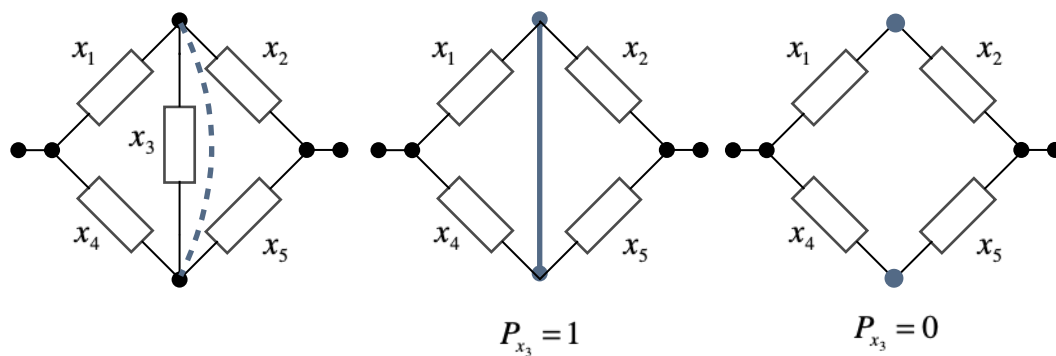


Рисунок 11.18 - Модифіковані схеми

При $P_{x_3} = 1$ наша мостова схема в результаті перетворення приводиться до виду

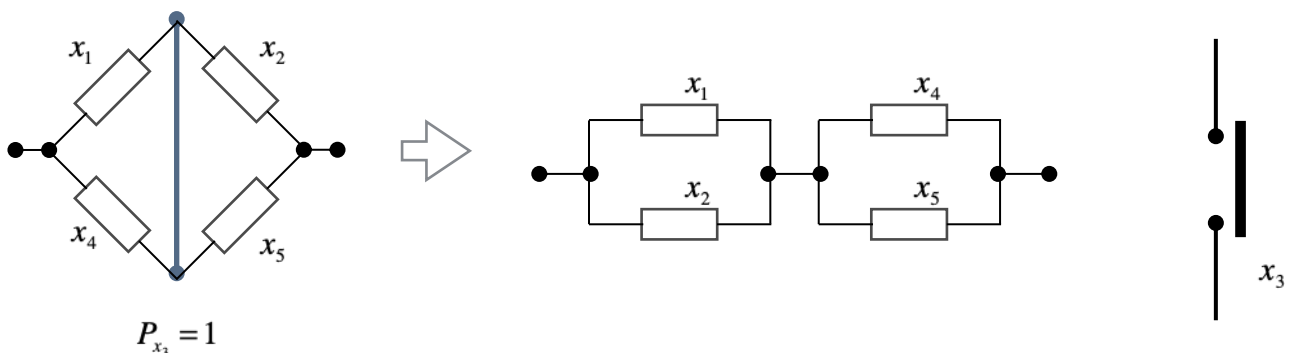


Рисунок 11.19 - Модифікація схеми

Таку схему ми вже розглядали.

Отримаємо паралельно-послідовне з'єднання. Для цієї схеми ми знаємо як визначати P_p . Тоді

$$(P_{x_3=1}) = P_{x_1x_2} \cdot P_{x_4x_5} = (1 - q_{x_1x_2}) \cdot (1 - q_{x_4x_5}) \quad (11.35)$$

При $P_{x_3} = 0$, враховуючи те, що x_3 вийшов з ладу, тобто ключ є розімкненим, то схема приводиться до вигляду

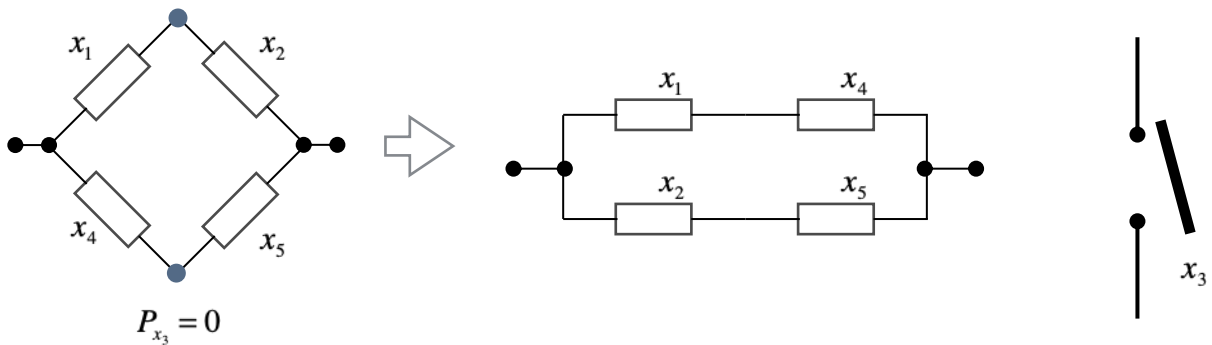


Рисунок 11.20 - Модифікація схеми

$$(P_{x_3=0}) = 1 - q_{x_1x_4} \cdot q_{x_2x_5} = 1 - (1 - P_{x_1}P_{x_4}) \cdot (1 - P_{x_2}P_{x_5})$$

При умові $P_{x_1} \neq P_{x_2} \neq P_{x_4} \neq P_{x_5}$ кінцевий результат буде мати вигляд (вирази $P_{x_3} = 1$ та $P_{x_3} = 0$ підставимо в загальний вираз)

$$P_p = P_{x_3} (P_{x_3=1}) + Q_{x_3} (P_{x_3=0})$$

$$P_p = P_{x_3} (1 - q_{x_1x_2})(1 - q_{x_4x_5}) + Q_{x_3} [1 - (1 - P_{x_1}P_{x_2})(1 - P_{x_4}P_{x_5})]$$

Часто $P_{x_1} = P_{x_2} = P_{x_3} = P_{x_4} = P_{x_5}$ - багатомашинна система - тоді отримаємо

$$P_p = P_{x_3} (1 - q^2)^2 + Q_{x_3} (1 - (1 - P^2)^2)$$

При $P_{\text{ФВ}} = 0.9$, $Q = 0.1$ отримаємо $P_p = 0.981$. Тобто

$$P_p = 0.981 > P_{x_1}, P_{x_2}, P_{x_3}, P_{x_4}, P_{x_5}$$

Таким чином, P_p виходить вище, ніж у ФУ в системі - тобто є сенс створювати такі з'єднання складних систем.

11.7. Метод мінімальних шляхів та мінімальних перетинів.

$$P_{\text{перет}} \leq P_p \leq P_{\text{шлях}} \quad (11.36)$$

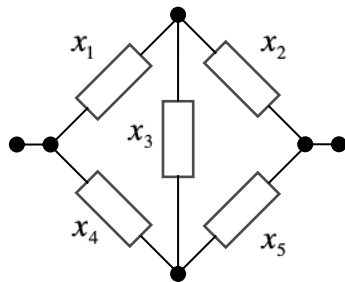
Зразу визначимо, що таке *мінімальний шлях* та що таке *мінімальний перетин*.

Мінімальний шлях в структурі довільного типу - це такий мінімальний набір працездатних елементів, вихід з ладу (відмова) будь-якого з них переводить систему зі стану працездатності в стан відмови. *Мінімальний шлях - це набір послідовно з'єднаних елементів.*

Тобто, щоб отримати множину мінімальних шляхів роблять наступним чином: рахуємо, що всі елементи системи є *відмовленими*.

Далі складаємо всі можливі *комбінації з'єднань* елементів так, щоб передати сигнал від входу системи на її вихід (очевидно це будуть ланцюги, складаються з послідовно з'єднаних елементів).

Давайте складемо множину шляхів для нашої мостової схеми.



	мінімальні шляхи
1	X ₁ X ₄
2	X ₁ X ₃ X ₅
3	X ₂ X ₅
4	X ₂ X ₃ X ₄

Рисунок 11.21 - Мостова схема

Всі елементи відмовили. Відновили комбінації елементів (шляхів) - система запрацювала. Складемо шляхи (ланцюги) з мінімального набору поновлених - працездатних елементів. Для першого шляху працездатні x₁x₄, в решта є ті, що відмовили. І таким чином для 2, 3, 4 шляхів.

Таким чином, система з довільною структурою має деяку множину j мінімальних шляхів з a_j працездатних елементів, тобто в загальному випадку $j=\{1, 2, \dots, n_{a_j}\}$ мінімальних шляхів, а кожен шлях містить a_j працездатних елементів системи.

Мінімальний перетин в структурі довільного типу є такий мінімальний набір елементів, що відмовили. В якому відновлення будь-якого з них переводить систему зі стану відмови до стану працездатності. Тобто, щоб отримати мінімальний перетин, поступаємо наступним чином: складаємо мінімальні перетини працездатний елементів при умові, що вихід з ладу цих елементів приводить до відмови всієї системи.

Для мостової схеми множина мінімальних перетинів буде такою:

	елементи що відмовили	працездатні
1	X ₁ X ₂	X ₃ X ₄ X ₅
2	X ₁ X ₃ X ₄	X ₂ X ₄
3	X ₂ X ₃ X ₄	X ₁ X ₅
4	X ₄ X ₅	X ₁ X ₂ X ₃

Набори елементів що відмовили, решта елементів - працездатні і система в цьому випадку не працює. Але відновивши один з елементів мінімального перетину - система стає працездатною.

Таким чином, система з довільною структурою елементів множина мінімальних перетинів $K=\{1,2,\dots,n_{\beta}\}$, а кожен перетин включає β_k елементів системи.

Перевага методу складається в тому, що дає верхню та нижню оцінку P_p . Вона виражена через параметри надійності елементів, що входять до мінімальних шляхів і мінімальних перетинів.

$$P_{\text{перет}} \leq P_p \leq P_{\text{шлях}}$$

$P_{\text{перет}}$ та $P_{\text{шлях}}$ відповідно визначаються наступним чином:

$$P_{\text{перет}} = \prod_{k=1}^{n_{\beta}} \left[1 - \prod_{i \in \beta_k} (1 - P_i) \right] \quad (11.37)$$

де n_{β} - кількість мінімальних перетинів;

β_k - кількість функціональних елементів, що входять до мінімального перетину. Тобто кількість добутоків така, скільки елементів в перетині.

$$P_{\text{шлях}} = 1 - \prod_{j=1}^{n_{\alpha}} \left(1 - \prod_{i \in \alpha_j} P_i \right) \quad (11.38)$$

де n_{α} - кількість мінімальних шляхів;

α_j - кількість функціональних елементів, що входять до мінімального шляху.

Для нашого прикладу визначимо $P_{\text{перет}}$ (згадаємо перетини: $x_1x_2; x_1x_3x_5; x_2x_3x_4; x_4x_5$)

Згідно формули - добутоків стільки скільки перетинів

$$P_{\text{перет}} = (1 - q_1q_2) \cdot (1 - q_1q_3q_5) \cdot (1 - q_2q_3q_4) \cdot (1 - q_4q_5) \quad (11.39)$$

Для нашого прикладу визначимо $P_{\text{шлях}}$ (згадаємо перетини: $x_1x_4; x_1x_3x_5; x_2x_5; x_2x_3x_4$)

$$P_{\text{шлях}} = 1 - (1 - P_1P_4) \cdot (1 - P_1P_3P_5) \cdot (1 - P_2P_5) \cdot (1 - P_3P_4)$$

При рівних значеннях P та q отримаємо

$$P_{\text{перет}} = (1 - q^2)^2 \cdot (1 - q^3)^2 \leq P_p \leq P_{\text{шлях}} = 1 - (1 - P^2)^2 \cdot (1 - P^3)^2 \quad (11.40)$$

Приклад

Для нашого випадку $\lambda = 0,01$ ¹/ГОД - інтенсивність відмов ФВ;

$t_0 = 10$ год - час безперервної роботи для функціональних елементів.

Тоді

$$P(t_0) = e^{-\lambda t_0} = e^{-0,01 \cdot 10} = e^{-0,1} \approx 0,92$$

$$Q(t_0) \approx 0,08$$

Підставляючи ці значення до (11.40) отримаємо:

$$0,978 \leq P_p \leq 0,9976 \quad (11.41)$$

Таким чином, при $\lambda = 0,01 \text{ 1/год}$ на протязі 10 годин безперервної роботи ймовірність безвідмовної роботи системи знаходиться в межах $0,978 \div 0,9976$ та значно вище ніж функціонального вузла, що входить в систему (0.92).

Діапазон показників більш переважний, ніж коли P_p задається точним, як правило, наближеним значенням.

1. При послідовно-паралельному з'єднанні ми отримуємо наступне:

При $P_A = 0.9, P_B = 0.8, P_C = 0.7, P_D = 0.6$

$$P_p = 0.8624$$

Тобто $P_p > P_B, P_p > P_C, P_p > P_D$

2. При паралельно-послідовному з'єднанні отримаємо $P_p = 0.8076$ - хоча й менше, ніж в першому випадку, але знову ж $P_p > P_B, P_p > P_C, P_p > P_D$.

3. У випадку мостової схеми при $P_x = 0.9$ отримаємо $P_p = 0.981$.

12. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РЕА

1. Підвищення надійності на етапі конструкторського проєктування
2. Компонентне резервування
3. Схемне резервування

Забезпечення необхідного рівня надійності РЕА що розробляється виконується комплексом робіт. Ці роботи проводяться при *проєктуванні, конструюванні, виробництві та експлуатації*.

Згідно алгоритму конструювання (*згадайте його*) розробка РЕА потребує зусиль декількох конструкторських груп, груп схемотехніків, кожна з яких компетентна у своїй предметній області та в своїх задачах.

При *схемо-технічному* проєктуванні з урахуванням підвищеної надійності розробники

- аналізують умови роботи РЕА та виконують вибір високонадійної елементної бази (з урахуванням цих умов);
- встановлюють розумний запас по електричним, температурним та механічним навантаженням (K_H, a_t, a_b, \dots);
- оптимізують електричні режими роботи, температурні режими як найбільш небезпечні;
- виконують наближений розрахунок надійності;
- розробляють структурну схему з урахуванням з'єднання елементів, що забезпечує заданий рівень надійності РЕА;
- вирівнюють (розподіляють) показники надійності між ФВ.

При *технічному* проєктуванні:

- конструкторськими методами (прийомами) локалізують всі види впливів, забезпечуючи при цьому мінімальні габарити та вагу (температура, вологість, механічні впливи);
- підвищують ефективність відводу тепла (методи відводу тепла);

- підвищують стійкість роботи РЕА при впливі завад - електро-магнітних, індуктивних (екрани розв'язки), розробляється технологічний процес

При виготовленні РЕА:

- розробляється технологічний процес, що необхідно суворо дотримуватися та безумовно - виконувати всі роботи й відповідності ТД, що розробляється;
- виконувати комплекс випробувань окремих вузлів, блоків, ..., та в цілому РЕА при самих несприятливих впливах.

Випробування, яке виконується після виготовлення є пробним етапом експлуатації РЕА. Тому, з точки зору надійності, для всіх розробників випробування є засобом перевірки відповідності кількісних показників надійності до заданих та вибір раціональних мір, що направлені на збереження (підвищення надійності - збереження результатів).

Випробування дозволяють визначити причини виникнення відмов (схемні, конструкторські, технологічні і т.д.) та достовірні показники надійності, що отримані при розробці.

При експлуатації необхідно (на будь-який виріб є інструкція по експлуатації):

- суворо дотримуватися інструкції по експлуатації;
- регулярно проводити технічну діагностику, профілактичні роботи та інші попереджувальні роботи, що направлені на зберігання високих показників надійності

Таким чином, проблема надійності в кінцевому рахунку потребує системного підходу, який важко застосувати, якщо РЕА розробляється декількома розробниками спеціалізованими групами. Відсутність зв'язків при вирішенні проблеми надійності на всіх етапах може призвести до невдачі - всі зусилля великого колективу розробників по створенню нового зразка РЕА.

Перший основний етап, на якому закладається необхідний рівень надійності РЕА - **проектування**. Цей етап охоплює період часу від складання ТЗ до передачі документації на підприємство-виробник для виробництва. Закладена надійність на цьому етапі (проектування) не може компенсуватися на наступних етапах.

