

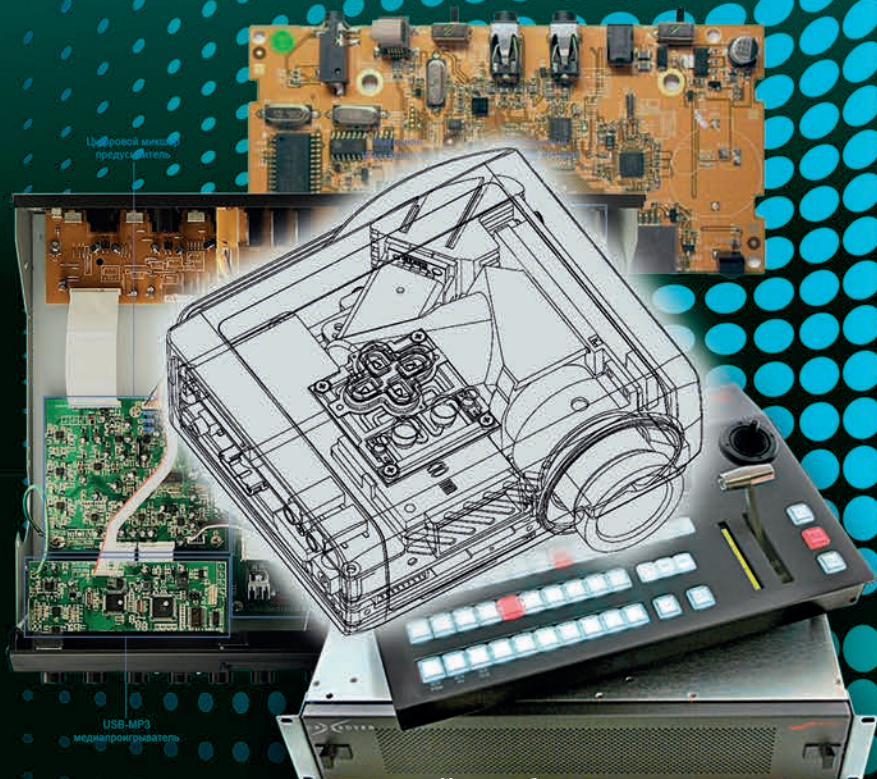
КОНСТРУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА
ТЕХНІКИ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ

У трьох книгах

Книга 2

Є. М. Травніков, В. С. Лазебний, Г. Г. Власюк,
В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко

ОСНОВИ КОНСТРУВАННЯ



Навчальний посібник
для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів

Київ
«КАФЕДРА» 2015

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕХНІКИ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ

У трьох книгах

Книга 2

Є. М. Травніков, В. С. Лазебний, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський,
В. М. Співак, В. Б. Швайченко

ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямом підготовки «Акустотехніка»*

Київ
«КАФЕДРА»
2015

УДК 621.391: 519.21 (075.8)

ББК 21.172.я 73

Т 94

Гриф надано Міністерством

освіти і науки,

молоді та спорту України

(протокол від 29 жовтня 2012 р.

№ 1/11-16813)

А в т о р и: Є. М. Травніков, В. С. Лазебний, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко

Р е ц е н з е н т и: д-р техн. наук, проф. О. Г. Додонов (Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України);

д-р техн. наук, проф. В. Я. Копп. (Севастопольський Національний технічний університет);

д-р техн. наук, проф. В. С. Смірнов (Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій)

Т94

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕХНІКИ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ: У 3-х кн. Кн. 2. ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ: Навчальний посібник / Є. М. Травніков, В. С. Лазебний, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко. За загальною редакцією В. С. Лазебного – К.: «КАФЕДРА», 2015. – с.: іл.

ISBN 966-8934-05-9 (кн. 1)

ISBN 966-8934-21-0

Посібник складено з трьох книг.

У першій книзі наведено основні характеристики сучасної апаратури реєстрації аудіо- та відеоінформації, що функціонує із застосуванням різних фізичних явищ та технічних рішень.

Другу книгу присвячено питанням організації та документального забезпечення процесу конструювання сучасних електронних пристроїв та апаратури реєстрації інформації. Книга містить ілюстрації та методики розрахунку основних конструктивних параметрів. Розглянуто основні чинники, що впливають на функціонування електронного обладнання, та способи подолання негативного впливу цих чинників на параметри та характеристики обладнання. У кінці кожного розділу наведено висновки та питання для самоконтролю. Матеріал посібника відповідає програмам підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів за напрямом «Акустотехніка» згідно вимог галузевих стандартів вищої освіти України.

Посібник може бути корисним фахівцям у галузі конструювання та технології виробництва електроакустичних, радіоелектронних та інформаційних приладів та систем.

УДК 621.391: 519.21 (075.8)

ББК 21.172.я73

ISBN 966-8934-05-9 (кн. 1)

© Травніков Є. М., Лазебний В. С.,

Власюк Г. Г., Пілінський В. В.,

Співак В. М., Швайченко В. Б., 2015

ISBN 966-8934-21-0

ЗМІСТ

<i>Вступ</i>	7
<i>Розділ 1. Вступ до конструювання техніки реєстрації інформації</i>	9
1.1. Апаратура реєстрації інформації	9
1.2. Характеристика процесу конструювання	14
1.3. Еволюція конструкторських рішень	18
1.4. Методи конструювання електронних засобів	20
1.5. Система стандартизації у техніці	25
1.6. Загальна характеристика конструкторської документації	27
1.7. Запитання для самоконтролю	29
<i>Розділ 2. Організація та документальне забезпечення процесу конструювання</i>	31
2.1. Науково-дослідні роботи	31
2.2. Дослідно-конструкторські розробки	31
2.3. Документальне забезпечення процесу конструювання	33
2.4. Види виробів	38
2.5. Види і комплектність конструкторських документів	41
2.6. Запитання для самоконтролю	46
<i>Розділ 3. Експлуатаційні параметри</i>	47
3.1. Умови експлуатації апаратури реєстрації інформації	47
3.2. Маркування кліматичного виготовлення та категорії розміщення електрообладнання	49
3.3. Забезпечення тепло- і холодостійкості апаратури	51
3.4. Захист від температурних впливів	52
3.4.1. Тепловідведення кондукцією	54
3.4.2. Тепловідведення конвекцією	58
3.4.3. Охолодження елементів конструкції тепловим випромінюванням ..	63
3.5. Захист апаратури від шкідливих впливів навколишнього середовища ...	70
3.5.1. Захист апаратури від вологи	70
3.5.2. Загальна характеристика впливу вібрацій та ударних навантажень	74

3.5.3. Способи захисту апаратури від вібрації та ударів	81
3.6. Характеристики надійності апаратури реєстрації інформації	83
3.7. Забезпечення надійності АРІ резервуванням апаратних засобів	88
3.8. Запитання для самоконтролю	89
Розділ 4. Друковані плати	92
4.1. Загальна характеристика друкованих плат	92
4.2. Характеристика процесу проектування і конструювання друкованих плат	94
4.3. Вимоги до конструктивних елементів друкованих плат	104
4.4. Матеріали для виготовлення друкованих плат	109
4.4.1. Загальна характеристика матеріалів основи друкованих плат	109
4.4.2. Параметри матеріалів основи друкованих плат	113
4.4.3. Матеріали фінішного покриття друкованих плат	114
4.5. Вибір методу виготовлення друкованих плат	116
4.6. Електричні характеристики друкованих плат	118
4.7. Особливості конструювання друкованих плат, які виготовляють хімічним методом	119
4.8. Особливості конструювання плат, що виготовляють комбінованим методом	120
4.9. Особливості конструювання багатошарових друкованих плат	121
4.10. Особливості конструювання багатошарових друкованих плат, виготовлених методом металізації наскрізних отворів	127
4.11. Особливості конструювання багатошарових плат, виготовлених методом попарного пресування	129
4.12. Особливості конструювання багатошарових друкованих плат, виготовлених методом пошарового нарощування	130
4.13. Особливості конструювання друкованих плат призначених для автоматизованого монтажу	131
4.14. Засоби автоматизованого проектування друкованих плат	137
4.15. Запитання для самоконтролю	141
Розділ 5. Конструювання гнучких і гнучко – жорстких друкованих плат	144
5.1. Типи гнучких друкованих плат	144

5.2. Матеріали для гнучких друкованих плат	147
5.3. Матеріали для основи гнучких плат	148
5.4. Адгезиви	149
5.5. Фольга	149
5.6. Покривні плівки	151
5.7. Покриття монтажних поверхонь (покриття для паяння)	151
5.8. Особливості проектування гнучкої частини плати, обґрунтованість використання багат шарової структури	154
5.9. Запитання для самоконтролю	158
Розділ 6. Електричні з'єднання та забезпечення електромагнітної сумісності апаратури реєстрації інформації	160
6.1. Різновиди електричних з'єднань в електронній апаратурі	160
6.1.1. Короткі лінії електричних з'єднань	162
6.1.2. Довгі лінії електричних з'єднань	164
6.1.3. Параметри з'єднувальних ліній	166
6.1.4. Взаємна ємність та індуктивність провідників друкованої плати ..	169
6.1.5. Перехресні завади між лініями електричних з'єднань	170
6.1.6. Ємнісна складова перехресної завади	172
6.1.7. Індуктивна складова перехресної завади	174
6.2. Електромагнітна сумісність та завадостійкість технічних засобів електронних засобів	176
6.3. Захист конструкції від впливу завад	180
6.4. Захист від завад ліній зв'язку та мережі живлення	190
6.4.1. Захист сигнальних ліній від завад	190
6.4.2. Запобігання завадам у системі електроживлення	192
6.4.3. Проектування друкованої плати з урахуванням вимог електромагнітної сумісності	195
6.5. Характеристики монтажних проводів та коаксіальних кабелів	196
6.6. Запитання для самоконтролю	201
Розділ 7. Уніфікація, допуски і посадки	204
7.1. Поняття про взаємозамінність	204

7.2. Основні положення Єдиної системи допусків і посадок	207
7.3. Допуски і відхилення розмірів гладких елементів деталей	214
7.3.1. Ряди основних відхилень і квалітет	217
7.3.2. Вибір посадок і допусків	220
7.4. Допуски форми і розташування поверхонь	223
7.4.1. Класифікація відхилень і допусків форми та розташування поверхонь	223
7.4.2. Відхилення і допуски розташування поверхонь	228
7.4.3. Сумарні відхилення (допуск) форми та розташування	229
7.5. Шорсткість поверхонь	233
7.5.1. Загальна характеристика та параметри шорсткості	233
7.5.2. Позначення параметрів шорсткості	236
7.6. Запитання для самоконтролю	239
Розділ 8. Особливості розроблення рушійних механізмів апаратури реєстрації інформації	242
8.1. Електродвигун – основне джерело руху в механізмах	243
8.1.1. Електродвигуни змінного струму	244
8.1.2. Електродвигуни постійного струму колекторні	250
8.1.3. Безколекторні електродвигуни постійного струму	251
8.2. Види рухів в механізмах і опори рухомих елементів	254
8.2.1. Тіла обертання та їх опори	256
8.2.2. Поступальний рух в механізмах. Опори тіл поступального руху	268
8.2.3. Газові опори в механізмах АПІ	273
8.3. Особливості конструкції вузлів механізмів АПІ	277
8.4. Запитання для самоконтролю	278
<i>Список термінів та скорочень</i>	<i>279</i>
<i>Література</i>	<i>281</i>

Вступ

Техніку реєстрації інформації (ТРІ) застосовують у багатьох сферах діяльності сучасного суспільства. Серед таких сфер можна назвати промислове виробництво, наукові дослідження, навчання, медицину, спортивні змагання й тренування, телеграфію і поліграфію усіх видів (друк журналів і газет, афіш, листівок, квитків, грошей тощо), радіомовлення, де більшість програм транслюють тільки після звукозапису й спеціального оброблення, телебачення, кінематографію, фотографію, обчислювальну техніку (магнітні й оптичні диски, твердотільні накопичувачі), військову галузь, побут тощо.

Із вищезазначеного випливає, що існує велике різноманіття пристроїв реєстрації, призначених для реєстрації рухомих та нерухомих зображень та звукових сигналів за умов, що істотно відрізняються параметрами навколишнього середовища та характеристиками реєстрованих явищ. Пристрої реєстрації може бути призначено для реєстрації тільки статичних зображень або тільки рухомих зображень, природних звуків, мистецьких фонограм або зображень та звуку, що супроводжує реєстроване явище.

Розвиток техніки та технології відбувається дуже бурхливо. Це позначилось і на еволюції пристроїв реєстрації інформації. Від початку, з моменту виникнення кінематографа, у пристроях реєстрації інформації обов'язково використовували носій інформації. Таким носієм були магнітна стрічка, кіноплівка, магнітні та оптичні диски тощо. Проте з розвитком цифрових технологій та мікросхемотехніки усе більшого використання набувають напівпровідникові засоби реєстрації інформації. Тому, у наш час уже доводиться застосовувати більш загальне поняття – середовище зберігання інформації.