Крім того, підвищення надійності РЕА на етапі проектування, конструювання, виготовлення, експлуатації досягається:

- підвищенням надійності всіх елементів, що використовуються;
- розробкою ефективної технології виробництва та методів контролю, щоб виробляти та відбирати високоякісні вузли та блоки;
- шляхом введення компонентної надмірності;
- шляхом введення схемної надмірності (резервування);
- шляхом введення інформаційної надмірності;
- використання автоматичної діагностики;
- удосконалення технології виготовлення елементної бази, методів контролю її параметрів та створення високонадійних елементів нового типу.

12.1. Резервування

Резервування є надмірність, що не працює, що не приймає участі в роботі, але яка у відповідний момент може бути ввімкнена в роботу. Тобто, якщо елемент системи має резерв, то при відмові будь-якого елемента його функції починає виконувати резервний елемент. Тому резервована система має більшу надійність, чим нерезервована.

Резервні елементи до ввімкнення можуть знаходитися в:

- на вантаженому стані;
- ненавантаженому стані;
- в полегшеному режимі.

Навантажений резерв характеризується тим, що резервні елементи знаходяться (у відношенні надійності) в тому ж режимі, що й основний елемент. Практично степінь зменшення надійності оснований на резервних елементах в часі в даному випадку однакова.

Ненавантажений резерв визначається тим, що резервні елементи не мають навантаження, що могло б вплинути на зниження їх надійності в часі. В момент їх включення замість відмовлених, вони зазвичай володіють початковою надійністю (що дорівнює надійності основних елементів до ввімкнення їх в роботу).

Полегшений резерв характерний тим, що резервні елементи знаходяться в полегшеному, слабо навантаженому режимі, що забезпечує суттєве зменшене зниження їх надійності в часі. Тобто до моменту включення надійність у них суттєво вище чим у ненових елементів.

Надійність з навантаженим резервуванням.

Нехай елемент має $(m-1)$ резервних елементів. Елементи мають відповідну надійність $P_1(t), P_2(t), \dots, P_m(t)$ та $q_1(t), q_2(t), \dots, q_m(t)$.

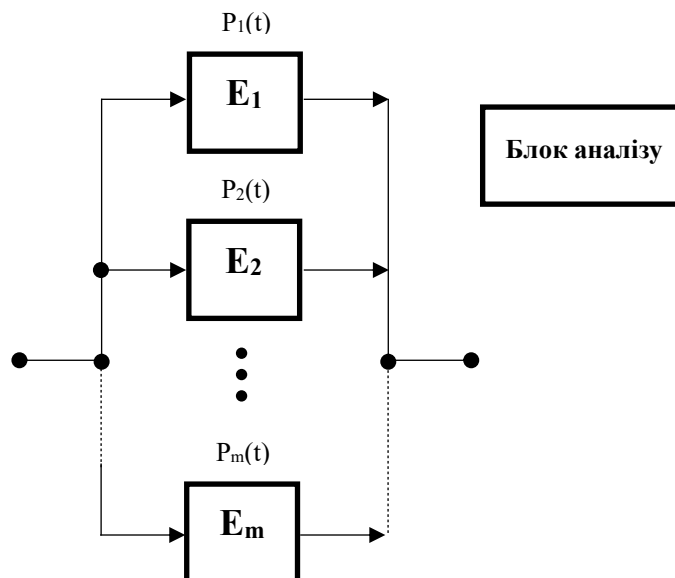


Рисунок 12.1 - Приклад схеми

Вважаємо, що час заміни елемента, який відмовив, дорівнює нулю. А пристрій, що виконує заміну елементів що відмовили, володіє ідеальною

надійністю. Надійність елементів не залежить від інших елементів що відмовили, розглядаються відмови типу “обрив”.

Для цього випадку (надійність з навантаженим резервом) виграш в надійності визначається співвідношенням:

$$n_{(Q)} = \frac{q_i}{Q_m} \approx \frac{\lambda_i t}{(\lambda_i t)^m} \approx \frac{1}{(\lambda_i \cdot t)^{m-1}} \quad (12.1)$$

При умові $\lambda t \ll 1$. $q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t$. Для великих значень λt цього виграшу немає.

Надійність з *ненавантаженим резервуванням*

Допущення, що були озвучені вище, залишаються. Крім того, умови роботи такі: після відмови основного елемента на його місце включається резервний. Повна відмова буде тоді, коли відмовить останній резервний елемент.

$$T_{cp} = \frac{m}{\lambda} \quad (12.2)$$

Надійність з *полегшеним резервуванням*.

В даному випадку, надійність вище чим з навантаженим резервуванням та менше, ніж з ненавантаженим.

Для $\lambda t \ll 1$ виграш в надійності визначається:

$$n_{(Q)} = \frac{m! \lambda^m}{[\lambda + (m - 1)\lambda_{пол}]} \quad (12.3)$$

де λ - інтенсивність відмов елемента в *робочому* режимі;

$\lambda_{пол}$ - інтенсивність відмов елемента в *полегшеному* режимі.

Виграш в надійності системи з n послідовно з'єднаних елементів визначається як

$$n_Q = \frac{1}{(n \cdot \lambda \cdot t)^{m-1}} \quad (12.4)$$

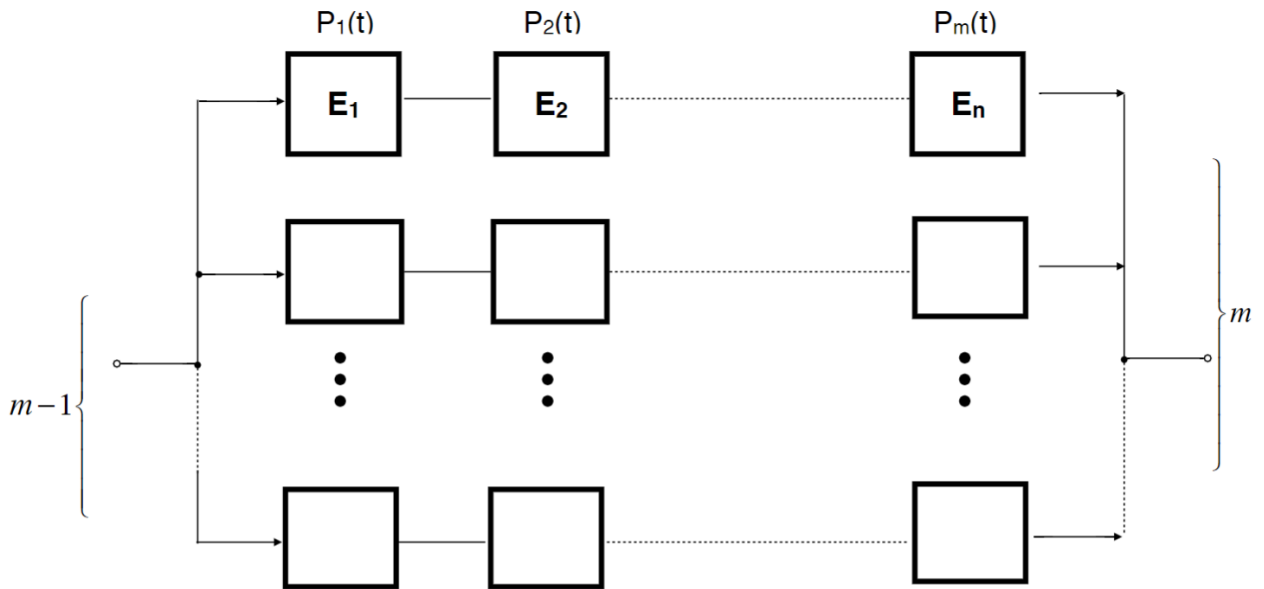


Рисунок 12.2 - Приклад схеми

При по елементному резервуванні

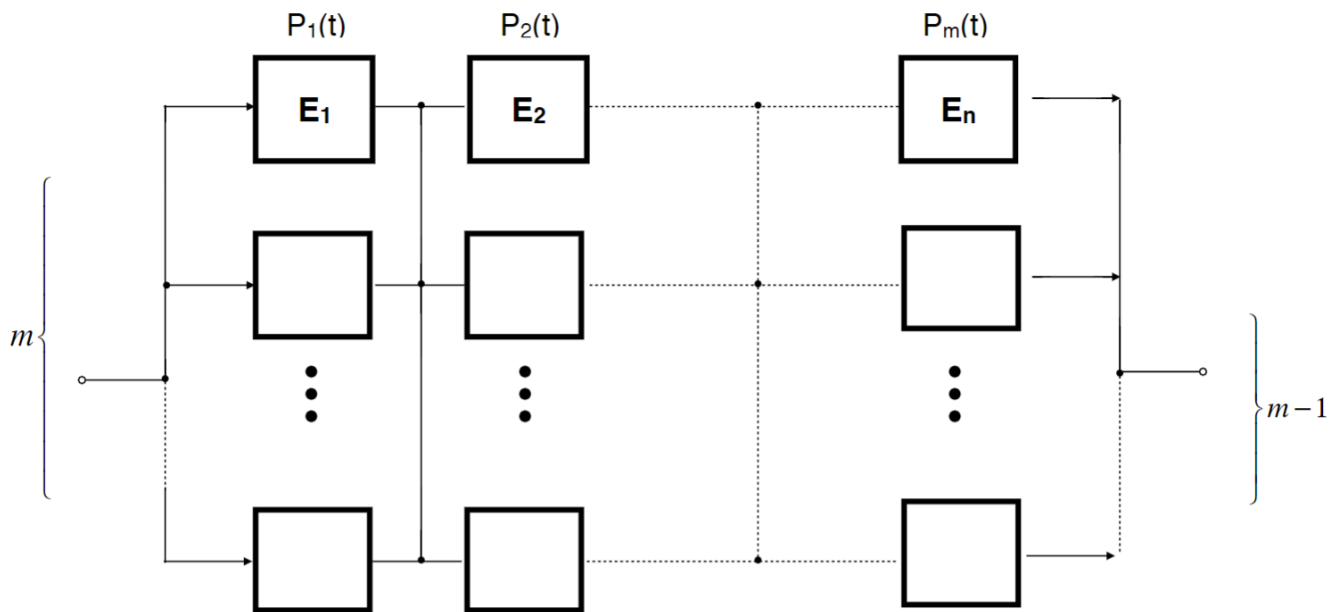


Рисунок 12.3 - Приклад схеми

Для рівно надійних елементів для резервованої групи елементів:

$$[P_m(t)]_n = \{1 - [1 - P(t)]^m\}^n \quad (12.5)$$

Можна зробити наступні важливі висновки:

- по елементне резервування більш ефективно, чим при резервуванні системі в цілому;
- при навантаженому резерві система в цілому T_{cp} системи зі збільшенням кратності резервування зростає повільно. Так при кратності $m = 10$ (кратність резервування дорівнює 10) T_{cp} зростає всього в 3 рази;
- ефективність резервування суттєво помітна при малих значеннях λt . Наприклад, при $\lambda t = 0,1$ та кратності резервування 1 ($m = 2$), ймовірність відмови зменшується в 10 разів, а при наявності трьох резервних систем - в 1000 разів.

Отже, з точки зору T_{cp} , кратність резервування збільшувати недоречно. Якщо ж оцінювати ефективність резервування по ймовірності безвідмовної роботи, то отримаємо прямопротилежний результат;

- по елементне резервування хоч і дає більшу ефективність при малих значеннях λ_e , тобто для порівняно простих систем - для складних систем таке резервування реалізувати складно.

12.2. Схемне резервування

Підвищенням надійності елементів в наш час не вдається повністю вирішити проблему побудови надійних ЕОМ. Це визвано значним випередженням росту складності нових розроблених ЕОМ, а також існуванням елементів, надійність яких достатньо низька та важко піддається підвищенню. Тому один зі шляхів підвищення надійності — введення **схемної надмірності**.

Схемна надмірність - схемне резервування припускає включення в схему пристрою додаткових елементів, які дозволяють компенсувати відмови окремих частин пристрою та забезпечити його надійну роботу. Але резервування ефективно тільки в тому випадку, коли несправності є статистично незалежними.

По способу включення резервних елементів функціональних пристроїв розрізняють наступні види резервування без відновлення:

- постійне;

- із заміщенням;
- ковзне.

При *постійному* резервуванні передбачається, що будь-який вузол, що відмовив, не впливає на нормальну роботу всього пристрою. Тому пошук елемента, що відмовив, не виконується. Це вид резервування використовується там, де недопустимо навіть короточасна перерва в роботі пристрою.

При резервуванні з *заміщенням* виконується автоматичне виявлення несправного елемента, його відключення та підключення працездатного елемента. Заміна блоку, що відмовив, може бути виконано автоматично чи вручну.

Резервування з *заміщенням* має наступні переваги:

- не потребує регулювання вихідних параметрів;
- резервна апаратура до підключення вимкнена (живлення не подається), що підвищує загальну надійність системи;
- є можливість використання одного резервного елемента на декілька працюючих.

При *ковзкому* резервуванні є декілька основних елементів та один резервний. Резервний елемент може заміщувати будь-який з основних елементів.

Схемне резервування має наступні недоліки:

- резервується складний пристрій, що веде до збільшення ваги, габаритів, споживаної потужності, тобто до ускладнення конструкції;
- блок аналізу несправностей є складним пристроєм з кінцевою надійністю

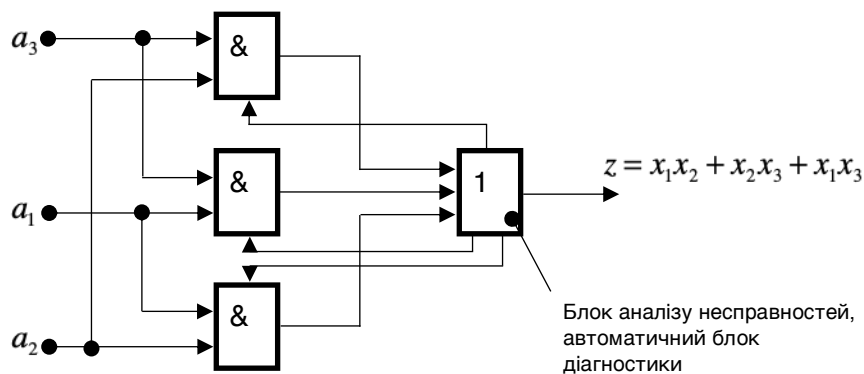


Рисунок 12.4 - Приклад схеми

12.3. Компонентне резервування

Будь-яке підвищення надійності резервуванням є так чи інакше надлишковим.

Дане резервування розглянемо на прикладі *квадрованого інвертора*.

Надійність роботи дискретних елементів РЕА, зокрема інвертору, визначається його активним елементом. В відсотковому відношенні інвертори у виробі складають до 30% від загального числа цифрових елементів.

Схему інвертора ви знаєте.

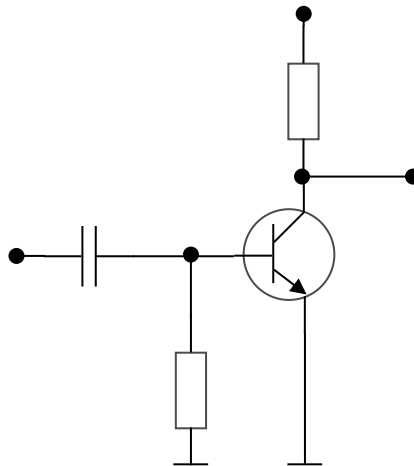


Рисунок 12.5 Схema інвертора

Для підвищення надійності інвертора широко використовують принцип *надлишковості компонентів*, тобто для підвищення надійності інвертора надлишковість компонентів є принципово необхідною умовою.

Компонентне резервування дозволяє:

- збільшити в 4-5 разів надійність у порівнянні з методом надлишковості на рівні схеми;
- забезпечує нормальну роботу при виникненні двох та більше несправностей в різних ланцюгах;
- невелике збільшення обладнання та споживаної потужності;
- відсутня складна схема автоматичної діагностики та перемикання на справну схему (*відсутній блок аналізу*), що завжди є при схемному резервуванні.

Побудова схеми інвертора з резервуванням на рівні компонентів виконується з урахуванням ймовірних несправностей активних дискретних компонентів - *транзисторів*.

Вихід з ладу тріодів (*транзисторів*) є ймовірним як за рахунок їх короткого замкнення, так і за рахунок обривів (*катастрофічні відмови*). Тому резервування ведеться по схемі їх послідовно-паралельного з'єднання - такі з'єднання дозволяють покращити показники надійності. Особливість резервування транзисторів обумовлена наявністю трьох сигнальних електродів.

Схема квадрованого генератора представлена нижче:

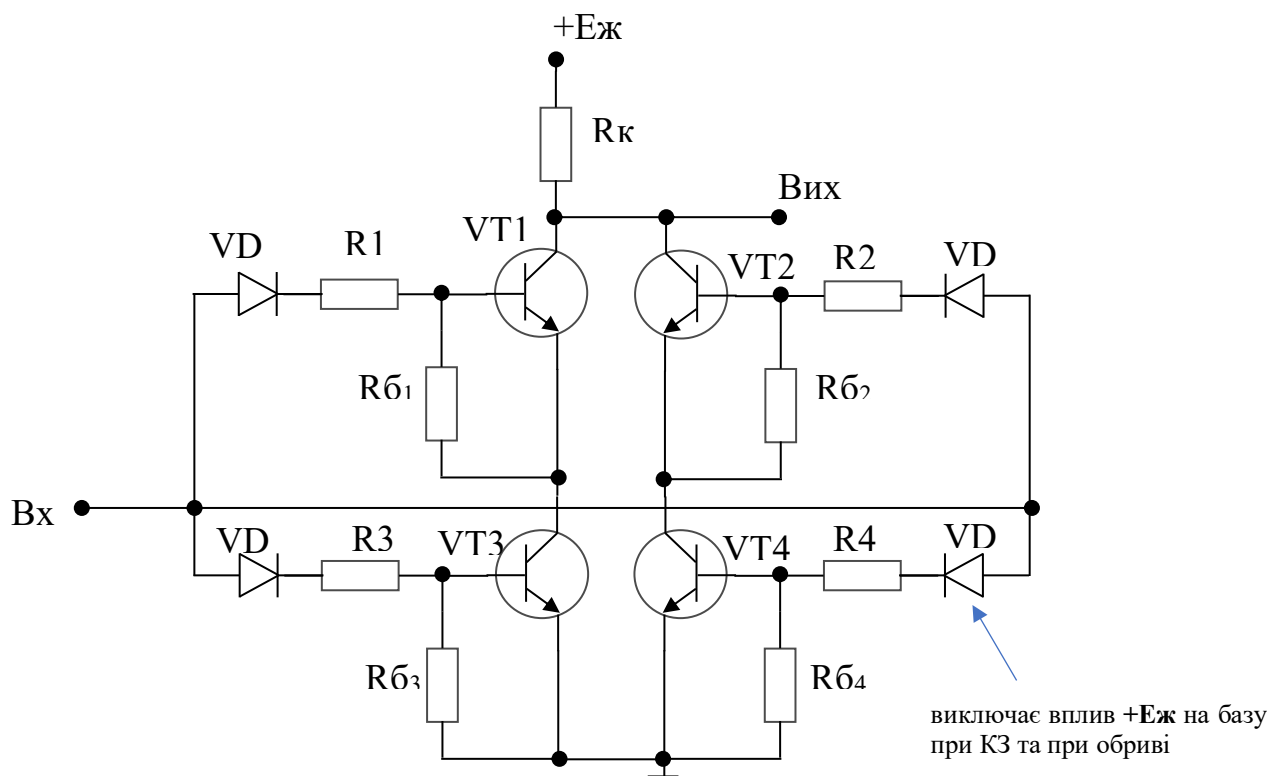


Рисунок 12.6 - Схема квадрованого генератора

На “плечах” з’єднання елементів *послідовно*. “Плечі” з’єднані *паралельно*.

Найбільш ймовірні відмови такого характеру:

- обрив, тобто виводи VT обірвані (внутрішньо - перегоріли);
- КЗ - (коротке замкнення) всередині корпусу.

Таким чином, елементи в інверторі можуть знаходитися в наступному стані: **Р** (робочий), **ОБ** (обрив), **КЗ** (коротке замкнення).

Щоб показати виграш в надійності **квадрованого інвертору** необхідно для 4-х транзисторів скласти карту станів: елементами Таблиця 12.1 є цифри, що вказують кількість несправностей в схемі. Якщо цифра обведена в кружок - схема не працездатна.

З Таблиця 12.1 слідує:

1. При одній відмові елемента схема працездатна, тобто “1” в таблиці не обведена кружком;
2. При 4-х відмовивших елементах схема не працездатна, тобто всі “4” обведені кружком;
3. Сумарна кідькість станів схеми: **81 = 42 + 39**. **42** несправності призводять до до втрати працездатності (*42 кружка*) та **39** несправностей не впливають на працездатність.

З Таблиця 12.1 слідує, що якісний виграш надійності є. Це, так сказати, *якісна оцінка*. Оцінимо *кількісно* виграш.

Ймовірність відмови квадрованого інвертора (Q_{KB}) визначається як сума ймовірностей відмов при всіх елементах що працюють; при одному що відмовив; двох, трьох, чотирьох елементах та з урахуванням того, що не всі види відмов елементів (за винятком чотирьох) призводять до відмови схеми в цілому.

Ймовірність відмов квадрованого інвертора:

$$Q_{KB} = \sum_{i=0}^4 n_i Q_i \quad (12.6)$$

де Q_i - ймовірність відмов i -х елементів схеми

i - кількість несправних елементів $i = 0, 1, 2, 3, 4$. При $i = 0$ всі елементи справні

Таблиця 12.1 Стани транзисторів квадрованого інвертору

VT1		P			ОБ			КЗ		
VT3	VT2 VT4	P	ОБ	КЗ	P	ОБ	КЗ	P	ОБ	КЗ
P	P	0	1	1	1	2	2	1	2	2
	ОБ	1	2	2	2	3	3	2	3	3
	КЗ	1	2	2	2	3	3	2	3	3
ОБ	P	1	2	2	2	3	3	2	3	3
	ОБ	2	3	3	3	4	4	3	4	4
	КЗ	2	3	3	3	4	4	3	4	4
КЗ	P	1	2	2	2	3	3	2	3	3
	ОБ	2	3	3	3	4	4	3	4	4
	КЗ	2	3	3	3	4	4	3	4	4

$$n_i = \frac{N_i}{K_i} \quad (12.7)$$

де N_i - кількість станів відмов схеми при i несправних елементах. Визначається з таблиці ($i = 2 N$ - кількість відмов схеми при двох несправних елементах)

K_i - кількість всіх можливих станів схеми, при i несправних елементах ($i = 2 K_i = 24$ - всього станів схеми при двох несправних елементах).

Таблиця 12.2 Визначення ймовірностей відмов квадрованого інвертора при “ i ” несправних елементах

Кількість несправних елементів в схемі, i	Кількість можливих станів схеми при i відмовлених елементах, K_i	Кількість відмов схеми при i відмовлених елементах, N_i	$n_i = N_i/K_i$
0 - всі елементи працездатні	1	0	$n_0 = 0$
1 - один елемент відмовив	8 (<i>потрібно порахувати всі клітинки з одною відмовою</i>)	0 (<i>ні одна клітка не обведена</i>)	$n_1 = 0/8$ $n_1 = 0$
2 - два елементи відмовили	24	6 (<i>обведено шість двійок</i>)	$n_2 = 6/24 = 0.25$
3 - три елементи відмовили	32	20	$n_3 = 0.625$
4 - чотири елементи відмовили	16	16	$n_4 = 1$

Всього **81** стан: **42** призводить до відмови; **39** несправностей не призводить до відмови.

Маючи на увазі, що не всі комбінації відмов елементів призводять до відмови схеми в цілому, а тільки n_i призводить до відмови (Таблиця 12.2), отримаємо

$$Q_{\text{КВ}} = \sum_{i=0}^4 n_i Q_i = n_0 Q_0 + n_1 Q_1 + n_2 Q_2 + n_3 Q_3 + n_4 Q_4 \quad (12.8)$$

$$= 0,25 \cdot Q_2 + 0,625 \cdot Q_3 + Q_4$$

Ймовірність безвідмовної роботи схеми при i несправних елементах визначається наступним чином:

$$Q_2 = 6 \cdot q_e^2 \cdot (1 - q_e)^2 - \text{ймовірність того, що два елементи відмовили}$$

$$Q_3 = 4 \cdot q_e^3 \cdot (1 - q_e)^3 - \text{ймовірність того, що три елементи відмовили}$$

$$Q_4 = q_e^4 - \text{ймовірність того, що чотири елементи відмовили}$$

Тоді

$$Q_{\text{КВ}} = 0,25[6 \cdot q_e^2 \cdot (1 - q_e)^2] + 0,625 [4 \cdot q_e^3 \cdot (1 - q_e)^3] + q_e^4$$

Приблизно

$$Q_{\text{КВ}} \cong \frac{3}{2} q_e^2 (VT)$$

Зменшення ймовірності відмов схеми квадрованого інвертора по зрівнянню зі схемою на одному елементі (*схема виконано на одному транзисторі*) визначається

$$n_{\text{КВ}} = \frac{q_e}{Q_{\text{КВ}}} = \frac{2}{3q_e} \gg 1$$

Виграш в показниках надійності квадрованого інвертора.

Контрольні запитання

1. Надійність. Визначення. Залежності
2. Впливи на надійність
3. Методи вирішення задач надійності
4. Стани радіоапаратури. Визначення
5. Напрацювання на збій
6. Відмова. Напрацювання на відмову
7. Класи факторів, що впливають на надійність
8. Властивості надійності
9. Надійність. Характеристики зовнішніх навантажень
10. Експлуатаційні показники надійності. Циклічність роботи приладу
11. Типи відмов
12. Надійність. Системи з простою структурою
13. Надійність. Системи зі складною структурою
14. Методи підвищення надійності

13. МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ДП

За відносно коротку історію розвитку технології ДП запропоновано, розроблено та випробувано велику кількість способів їх виготовлення. Але практичне використання знайшли ті, які основані на **хімічних процесах травлення** (*субтрактивний метод*) або **осадження** (*адитивний метод*). Слід особливо відмітити, що ці методи на “ура” підтримала промисловість - це дуже важливо.

Більшість сучасних технологій поєднують обидва прийоми (*комбінований метод*), зокрема травлення мідної фольги та нарощування міді на діелектричних поверхнях (металізація), наприклад, в отворах.

Нарощування (осадження чи інші гальванічні прийоми) служить також для збільшення товщини (перетину) провідників на ДП або для отримання різних гальванічних (металічних) покриттів, що забезпечують захист мідних поверхонь та покращують якість пайки компонентів.

Таким чином, сучасне виробництво ДП *основане на гальванічних процесах* в поєднанні з механічною обробкою та рядом інших додаткових прийомів та технологій.

Нижче розглянемо найбільш відомі та широко застосовувані у виробництві варіанти конструкцій ДП та відповідні технологічні процеси. При цьому ставиться задача не дати всі тонкощі технології виготовлення ДП, а дати в основному тільки ті відомості, що необхідні для проєктування друкованих вузлів методами різноманітних САПР.

Радіoeлектроніка та обчислювальна техніка міцно закріпилися у всіх сферах людської діяльності в самих різних сферах - від найпростіших електричних схем до найскладніших обчислювальних комплексів. *Оснoву* всіх цих пристроїв складає ДП, створення яких потребує від розробників та конструкторів врахування самих різноманітних, а часом і суперечливих впливів. Постійне вдосконалення елементної бази, широке впровадження багатомовних

IC, IC з кульковими виводами (BGA корпус), також БДП, призвело до того, що вона (ДП) в даний час є основними компонентами в сучасній апаратурі.

Можна стверджувати й так: розробка РЕА 4-го та, особливо, 5-го поколінь стикнулися з такою дилемою - параметри в/ч (високочастотної) елементної бази не вдавалося реалізовувати на ДП на основі СФ. Плата стала самим вузьким елементом (вузлом) в пристрої: *ДП не була елементом пристрою; параметри ДП були самі по собі та вважалися константними.*

Щоб підвищити параметри ДП необхідно було розробити інший матеріал - FR, що має масогабаритні та електричні параметри набагато кращі ніж у СФ. Вирішено багато конструктивних задач машинного проєктування РЕА. На ДП друковані провідники стали розглядатися та проєктуватися як лінії зв'язку узгоджені з навантаженням, стала обов'язковою вимога $\Sigma L_{3\phi} = \min$. Впроваджується поняття полоскові лінії зв'язку, хвильовий опір яких можна задавати параметрами провідника.

Таким чином, РЕА стала високочастотна, швидкодіюча. Вона містить всі конструктивні в/ч елементи: IC -> ДП = в/ч ДВ. Все стало узгодженим - все змінило свою конструкцію та параметри.

Виробництво БДП є складним технологічним процесом, що складається з більш ніж **ста кроків**. Більше 20 шарів складно зв'язані між собою тільки щоб сформувати БДП з 3-х мірною структурою. Число шарів залежить від дизайн проєкту конкретного пристрою. Процеси формування різних шарів БДП достатньо хитромудрі, але в їх основі одна проста ідея - матеріал осаджують зразу на всю поверхню кожного шару, а потім осаджений матеріал акуратно видаляють з тих ділянок, де він непотрібен. Для цього слугує процес *фотолітографії*. Материнські плати зазвичай мають не менш чотирьох або шести шарів металізації.

1. *Методи виготовлення ДДП (ОДП)*
2. *Методи виготовлення БДП*
3. *Виготовлення ДВ*

Класифікацію методів виготовлення ДП, що використовуються в наш час на виробництві можна представити наступним чином:

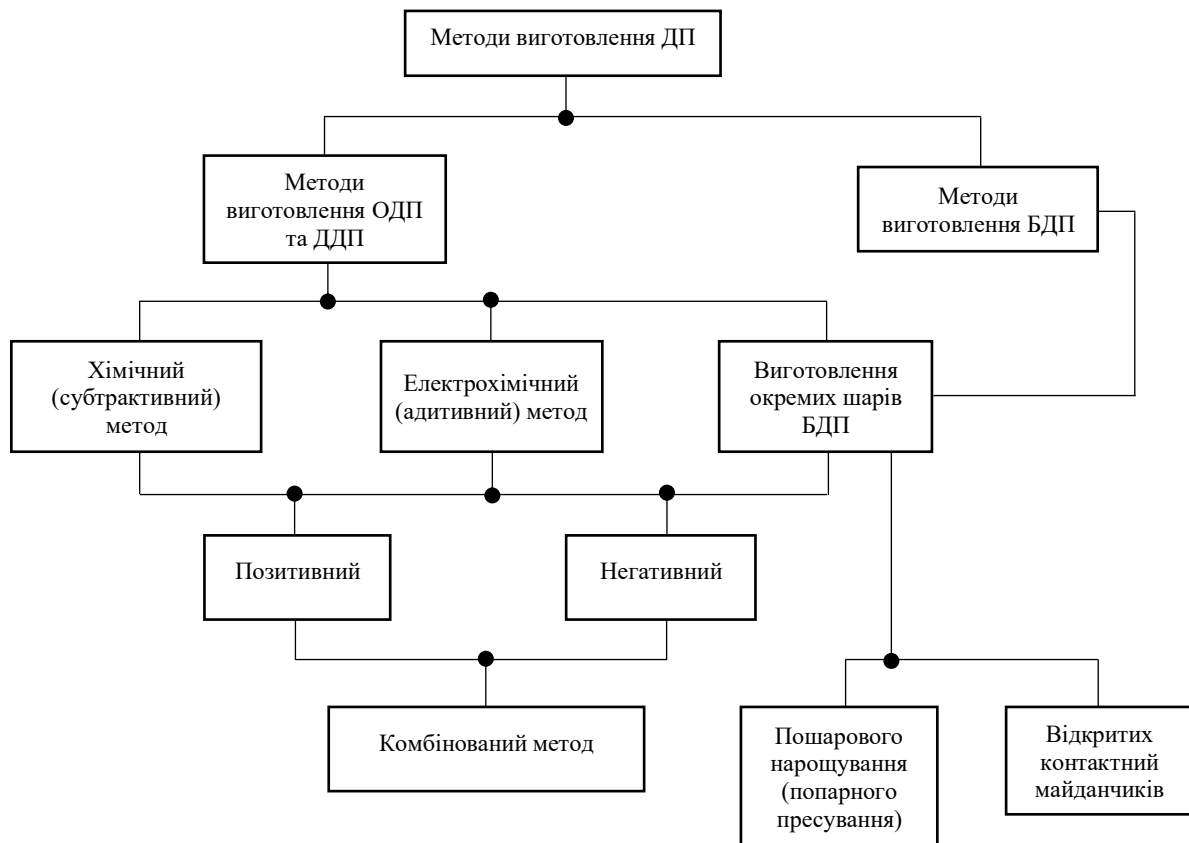


Рисунок 13.1 - Методи виготовлення ДП

Слід відмітити, що всі методи виготовлення ДП включають набір приблизно однотипних технологічних операцій, основними з яких є:

- нанесення захисного покриття (резисту);
- отримання друкованого малюнку елементів монтажу (доріжки та КМ для поверхневого монтажу);
- виготовлення МО та ПО;
- пресування або склеювання друкованих шарів (для багатошарової структури);
- операційний контроль.