Процес реєстрації інформації електронними засобами складається з трьох етапів. Обов'язковими етапами є сприйняття інформації (перетворення інформації в електричні сигнали), зберігання сигнальної інформації та відтворення інформації. Відтворення інформації може відбуватись у форматі, що відрізняється від її початкового формату. Так, наприклад, зареєстрований звуковий сигнал може бути відтворено у вигляді звукового сигналу, сигналограми цього сигналу – на екрані осцилографа або комп'ютерного монітора, частотного спектру – на екрані спектроаналізатора.

У сучасній апаратурі в багатьох випадках сприйняття, оброблення та зберігання інформації здійснюють із застосуванням твердотільних пристроїв. Для зберігання дуже великих масивів інформації використовують удосконалені традиційні накопичувачі на магнітних та магнітооптичних дисках або магнітній плівці (стрімери).

Пристрої відтворення інформації теж зазнали значних змін. Основними пристроями для відтворення зображень зараз є матричні екрани на рідких кристалах різної конструкції, світлодіодні панелі та проєкційні пристрої.

Метою другої книги посібника з 3-х книг – надання студентам та фахівцям, головним чином конструкторам, основних необхідних знань з конструювання техніки, насамперед апаратури реєстрації інформації.

Залежно від призначення апаратури реєстрації інформації та умов її застосування перед конструктором постає низка завдань, виконання яких забезпечує врешті решт надійне функціонування апаратури. Конструювання вимагає від конструктора різноманітних знань у різних сферах техніки та технології. Процеси конструювання, виробництва та експлуатації нерозривно пов'язані між собою. Тому, для розроблення якісної й конкурентоспроможної апаратури конструктор має знати особливості організації процесу конструювання, структуру та зміст документації, що супроводжує конструкторське проектування, властивості та характеристики конструкційних матеріалів, сучасні підходи до реалізації функціональних вузлів техніки реєстрації інформації, способи протидії негативному впливу зовнішнього середовища. На сучасному етапі розвитку техніки дуже важливим чинником, що визначає її якісні та експлуатаційні показники, є електромагнітна сумісність.

У другій книзі розглянуто зазначені вище питання. Значну увагу приділено організації процесу конструювання, забезпеченню надійності апаратури реєстрації інформації, розробленню друкованих плат різного рівня складності, конструюванню й реалізації ліній електричних з'єднань, забезпеченню електромагнітної сумісності розробленої апаратури та взаємозамінності окремих складових конструкцій.

Автори сподіваються, що наведений у навчальному посібнику матеріал, сприятиме формуванню гідного рівня конструкторської підготовки студентів та фахівців, що працюють в галузі електроніки.

Автори щиро вдячні інженеру-електроакустику, високопрофесійному фахівцю у сфері мультимедійних технологій Демурі Віталію Анатолійовичу за допомогу та творчий підхід в підготовленні рукопису до друку.

Розділ 1. Вступ до конструювання техніки реєстрації інформації

1.1. Апаратура реєстрації інформації

В апаратурі реєстрації інформації (АРІ) обов'язково має бути носій інформації та засоби запису-зчитування інформації з використанням цього носія. Залежно від призначення та типу апаратури такими носіями можуть бути кіно- та фотоплівка, магнітна стрічка, магнітні та оптичні диски, напівпровідникова інтегральна пам'ять, паперовий носій тощо.

АРІ розрізняють за механічною характеристикою носія інформації (гнучкі, жорсткі і твердотільні), призначенням (звукозапису, запису зображень, інших видів), за типом взаємодії носія з елементами запису-відтворення інформації (динамічні або статичні системи), за принципом дії (оптико-механічні, електромагнітні, оптично-лазерні, термопластичні, електричні тощо), за типом збережених сигналів (аналогові, цифрові).

Гнучкими носіями є кіно- та фотоплівки, магнітні стрічки і тонкі магнітні диски, магнітний дріт, папір листовий і рулонний, фотопапір.

Жорсткими носіями є жорсткі (завтовшки 0,8-16 мм) магнітні диски, оптичні диски, магнітно-оптичні диски, фотопластини, м'який листовий метал (алюміній, латунь тощо).

Твердотільними носіями є феритові магнітні осердя, модулі інтегральної напівпровідникової пам'яті, напівпровідникові прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), матричні комплементарні метал-оксид-напівпровідникові (КМОН) перетворювачі оптичних зображень тощо.

Перші два види носіїв інформації застосовують у системах з динамічним процесом реєстрації (динамічна система), а третій вид – у системах зі статичним процесом запису-відтворення інформації (статична система).

У динамічній системі є відносний рух носія інформації і елементів запису-відтворення цієї інформації.

У статичній системі немає ніякого руху вищезгаданих елементів, є рух електронів, заповнення потенціальних ям у напівпровідниковій структурі, комутація мікро (фото) елементів, процес заряду та розряду елементарних конденсаторів.

Із запровадженням цифрових технологій передавання та зберігання інформації найбільшого поширення набувають універсальні пристрої реєстрації та зберігання цифрової інформації незалежно від її походження. У той же час є спеціалізовані системи реєстрації певних різновидів інформації. Зокрема це стосується реєстрації зображень та звукозапису.

Найбільш суттєві відмінності АРІ обумовлено **принципами їх функціонування**. За принципами функціонування АРІ можна розподілити на такі типи:

– **оптико-механічна апаратура реєстрації зображень** для отримання та зберегання статичної копії зображення (фотографії) з хімічним способом на-



Рисунок 1.1. Пристрої оптико-механічної реєстрації нерухомих зображень:
а, б – цифрові аматорський та професійний фотоапарати компанії Panasonic,
в – фотоапарат компанії Polaroid для миттєвого виготовлення фотознімка

несення на носій (гнучкий у вигляді фотоплівки і фотопаперу, і жорсткий у вигляді фотопластин, рис. 1.1);



Рисунок 1.2. Пристрої для оптико-механічної реєстрації рухомих зображень

– **оптико-механічна апаратура реєстрації рухомих зображень** для кінематографії з хімічним способом нанесення на носій (гнучкий у вигляді кіноплівки, рис. 1.2);

– **оптико-лазерна апаратура реєстрації інформації** на жорстких оптичних дисках (рис. 1.3);

– **електромагнітна апаратура реєстрації інформації** на гнучких носіях, якими можуть бути магнітна стрічка або диски, або на жорстких носіях у вигляді дисків, магнітних барабанів тощо (рис. 1.4 і рис. 1.5).

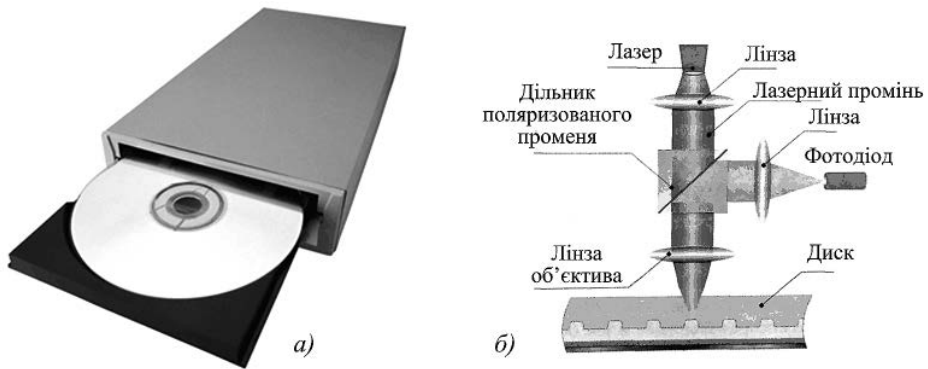


Рисунок 1.3. Зовнішній вигляд (а) та оптична схема (б) пристрою для оптико-лазерної реєстрації інформації на оптичних дисках



Рисунок 1.4. Пристрої для електромагнітної реєстрації інформації на магнітних дисках



Рисунок 1.5. Пристрої для електромагнітної реєстрації інформації на магнітній стрічці: а – котушковий аудіомагнітофон, б – касетний відеомагнітофон, в – приклади траєкторій стрічки у стрічкопротяжних механізмах

Жорсткий магнітний диск – це кругла металева пластина завтовшки 1,5...2 мм, вкрита феромагнітним шаром і спеціальним захисним шаром. Для запису і читання використовують обидві поверхні диска. В одному пристрої використовують кілька дисків, розташованих на одній осі. Зазвичай використовують пакети з 4, 5, 8 і більшою кількістю дисків, де на кожен поверхню диска припадає одна магнітна голівка (МГ). Поверхню диска розподілено на доріжки. Доріжки з одним і тим же радіусом на всіх дисках пакета утворюють циліндр. Циліндр визначає положення всіх МГ блоку під час запису або зчитування на тій чи іншій доріжці. Циліндри нумерують номерами відповідних доріжок. Зазвичай один сектор на доріжці вміщує 4096 байт. Повну адресу сектора в дисковому пакеті складено з трьох частин: номера циліндра, номера МГ і номера сектора на доріжці.

– **Магнітооптична апаратура реєстрації інформації** на спеціальних жорстких дисках.

– **Фотоелектростатична апаратура реєстрації**, якою є копіювальні пристрої («ксерокси») і лазерні принтери (рис. 1.6).

– **Електронно-оптична апаратура реєстрації зображень**, до якої можна віднести прилади нічного бачення, приціли, рентгенівські апарати, медичні і промислові дефектоскопи тощо. Апаратура цієї групи реєструє зображення без сканування.

– **Електронно-оптична апаратура реєстрації зображень зі скануванням**, до якої віднесено телевізійні камери, телевізійні приймачі (телевізори), монітори комп'ютерів, камери відеоспостереження, сканери планшетні і барабанні. Цю АРІ використовують, як для запису (телевізійні камери, сканери), так і для відтворення (телевізійні приймачі, монітори) зображень.

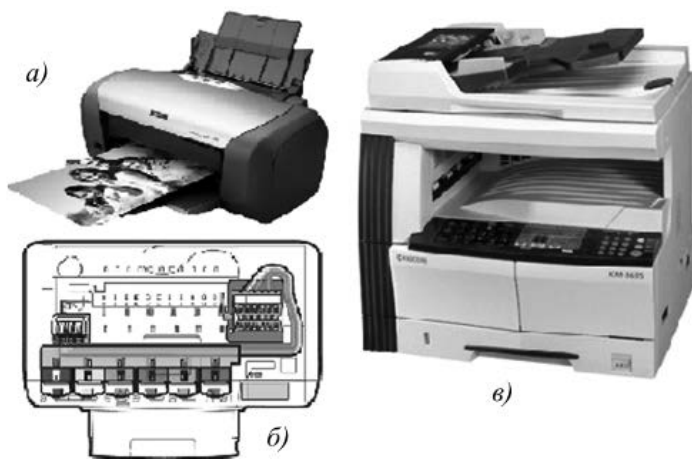


Рисунок 1.6. Пристрої фотоелектричної реєстрації зображень:
а – струменевий принтер, б – схема надходження чорнил в картридж шестиколірного струменевого принтера, в – лазерний копіювальний пристрій

– **Термопластична апаратура реєстрації зображень**, яку складає група пристроїв із записом та відтворенням інформації із застосуванням спеціального гнучкого носія – термопластичної стрічки.

– **Голографічна апаратура реєстрації зображень**, в якій застосовують спеціальну схему запису зображення на оптичний носій когерентним оптичним потоком (створення голограми), і, яка дозволяє відтворити об'ємне зображення.

– **Механічно-пресова апаратура реєстрації зображень**, в якій використовують гнучкий носій у вигляді будь-якого паперу (друкарського, книжного, журнального, газетного, грошового, афішного тощо), що взаємодіє з друкарським циліндром (барабаном) з рельєфним зображенням, вкритим друкарськими фарбами (фарбою). Взаємодія між носієм і барабаном здійснюється у результаті контакту з притисканням. Цю апаратуру вважають **найдавнішим різновидом апаратури реєстрації зображень** (у 1640 рік у Львові першодрукар Іван Федоров набрав дві різні книги – Євангеліє). До цієї групи апаратури реєстрації зображень віднесено також апаратуру для нанесення всіляких малюнків (клітинок, газетних смуг, назв продукції і фірм) на текстильні вироби (сорочки, теніски тощо). Найцінніша продукція – грошові знаки (гривні, рублі, долари, євро тощо). Крім того, до апаратури зазначеного типу віднесено апаратуру для нанесення зображень на жорсткому носії, тобто для карбування монет, медалей тощо.

Крім основного обладнання для реєстрації інформації конструктору доводиться мати справу з проектуванням допоміжної апаратури та устаткування. Устаткування цього класу – це **нестандартне метрологічне (вимірювальне) устаткування, яке не виробляють серійно** внаслідок вузької спрямованості та обмеженого попиту на такі вироби. До такого устаткування, що необхідне для обслуговування виробів АРІ, відносять великий парк найменувань, наприклад, вимірювачі швидкості і натягнення магнітної стрічки, моментовимірювальні касети і окремі вимірювачі обертальних моментів приймально-подавальних вузлів механізмів транспортування стрічки (МТС) стендів контролю якості стрічки, пристрої налаштування стрічко-протяжних трактів відеомагнітофонів, стенди запису всіляких вимірювальних відеокасет (до 18 найменувань), стенди контролю параметрів усіх магнітних головок, блоків оберткових головок, прилади для налаштування положення відеоголовок щодо кутів нахилу, виступів тощо.

Як впливає з вищенаведеного, конструювання, підготовка виробництва і виготовлення АРІ (серійно або невеликими партіями) потребують значних інтелектуальних зусиль і вирішення цілої низки технологічних завдань, від яких залежить **конкурентоспроможність і довговічність** нової продукції, яку готують до випуску. Якщо нова АРІ буде відповідати вимогам часу, тоді навіть значні витрати на розробку є виправданими.

1.2. Характеристика процесу конструювання

Конструювання в техніці (від лат. *construe* – *будую*) – це творчий процес, у результаті якого створюють конструкторську документацію, за якою здійснюють фізичну реалізацію технічного виробу і забезпечують передбачені функціональні можливості виробу.

Конструювання є частиною загального процесу створення нових або удосконалення вже існуючих технічних засобів. Стосовно електронних засобів цей процес, як правило, складено з таких етапів:

- розроблення структурної, функціональної та принципової схем, конструювання пристрою (системи),
- розроблення технології виготовлення,
- впровадження у виробництво та експлуатація.

Усі зазначені етапи є взаємопов'язаними і можуть обумовлювати зміни у початкових рішеннях стосовно реалізації окремих функціональних вузлів або пристрою (системи) в цілому.

Історично утвердилась думка, що конструювання є **мистецтвом**, яке вимагає особливого обдарування. Талант, інтуїція і фантазія конструктора визначають успіх зазначеної творчої діяльності.

Конструювання АРІ вимагає від фахівця різнобічних знань з фізики та техніки, технології, матеріалознавства, ергономіки, фізіології, економіки тощо. Особливості конструювання АРІ обумовлені тим, що в апаратурі реєстрації інформації необхідно застосовувати досягнення різних галузей сучасної науки та техніки.

Обов'язковою для будь-якої сучасної АРІ є електронна частина. Електронні засоби використовують для реалізації системи керування пристроями та функціональними системами, реалізації модулів пам'яті та відображення інформації, зв'язку між окремими складовими систем та пристроїв. Механічні та електромеханічні системи є обов'язковими у пристроях реєстрації зображень, магнітного та оптичного запису тощо. Вони забезпечують позиціонування, масштабування, наведення на об'єкт, функціонування рухомих систем пристроїв реєстрації.

Різноманіття виконуваних функцій і умов експлуатації обумовлює суперечливі вимоги до конструкцій електронних засобів (ЕЗ). Ця обставина значно ускладнює працю конструктора. Для полегшення цього завдання вимоги до конструкцій об'єднано в групи, стандартизовано і кодифіковано.

З'ясуємо зміст і особливості різних груп вимог.

Вимоги до конструкції ЕЗ за призначенням. Ця група вимог встановлює первинне завдання на підставі якого, власне, і розробляють пристрій. Загальний перелік таких вимог охоплює: *функціональне призначення*; параметр, що визначає конструкцію; *клас об'єкта* розміщення; *кліматичне виконання*; *категорію розміщення* на об'єкті; *масогабаритні характеристики*; *засоби закріплення* на об'єкті; *комунікації* на об'єкті; *електромагнітний захист* тощо.

Вимоги до конструкції щодо надійності. Вимоги щодо надійності визначають *стійкість апаратури* до кліматичних, механічних, біологічних і радіаційних впливів, а також вимоги щодо *безвідмовності та довговічності, зберігання і ремонтпридатності*. Забезпечення цих вимог означає, що апаратура буде виконувати покладені на неї функції протягом передбаченого *терміну експлуатації* за будь-яких умов, що враховано на етапі конструювання.

Вимоги щодо безпеки, ергономіки та естетики визначають завдання щодо *сумісності* конструкції ЕЗ з людиною під час експлуатації та ремонту, що передбачає відсутність загрози життю і здоров'ю операторів та ремонтного персоналу, зниження втомлюваності.

Вимоги щодо технологічності та уніфікації визначають пристосованість конструкції до обмеженої витрати трудових, матеріальних і енергетичних ресурсів під час підготовки виробництва та промислового виготовлення виробів у заданій кількості відповідно до певної категорії якості.

Патентно-правові вимоги регламентують умови, за яких прийняті у процесі розроблення конструкції технічні рішення стають промисловою власністю з винятковим правом на неї підприємства-розробника, що обумовлює економічний ефект та формує престиж фірми.

Конструкція визначає форму окремих деталей та вузлів, взаємне просторове розташування частин пристрою реєстрації інформації, способи їх з'єднання й матеріали з яких їх виготовлено. Для конструкцій апаратури реєстрації інформації і електронної апаратури в цілому характерним є:

– *ієрархічна структура*, якою передбачено формування завершеного пристрою поступовим об'єднанням простих функціональних вузлів у більш складні форми;

– *велика кількість електричних, магнітних та електромагнітних зв'язків*;

– *наявність неоднорідностей* в лініях електричних зв'язків, що обумовлює загасання та спотворення сигналів і виникнення електромагнітних завад;

– *наявність теплових зв'язків*, що обумовлює необхідність захисту термочутливих компонентів та вузлів від надмірного нагріву;

– *слабкий зв'язок* між внутрішньою структурою конструкції та її зовнішнім оформленням.

У структурі конструкцій електронної апаратури виділяють елементну базу та три конструктивні рівні. Тобто, ієрархічна структура конструкцій містить такі рівні:

0 рівень – електронні компоненти (активні та пасивні елементи електронних схем);

1 рівень – модуль першого рівня, як правило, друкована плата. Може бути окремий функціональний вузол з просторовими з'єднаннями;

2 рівень – модуль другого рівня: блок, рама. Блок – частина ЕА, що виконує декілька функцій, складається з кількох модулів першого рівня і має власну лицьову панель;

3 рівень – функціонально завершений електронний пристрій або система, виготовлені у вигляді стійки, шафи або пульта із застосуванням основної несної конструкції.

Сучасну систему несних конструкцій ЕА уніфіковано і передбачено послідовне нарощування конструкцій вищого рівня об'єднанням конструкцій нижчого рівня. Такий підхід передбачає уніфікацію габаритних розмірів окремих конструктивних елементів. Несними конструкціями третього рівня ієрархії є кожухи, каркаси, монтажні рами, корпуси шаф, стійки, панелі, корпуси пультів.

Монтажна рама – несна конструкція відкритого типу, яку призначено для розташування кількох конструктивних елементів нижчого рівня зі спеціальним механічним кріпленням, на якій розташовано елементи для електричного з'єднання.

Стіяка – монтажний пристрій відкритого типу для розташування блоків у кілька рядів. Блоки для монтажу в стійці, як правило, мають передню панель, але не мають повноцінного корпусу. Основною несною конструкцією стійки є вертикально розташована спільна рама.

Стелаж – механічна конструкція, яку призначено для розташування блоків закритого типу (приладів) у кілька рядів.

Шафа – механічна конструкція подібна до стійки, але закрита з усіх боків від зовнішнього середовища і має суцільні дверцята.

Панель – частина пристрою (пульту), що призначена для розташування органів керування, комутації та індикації.

Корпус – несна конструкція, яку призначено для розташування засобів відображення інформації, органів керування і окремих функціональних складових пристрою.

Структурний конструктивний поділ АРІ дозволяє розподілити процес конструювання і виготовлення кінцевого виробу, поліпшує ремонтпридатність пристрою. У наш час поширеним є агрегатний спосіб ремонту, за якого ремонт здійснюють заміною несправного функціонального вузла повністю.

Одним з основних завдань у процесі конструювання є пошук аналогів виробу або системи. Аналогами є пристрої або системи, що виконують ті самі функції повністю або частково, що й проєктований пристрій. З аналогів обирають прототип. Прототип – це аналог, що за своїми характеристиками найкраще відповідає вимогам до пристрою або системи які має бути сконструйовано. Під час аналізу технічних рішень, реалізованих у прототипі та аналогах, визначають можливість та шляхи удосконалення використаних технічних рішень або їх заміну новими рішеннями з метою усунути наявні недоліки та надати новій розробці якісно нових властивостей.

Якщо узагальнити наявний на сьогодні великий досвід конструювання АРІ різного призначення, можна виокремити кілька якісних рівнів конструкторських розробок з огляду на новизну прийнятих рішень. Класифікацію за новизною конструкторських рішень можна охарактеризувати такими рівнями.

Перший рівень. Для нової розробки **відсутній світовий аналог**. Пристрій або систему цього рівня може бути захищено унікальним патентом. Такі па-

тенти є **піонерськими в певній галузі техніки**. Цей рівень дуже рідкісний, за статистикою *кількість піонерських винаходів* не перевищує 3-5% від усіх отриманих патентів.

Другий рівень. Цьому рівню відповідають технічні розробки, що **перевищують показники світових аналогів**. Пристрої, які відносять до цього рівня, є найбільш поширеними. Технічні рішення, реалізовані у таких виробках також є оригінальними і можуть бути захищені відповідними патентами (80-85% від усіх винаходів). Перевищення рівня аналогу має бути за основними параметрами конструкції (пунктам патентної формули, тобто тими, які складають основу винаходу і їх важко будь-кому надалі оминати своїми рішеннями). Другорядні пункти винаходу легко обійти або взагалі відкинути. Цей вид розробок дає перспективу щодо випуску продукції на певний проміжок часу (3-7 років), доки не з'явиться щось більш досконале, оскільки досконалості немає меж.

Третій рівень. Цей рівень можна назвати «**рівень світових аналогів**». До цього рівня можна віднести розробки, в яких параметри виробу не перевищують відомі кращі зразки, але реалізовані в них технічні й конструктивні рішення дозволяють оминати чужі патенти і випускати якісну продукцію й бути конкурентоспроможним на ринку відповідних технічних засобів.

Згідно прийнятих правил конструктору доводиться відповідно до посадової інструкції виконувати такі роботи:

- *розроблення* конструкторської документації;
- *супровід* виробу у процесі виробництва;
- *участь у випробуваннях* і передаванні продукції замовнику;
- *участь в установці* на об'єкті замовника і навчанні технічного персоналу.

Сам процес конструювання починається з отримання *технічного завдання* (ТЗ) від головного розробника або від замовника. Отримавши ТЗ, призначені на розроблення *конструкторської документації* (КД), конструктори мають докладно його вивчити і з'ясувати найбільш складні вимоги та узгодити порядок взаємодії з усіма учасниками розробки.

Розроблення виробу від початку має супроводжувати провідний технолог, щоб конструкція, наприклад, відеомагнітофона, була технологічною щодо виготовлення окремих деталей, складання, настроювання і ремонту. Провідний конструктор і провідний технолог розробки мають працювати у постійній взаємодії, тоді можна очікувати появи оптимальної і високотехнологічної конструкції виробу. Це – світова практика.

Після розроблення конструкторської документації (ескізної або суворого обліку), її підписання відповідними особами (конструктором, його керівником, провідним технологом, головним конструктором або його заступником тощо) здійснюють розмноження КД у потрібній кількості екземплярів (3-5 залежно від етапу конструювання).

Після розмноження КД її надають в інші підрозділи, зокрема технологам для формування технологічної документації (це є основна розсилка), залишаючи собі контрольний екземпляр для коригування і супроводу у виробництві.

Після створення технологіями відповідних технологічних карт для виготовлення деталей та складання виробу КД разом з технологічною документацією надходить на виробництво для виготовлення і складання виробу. Для конструкторів починається епізодична робота із супроводу деталей на виробництві, вирішення всіляких питань, що виникають: заміна матеріалу деталі, коригування неправильних розмірів тощо.

1.3. Еволюція конструкторських рішень

Брати Луї та Огюст Люм'єри продемонстрували свою кінематографічну систему в 1895 році, що у світі вважають початком ери кінематографу. Цей період також можна вважати і початковим періодом епохи конструювання пристроїв реєстрації інформації. Перша запропонована система була суто оптико-механічною з реєстрацією рухомих зображень на фотоплівку. Сучасні системи реєстрації інформації і зображень зокрема увібрали найкращі досягнення в галузі оптики, електроніки, обчислювальної техніки, точної механіки тощо.

Зробимо невеличку ретроспективу еволюції конструкцій електронних засобів.

Зазвичай початок конструювання в електроніці пов'язують з науково-технічною діяльністю відомих винахідників Олександра Попова та Гульєльмо Марконі. Проте, цей період можна вважати лише початковим, оскільки електроніки, як галузі, іще не існувало.