Нанесення топологічного рисунку схеми або формування захисного рельєфу необхідної конфігурації необхідно при виконанні процесів металізації та травлення. Рисунок повинен мати чіткі границі з точним відтворенням вузьких

ліній, бути стійким до травильних розчинів, не забруднювати основу плати, легко зніматися після виконання своїх функцій.

Перенос рисунку друкованого монтажу з креслення ДП на фольгований діелектрик виконується наступними методами:

- фотодруку;
- трафаретного друку;
- сіткографії;
- офсетного друку;
- методом гравірування (механічним методом).

При методі *фотодруку* поверхня фольги покривається світлочутливим фоторезистом, на який переносять рисунок елементів друкованого монтажу. Метод забезпечує саму високу точність, кращу чіткість та різкість контурів. Тому цей метод використовується, де самі високі вимоги по допускам - БДП, 5-й клас, при малосерійному виробництві, тому що непотрібно виготовляти трафарети.

При *трафаретному друці* захисне покриття (резисти), що нанесені через трафарет на фольгу, утворює стійкий до травлення шар. Товщина шару складає 30-40 мкм. Метод ефективний та екологічний при автоматизації виробництва та випуску великої серії однотипних ДП. *Складно змінити рисунок.*

Суть методу *офсетного друку* полягає в тому, що в кліше, яке несе зображення схеми (печатка в деканаті), закатується фарба. Потім фарба знімається офсетним валиком, покритим гумою, та переноситься на ізоляційну основу (фольгу), а потім сушиться. За допомогою одного кліше можна виконати необмежену кількість відбитків. *Широко використовується для позначення елементів.* Недолік - важко змінити рисунок.

Сіткографічний (сітчатий трафарет) спосіб нанесення рисунку схеми найбільш рентабельний для масового та крупно-серійного виробництва плат з мінімальною шириною провідників. В наш час найбільш використовується.

Суть даного способу полягає в нанесенні на плату спеціальної кислотостійкої фарби через сітчатий трафарет, в якому необхідний рисунок створено сотами сітки, відкритими для продавлювання складу (фарби).

Зображення на сітці отримують за допомогою експонування рідкого або сухого фоторезисту, після прояву якого створюється відкриті соти сітки.

Таким чином, методом фотодруку отримують друкований рисунок елементів друкованого монтажу (друкованих провідників, майданчиків) на сітці сот, які відкриті.

Метод гравірування. Цей метод полягає в вигравуванні відповідного рисунку друкованого монтажу механічним способом - за допомогою фрези. Зазвичай використовується для дослідних цілей - виготовлення одиночних ДП.

13.1. Хімічний субтрактивний метод

13.1.1. Хімічний позитивний метод

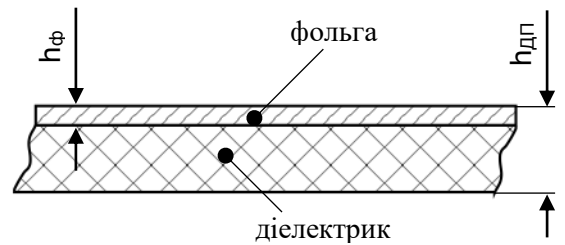
В субтрактивних (*відношення, видалення*) методах провідний рисунок (рисунок елементів друкованого монтажу) утворюється шляхом видалення провідникового шару з незахищених ділянок поверхні фольги. Для цього на мідну фольгу діелектрика наноситься захисний резист у вигляді провідникової схеми, а незахищені ділянки фольги витравлюються.

Отвори не металізуються

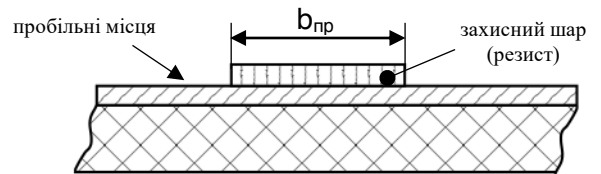
Процес є найбільш простим та дозволяє виготовити ДП з підвищеною щільністю монтажу. Враховуючи те, що МО не мають металізації, то не забезпечується міцність зчеплення в місцях встановлення виводів КЕ. Міцність зчеплення забезпечується розмірами КП та якістю фольгового діелектрика.

Схема технологічного процесу виготовлення ОДП (ДДП) хімічним *позитивним* методом

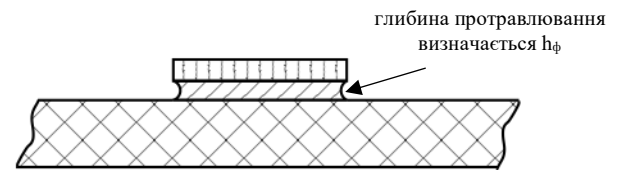
Ретельно оброблений
односторонній фольговий
діелектрик



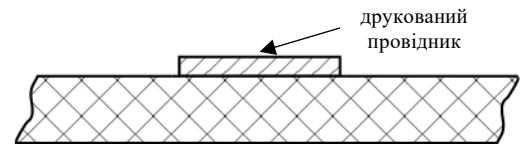
Створення захисного рельєфу:
трафаретний друк, фотодрук, ...



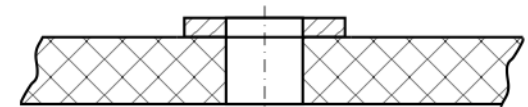
Травлення (хлорид заліза)



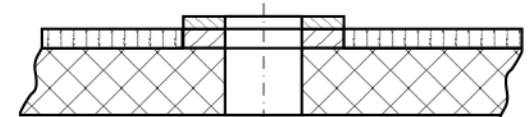
Видалення резисту (механічним,
хімічним шляхом)



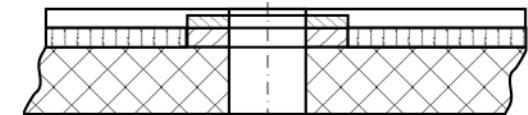
Виготовлення отворів



Маркування, нанесення маски
для пайки, трафаретний друк



Нанесення захисної плівки лаку:
занурення, розпилення



Контроль

Рисунок 13.2 - Хімічний позитивний метод

Таким чином, коротко суть методу наступна.

Матеріал основи опускаємо, тобто не розглядаємо також дуже складні процеси механічної обробки зразку плати - сучасні ДП виготовляються 4 або 5-го класу точності, а це означає, що високі конструктивні вимоги пред'являються

не тільки до елементів друкованого монтажу, а й до механічної обробки, до точності фіксації плати при формуванні рисунку друкованих елементів. Потім йде ретельна обробка поверхні фольги. Ця обробка в подальшому забезпечує високу якість виготовлення ДП.

Після етапу механічної підготовки ДП на мідну фольгу наноситься кислотостійкою фарбою позитивний рисунок схеми провідників (*звертаю вашу увагу на необхідну точність*). Травленням в розчині хлоридного заліза видаляється мідь з незахищених ділянок і на діелектрику утворюється необхідна схема провідників.

Після етапу травлення ДП проходить ряд технологічних операцій, що пов'язані з очищенням ДП від захисної фарби та результатів хімічної реакції (*багатократна промивка*).

Недоліки методу

- великі втрати міді (60-90%) високоякісної, електрохімічної (*при виготовленні 16000м² ДП втрати міді сягають 3-6т*);
- немає металізації отворів;
- підтравлювання друкованих провідників (бокове). Підтравлювання провідників обмежує їх мінімальну ширину. Це призводить до того, що $b_{пр}$ збільшують на $1.5h_{ф}$. При цьому вся складність полягає в тому, що $b_{пр} = 100\text{мкм}$ та менше (*не у нас*) і він ще й протравлюється з боків;

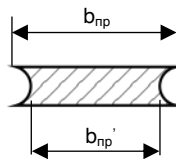


Рисунок 13.3 - Підтравлювання провідника

- використовується травильна кислота - агресивне середовище. Це потребує розробляти технологічне обладнання, що відповідає агресивності матеріалів.

Переваги методу

- висока роздільна здатність;
- короткий технологічний цикл;
- високе відпрацювання технологічного процесу (з 1924 року - видано патент).

Звертаю вашу увагу $t_{np} = h_{\phi}$

13.1.2. Хімічний негативний метод

В самому методі захисний рельєф створюється гальванічним покриттям мідних поверхонь, що захищені резистом. Тип матеріалу, що наноситься, визначається функцією шару, тобто в БДП різні шари покриваються різними матеріалами.

Наступними операціями є видалення резисту та травлення, при цьому гальванічно осаджені шари служать захисною маскою. *Негативний метод* може використовуватися при виготовленні всієї ДП або тільки окремих елементів друкованого монтажу, окремих шарів БДП.

Схема технологічного процесу виготовлення ОДП (ДДП) *негативним* хімічним методом:

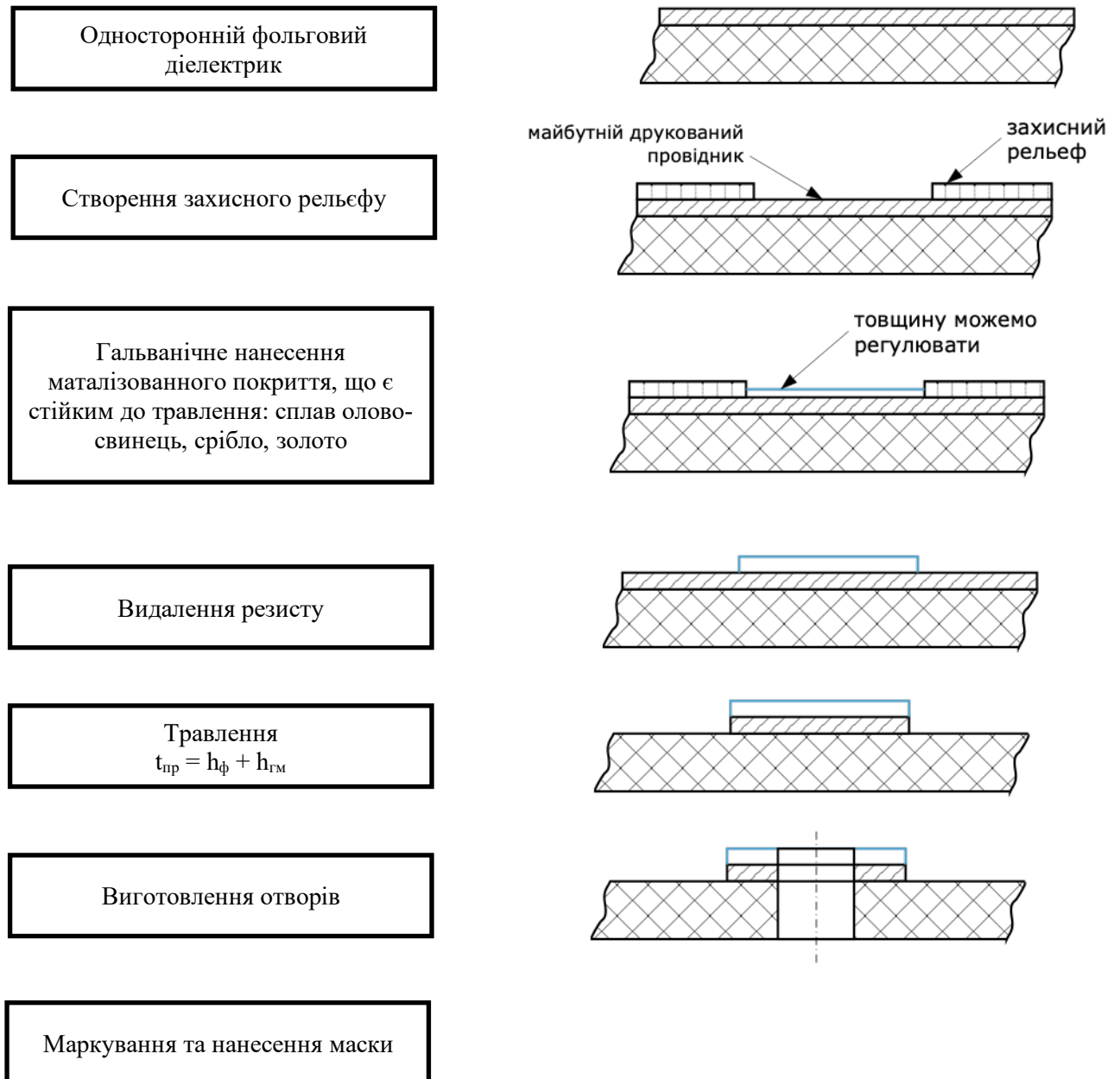


Рисунок 13.4 - Хімічний негативний метод

Звертаю вашу увагу на принципову різницю між *позитивним* та *негативним* методами:

- в позитивному методі елементи друкованого монтажу захищаються від травлення фоторезистом;
- в негативному - фоторезист захищає місця, що підлягають травленню.

Розглянемо інший метод виготовлення ДП

13.2. Адитивні методи

Адитивні методи оснований на вибіркового хімічному або хімічно-гальванічному осадженні *металу* на ізоляційну поверхню, на яке попередньо може наноситися шар клеєвої композиції.

В порівнянні з субтрактивними методами, адитивні забезпечують такі **переваги**:

- більш висока роздільна здатність: ширина провідників та зазорів між ними може сягати менше 0.1мм;
- немає підтравлювання провідників та КМ;
- провідники та металізовані МО мають однорідну структуру, тому що отримані під час одного хіміко-гальванічному процесі;
- економія міді, хімікатів для травлення, екологічна чистота;
- зменшує тривалість виробничого циклу;
- при адитивному методі $t_{пр} = t_{осадженої\ міді}$ - але товщину можна регулювати - це важливо, тобто збільшуємо струм товщиною, а не шириною провідника;
- висока надійність щеплення провідників, МО з КМ, тому що провідники та МО виготовляються в одному технологічному процесі.

Можна виділити наступні **недоліки**:

- нерівномірність товщини покриття в МО, тому що нерівномірна щільність струму при виконанні процесу осадження - *крайовий ефект*;
- низька швидкість осадження;
- висока вартість.

13.2.1. Хімічний адитивний метод

Метод оснований на вибіркового *осадженні* хімічної міді на нефольговий діелектрик. При цьому використовують діелектрик з введеним до його складу каталізатора та адгезованим шаром на поверхні. Осадження міді виконується на місцях провідників та в монтажні отвори.

При формуванні провідників пусті ділянки покривають захисним шаром - ділянки під провідники та КМ з МО залишаються відкритими.

Свердлюються отвори. На відкриті ділянки для друкованих провідників, отворів *хімічним* методом осаджується мідь. Потім виконується гальванічне осадження міді. При цьому створюються друковані провідники, КМ та одночасно металізуються отвори.

Виготовлення ДДП з металізованими монтажними отворами хімічним адитивним методом.

Електричне з'єднання двох сторін ДП є актуальним. Тому були багаточисельні спроби вирішити цю задачу: впаювання проволочки або штифтів, використання пустотілих заклепок, що характеризуються низькою надійністю.