Перше покоління електронної апаратури і, відповідно, конструкторських рішень відносять до періоду застосування *електронних вакуумних ламп*, як основних підсилювальних елементів. Електронну лампу винайшли 1905-1906 роках (Джон Флемінг та Лі де Форест) і потім тривалий час удосконалювали. Пік розквіту лампової схемотехніки припадає на 1935-1950 роки. Ідеї, щодо оброблення сигналів та створення нових електронних систем випереджали, що цілком природно, розвиток елементної бази та схемотехнічних рішень. Основні обмеження і проблеми конструювання електронних засобів цього періоду пов'язані з великими масо-габаритними показниками, виділенням великої кількості тепла, споживанням великої кількості електроенергії, потребою у використанні дорогих матеріалів, обмеженим переліком конструктивних матеріалів і відносно низькою надійністю штучних матеріалів. Слід зазначити, що активне застосування ламп продовжувалось і у 60-х роках минулого століття і в 70-х. Але в цей період не вони вже визначали тенденції розвитку схемотехніки та конструктивних рішень. Тому, до електронної апаратури першого покоління відносять лампові пристрої та системи, а в часі – це апаратура 20-60-х років.

У 1947-1948 роках *винайдено транзистор*. Формально «батьком» транзистора вважають Вільяма Шоклі, проте Нобелівську премію за створення транзистора у 1956 році отримала група фахівців, у складі якої були Вільям Шоклі, Джон Бардін та Волтер Браттейн. Електронну апаратуру, основними елементами якої є транзистори та інші дискретні *напівпровідникові елементи*, відносять

до *другого покоління*. Цю апаратуру характеризують значно кращі масо-габаритні показники порівняно з ламповою, а принципи її конструювання і типові конструктивні рішення зазнали суттєвих змін.

У 1960 році виготовлено першу *інтегральну мікросхему*, тобто функціональний вузол, усі елементи (активні та пасивні або їх аналоги) якого сформовано в *одному кристалі* напівпровідника. Згодом для характеристики складності інтегральних схем (ІС) увели параметр, який називають «показник ступеня інтеграції» k . Цей показник визначають зі співвідношення

$$k = \lg N, \quad (1.1)$$

де N – кількість елементів в еквівалентній електричній схемі ІС.

Електронну апаратуру, створену із застосуванням інтегральних мікросхем початкового періоду для якої $k < 2$ віднесено до апаратури *третього покоління*. Для цього періоду характерним є широке, майже обов'язкове, застосування друкованих плат. Спочатку це були одnobічні та двобічні плати, але згодом виникла необхідність переходити до застосування багатoshарових друкованих плат. Обмежений перелік мікросхем, що виготовляли централізовано, як уніфіковані функціональні модулі, обумовив розвиток конструювання та виготовлення *мікросборок*, а згодом – мікросхем на замовлення. *Мікросборка* – функціональний вузол, виготовлений на металевій підкладці, вкритій скляною емаллю, на якій розташовані безкорпусні інтегральні схеми малого ступеня інтеграції, напівпровідникові та пасивні елементи. Сигнальні з'єднання між елементами схеми здійснювали провідниками, виготовленими за *тонкоплівковою* або *товстоплівковою* технологією. Остаточню конструктивно такий функціональний вузол розташовували у невеликому стандартизованому металевому корпусі.

Економічні переваги та широкі функціональні можливості інтегральної схемотехніки сприяли швидкому розвитку технологій виготовлення ІС. Це призвело до створення не тільки складних функціональних вузлів, а й завершених складних електронних пристроїв, як цифрових, так і аналогових. Електронну апаратуру із застосуванням мікросхем, що мають показник ступеня інтеграції $k = 3-4$, віднесено до апаратури *четвертого покоління*. Можна вважати, що етап розвитку тривав до кінця 80-х років минулого століття.

Наступний етап розвитку ЕЗ (ЕА *п'ятого покоління*) пов'язаний з впровадженням надвеликих інтегральних мікросхем, активного застосування гібридних технологій оброблення та відтворення сигналів. У кінці періоду, до якого віднесено ЕЗ *четвертого покоління*, багато вчених висловлювали думку, що наближається межа подальшої мініатюризації, обумовлена фізичними властивостями напівпровідникових матеріалів, зосереджених в мікроскопічних об'ємах. На певному етапі вважали, що подальше зменшення об'єму, в якому розташовано один транзистор мікросхеми, не є можливе. Проте дослідження тривали і призвели до значних успіхів. Ці успіхи дозволили значно поліпшити швидкість й масогабаритні показники ІС безпосередньо і практично необмежено розширити можливості конструювання електронної апаратури різного

призначення. У результаті розвитку *нанотехнологій* розроблено нові, електронні, електронно-оптичні, електронно-акустичні та інші пристрої з надзвичайними можливостями. Зауважимо, що п'яте покоління ЕА продовжує розвиватись і у наш час.

Зрозуміло, що поява нових електронних компонентів на кожному етапі розвитку електронної техніки, потребувала удосконалення процесу конструювання цієї техніки, застосування конструктивних матеріалів з новими властивостями, удосконалення елементів конструкцій нової електронної техніки. На кожному етапі доводилось вирішувати складні технічні та технологічні завдання, пов'язані із забезпеченням нормальної робочої температури для окремих функціональних вузлів і пристроїв у цілому, забезпечення екранування елементів схем, що функціонують з використанням дуже високих частот (сотні мегагерц і, навіть, одиниці гігагерц), забезпечення надійного електроживлення і електричних зв'язків між функціональними вузлами.

Як підсумок наведемо таку хронологію еволюції електронних засобів:

I покоління ЕА – 20-ті роки ХХ століття – середина 60 років ХХ століття (електронно-вакуумна – лампова електроніка);

II покоління ЕА – 50-ті роки – середина 70-х (транзисторна електроніка);

III покоління ЕА – початок 70-х – початок 80-х (ЕА з ІС, $k < 2$);

IV покоління ЕА – початок 80-х – початок 90-х (ЕА з ІС, $k = 3 \div 4$);

V покоління ЕА – початок 90-х – наш час (ЕА з ІС, $k > 4$).

1.4. Методи конструювання електронних засобів

Проектування сучасних електронних засобів є складним процесом, у якому взаємно пов'язані принципи дії електронних систем, механічні схеми та конструкції апаратури, а також технологія її виготовлення. Як частина цього загального процесу, конструювання має задовольняти усі вимоги, визначені на етапі проектування ЕЗ.

Конструювання може бути здійснено різними методами. Сучасні методи конструювання ЕЗ поділяють на три взаємозалежні групи (рис. 1.7):

1) *за видами зв'язків між елементами;*

2) *за способом формування та організації структури зв'язків між елементами;*

3) *за ступенем автоматизації формування структури зв'язків між елементами.*

Вибір зазначених методів конструювання ЕЗ залежить від призначення апаратури та її функцій, переважного виду зв'язків, рівня уніфікації, автоматизації виробництва тощо.

Так, наприклад, у разі конструювання пристроїв з використанням інтегральних мікросхем застосовують топологічний метод (переважають фізичні зв'язки), функціонально-модульний (функціональними модулями є ІС), автоматизований (розміщення ІС на друкованій платі (ДП) та трасування з'єднань

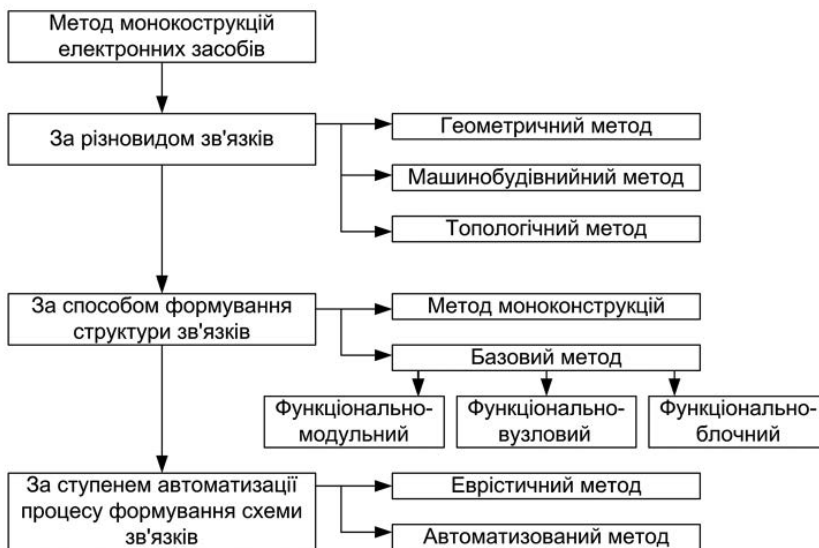


Рисунок 1.7. Методи конструювання електронних засобів

виконують за допомогою ЕОМ). У свою чергу ІС конструюють методами топології із застосуванням автоматизованих засобів.

Розглянемо стисло характеристику зазначених вище методів конструювання електронних засобів.

Геометричний метод. В основу методу покладено структуру геометричних та кінематичних зв'язків між деталями, що утворюють систему опорних точок, кількість і розміщення яких залежить від заданих ступенів свободи і геометричних властивостей твердого тіла. Метод доцільно застосовувати для конструкцій, в яких треба забезпечити точне взаємне розташування деталей або забезпечити їх точне переміщення під час деформацій, величини яких значно менші похибок виготовлення деталей. До таких вузлів можна віднести оптичну систему сучасних фотоапаратів та відеокамер, накопичувачі на магнітних дисках тощо. Однією з основних характеристик геометричного методу є те, що у разі його застосування характер взаємозв'язку двох деталей майже не залежить від похибок їх виготовлення. Властивості, яких набувають конструкції, створені за цим методом, дуже важливі для масового виробництва, побудованого на взаємозамінних деталях.

Машинобудівний метод. В основу цього методу покладено структуру геометричних і кінематичних зв'язків між деталями, що створюють систему опорних поверхонь, кількість і розміщення яких вибирають за умови мінімізації маси та допустимої міцності конструкції. Метод доцільно застосовувати для конструкцій з відносно великими деформаціями. Наприклад, під час проектування каркасних конструкцій ЕЗ усіх рівнів, кінематичних ланок функціональних вузлів (ФУ), а також усіх видів нерухомих з'єднань (болти,

гвинти, заклепки, скоби тощо). Можливість забезпечити механічну міцність за мінімальної маси, простота конструкції і висока економічність характеризують цей метод. Для окремих видів конструкцій ЕЗ він є більш ефективним у порівнянні з геометричним.

Топологічний метод. В основу цього методу покладено структуру *фізичних зв'язків* між електро-радіо-елементами (ЕРЕ), тобто, формування структури принципової схеми та її геометричної (топологічної) зв'язності, незалежно від її функціонального змісту. Метод застосовують, якщо непридатні геометричний і машинобудівний методи. Топологічний метод може бути застосовано для виявлення структури будь-яких зв'язків, проте переваги цього методу беззаперечні у ситуаціях, де зв'язки елементів можна подати як граф. *Графом* у загальному випадку називають графічне подання структури зв'язків між елементами принципової схеми і елементами конструкції.

Основні характеристики **топологічного методу**:

1) подання зв'язності елементів принципової схеми і деталей конструкції із застосуванням теорії графів;

2) *ізоморфізм графів*, тобто властивість еквівалентності змісту незалежно від відмінності геометричного образу, що дозволяє отримати множину перетворень графа, серед яких конструктор може сформулювати рішення суттєво відмінне від прототипу;

3) *використання властивостей графів* для розміщення елементів і орієнтації їх у просторі для трасування ліній зв'язку та засобів їх з'єднання з елементами.

Топологічний метод конструювання застосовують, у першу чергу, для створення *пліткових ІС, друкованих плат, гнучких друкованих з'єднувачів, електромонтажних креслень*, реалізації принципу «*безперервної схеми*» в пристроях діапазону НВЧ тощо.

Метод проектування моноконструкцій спрямований на *мінімізацію кількості зв'язків у конструкції*, його застосовують для створення *функціональних вузлів (ФВ), блоків, радіоелектронних пристроїв (РЕП)* із використанням спільної *монтажної конструкції* (каркасі, шасі) у вигляді моноузла (моноблока) з оригінальними елементами. Тривалий час конструювання ЕЗ здійснювали лише з використання моноконструкцій з урахуванням конкретних вимог, що мають забезпечити функціональні вузли, блоки та РЕП.

Відомо, що розроблення моноконструкцій ЕЗ є складним творчим процесом і має ряд недоліків, а саме: тривалий час конструювання та впровадження в серійне виробництво, обмежені можливості типізації та уніфікації, недостатньо висока надійність, низька ступінь ремонтпридатності, складність внесення змін до принципової схеми без перероблення конструкції, значна вартість розроблення та виготовлення конструкції.

Базовий метод конструювання. Основою методу є *поділ апаратури на конструктивно і схемно завершені частини*. Базовий метод конструювання і

його різновиди (*функціонально-модульний, функціонально-вузловий і функціонально-блочний* метод) ґрунтується на принципах агрегування, функціональної та розмірної взаємозамінності, схемної і конструкторської уніфікації. Розподіл базового методу на різновиди обумовлено з обмеженнями схемної і конструкторської уніфікації структурних рівнів (модулів, ФВ, блоків).

Агрегування – процес, у результаті якого, прості складові об'єднують у певні функціонально завершені вузли, блоки. Агрегування – поняття, що набуло поширення у різних галузях господарської та економічної діяльності. Наприклад, в автомобілі є силовий агрегат, у безпроводових телекомунікація застосовують об'єднання (агрегування) окремих пакетів даних, призначених для певного абонента, у великі сигнальні блоки для зменшення потоків службової інформації тощо.

Базовий метод є основним під час проектування сучасних ЕЗ, він має багато переваг у порівнянні з методом моноконструкцій.

Можна зазначити наведені нижче властивості базового методу.

На **етапі конструкторського проектування** застосування цього методу:

1) надає можливість одночасно здійснювати роботу над багатьма вузлами і блоками, що скорочує терміни завершення процесу проектування;

2) спрощує налагодження і сполучення вузлів в лабораторії, оскільки робота ФВ визначається роботою відомих модулів та ІС;

3) значно спрощує конструювання та макетування;

4) скорочує обсяг оригінальної КД;

5) надає можливість постійно вдосконалювати апаратуру без суттєвих змін конструкції;

6) спрощує і прискорює внесення, в разі необхідності, змін до принципової схеми, конструкції та КД.

На **етапі виробництва** застосування базового методу:

1) скорочує терміни освоєння серійного виробництва апаратури;

2) спрощує процес складання, монтаж;

3) зменшує вимоги до кваліфікації складальників і монтажників;

4) зменшує вартість апаратури завдяки широкій механізації та автоматизації виробництва;

5) підвищує ступінь спеціалізації виробництва.

Під час експлуатації застосування базового методу:

1) підвищує експлуатаційну надійність АРІ;

2) полегшує обслуговування;

3) покращує ремонтпридатність апаратури.

Евристичний метод використовує *узагальнений практичний досвід* (колективна мудрість) у сфері конструювання АРІ і суміжних галузей. Метод є основним у практичній діяльності конструктора АРІ.

Евристика – (Від грец. *Heurisko* – здійснюю пошук, відкриваю) – сукупність прийомів і методів, що полегшують і спрощують розв'язання пізнавальних, конструктивних, практичних завдань. Евристикою називають також

спеціальну наукову область, що вивчає специфіку творчої діяльності. Евристичні методи протиставляють рутинному, формальному перебору варіантів за заданими правилами. По суті під час вирішення будь-якого завдання людина завжди використовує ті чи інші методи, що скорочують шлях до досягнення результату, та полегшують його знаходження. Наприклад, під час доведення теорем геометрії ми, зазвичай, використовуємо як евристичний засіб креслення; у разі вирішення математичного завдання, ми намагаємось згадати і скористатись розв'язками інших схожих завдань; як евристичні засоби використовують загальні твердження і формули, індуктивні методи, аналогії, наочні моделі й образи, уявні експерименти тощо.

Метод автоматизованого (автоматичного) конструювання ґрунтується на *застосуванні ЕОМ для розв'язання завдань розташування ЕРЕ, трасування електричних з'єднань різних структурних рівнів, виготовлення креслень і текстової КД.*

Велика розмаїтість завдань автоматизованого конструювання призвела до *розроблення алгоритмів* для вирішення однотипних завдань, що відрізняються точністю, тривалістю часу виконання, необхідним обсягом машинної пам'яті тощо. Системи автоматичного конструювання ЕЗ – це системи типу «людина-машина», вони містять *комплекс технічних засобів* (ЕОМ, координатографи, засоби друку та відображення інформації) і *математичне забезпечення*, призначене для розв'язку завдань конструювання РЕА різного ієрархічного рівня. Незважаючи на відмінності автоматизованих методів конструювання, можна виділити такі самостійні етапи автоматичного конструювання:

1. *Уведення вхідної інформації*, контроль правильності підготовки та кодування вхідних даних.

2. *Компонування функціональної структури* пристроїв ЕЗ усіх рівнів із застосуванням обраних показників якості, тобто розподіл сукупності функціональних модулів та елементів на підмножини, що відносять до різних рівнів ієрархії.

3. *Розміщення* скомпонованих функціональних модулів та елементів у конструкціях пристроїв всіх рівнів, складання відповідного технічного документа, наприклад, таблиці розташування.

4. *Трасування з'єднань* або, іншими словами, формування схеми фізичних зв'язків між пристроями, модулями або елементами відповідно до схеми електричних зв'язків з урахуванням обмежень на прокладання, складання електромонтажної документації, контроль правильності складання документації. У процесі виготовлення фотооригіналів або фотошаблонів автоматизованими методами робочі креслення втрачають функції основного документа, необхідного для виготовлення фотооригінала. Основою конструкторської документації є табличний спосіб подання результатів проектування. За таких обставин машинні креслення розташування елементів на ДП і креслення шарів плат є додатковою документацією. Якщо з'єднання здійснюються на верстатах-автоматах, то вихідну інформацію подають на спеціальному носії (перфострічки,

перфокарти, електронні файли тощо) одночасно з керуючою інформацією для виготовлення фотошаблонів.

5. *Складання зведених вторинних текстових документів*: відомостей, специфікацій покупних виробів, запасних інструментів і приладдя (ЗІП) тощо.

Автоматизований метод конструювання, так само як і базовий, ґрунтується на високому рівні схемної і конструкторської уніфікації, оскільки повторювані елементи схеми і деталі конструкцій спрощують розроблення програм для ЕОМ з метою забезпечити документальний супровід конструкцій ЕЗ.

1.5. Система стандартизації у техніці

У сучасному світі застосовують міжнародні, регіональні (наприклад, європейські), національні (раніше їх називали «державні»), галузеві стандарти усіх сфер діяльності. На великих підприємствах можуть бути також Стандарти підприємства.

Національні стандарти, що є складовими єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД), встановлюють взаємопов'язані правила і положення щодо порядку розроблення, оформлення та обігу конструкторської документації на виробі, що розробляють і виготовляють підприємства всіх галузей промисловості.

Стандарт – нормативно-технічний документ зі стандартизації, що встановлює комплекс норм, правил, вимог до об'єкта стандартизації і затверджений компетентним органом.

Стандарт розробляють з урахуванням досягнень науки, техніки передового досвіду. У стандарті має бути враховано сучасний рівень техніки та технології. Стандарт може бути розроблено як на матеріальні предмети (продукцію, еталони, зразки речовин тощо), так і на норми, правила, вимоги до об'єктів організаційно-методичного і загальнотехнічного характеру. У разі впровадження стандарту, підприємства мають дотримуватись вимог цього стандарту у технічній документації й у виробках, виготовлених за цією документацією. Дотримання стандарту (норм, правил, вимог, встановлених стандартом відповідно до сфери його поширення і сфери дії) має бути забезпечено з дати введення його в дію.

Зміст стандартів безперервно змінюється. Ці зміни пов'язані з розвитком продуктивних сил економічного базису.

Системами міжнародної та національної стандартизації передбачено також термінологічні стандарти, які, як правило, розміщено в нульових групах усіх розділів: А00, Т00, Е00 тощо. У стандартах встановлюють терміни і визначення, обов'язкові для застосування в документації всіх видів науково-технічної, навчальної та довідкової літератури.

У ряді стандартів наведено стандартизовані літерні і графічні позначення елементів і пристроїв.

Стандарти на термінологію та позначення мають важливе значення для науки і виробництва. Під час обміну науковою та технічною інформацією між

організаціями і підприємствами, а також під час міжнародного обміну, точність і однозначність термінів і позначень є необхідною умовою. У зв'язку з цим заборонено застосовувати нестандартні позначення і терміни, а також терміни синоніми.

Найважливіші цілі стандартизації:

- *поліпшувати якість* виробленої продукції;
- *підвищувати конкурентоспроможність* товарів вітчизняного виробництва і забезпечувати умови для їх експорту на світовий ринок;
- *встановлювати раціональну номенклатуру* вироблених товарів;
- *розвивати міжнародне співробітництво* в усіх сферах людської діяльності;
- *захищати навколишнє середовище* від техногенного впливу;
- *забезпечувати безпеку людей*.

Головним завданням стандартизації є створення комплексу нормативних документів, що визначають сучасні вимоги до продукції, до її розроблення, виробництва і застосування, а також нагляд за правильним використанням стандартів.

Основний принцип стандартизації – це програмно-цільове планування. Іншими важливими принципами стандартизації є: директивність, системність, динамізм і оптимальність.

Директивність чи обов'язковість стандартизації полягає в тому, що в стандарти закладають вимоги і норми, обов'язкові за своєю державно-правовою сутністю. За порушення вимог стандартів законами передбачено відповідальність.

Системність характеризує стандарт як елемент системи. На основі цього принципу розробляють системи міжгалузевих стандартів, наприклад, стандартів на систему показників якості продукції.

Основні методи стандартизації:

- *математичні методи* (використання рядів кращих чисел і параметричних рядів);
- *уніфікація* (приведення продукції до подібності за формою, нормами і типорозмірами);
- *агрегування* (конструювання готових виробів з уніфікованих і стандартних деталей і вузлів);
- *комплексна стандартизація* (розроблення єдиної системи взаємопов'язаних вимог до готової продукції, сировини, матеріалів, а також до процесів розроблення, виробництва і споживання);
- *випереджальна* стандартизація (встановлення підвищених вимог до об'єкта стандартизації, обґрунтоване прогнозом науково-технічного розвитку).

Призначення стандартизації:

– *установлення вимог* до якості готової продукції на основі комплексної стандартизації якісних характеристик даної продукції, а також сировини, матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів, необхідних для її виготовлення з високими показниками якості та ефективної експлуатації;

- встановлення норм, вимог і методів у галузі проектування та виробництва продукції з метою забезпечення її оптимальної якості і запобігання нерационального різноманіття видів, марок, типорозмірів;
- встановлення єдиних систем документації, зокрема уніфікованих систем документації, що використовуються в автоматизованих системах управління,
- встановлення системи класифікації та кодування техніко-економічної інформації, а також розроблення стандартів на види носіїв інформації, форм і систем організації виробництва та технічних засобів організації праці;
- встановлення єдиних термінів та позначень у найважливіших галузях науки і техніки, а також в галузях народного господарства тощо.

Категорії і види стандартів. Залежно від змісту вимог, наведених у стандартах усіх категорій продукції, стандарти поділяють на види:

- стандарти технічних умов (загальних технічних умов);
- стандарти загальних технічних вимог (технічних вимог);
- стандарти параметрів і (або) розмірів;
- стандарти типів і основних параметрів і (або) розмірів;
- стандарти конструкції і розмірів;
- стандарти марок;
- стандарти сортаменту;
- стандарти правил приймання;
- стандарти методів випробувань (контролю, аналізів, вимірів);
- стандарти правил маркування, пакування, транспортування та зберігання;
- стандарти правил експлуатації і ремонту;
- стандарти типових технологічних процесів.

Загальнотехнічні та організаційно-методичні стандарти на загальні норми, показники якості, методи розрахунку і проектування, класифікації та кодування, терміни і визначення, одиниці фізичних величин, загальні вимоги до продукції, призначеної для застосування за різних кліматичних умов експлуатації, вимоги до виготовлення, вимоги до безпеки, сортність продукції, на яку дозволено встановлювати сортність тощо, – на види не поділяють.

1.6. Загальна характеристика конструкторської документації

Конструкторська документація – документи, окремо або в сукупності визначають склад і конструкцію виробу і містять необхідні дані для його розроблення і виготовлення, контролю, приймання, експлуатації, ремонту, утилізації.

Конструкторські документи поділяють на:

- *одиничні*;
- *групові* – на вироби, які мають спільні конструктивні ознаки і мають деякі відмінності один від одного.

За формою конструкторські документи поділяють на:

- графічні;
- текстові.

Графічна КД – документація, в якій за допомогою встановлених стандартних символів і правил формування графічних образів надано вичерпну інформацію про пристрій або систему, принцип дії, склад і зв'язки між окремими складовими.

Технічні вимоги до текстових документів

Текст документа слід подавати з дотриманням наведених нижче правил та рекомендацій.

Повне найменування виробу на титульному аркуші, в основному написі і під час першого згадування в тексті документа має бути однаковим з найменуванням його в основному конструкторському документі.

У наступному тексті порядок слів у найменуванні має бути прямим, тобто, на першому місці має бути визначення, а потім – назва виробу; допускається вживати скорочене найменування виробу.

У документах необхідно застосовувати науково-технічні вимоги, позначення та визначення, установлені відповідними стандартами, а за їх відсутності – загальноприйняті у науково-технічній літературі.

У текстовому документі **не можна:**

- застосовувати для одного і того ж поняття *різні* науково-технічні терміни, близькі за змістом, а також іноземні слова і терміни за наявності рівнозначних слів і термінів українською мовою;

- *скорочувати позначення* одиниць фізичних величин, якщо їх наведено без цифр, за винятком одиниць фізичних величин в головках і боковиках таблиць і в розшифровках літерних позначень, що входять до формули;

- *застосовувати скорочення слів*, крім встановлених правилами української орфографії, пунктуації, а також відповідними стандартами.

Вимоги до текстових документів, що містять текст, розділений на графи

Текстові документи, що містять текст, розділений на графи, за необхідності поділяють на розділи й підрозділи, які не нумерують.