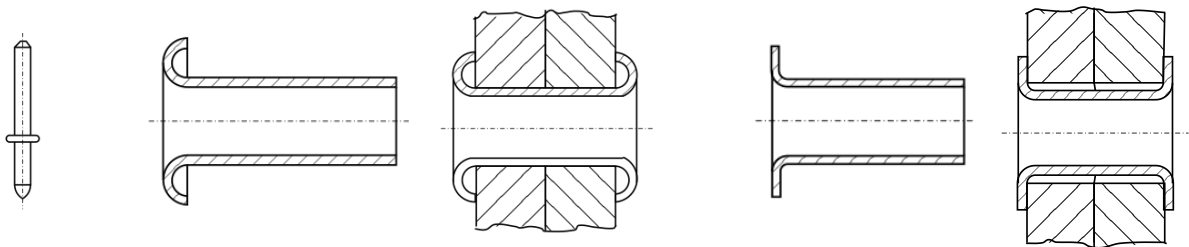


Рисунок 13.5 - З'єднання двох сторін ДП

Можливе також виконання переходу з однієї сторони ДП на іншу за допомогою виводів штирьових компонентів. Тобто перехід виконується безпосередньо за рахунок виводу, але в цьому випадку збільшується кількість точок пайки та в деяких випадках складність.

В наш час для електричного з'єднання шарів використовується тільки *металізовані отвори*. Такі отвори отримують *комбінованим хіміко-гальванічним методом*, що є типовим методом масового виробництва та відповідає іншим технологічним процесам.

Схема технологічного процесу виготовлення ДДП хімічним адитивним методом з металізацією отворів представлено нижче.

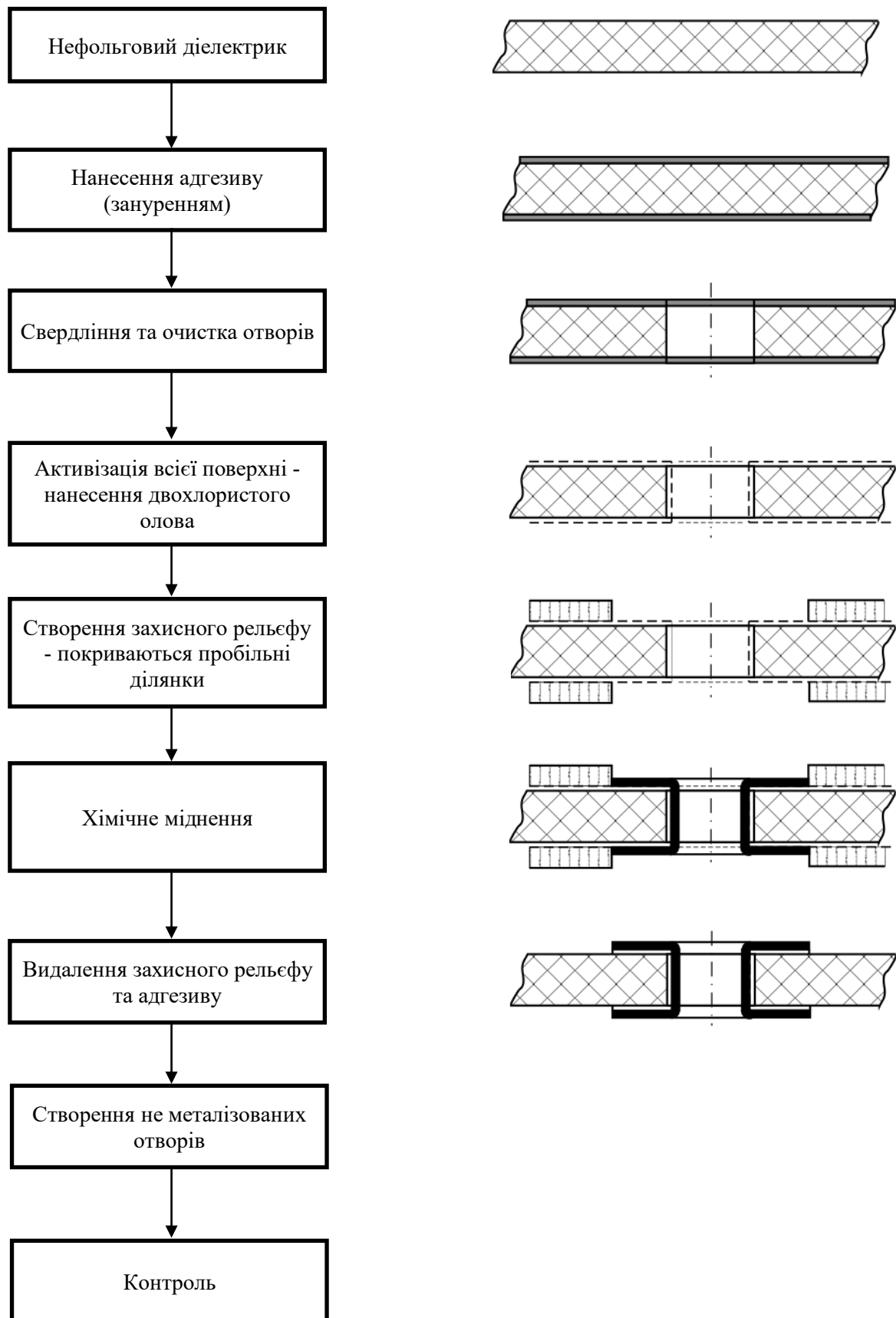


Рисунок 13.6 - Схема технологічного процесу виготовлення ДДП хімічним адитивним методом

13.3. Комбінований метод

Цим методом виготовляються ДП (ОДП та ДДП) з фольгового діелектрика витравлюванням рисунку провідників хімічним методом з металізацією монтажних отворів, КМ, провідників електрохімічним методом.

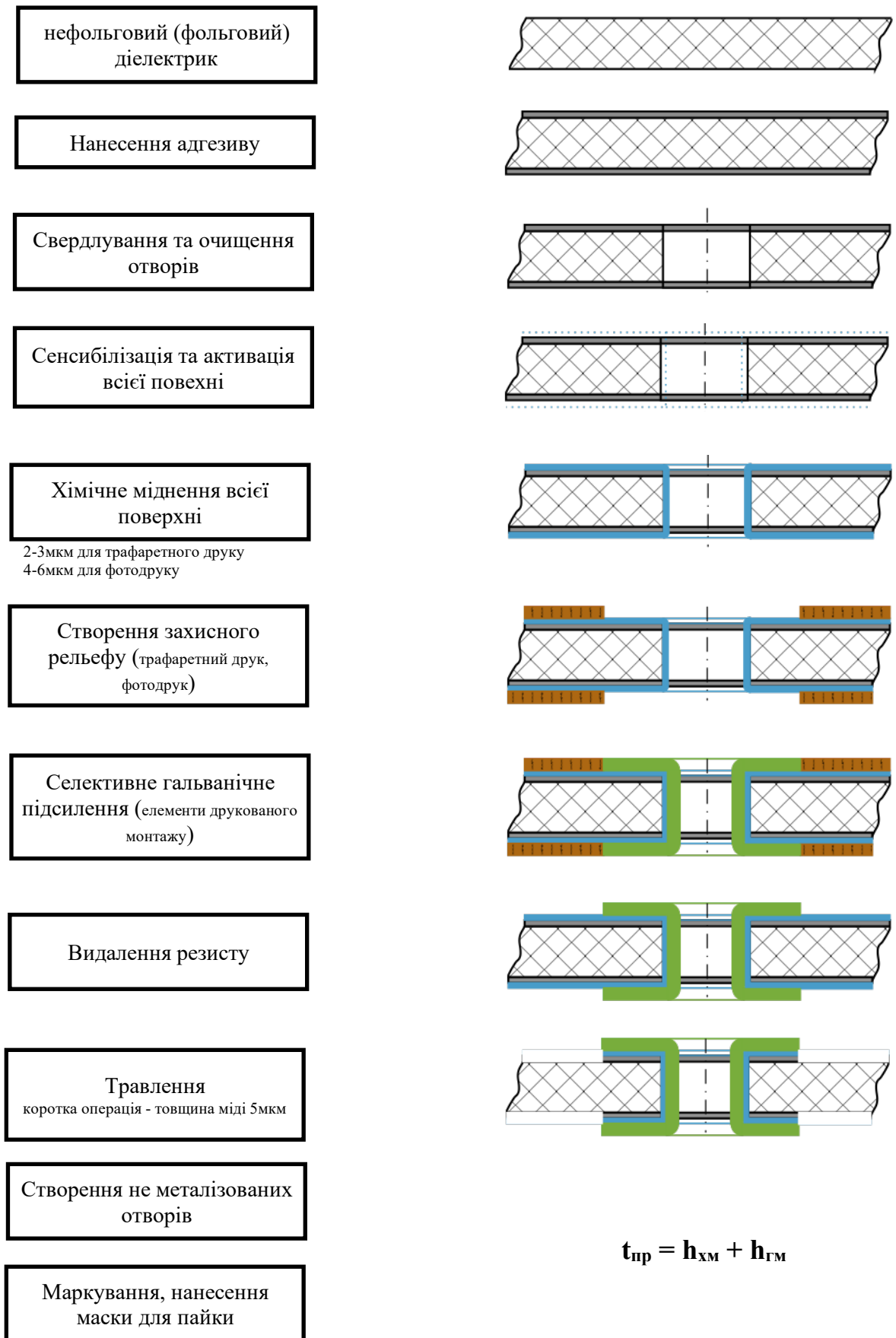
Комбінований метод виготовлення ДДП включає в себе два принципово різних способи *негативний* та *позитивний*.

13.3.1. Комбінований негативний спосіб

Передбачає створення друкованих провідників хімічним способом та металізацію отворів електрохімічним способом.

Типовий технологічний процес має наступні основні етапи:

- отримання заготовок та підготовка поверхні фольги;
- нанесення зображення друкованих провідників;
- видалення незахищених ділянок фольги (травлення);
- видалення захисного покриття провідників;
- нанесення на основу захисного покриття;
- обробка отворів, що підлягають металізації;
- хімічна металізація отворів;
- електрохімічна металізація отворів та друкованих провідників;
- обробка провідних поверхонь легкоплавким сплавом;
- механічна обробка плати.



$$t_{np} = h_{xm} + h_{gm}$$

Рисунок 13.7 - Схема технологічного процесу виготовлення ДДП комбінованим негативним методом

13.3.2. Комбінований позитивний спосіб

Складається з наступних основних етапів:

- підготовка основи;
- нанесення рисунку провідників;
- нанесення захисної лакової плівки;
- обробка отворів;
- хімічне міднення отворів;
- видалення лакової плівки;
- електролітичне міднення отворів та провідників;
- нанесення кислотостійких сплавів та металів;
- видалення емульсії;
- травлення;
- освітлення провідних покриттів;
- механічна обробка плати.

Детально дивимося [О: 4].

При цьому спочатку виконується травлення міді з пробільних місць, а потім виконується свердлування отворів та їх металізація.

Після свердлування та хімічного міднення отворів виконується гальванічне осадження міді на провідники, КМ та МО.

Комбінований позитивний метод комбінує в собі всі переваги хімічного субтрактивного та хімічного адитивного методів:

- підвищена надійність МО;
- високі електроізоляційні параметри плати, тому що діелектрична основа плати закрита мідною фольгою практично у всьому технологічному циклі.

Таким чином базовими технологічними процесами при виробництві ДП є:

- нанесення рисунку схеми провідників на основу;

- отримання рисунку схеми провідників: травлення, електролітична металізація;
- механічна обробка плат: свердлування отворів, пробивання отворів;
- захист друкованих провідників для забезпечення пайки;
- контроль параметрів ДП.

Двосторонній фольговий діелектрик

Свердлування та очищення отворів

Сенсибілізація та активація

*сенсибілізація - розчин двохлористого олова
активація - хлористий паладій*

Хімічне міднення
(хімічне осадження міді товщиною 5мкм)

Створення захисного рельєфу з двох сторін

Гальванічне підсилення міді
(потовщення шарів міді - 5мкм)

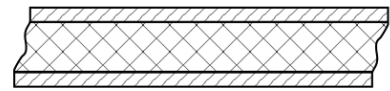
Гальванічне осадження металічного шару, що є стійким до травлення
(сплав олово-свинець, срібло, золото)

Видалення резисту, травлення

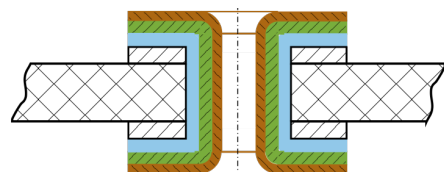
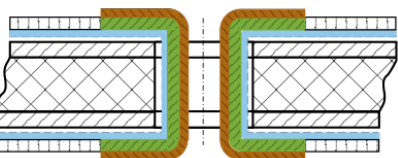
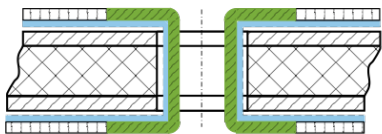
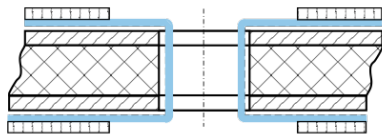
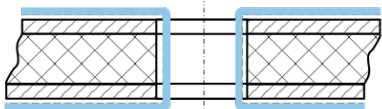
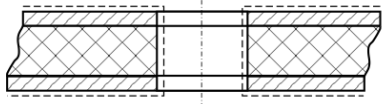
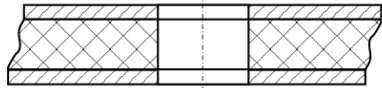
Створення неметалізованих отворів

Маркування, нанесення маски для пайки

отвори тільки свердлюють



отвори повинні бути абсолютно гладкими



Контроль

Рисунок 13.8 - Схема технологічного процесу виготовлення ДДП комбінованим позитивним методом

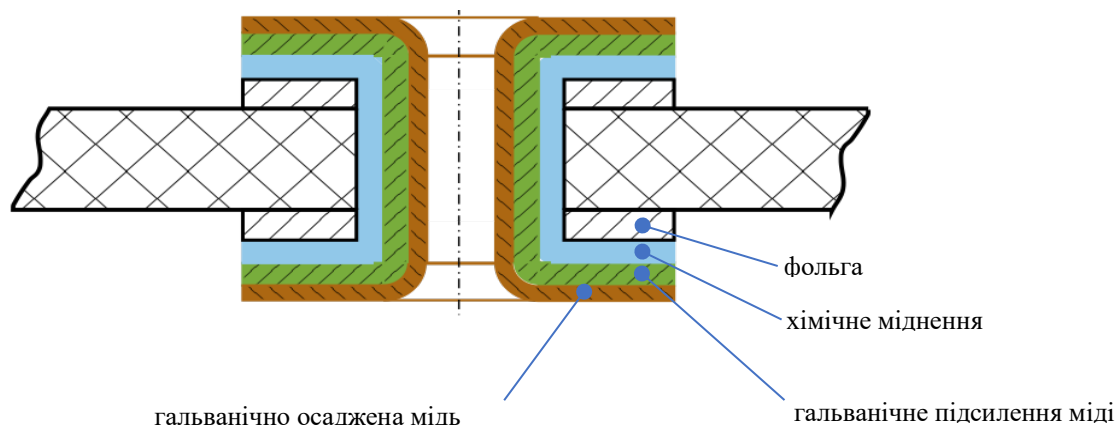


Рисунок 13.9 - Металізований отвір

Створення отворів виконується свердлуванням (або лазером), завдяки чому створюються отвори з чистими та гладкими стінками.

Далі проводять сенсibiliзацію в розчині двохлористого олова та активацію в розчині хлористого паладію, потім хімічне міднення всієї поверхні.

Створюють захисний рельєф. Покриті мідні ділянки, які відповідають рисунку друкованих провідників, залишаються вільними від захисного рельєфу. Вони далі потовщуються гальванічно осадженою міддю та покриваються стійким до травлення металом (планування ДП). Для цього в основному використовується покриття сплавом олово-свинець, яке служить захисним шаром при травленні та полегшує потім процес пайки.

Золото переважно використовується для контактів друкованих роз'ємів.

13.4. Захисне покриття плати (паяльна маска) та фінішне покриття

Для забезпечення захисту друкованих провідників зовнішніх шарів від механічних впливів, для полегшення монтажу компонентів на платі використовують спеціальні захисні покриття (їх дуже часто називають

«зеленкою»). Це покриття буває різних кольорів та наноситься на усю плату, крім контактних майданчиків компонентів.