Найменування розділів і підрозділів записують у вигляді заголовків малими літерами (крім першої великої) і підкреслюють.

Розташування заголовка для відомостей встановлено відповідними стандартами ЄСКД і системою проектної документації для будівництва (СПДБ).

Нижче кожного заголовка необхідно залишати один вільний рядок, вище – не менше одного вільного рядка.

У текстовому документі, що має рядки, усі записи роблять на кожному рядку в один ряд.

Для полегшення внесення змін у конструкторських документах рекомендовано:

– робити запис у нижній частині поля рядка. Записи не повинні зливатися з лініями, що розмежують рядки і графи; слід залишати вільні рядки між розділами та підрозділами, а в документах великого обсягу – також всередині розділів і підрозділів;

– у разі складання документів на дослідні зразки додатково передбачати вільні рядки для запису документів та інших даних, які можуть бути введені в документацію;

– якщо у графі документа записано текст у кілька рядків, то в наступних графах записи слід починати на рівні першого рядка. Якщо в наступних графах запис розміщено на одному рядку, то за машинописного способу виконання допускається розміщувати запис на рівні останнього рядка.

Розрахунки

Порядок подання розрахунків визначається характером величин, для яких необхідно здійснити розрахунки.

Розрахунки в загальному випадку мають містити:

- ескіз або схему виробу, для якого здійснюють розрахунки;
- завдання, які слід виконати під час розрахунку (вказати, що треба визначити в розрахунку);
- дані для розрахунку;
- умови, з урахуванням яких здійснено розрахунок;
- розрахунок;
- висновок.

Ескіз або схему, що супроводжують розрахунок, можна креслити в довільному масштабі, за якого забезпечено чітке уявлення про те, що розраховано для даного виробу.

1.7. Запитання для самоконтролю

1. Які носії інформації застосовують в апаратурі реєстрації інформації?
2. У чому полягає основна відмінність статичної та динамічної систем реєстрації інформації?
3. Наведіть приклади оптико-механічної апаратури реєстрації інформації і коротко поясніть принципи її функціонування.
4. На які види розділяють АРІ за принципом дії?
5. До якого типу апаратури реєстрації інформації віднесено принтери і чому?
6. Яке додаткове обладнання використовують у процесі виготовлення апаратури реєстрації інформації?
7. Що таке процес конструювання? З яких етапів складається процес конструювання електронного обладнання?
8. Поясніть, які вимоги слід враховувати конструктору у процесі конструювання електронного обладнання.

9. Які конструктивні особливості характерні для електронного обладнання?
10. Які рівні виділяють в ієрархічній структурі конструкції? Надайте їх стислу характеристику.
11. Які основні роботи має виконувати конструктор згідно посадової інструкції?
12. Скільки поколінь електронної апаратури змінилось за час її існування? Надайте їх стислу характеристику.
13. Поясніть особливості конструювання електронної апаратури четвертого покоління.
14. Поясніть особливості конструювання електронної апаратури п'ятого покоління.
15. Які методи конструювання застосовують у процесі розроблення сучасної апаратури реєстрації інформації?
16. Поясніть сутність геометричного методу конструювання апаратури реєстрації інформації.
17. Поясніть сутність топологічного методу конструювання апаратури реєстрації інформації.
18. Поясніть сутність базового методу конструювання апаратури реєстрації інформації.
19. Поясніть призначення та основні завдання державної системи стандартизації у техніці.
20. Поясніть особливості видів стандартів цих категорій продукції.
21. Поясніть, що таке графічна конструкторська документація.
22. Наведіть основні вимоги до змісту текстових конструкторських документів.
23. Поясніть рекомендації щодо подання розрахунків у конструкторській документації.

Розділ 2. Організація та документальне забезпечення процесу конструювання

Основними видами проектних робіт, які виконують під час створення апаратури реєстрації інформації, є науково-дослідні роботи (НДР) і дослідно-конструкторські роботи (ДКР).

2.1. Науково-дослідні роботи

У процесі створення сучасних приладів часто виникають принципово нові завдання, вирішення яких вимагає глибоких і різнобічних теоретичних та експериментальних досліджень. Іноді такі завдання складають певну проблему або групу проблем.

Очевидно, що до вирішення проблемних питань починати проектування приладу або системи було б передчасним та не виправданим.

З метою вирішити проблемні питання і отримати необхідний для проектування початковий матеріал здійснюють *науково-дослідні роботи*.

Науково-дослідна робота складається з кількох *етапів*, під час яких виконують такі дії:

- опрацьовують і погоджують *технічне завдання*;
- вивчають вітчизняну і зарубіжну *літературу* за напрямом розробки;
- розробляють загальну методику і складають *план* проведення робіт;
- здійснюють *теоретичні дослідження*;
- складають перелік *експериментів* з розробленням конкретних методик і схем експериментальних установок;
- розробляють і виготовляють *макетні вузли* або макетний зразок і досліджують особливості прийнятих технічних рішень;
- розробляють і виготовляють *експериментальний зразок*;
- досліджують і *випробовують експериментальний зразок*;
- *аналізують результати* експериментів і випробувань;
- за результатами виконання НДР складають *науково-технічний звіт* і створюють експериментальний (або макетний) зразок приладу або системи, а також розробляють рекомендації стосовно технічного завдання на ДКР.

Залежно від цілей, характеру і складності НДР вказані роботи може бути скориговано або скорочено.

2.2. Дослідно-конструкторські розробки

Дослідно-конструкторську роботу виконують після з'ясування принципової технічної можливості створення приладу. Її метою є розробити *конструкторську документацію* і виготовити *дослідний зразок*.

У складних випадках, під час розроблення великих технічних комплексів іноді виникає необхідність у виконанні *аванпроекта* для попереднього

з'ясування господарської доцільності і технічної можливості створення майбутнього приладу в бажані терміни, здійснення компоновки в заданих габаритних розмірах тощо.

Якщо принципову технічну можливість створення приладу встановлено, ДКР охоплює основні етапи, наведені в табл.2.1 (ДСТУ 3974-2000).

Таблиця 2.1. Стадії та етапи виконання ДКР

Стадія розроблення	Етапи виконання робіт
<i>Технічна пропозиція</i>	Добір та узагальнення науково-технічних та патентних документів, оформлення аналітичного огляду. Розроблення технічної пропозиції на підставі аналізу науково-технічних, патентних, нормативних документів, маркетингових досліджень, ТЗ на ДКР. Затвердження технічної пропозиції з наданням документам літери «П».
<i>Ескізний проект</i>	Розроблення комплекту документів ескізного проекту. Виготовлення та випробовування макетів або експериментальних зразків, за необхідності. Затвердження ескізного проекту з наданням документам літери «Е».
<i>Технічний проект</i>	Розроблення комплекту документів технічного проекту. Розроблення конструкторських рішень виробу та його складових частин. Затвердження технічного проекту з наданням документам літери «Т».
<i>Робоча конструкторська документація дослідного зразка (дослідної партії) виробу, призначеного для серійного (масового) чи одиничного виробництва</i>	Розроблення робочої конструкторської документації, призначеної для виготовлення і випробування дослідного зразка (дослідної партії), без надання літери. Виготовлення і попередні випробування дослідного зразка (дослідної партії). Корикування КД за результатами виготовлення і попередніх випробувань дослідного зразка (дослідної партії). Приймальні випробування дослідного зразка (дослідної партії). Корикування КД за результатами приймальних випробувань дослідного зразка (дослідної партії).

Залежно від різновиду, призначення і складності зразка питома вага окремих етапів може бути різною. Крім того, під час виконання окремих етапів, як правило, розробляють та виготовляють *макети* (здійснюють макетування) окремих механізмів і вузлів для перевірки схемних і конструктивних рішень. Значущість макетування може бути вельми великою, проте його не можна виділити як самостійний етап, оскільки необхідність макетування може виникнути на багатьох з вказаних етапів (особливо на етапах ескізного і технічного проектів). У результаті здійснення ДКР, як правило, виготовляють *дослідний зразок* приладу.

2.3. Документальне забезпечення процесу конструювання

Конструкторський документ – документ, який окремо чи разом з іншими документами визначає склад і конструкцію виробу та містить необхідні дані, згідно з якими розробляють, виробляють, контролюють, приймають, постачають, експлуатують та ремонтують виріб.

Технічне завдання

Технічне завдання (ТЗ) є дуже важливим документом, що з одного боку визначає технічні параметри та характеристики розроблюваного пристрою або системи, а з другого – є одним із основних документів, що *визначає відносини* між замовником та виконавцем робіт. Саме технічне завдання є тим документом, що визначає правоту однієї із сторін у разі виникнення непорозумінь та суперечностей. До складання технічного завдання завжди треба ставитись з *максимальною відповідальністю*.

Технічне завдання розробляють, погоджують і затверджують на дослідно-конструкторську роботу, будь-який різновид проекту та науково-дослідну роботу.

Зміст та обсяг технічного завдання визначають характер, складність і структуру прогнозованих робіт. Наприклад, на окремі частини роботи головний виконавець видає усім співвиконавцям, що беруть участь у проекті, окремі технічні завдання, обсяг яких значно менший.

Технічне завдання є документом, структуру і зміст якого регламентовано стандартом ДСТУ 3974-2000.

Технічне завдання на виконання ДКР має містити такі основні розділи:

- *назва ДКР, шифр і підстава для виконання ДКР;*
- *виконавці ДКР;*
- *виробник;*
- *мета виконання ДКР і призначення продукції;*
- *склад продукції;*
- *технічні вимоги;*
- *техніко-економічні вимоги;*
- *вимоги до сировини, матеріалів та ПКВ (покупних виробів);*
- *вимоги до консервації, пакування і маркування;*
- *спеціальні вимоги;*
- *вимоги до розроблюваної документації;*
- *стадії і етапи ДКР;*
- *порядок приймання ДКР і матеріали, які подають під час закінчення етапів і ДКР у цілому;*
- *вимоги щодо технічного захисту ІзОД (інформації з обмеженим доступом), за необхідності;*
- *додатки.*

Залежно від специфіки ДКР та призначення продукції *дозволено доповнювати* ТЗ іншими розділами або *вилучати* окремі розділи.

У розділі «технічні вимоги» має бути відзначено точність, цикл роботи, особливості приладу, пов'язані з вибраною методикою робіт тощо (у складному комплексі корисно дати окремо основні технічні характеристики окремих приладів); тут же може бути зазначено вимоги до оптичних характеристик, якщо їх доцільно віднести до приладу в цілому, а не до його окремих частин, наприклад, для приладів спостереження: збільшення поля зору, діаметр і відстань до вихідного отвору, межі діоптрійної установки окуляра тощо; для фотографічних приладів: фокусна відстань, відносний отвір, поле зору (розміри кадру), роздільна здатність тощо.

Технічна пропозиція

Технічна пропозиція – сукупність конструкторських документів, у яких має бути наведено уточнені технічні та техніко-економічні обґрунтування доцільності розроблення документації виробу *на підставі*:

– *аналізу* технічного завдання замовника і різних варіантів можливих конструкторських рішень;

– порівняльного *оцінювання* рішень з урахуванням конструктивних і експлуатаційних особливостей розроблюваного та існуючих виробів тощо.

Технічну пропозицію розробляють у разі, якщо це передбачено технічним завданням. Технічну пропозицію розробляють з метою виявлення *додаткових* або *уточнених вимог* до виробу (технічних характеристик, показників якості тощо), які не могли бути зазначені в технічному завданні, і це доцільно зробити на підґрунті попереднього конструкторського опрацювання та аналізу різних варіантів реалізації виробу.

Перелік робіт, виконуваних на стадії технічної пропозиції, встановлюють на основі технічного завдання і його визначає розробник залежно від характеру і призначення виробу. Зазвичай на етапі розроблення технічної пропозиції виконують такі *роботи*:

– *підбирають і вивчають матеріали* за темою завдання, зокрема патентні матеріали;

– *визначають головні ознаки приладу*, які треба поліпшити і порівнюють конструкцію з тими, що існують;

– *визначають принципову можливість* реалізувати задані параметри; здійснюють необхідні розрахунки, обґрунтування, а в складних випадках і експерименти;

– *виявляють можливості запозичення* ідей або готових конструктивних рішень з існуючих приладів, аналізують можливі варіанти реалізації приладу;

– *складають перелік* необхідних науково-дослідних робіт для визначення можливості виконання або поліпшення окремих характеристик і параметрів конструкції;

– здійснюють технічні і техніко-економічні обґрунтування доцільності проектування виробу із заданими параметрами;
– узгоджують і остаточно формулюють усі пункти ТЗ (зазвичай спільно з представниками замовника).

У технічну пропозицію заносять конструкторські документи, передбачені технічним завданням.

На розгляд, погодження та затвердження подають копії документів технічної пропозиції. За узгодженням із замовником можна подавати оригінали документів технічної пропозиції.

Ескізний проект

Ескізне проектування починають з розроблення основних схем приладу і необхідних розрахунків.

Різновиди і типи схем встановлені ГОСТ 2.701-84. Різновиди схем позначають літерами, типи схем – цифрами.

У приладобудуванні використовують схеми, основні види і типи яких описано нижче.

Різновиди схем позначають літерами: *електричні* – Е; *гідравлічні* – Г; *пневматичні* – П; *кінематичні* – К; *оптичні* – Л.

Типи схем позначають цифрами: *структурні* – 1; *функціональні* – 2; *принципові* (повні) – 3; *з'єднань* (монтажні) – 4; *підключення* – 5; *загальна* – 6, *розташування* – 7, *об'єднані* – 0.

Схеми, що є складовими конструкторської документації, позначають шифром, наприклад, схему електричну принципову позначають шифром ЕЗ.

У результаті виконання ескізного проекту розробляють таку документацію:

1. *Структурну, принципову, кінематичну, оптичну, електричну та інші схеми приладу* і його частин (залежно від особливостей конкретного приладу);

2. *Креслення загального вигляду приладу, його основних складових одиниць* (загальна компоновка без детального конструктивного опрацювання), габаритні креслення;

3. *Пояснювальну записку до ескізного проекту.* Пояснювальна записка до ескізного проекту містить такі розділи:

– вимоги ТЗ;

– *теоретичну частину* – теоретичне обґрунтування конструкції, підкріплене всіма необхідними розрахунками;

– *розрахунок* кінематичної, електричної та інших схем і дані оптичної схеми з графіками аберації; а також розрахунки на міцність, жорсткість тощо (відповідно до вимог ТЗ);

– *опис конструкції*;

– *ступінь реалізації* пунктів ТЗ;

– *зауваження і пропозиції* щодо коригування ТЗ.

Документацію ескізного проекту після його завершення розсилають замовнику і зацікавленим організаціям, після чого відбувається захист ескізного проекту. За результатами всебічних обговорень складають протокол захисту із зазначенням усіх зауважень до ескізного проекту і порядку їх усунення. Особливо відзначають зміни ТЗ. Протокол захисту *затверджують*, як правило, ті організації, які затвердили ТЗ.

Технічний проект

Технічний проект відрізняється від ескізного детальним і *остаточним* опрацюванням конструкції приладу. Креслення загального вигляду приладу і його частин, а також креслення складальних одиниць конструктивно відпрацьовують настільки, щоб можна було *надалі зробити робоче креслення кожної деталі*.

Креслення загального вигляду розробляють за результатами ескізного проекту і зауважень до нього, а також уточнених схем і розрахунків. Наприклад, в технічному проекті використовують остаточну, зроблену із застосуванням аберраційного розрахунку оптичну схему.

Одночасно з уточненням схем і розрахунків здійснюють уточнення баз механічних з'єднань із суміжними організаціями.

Розроблення робочих креслень деталей і креслень дрібних складальних одиниць здійснюють на підставі складальних креслень більших складальних одиниць.

У процесі створення робочого креслення деталі залежно від її конфігурації і складності обирають *масштаб креслення* з таким розрахунком, щоб можна було розмістити усі розміри і їх *легко сприймати*, а конфігурація деталі була *чіткою і зрозумілою*. На кресленні деталі необхідно навести стільки *розрізів і проєкцій*, скільки необхідно для *повного уявлення* про неї, проте слід уникати зайвих проєкцій і розрізів.

На кожному кресленні деталі вказують усі дані, необхідні для її виготовлення: *розміри і допуски на них, шорсткість поверхонь; дозволені відхилення форми і розташування поверхонь; матеріал; спосіб оброблення поверхонь; масу*.

Крім того, за необхідності, креслення *може* містити різні *пояснювальні написи*, наприклад, про термічне оброблення, спосіб виготовлення, розміри заготівки, додаткові вимоги до точності тощо.

На кресленнях складальних одиниць наводять технічні вимоги на складання, регулювання, контроль тощо.

Особливу увагу потрібно приділити під час розроблення креслень деталей на вибір баз і нанесення розмірів.

Будь-який прилад комплектують технічним паспортом.

Технічний паспорт приладу містить таку інформацію:

– основні *технічні дані*; постійні величини; принципів особливості конструкції (за необхідності) і основні *правила поводження з приладом*;

– результати досліджень даного екземпляра приладу (*точність*, якість оптичних систем, *похибки* окремих деталей і частин, *ціна ділень* вимірювальної шкали тощо);

- деякі характерні результати, отримані у процесі натурних досліджень;
- перелік *складу* комплекту;
- *свідоцтво* про приймання;
- *відмітки* про стан приладу, технічне обслуговування і ремонт;
- відомості про *консервацію* та *пакування*;
- інформацію про *гарантії* і відомості стосовно можливої *рекламації*.

У паспорт записують *номер* приладу (номер механізму), а в складних приладах – номери основних механізмів і частин (електродвигунів, об'єктивів тощо).

Формуляр містить ті ж розділи, що і технічний паспорт, а також розділ про *режими роботи*, *облік роботи* приладу під час експлуатації та деякі інші спеціальні розділи.

Виготовлення дослідного зразка

Дослідний зразок виготовляють відповідно до *робочих креслень* деталей, складальних креслень частин, креслень загального вигляду складальних одиниць і приладу в цілому, *за технічними умовами* на прилад та його частини.

Під час виготовлення деталей, складальних одиниць, налагоджування та регулювання приладу в дослідному цеху всі зауваження *реєструють* в спеціальній книзі зауважень. *Конструктор аналізує зауваження*, ретельно перевіряє необхідність змін у кресленнях і *робить ці зміни* за встановленим для креслень дослідного зразка порядком.

Зауваження, що виникають, слід обов'язково записувати у книгу зауважень, потім їх уважно аналізувати і усувати, оскільки зміна деталей в дослідному цеху без відображення цих змін у кресленнях призводить до виникнення непорозумінь і до появи браку у процесі подальшого виготовлення приладу (установчої партії, серії).

Випробування дослідних зразків

Випробування дослідних зразків за стадіями життєвого циклу продукції бувають довідні, попередні та приймальні згідно ДСТУ 3021-95 «Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення».

Попередні випробування здійснюють з метою попередньої перевірки відповідності дослідного зразка заданим технічним умовам. Попередніми випробуваннями є конструкторсько-завершальні та лабораторно-заводські випробування.

Приймальні випробування здійснюють з метою перевірити відповідність дослідного зразка заданим технічним умовам і вимогам та з'ясувати можливість розпочати серійне або масове виробництво таких приладів.

Як попередні, так і приймальні випробування можуть бути *лабораторними (стендовими)* і *польовими* (полігонними, льотними).

Польові випробування не проводять у випадках, якщо всі тактико-технічні характеристики дослідного зразка можна перевірити у процесі лабораторних випробувань.

Конструкторсько-завершальні випробування здійснюють за програмою, затвердженою головним конструктором, з метою виявлення реальних можливостей приладу і його відповідності заданим технічним вимогам. Технічну документацію і дослідні зразки за необхідності доопрацьовують за наслідками випробувань.

Лабораторно-заводські випробування здійснюють за програмою, узгодженою із замовником і затвердженою в установленому порядку. Результати випробувань оформлюють відповідними актами в зазначеному порядку і термінів усунення виявлених зауважень. Згідно актам, за необхідності, здійснюють доопрацювання дослідних зразків і технічної документації.

Державні випробування здійснює спеціальна Державна комісія, до складу якої входять провідні фахівці з відповідного напрямку приладобудування, представники замовника і головного конструктора, за програмою, затвердженою замовником або галузевим науково-дослідним інститутом.

На державні випробування надають повністю доопрацьовані за наслідками попередніх випробувань, ретельно перевірені і налагоджені прилади.

В акті державних випробувань, окрім зауважень і порядку їх усунення, роблять висновок про можливість запуску приладу в серійне або масове виробництво.

Акт державної комісії є підставою для затвердження зразка до впровадження для серійного виробництва.

2.4. Види виробів

Виробом називають будь-який предмет або набір предметів виробництва, що виготовляють на підприємстві.

Вироби, залежно від їх призначення, поділяють на вироби *основного виробництва* і на вироби *допоміжного виробництва*. До виробів основного виробництва слід відносити вироби, призначені для постачання (реалізації) *зовнішнім користувачам*. До виробів допоміжного виробництва слід відносити вироби, призначені тільки для *власних потреб* підприємства, що виготовляє їх. Вироби, призначені для постачання (реалізації) і одночасно використовувані для власних потреб підприємством, що їх виготовляє, слід відносити до виробів основного виробництва.

У сфері конструювання встановлено такі види виробів:

- деталі;
- складальні одиниці;
- комплекси;
- комплекти.

Вироби, залежно від наявності або відсутності в них складових частин, поділяють на:

- а) неспецифіковані (деталі) – що не мають складових частин;
- б) специфіковані (складальні одиниці, комплекси, комплекти) – що складаються з двох і більш складових частин.

Різновиди виробів та їх структуру наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1. Види виробів та їх структура

Поняття «складова частина» слід застосовувати тільки відносно конкретного виробу, до складу якого вона входить. Складовою частиною може бути будь-який виріб (деталь, складальна одиниця, комплекс і комплект).

Деталь – виріб, виготовлений з *однорідного* за найменуванням та маркуванням матеріалу, *без застосування складальних операцій*, наприклад: валик із суцільного металу, литий корпус; пластина з біметалічного листа; друкована плата; маховик з пластмаси (без арматури); відрізок проводу або дроту заданої довжини. Деталі є вироби з покриттям (захисним або декоративним), незалежно від вигляду, товщини і призначення покриття, або виготовлені із застосуванням місцевого зварювання, паяння, склеювання, зшивання тощо. Наприклад: хромований гвинт; трубка, спаяна або зварена з одного листа металу; коробка, склеєна з одного листа картону.

Складальна одиниця – виріб, складові частини якого *з'єднують між собою на підприємстві-виробнику складальними операціями* (згвинчуванням, клепою, зварюванням, паянням, пресуванням, розвальцьовуванням, склеюванням, зшиванням, укладанням тощо), наприклад: автомобіль, верстат, телефонний апарат, мікромодуль, редуктор, зварний корпус, маховик з пластмаси з металевою арматурою.

До складальних одиниць, за необхідності також може бути віднесено:

- а) вироби, для яких конструкцією передбачено *розбирання* їх на складові частини на підприємстві-виробнику, наприклад, для зручності пакування і транспортування;

б) *сукупність складальних одиниць і (або) деталей, що мають загальне функціональне призначення і спільно встановлюваних на підприємстві-виробнику в іншу складальну одиницю. Наприклад: електроустаткування верстата, автомобіля, літака; комплект складових частин врізного замку; сукупність складальних одиниць і (або) деталей, що мають загальне функціональне призначення, спільно укладених на підприємстві-виробнику в засоби укладань (футляр, коробку тощо), які передбачено використовувати разом з укладеними в них виробами, наприклад: готовальня, комплект кінцевих плоско-паралельних мір довжини.*

Комплекс – *два і більше специфікованих виробу, не з'єднаних на підприємстві-виробнику складальними операціями, але такі, що призначені для виконання взаємопов'язаних експлуатаційних функцій.*

Кожен з цих специфікованих виробів, що є складовими комплексу, призначено для виконання *однієї або декількох основних функцій*, встановлених для всього комплексу, наприклад: цех-автомат; завод-автомат, автоматична телефонна станція, бурильна установка; виріб, що складається з метеорологічної ракети, пускової установки і засобів управління; корабель.

Частинами комплексу, окрім виробів, що виконують основні функції, можуть бути деталі, складальні одиниці і комплекти, призначені для виконання допоміжних функцій, наприклад: деталі і складальні одиниці, призначені для монтажу комплексу на місці його експлуатації; комплекс запасних частин, засобів укладань, тара тощо.

Комплект – *два і більше виробів, не сполучених на підприємстві-виробнику складальними операціями і виробу, що є набором, мають загальне експлуатаційне призначення допоміжного характеру, наприклад: комплект запасних частин, комплект інструменту і приладдя, комплект вимірювальної апаратури, комплект пакувальної тари тощо.*

До комплектів також відносять *складальну одиницю або деталь, що поставляють разом з набором інших складальних одиниць і (або) деталей, призначених для виконання допоміжних функцій у процесі експлуатації цієї складальної одиниці або деталі, наприклад: осцилограф в комплекті з ящиком укладання, запасними частинами, монтажним інструментом, змінними частинами.*

До *покупних* віднесено виробу, що не виготовляють на даному підприємстві, а отримують у готовому вигляді, окрім отриманих у порядку кооперації.

До виробів, що отримують у *порядку кооперації*, відносять складові частини виробу, які виготовляють на іншому підприємстві за конструкторською документацією, що входить в комплект документів виробу, що виготовляють на даному підприємстві.

Основне призначення стандартів ЄСКД полягає у встановленні в організаціях і на підприємствах єдиних правил виконання, оформлення і використання конструкторської документації. Загальні правила забезпечують:

– можливість *взаємного обміну* конструкторськими документами між організаціями і підприємствами без їх переоформлення;

- *стабілізацію комплектності*, що унеможливило дублювання і розроблення непотрібних виробництву документів;
- можливість *розширення уніфікації* під час конструкторського проектування промислових виробів;
- *спрощення форм* конструкторських документів і графічних зображень.