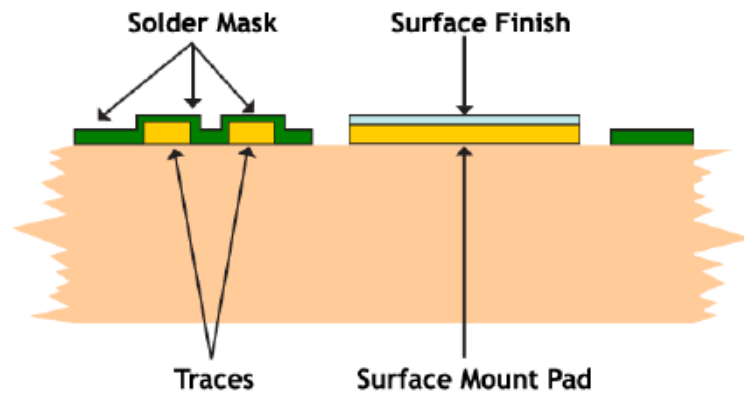


Рисунок 13.10 - Захисна маска та фінішне покриття

На Рисунок 13.10 зображено захисне покриття (Solder Mask), яке лежить на доріжках та поруч з КМ. Також бачимо, що на КМ лежить фінішне покриття (Surface Finish), яке забезпечує полегшення пайки компонентів та захист міді від окислення.

На сьогодні існує велика кількість покриттів (Таблиця 13.1), найрозповсюдженим є HAL Sn Pb. Ця технологія забезпечує додавання на чисте мідне покриття припою та потім його вирівнювання методом гарячого луження. Якщо на платі є захисне покриття (як на Рисунок 13.10) то фінішне покриття наносять тільки на КМ.

13.5. Друковані контакти

Часто по функціональним причинам необхідна металічна чиста поверхня - друковані вилки роз'ємів, КМ, поверхня контактів. В цьому випадку шари міді елементів друкованого монтажу після травлення плакуються - наноситься захисна плівка

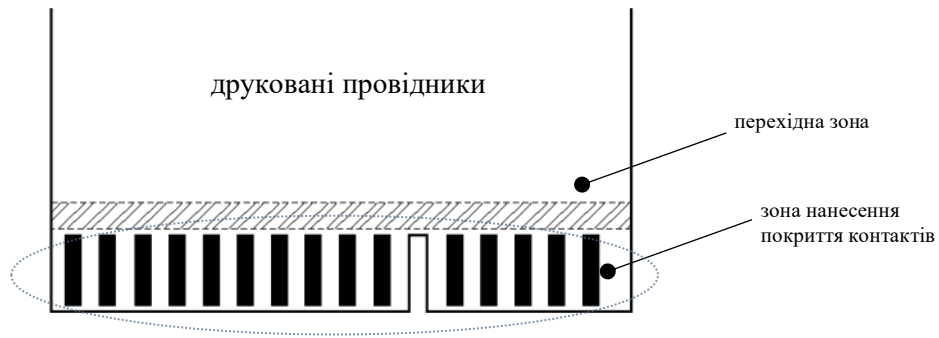


Рисунок 13.11 - Друкований провідник

Перетин провідника з захисним покриттям при позитивному методі

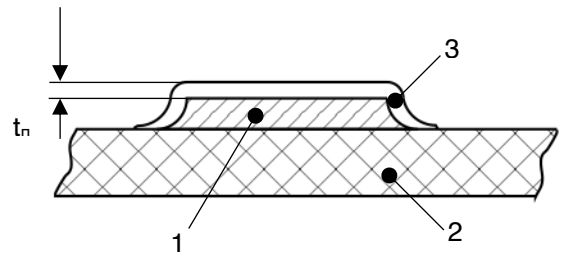


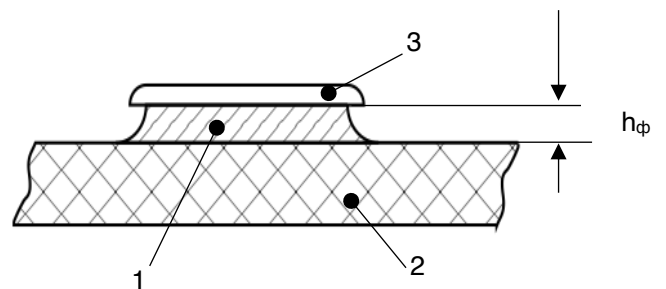
Рисунок 13.12 - Перетин провідника з захисним покриттям при позитивному методі

- 1 - шар міді
- 2 - діелектрик
- 3 - покриття

t_n - товщина покриття

h_ϕ - товщина міді

Перетин провідника з захисним покриттям при негативному методі



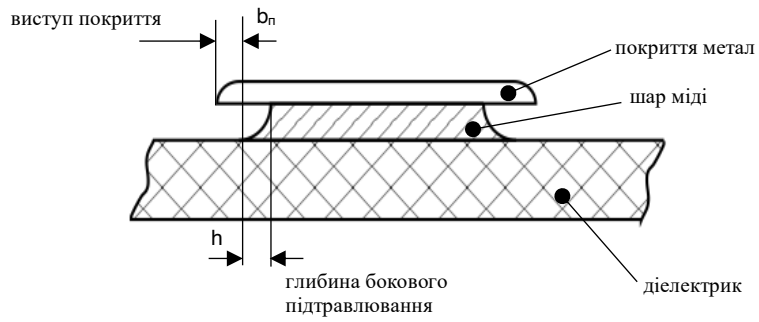


Рисунок 13.13 - Перетин провідника з захисним покриттям при негативному методі

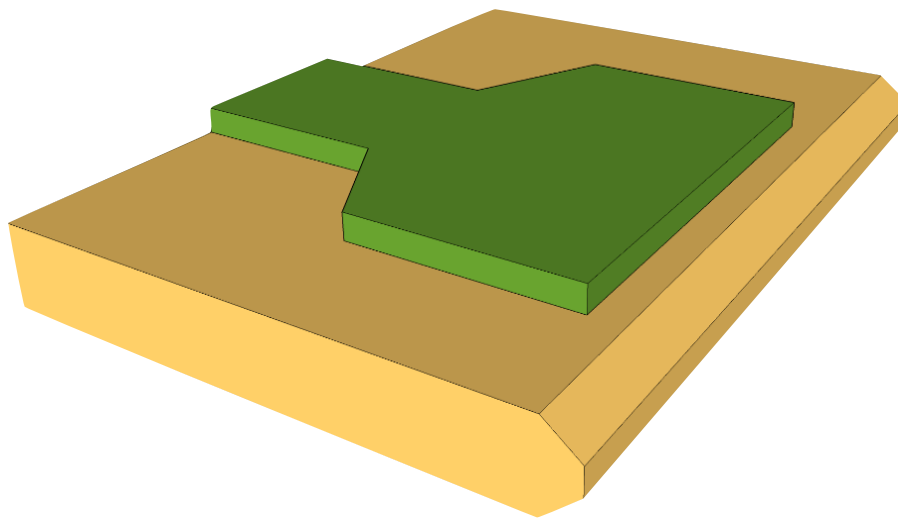


Рисунок 13.14 - Контакт

Структура контакту друкованого роз'єму

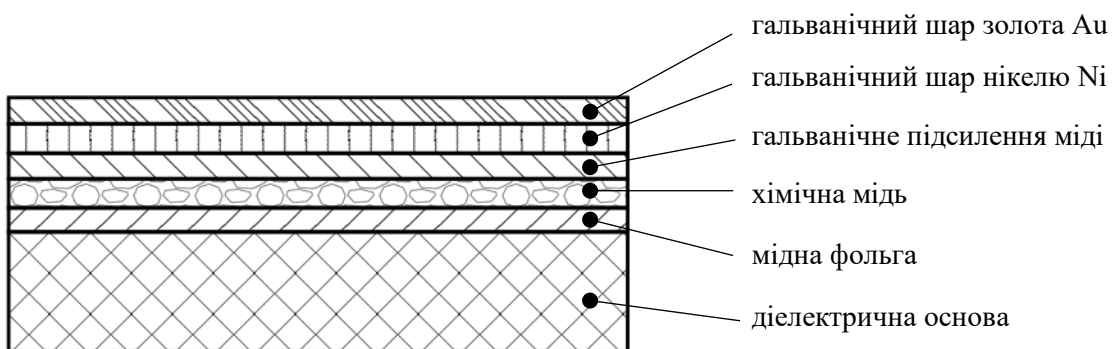


Рисунок 13.15 - Друкований роз'єм

Таблиця 13.1 Метали, що найбільш часто використовуються в якості додаткових, фінішних покриттів

Покриття	Товщина шару, мкм	Використання
Hasl SnPb на основі олов'яно-свинцевого сплаву	2-40	для захисту поверхні та покращення паяння компонентів
Hasl Lead Free безсвинцеве покриття на основі сплаву олова	2-40	для захисту поверхні та покращення паяння компонентів
ENIG імерсійне золото	0.05 -0,1	використовується з підшаром гальванічного нікелю. Забезпечує рівну поверхню, великий термін придатності для монтажу. Використовується для покриття поверхні контактів роз'єму, друкованих компонентів (фільтрів, антен і тп).
ENEPIG імерсійне золото	0.05 -0,1	використовується з підшаром гальванічного нікелю та паладію. Забезпечує рівну поверхню, великий термін придатності для монтажу. Використовується для покриття поверхні контактів роз'єму, друкованих компонентів (фільтрів, антен і тп).
нікель (Ni)	3 - 5	в якості підшару для золота, паладію та олова
паладій (Pd)	0.05 – 0,12	в якості підшару для золота
Immersion Silver імерсійне срібло	0,07-0,2	для захисту поверхні та покращення паяння компонентів. Забезпечує рівну поверхню та великий термін придатності для монтажу.
Immersion Tin імерсійне олово	1-15	для захисту поверхні та задовільного паяння компонентів. Забезпечує обмежений термін придатності для монтажу.

Методи виготовлення ДП з металізацією отворів мають суттєві переваги:

- суттєво підвищується надійність паяних з'єднань за рахунок того, що припой при відповідному виборі діаметру заповнює весь отвір. При цьому досягається висока електрична та механічна стабільність при малому розмірі контактного майданчика;
- міцність на розрив виводів пайки вище міцності самих виводів.

14. КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БДП

Сучасна РЕА та особливо апаратура цифрової ОТ характеризується значним збільшенням *функції змісту* та використанням 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 швидкодійних РЕА, потребують врахування при конструюванні апаратури конструктивних та електричних характеристик друкованих провідників в системі багатошарового друкованого монтажу [О: 5].

При цьому повинні враховуватися не тільки геометричні параметри (такі як *ширина та l_{np} , 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 параметр (*хвильовий опір*) особливо важливий при побудові РЕА на надшвидкісній елементній базі.

Тісний взаємозв'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.

14.1. Основні методи отримання БДП

Збільшення складу, безперервне ускладнення РЕА (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 клеєні 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 покращуючи тепловідвід;
3. наявність “земляного” шару та можливість досить точно управляти товщиною діелектрика, постійність ширини провідників дозволяють 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 0,625; 1.25 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 тримірна, 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 РЕА використовуються декілька різних методів міжшарових з'єднань в БДП. Найбільш використовуються наступні методи:

- відкритих КМ;
- попарного пресування;
- пошарового нарощування;
- металізації наскрізних отворів.

14.1.1. 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.

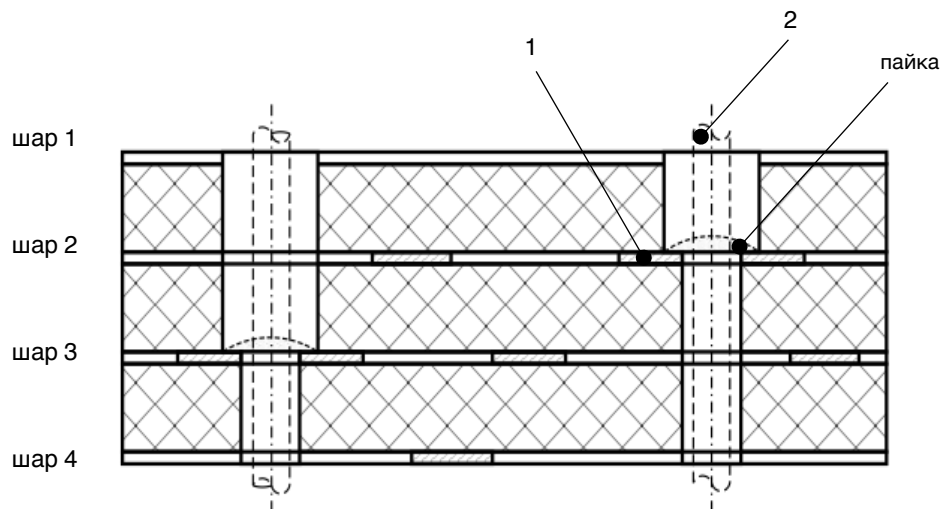


Рисунок 14.1 - Метод відкритих КМ

Метод є одним з перших метод міжшарових з'єднань.

4-х шарова ДП, що виконана методом відкритих КМ.

1 - відкрита КМ; 2 - вивід елементу.

14.1.2. Метод попарного пресування

Для виконання БДП *методом попарного пресування* використовують добре засвоєну технологію ДДП (наприклад комбінований метод) з 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

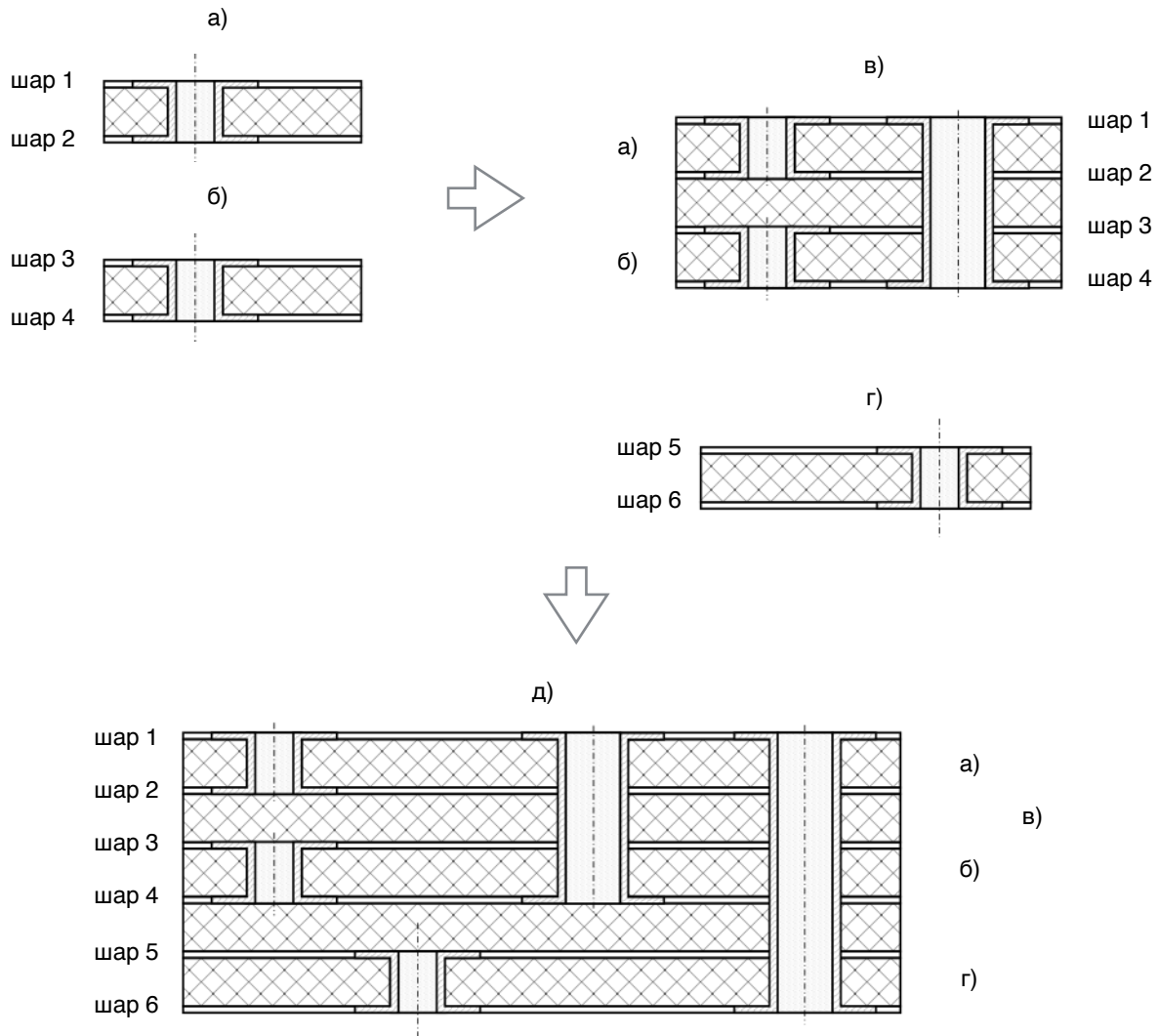


Рисунок 14.2 - Схема виготовлення 6-ти шарової ДП

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. на кінець, отвір з четвертого шару на третій.

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

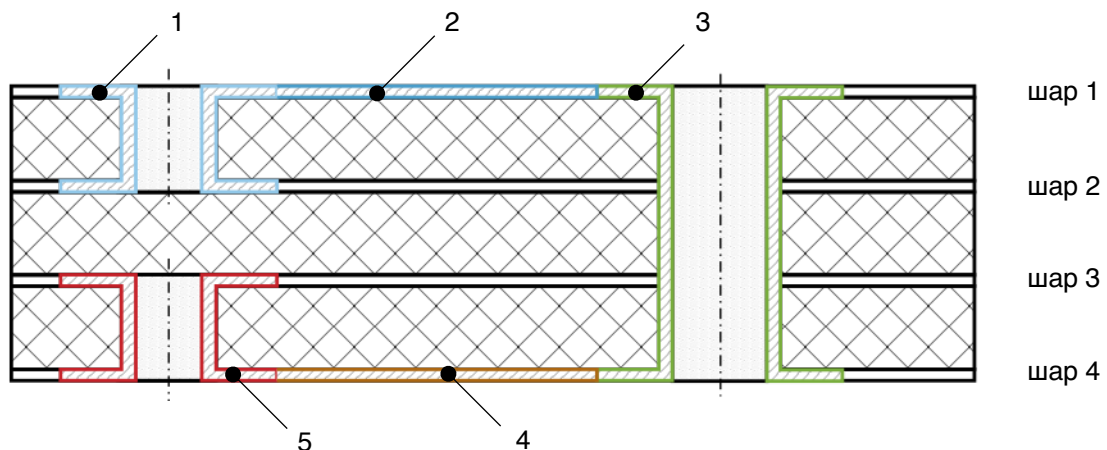


Рисунок 14.3 - Схема з'єднання 2-го та 3-го шарів в 4-х шаровій ДП, метод попарного пресування

- 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.

14.1.3. 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'єднанні між собою, мають КМ, торцеві частини яких з'єднуються з металізованими отворами.

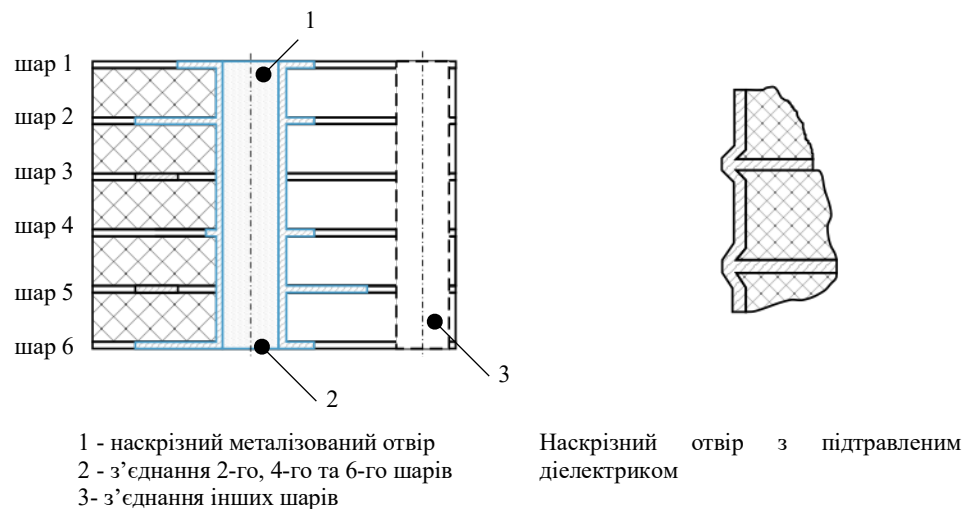


Рисунок 14.4 - 6-ти шарова ДП, що виконана методом металізації наскрізних отворів

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

При цьому частина КМ оголюється (Рисунок 14.4) і при металізації отворів виходить більш якісне з'єднання стінки отвору з КМ даного шару. Процес *зворотного травлення* широко використовується при промисловому виробництві БДП для підвищення їх надійності.

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

Проте цей метод широко використовується та забезпечує

- високу щільність монтажу;
- надійне міжшарове з'єднання;

- дозволяє використовувати наскрізні отвори для встановлення роз'ємних з'єднань, що зумовило широке використання ІС з великою кількістю виводів, ДВ потребують багатовивідні роз'єми.

При цьому методі окремі шари склеюються між собою за допомогою листів недополімеризованого матеріалу (або препрегу). 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 ± 75 мкм.

Недоліками БДП, що виготовлені методом металізації наскрізних отворів є:

1. порушення провідного шару в наскрізних отворах після металізації;
2. забруднення стінок отворів смолою 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. Присутність 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 з торця внутрішнього провідного шару, але й з відкритими (дякуючи травленню діелектрика) верхньої на нижньої частин внутрішнього провідного шару (Рисунок 14.4).

14.2. Конструктивні параметри БДП з наскрізними металізованими отворами

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 служить 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 припої використовуються інколи в якості резистів при травленні міді.

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

БДП з наскрізними металізованими отворами, що розташовані з кроком неменше 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 зворотного травлення діелектрика та процесу гальванічного осадження міді.

Якщо використовується зворотне травлення, то товщина внутрішнього провідного шару повинна бути не менше 18, 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 ± 125 мкм, для плат з розмірами > 15 см ± 175 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 потрійний 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 механічні 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 площина 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 частини 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 87.5мкм.

14.3. 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.

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

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

14.4. Проектування БДП

БДП використовуються в першу чергу в складних швидкодійних РЕА. Елементна база - ІС мають час затримки $\approx 1-2$ нс/каскад при $\tau_0=2-3$ 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 виявляється одного порядку або навіть 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 багатошаровий 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 передавальні 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 проєктуванні, а головне витримати при проєктуванні.

Найкращим чином вирішувати обидві задачі дозволяє застосування в якості друкованих міжз'єднань *полоскових ліній* (Рисунок 14.5, Рисунок 14.6), *мікрополоскових ліній* (Рисунок 14.7, Рисунок 14.7), *компланарних ліній* (Рисунок 14.9), що отримані чергуванням сигнальних доріжок з екранувальними суцільними шарами «землі».

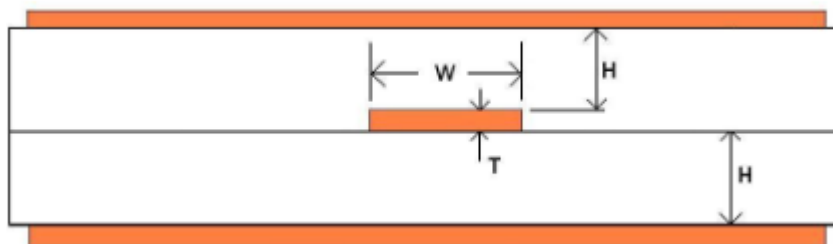


Рисунок 14.5 - Полоскова лінія

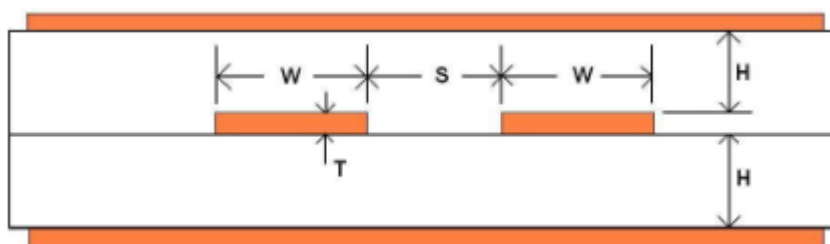


Рисунок 14.6 - Полоскові лінії

Полоскова симетрична лінія – це сигнальний провідник та земля. Сигнальний провідник знаходиться на внутрішньому шарі (між двох діелектриків), а на зовнішніх шарах плати - «земля».

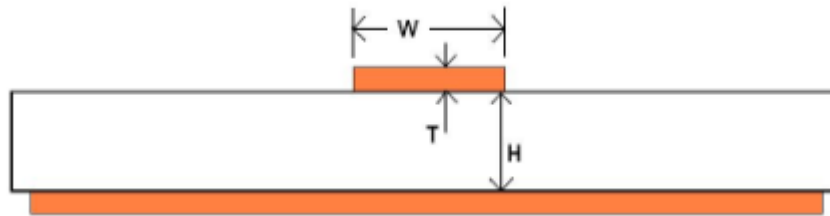


Рисунок 14.7 - Мікрополоскова лінія (або несиметрична полоскова лінія)

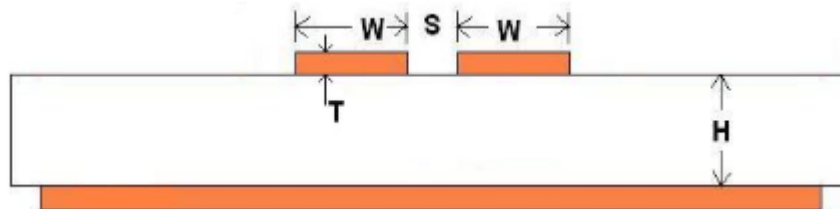


Рисунок 14.8 - Дві мікрополоскові лінії

Мікрополоскова лінія – сигнальний провідник на зовнішньому шарі, під яким знаходиться шар землі.

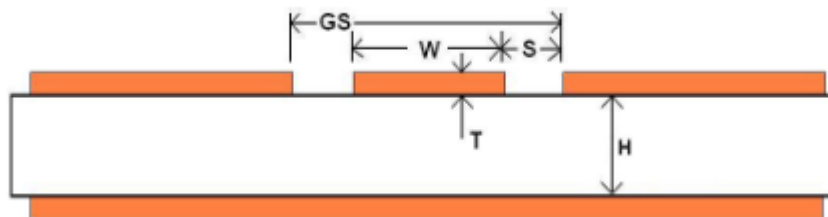


Рисунок 14.9 - Компланарна лінія

Компланарна лінія – сигнальний провідник, який з боків та під провідником має «землю».

Мікрополоскові лінії між'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 для СВЧ матеріалу RO4003C з товщиною 0,508мм:

- $Z_0 = 50 \text{ Ом}$
- ширина ліній $W = 1,09\text{мм}$
- товщина $T = 33,02\text{мкм}$
- відстань між лінією та шаром землі $H = 0,508\text{мм}$ (тобто товщина використаного діелектрика)

При цьому важливо, щоб параметри ліній обирались одночасно з вибором типу ІС.

14.5. 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 внутрішніх (2й та 3й) є служать один для “землі” – екранувальний шар, а інший для подачі напруги живлення.

При цьому виділяють *три рівня монтажу*:

- **на першому рівні** (в стійочних платах) ІС з’єднуються за допомогою багатошарового друкованого монтажу;
- **на другому рівні** (в панелях змінні плати) панелі що вставляються з роз’єми панелі, з’єднуються між собою за допомогою багатошарового 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 усіх ІС, використовуючи відповідний внутрішній екранувальний шар (шар «землі»). Відповідно два зовнішніх шари дозволяють з’єднати практично всі ІС в змінних платах та виконати за допомогою друкованого монтажу $\approx 80\%$ з’єднань в панелі (**наступний рівень ієрархії**). Решту з’єднань в панелі виконують крученим

двожильним проводом або трьохжильним з контрольованим Z_0 та перехресними наведеннями.

При 4x шаровому друкованому монтажу мікрополоскові лінії краще розміщувати на поверхні плати. Це дозволяє їх легко контролювати, а в деяких випадках - виправляти.

14.6. Вибір методу проєктування 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 замінні плати як правило виконують прості функції і тому вони рідко перепроектуються.

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 проєктування міжз'єднань панелей значно складніше, ніж проєктування міжз'єднань змінних плат. І крім того, зміни в схемі панелей вносяться значно частіше.

14.7. Електричні характеристики БДП

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 опір наскрізних з'єднувальних отворів та інше.

Омічний 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 *омічний опір* з'єднань.

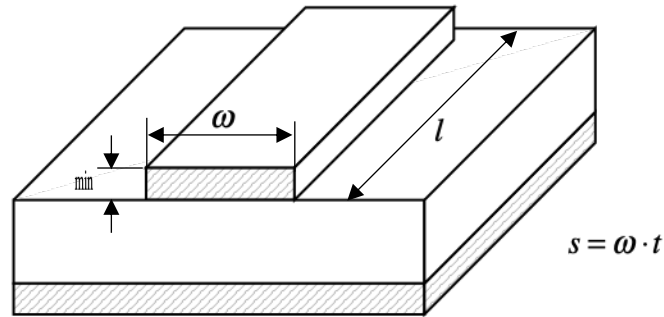


Рисунок 14.10 - Розрахунок омічного опору

$$R = \rho \left(\frac{l}{s} \right) = \rho \left(\frac{l}{\omega t} \right) \quad (14.1)$$

де s - поперечний розріз;

l – довжина;

ω – ширина;

t – товщина;

ρ - 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

$$R_{T_2} = R_{T_1} [1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (14.2)$$

де α - температурний коефіцієнт зміни опору при температурі T .
Визначається за наступним графіком.

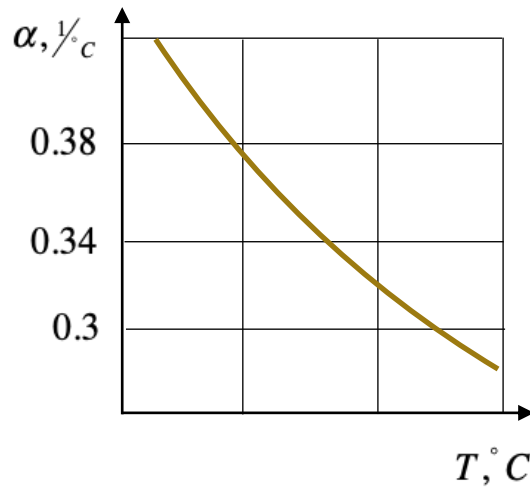


Рисунок 14.11 - Залежність α міді від температури

Провідник $l = 70\text{см}$ ДП розміром $30 \times 40\text{ см}$ складе біля 4.2 Ом , що при струмі біля 100мА зумовить омичне падіння напруги біля 0.42В , 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 прийнято користуватися для інтегральних дифузійних резисторів, тобто питомим опором квадрату поверхні провідника при відповідній його товщині. Ця величина позначається R_s .

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

Омичний опір наскрізних металевих отворів

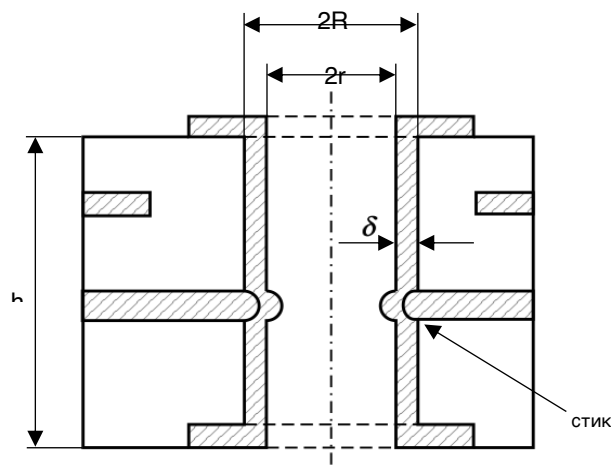


Рисунок 14.12 - Розрахунок омичного опору наскрізних металевих отворів

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 лінію передачі в/ч сигналу.

$$R_{\text{наск}} = \rho \frac{h}{\pi} (R^2 - r^2) = \rho \frac{h}{\pi} (2\pi R\delta - \delta^2), \text{ мОм} \quad (14.3)$$

При товщині БДП 1.5мм опір металізованого покриття перехідного отвору буде

$$R_{\text{наск}} = 0,59 \times 1,5 = 0,89 \text{ мОм}$$

тобто омичний опір ПО має порядок одиниць мОм.

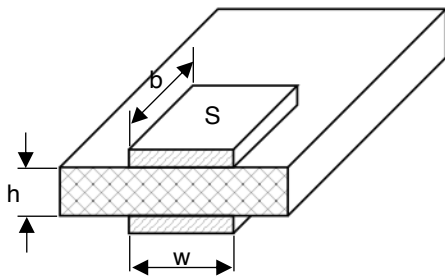
Розподілена ємність та індуктивність друкованих провідників

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 $\tau < \text{нс}$.

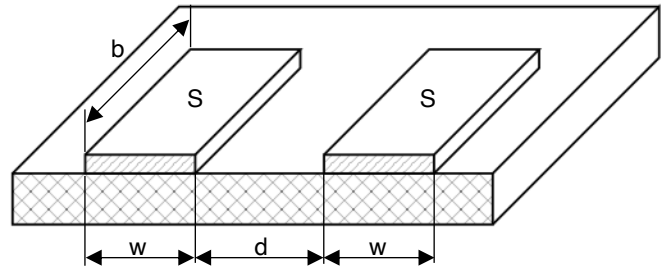
При цьому по суті потрібно виконати не розрахунок конкретного значення ємності, а виконати оцінку порядку її величини, тому що при виготовленні ДП неминучі деякі варіації ширини провідників та зазору між ними впродовж довжини. Нестабільність вузьких провідників (ширина 250мкм) складає $\pm 20\%$, таким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

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

Міжшарова ємність представляє собою результат електростатичної



Шари розташовані на суміжних шарах



Ємність між суміжними провідниками на одному шарі

Рисунок 14.13 - Ємність друкованих провідників

взаємодії між суміжними провідниками, що розташовані на різних шарах *по вертикалі*.

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

Міжшарова ємність визначається

$$C_m = \frac{\varepsilon S}{4\pi h} = \frac{\varepsilon w b}{4\pi h} \quad (14.4)$$

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

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

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

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, ε - діелектрична проникність (для склотекстоліту).

Для полоскової лінії міжшарова погонна ємність відносно земляних площин визначається:

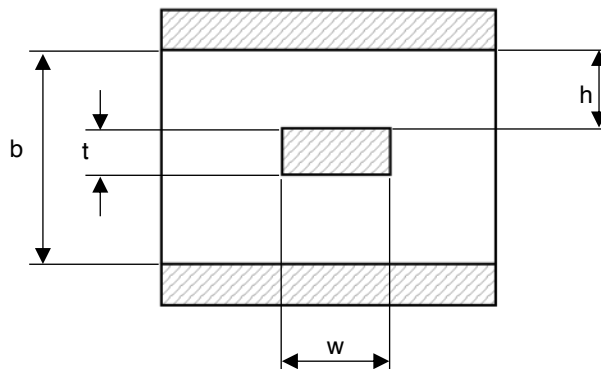


Рисунок 14.14 Розрахунок міжшарової погонної ємності для полоскових ліній

$$C'_{ml} = 0,355 \cdot \varepsilon \frac{w/b}{1 - t/h^2}, \quad pF/cm \quad (14.5)$$

якщо $\varepsilon = 6$, тоді

$$C'_{ml} = 2,12 \frac{w/b}{1 - t/h^2}, \quad pF/cm$$

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

$$L_{pr} = 0.2l \left[2.31 \lg \left(\frac{4l}{d} \right) - 0.75 \right], \mu H \quad (14.6)$$

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 др.пр, поблизу якого знаходиться зворотній провідник

$$L_0 \text{ др.пр,} = 0,2 \cdot 10^{-2} \cdot l \cdot 2.3 \cdot \lg \left[\frac{4h}{0.56w + 0.67t} \right], \mu H$$

де 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

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (14.7)$$

де 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:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (14.8)$$

Для полоскової лінії:

$$Z_0 = \frac{G_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{4b}{d_0} \quad (14.9)$$

де 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:

$$Z_0 = \frac{n}{w} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r}} = \frac{n}{w} \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}}, \text{ Ом} \quad (14.10)$$

Затримка розповсюдження сигналу визначається

$\tau = 3,33\sqrt{\epsilon_r}$ та залежить від ширини провідника

Контрольні запитання

1. Методи нанесення рисунку елементів друкованого монтажу.
2. Хімічний субтрактивний метод виготовлення друкованих плат.
3. Хімічний негативний метод.
4. Хімічний позитивний метод.
5. Адитивні методи.
6. Комбінований негативний метод.
7. Комбінований позитивний метод.
8. Проектування БДП. Вплив параметрів елементів друкованого монтажу на електричні параметри друкованої плати.

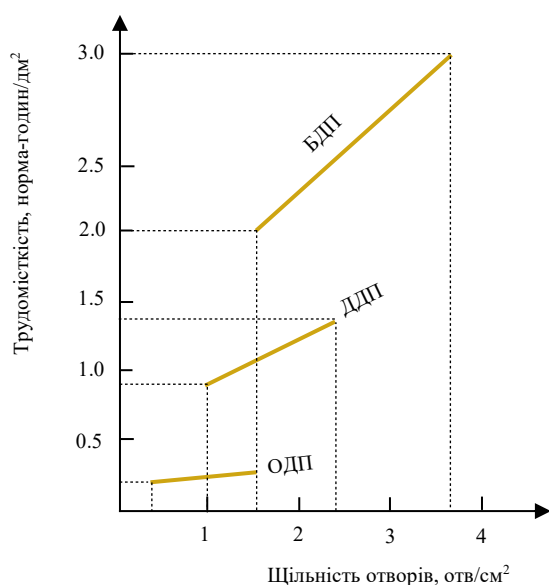
9. Проектування БДП. Визначення кількості та рекомендована функціональна завантаженість шарів.
- 10.БДП, метод металізації наскрізних отворів.
- 11.БДП, метод попарного пресування.
- 12.БДП, метод металізації наскрізних отворів.

15.СКЛАДНІСТЬ ТА ВАРТІСТЬ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

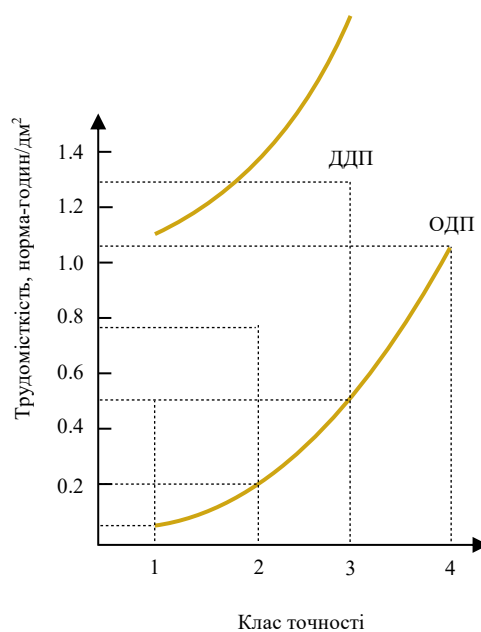
Поряд з типом та розмірами ДП, вихідними матеріалами суттєвий економічний вплив на виготовлення ДП надає їх складність. Зі зростаючою складністю пов'язано впровадження більш дорогого обладнання, матеріалів, а також більш високих виробничих затрат, що призводить до росту вартості ДП.

На складність виготовлення ОДП та ДДП впливають мінімальні діаметри монтажних отворів, що знаходяться в кореляційній залежності з діаметрами контактних майданчиків. Вибраний клас точності друкованого монтажу, крок координатної сітки також впливають на вартість ДП.

Орієнтовні зміни трудомісткості виготовлення 1 дм² площі ДП в багатосерійному виробництві в залежності від її типу та класу точності приведено на Рисунок 15.1.



Орієнтовна зміна трудомісткості виготовлення 1 дм² площі друкованої плати в багатосерійному виробництві в залежності від її типу



Орієнтовна зміна трудомісткості виготовлення 1 дм² площі друкованої плати в багатосерійному виробництві в залежності класу точності

Рисунок 15.1 - Орієнтовні зміни трудомісткості виготовлення 1 дм² площі ДП

На складність БДП головним чином впливають такі фактори:

- кількість шарів
- клас точності
- розміри

Залежність відносної вартості виготовлення БДП від кількості шарів приведена на Рисунок 15.2. Різке зростання вартості при збільшенні кількості шарів від двох до трьох пов'язано з тим, що при цьому потребується проведення усіх технологічних операцій, необхідних при виготовленні БДП. При постійному числі шарів та незмінній складності вартість виготовлення з розмірами до 200x200 мм збільшується пропорційно площі плати. Залежність вартості виготовлення БДП від розмірів та кількості шарів приведено на Рисунок 15.2.

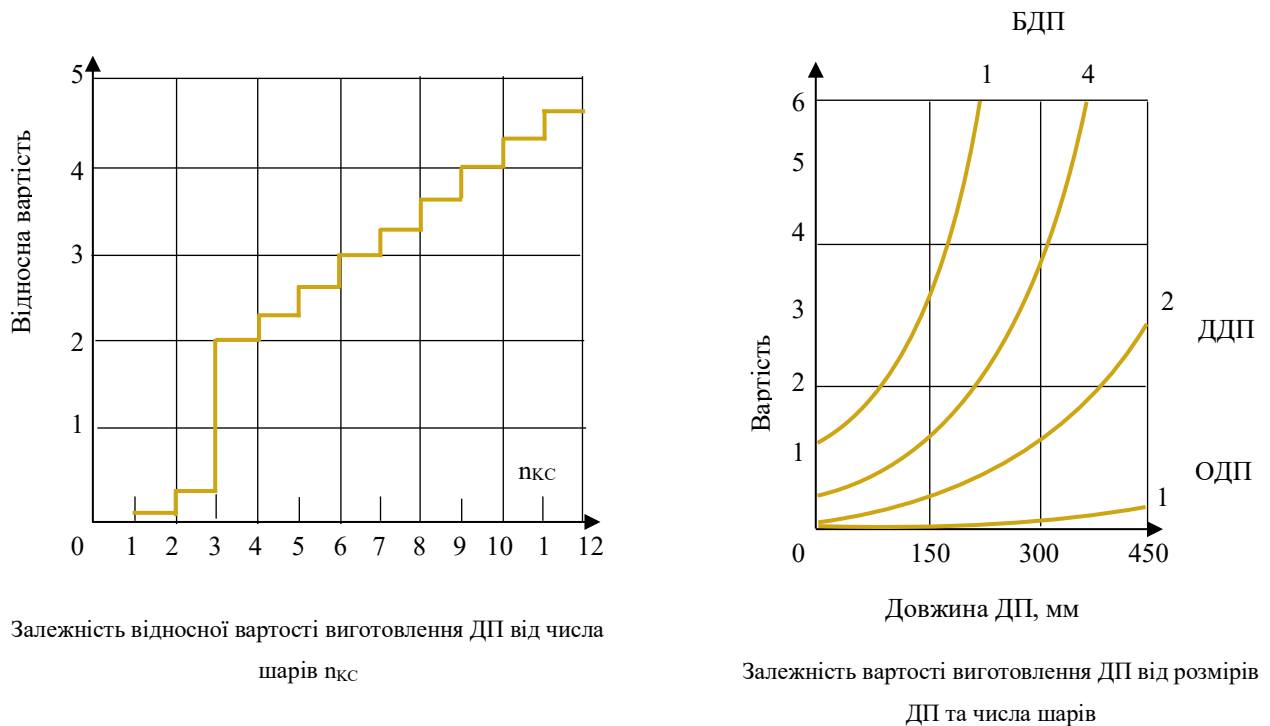


Рисунок 15.2 - Залежність відносної вартості виготовлення ДП

Крім того, необхідно враховувати вплив класу точності на собівартість ДП. При переході з кроку координатної сітки (ККС) 2.5мм на крок 1.25мм підвищуються вимоги до конструкторсько-технологічним обмеженням, в наслідок чого, собівартість майже **подвоюється**.

Таким чином, внаслідок високої вартості БДП перед їх застосуванням на основі ретельної оцінки техніко-економічних показників необхідно визначити

доцільність їх використання. При цьому в першу чергу враховуються такі фактори:

- технічна необхідність
- висока вартість БДП по зрівнянню з більш простими ДП
- раціональні розміри

Проте використання БДП у великих електронних пристроях технічно необхідне, а в деяких випадках економічно доцільно, тому що вони покращують відношення між характеристиками та розмірами. Пристрої менших розмірів з тим же набором функцій або покращення параметрів в тих же розмірах - **об'ємна ефективність**.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Основна література

1. Белинский В. Т., Гондюл В.П., Грозин А.Б., Круковский-Синевиц К.Б., Мазор Ю.Л. Практическое пособие по учебному конструированию РЭА / В.Т. Белинский и др. ; под ред. К.Б. Круковского-Синевица, Ю.Л. Мазора. К. : Вища школа, 1992. 496с. : ил. + прил. ISBN 5-11-003605-5.
2. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем. - М.: Высш. шк., 1984. - 248 с., ил.
3. Парфенов Е. М., Камышная Э. Н. и Усачов В. П. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ Е.М. Парфенов, Э.Н. Камышная, В.П. Усачов. - М. : Радио и связь, 1989. – 272 с.: ил.
4. Ушаков Н.Н. Технология элементов вычислительных машин. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1976.-413 с.: ил.
5. Долкарт В. М., Новик Г. Х., Колтыпин И. С.. Микроминиатюрные аэрокосмические цифровые вычислительные машины / В.М. Долкарт, Г.Х. Новик, И.С. Колтыпин. - М.: Сов. радио, 1967. - 348 с.: ил.
6. Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В., Мысловский Э.В., Парфенов О.Д., Пирогова Е.В., Шахнов В.А., Шерстнев В.В. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов/ К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др.; Под общей редакцией В.А.Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568с.: ил.
7. Преснухин Л.Н., Шахнов В.А. Конструирование электронных вычислительных машин и систем: Учебник для вузов по специальности «ЭВМ» и «Конструирование и производство ЭВА». – М.: Высш.шк., 1986. 512с.:ил.
8. Дульнев Г.Н. Теория тепло- массообмена. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 195с.

9. Ханке, Х.-И. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры : пер. с нем. / Х.-И. Ханке, Х. Фабиан. – М. : Энергия, 1980.
10. Пацюра И.В., Корнейчук В.И., Довбыш Л.В. Надежность электронных систем. - Київ: Світ, 1997.
11. Елшанский В.Б., Елшанская Л.П. Основы технологии поверхностного монтажа / В.Б. Елшанский, Л.П. Елшанская. - Чернигов : РИК "Деснянская правда", 2007. - 232 с.: рис., табл. - ISBN 978-966-502-371-5
12. Мэнгин Ч.-Г., Макклелланд С. Технология поверхностного монтажа. Будущее технологии сборки в электронике. Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 276 с. — ISBN 5-03-001485-3
13. Федулова А. А., Устинов Ю. А. Технология многослойных печатных плат / А. А. Федулова, Ю. А. Устинов – М. : Радио и связь, 1990.
14. Медведев, А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа / А. М. Медведев. – М. : Радио и связь, 1986.
15. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы)/ А. И. Горобец, Л. И. Степаненко, В. М. Коронкевич. - Киев: Техника, 1985, - 312 с.

Додаткова література

1. Уваров А. - P-CAD 2000. Конструирование печатных плат (От простого к сложному);
2. Макстас М.Я. - 8 уроков по P-CAD 2001 (для крестьян).
3. Медведев, А. М. Сборка и монтаж электронных устройств / А. М. Медведев. – М. : Техносфера, 2007. – 256 с.
4. Технология радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Н. К. Юрков, А. К. Гришко, Л. А. Тюрина, М. В. Чернецов ; под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – 344 с.
5. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/ Под ред. Р. Г. Варламова.—М.: Сов. радио, 1980.—480 с.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВІС - велика інтегральна схема

КЕ – конструктивні елементи

РЕА – електронно-обчислювальна апаратура

ТЗ – технічне завдання

СЕП - схема електрична принципова

ФП - функційні пристрої

ФВ - функціональний вузол

ККС – крок координатної сітки

К – корпус

ТПМ - технологія поверхневого монтажу

МО - монтажний отвір

ЗВП - запасні вироби та приналежності

ФЕ – функціональний елемент

БДП – багатошарова друкована плата

ДДП – двостороння друкована плата

СЕП - схема електрична принципова