2.5. Види і комплектність конструкторських документів

Види конструкторських документів

Конструкторські документи поділяють на види, які наведено в табл.2.1.

Таблиця 2.1. Види конструкторських документів

Вид документа	Визначення
1	2
Креслення деталі	Документ, що містить зображення деталі та інші дані, необхідні для її виготовлення і контролю.
Складальне креслення	Документ, що містить зображення складальної одиниці й інші дані, необхідні для її складання (виготовлення) і контролю. До складальних креслень також відносять креслення, за якими виконують гідромонтаж і пневмомонтаж.
Креслення загального вигляду	Документ, що визначає конструкцію виробу, взаємодію його основних складових частин і пояснює принцип роботи виробу.
Теоретичне креслення	Документ, що визначає геометричну форму (обриси) виробу і координати розташування складових частин.
Габаритне креслення	Документ, що містить контурне (спрощене) зображення виробу з габаритними, установлювальними і приєднувальними розмірами.
Електромонтажне креслення	Документ, що містить дані, необхідні для здійснення електричного монтажу виробу.
Монтажне креслення	Документ, що містить контурне (спрощене) зображення виробу, а також дані, необхідні для його установлення (монтажу) на місці застосування. До монтажних креслень також віднесено креслення фундаментів, що спеціально розробляють для установлення виробу.
Пакувальне креслення	Документ, що містить дані, необхідні для пакування виробу.
Схема	Документ, на якому наведено у вигляді умовних зображень або позначень складові частини виробу і зв'язки між ними.
Специфікація	Документ, що визначає склад складальної одиниці, комплексу або комплекту.
Відомість специфікацій	Документ, що містить перелік усіх специфікацій складових частин виробу із зазначенням їх кількості.
Відомість документів, на які є посилання	Документ, що містить перелік документів, на які є посилання в конструкторських документах виробу.

Вид документа	Визначення
1	2
Відомість придбаних виробів	Документ, що містить перелік придбаних виробів, застосованих у розробленому виробі.
Відомість узгодження застосування придбаних виробів	Документ, що містить перелік придбаних виробів, застосування яких узгоджено.
Відомість місць зберігання оригіналів	Документ, що містить перелік підприємств (організацій), на яких зберігають оригінали документів, розроблених і (або) застосованих для даного виробу.
Відомість технічної пропозиції	Документ, що містить перелік документів, які є складовими технічної пропозиції.
Відомість ескізного проекту	Документ, що містить перелік документів, які є складовими ескізного проекту.
Відомість технічного проекту	Документ, що містить перелік документів, які є складовими технічного проекту.
Пояснювальна записка	Документ, що містить опис пристрою і принципу дії розробленого виробу, а також обґрунтування прийнятих технічних та техніко-економічних рішень.
Технічні умови	Документ, що містить вимоги (сукупність всіх показників, норм, правил і положень) до виробу, його виготовлення, контролю, приймання і постачання, які недоцільно вказувати в інших конструкторських документах.
Програма і методика випробувань	Документ, що містить технічні дані, які треба перевіряти під час випробування виробу, а також порядок і методи їх контролю.
Таблиця	Документ, що містить залежно від його призначення відповідні дані, зведені в таблицю.
Розрахунок	Документ, що містить розрахунки параметрів і величини, наприклад, розрахунок розмірних ланцюгів, розрахунок на міцність тощо.
Експлуатаційні документи	Документи, призначені для використання під час експлуатації, обслуговування та ремонту виробу в процесі експлуатації.
Ремонтні документи	Документи, що містять дані для ремонтних робіт на спеціалізованих підприємствах.
Патентний формуляр	Документ, що містить інформацію про патентну чистоту об'єкту, а також про створені і використані під час його розроблення вітчизняні винаходи.
Карта технічного рівня і якості виробу	Документ, який містить дані, що визначають технічний рівень якості виробу і відповідність його технічних і економічних показників досягненням науки і техніки, а також потребам споживчого ринку.
Інструкція	Документ, що містить вказівки і правила, для виготовлення виробу (складання, регулювання, контроль, приймання тощо).

Документи залежно від стадії проектування розподіляють на *проектні* (технічна пропозиція, ескізний проект і технічний проект) і *робочі* (робоча документація).

Найменування конструкторських документів залежно від способу їх виконання і характеру використання наведено в табл. 2.2.

Документи, призначені для разового використання у виробництві (документи макету, стендів для лабораторних випробувань тощо), можна виготовляти у вигляді ескізних конструкторських документів.

Таблиця 2.2. Види документів за характером використання

Вид документа	Визначення
Первинні оригінали	Документи, зроблені на будь-якому матеріалі і призначені для виготовлення з них оригіналів.
Оригінали	Документи, зі справжніми підписами відповідних осіб і виготовлені на будь-якому матеріалі, що дозволяє багаторазове відтворення з них копій. Допускають як оригінал використовувати первинний оригінал, фотокопію або екземпляр зразка, виготовленого друкованим способом, зі справжніми підписами відповідних осіб, відповідальних за виготовлення документа.
Дублікати	Копії оригіналів, що забезпечують ідентичність відтворення оригіналу, виготовлені на будь-якому матеріалі, що дозволяє зняття з них копій.
Копії	Документи, виготовлені способом, що забезпечує їх ідентичність з оригіналом (дублікатом) і призначені для безпосереднього використання під час розроблення, у виробництві, експлуатації і ремонті виробів. Копіями є також мікрофільми-копії, отримані з мікрофільму-дубліката.

Комплектність конструкторських документів

Розрізняють основний конструкторський документ (КД), основний комплект КД, повний комплект КД.

Основний КД виробу окремо або в сукупності з іншими КД, записаними в ньому (конструкторські документи, що стосуються даного виробу), повністю і однозначно визначають даний виріб і його склад.

Основними конструкторськими документами вважають: для деталей – креслення деталі; для складальної одиниці, комплексів і комплектів – специфікацію.

Виріб, застосований відповідно до КД, зробленої відповідно до ЕСКД, записують в документи інших виробів, в яких його застосовано, записом позначення його основного КД. Вважають, що такий виріб застосовано за своїм основним КД.

Основний комплект КД виробу об'єднує КД, що стосується усього виробу, наприклад, *складальне креслення, принципова електрична схема, технічні умови, експлуатаційні документи*. КД складових частин не є складовою частиною основного комплекту документації виробу.

Повний комплект КД виробу складено з таких документів: *основного комплекту КД на даний виріб, основних комплектів КД на всі його складові частини*.

До складу КД виробу може бути уведено, також, *групові* КД, якщо ці документи поширюються і на даний виріб, наприклад, групові технічні умови. До основного комплекту конструкторських документів виробу може бути внесено групові конструкторські документи, якщо ці документи мають безпосереднє відношення до даного виробу, наприклад, групові технічні умови.

Комплект конструкторської документації, що супроводжує проект технічного комплексу наведено на рис. 2.2.

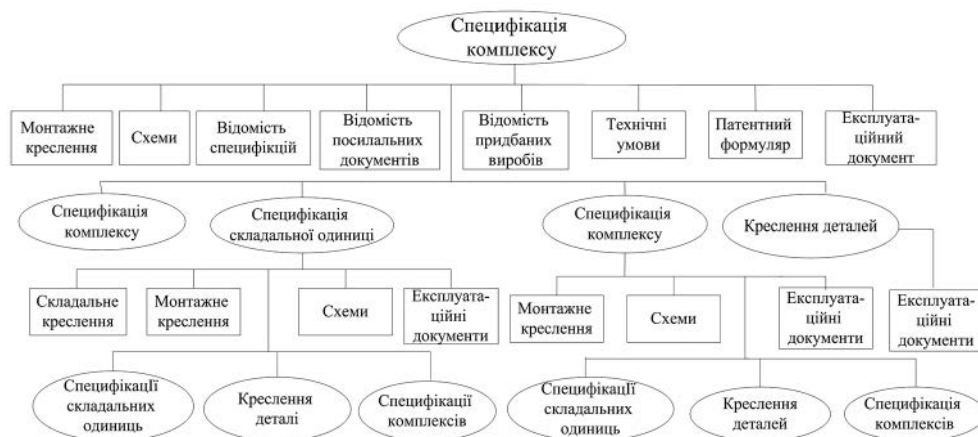


Рисунок 2.2. Схема комплекту конструкторських документів комплексу

На рис. 2.2. в овалі наведено основні конструкторські документи виробу, а документи основного комплекту наведено в прямокутниках (на схемі наведено тільки частину документів основного комплекту, передбачених в табл. 2.1).

Комплектність експлуатаційних документів

Номенклатуру експлуатаційних документів визначено стандартом ДСТУ-ГОСТ 2.601-2006 ЕСКД. До переліку документів цієї групи віднесено:

- *Технічний опис* (ТО);
- *Інструкцію з експлуатації* (ІЕ);
- *Інструкції з технічного обслуговування* (ІО);
- *Інструкцію з монтажу*, пуску, регулюванню і обкатки виробу на місці його застосування (ІМ);
- *Формуляр* (ФО);
- *Паспорт* (ПС);
- *Етикетку* (ЕТ);
- *Відомості ЗІП* (запасних інструментів та пристроїв – ЗІП);
- *Навчально-технічні плакати*;
- *Відомість експлуатаційних документів* (ЕД).

Експлуатаційні документи складають на виробі, монтаж (установлення), використання, технічне обслуговування яких, а також транспортування і зберігання або застосування в інших виробках може бути забезпечено тільки за наявності відомостей щодо складу, конструкції, технічних параметрів, дії цих виробів і спеціальних вказівок щодо експлуатації.

Експлуатаційні документи потрібно складати і на групи виробів, розташованих на одному об'єкті (у одному або кількох приміщеннях) і призначених для виконання будь-яких функцій, визначених для об'єкту.

На виробі, для яких обсяг відомостей та вказівок незначний і їх доцільно розмістити (маркувати) на самому виробі, експлуатаційні документи не складають.

Експлуатаційні документи розробляють, як правило, на виріб в цілому, незалежно від наявності експлуатаційних документів на його складові частини.

Експлуатаційні документи на складові частини виробу пропонують розробляти тільки в технічно обґрунтованих випадках. У такому разі в експлуатаційних документах на виріб не повторюють зміст документів на його складові частини, а дають на них посилання.

Подібні відступи необхідно узгоджувати із замовником документації або із замовником виробу і документації на нього.

В окремих випадках для дослідних зразків і для виробів індивідуального виробництва можна використовувати конструкторські документи, передбачені ГОСТ 2.102–68, як експлуатаційні документи. Перелік таких документів необхідно узгоджувати із замовником.

Комплект експлуатаційних документів

Комплект експлуатаційних документів узгоджують із замовником.

Для зручності користування відомості, необхідні для експлуатації виробу, може бути оформлено як один документ з назвою «Керівництво з експлуатації» (шифр КЕ).

Деякі експлуатаційні документи може бути об'єднано, а саме:

а) інструкцію з експлуатації з технічним описом. Такий документ випускають з назвою «Технічний опис і інструкція з експлуатації» (шифр – ТО);

б) інструкцію з експлуатації і технічний опис з паспортом. Такий документ випускають з назвою «Паспорт» (шифр – ПС);

в) інструкцію з експлуатації і технічного обслуговування з інструкцією з монтажу, пуску, регулювання і обкатки виробу на місці його застосування. Такий документ має назву «Інструкція з експлуатації» (шифр – ІЕ).

У об'єднаних документах необхідно наводити дані, що має бути наведено в кожному із об'єднаних документів окремо.

Крім наведених рекомендацій щодо об'єднання експлуатаційних документів у стандарті передбачено додаткові можливості:

а) на вимогу замовника або за узгодженням з ним інші варіанти об'єднання експлуатаційних документів;

б) об'єднання експлуатаційних документів за умови, що воно не призведе до обмеження користування об'єднаними документами.

2.6. Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні види проектних робіт.
2. Назвіть основні етапи науково-дослідних робіт.
3. Поясніть особливості етапів виконання ДКР.
4. Поясніть, що таке конструкторський документ.
5. Назвіть розділи Технічного завдання на ДКР та охарактеризуйте їх.
6. Поясніть призначення та зміст Технічної пропозиції.
7. Як позначають види і типи схем?
8. Охарактеризуйте вимоги до структури та змісту Пояснювальної записки.
9. Яка відмінність між ескізним та технічним проектом?
10. Які відомості наводять у технічному паспорті приладу?
11. Які види випробувань здійснюють над дослідними зразками і чим вони відрізняються?
12. Назвіть види технічних виробів та охарактеризуйте їх.
13. Яку інформацію подають у відомості технічного проекту?
14. Яку інформацію подають у патентному формулярі?
15. Які документи складають основний комплект конструкторських документів?
16. Які документи складають повний комплект конструкторських документів?

Розділ 3. Експлуатаційні параметри

3.1. Умови експлуатації апаратури реєстрації інформації

Апаратуру реєстрації інформації застосовують у *телебаченні, приладах керування кораблями та літаками за умов поганої видимості земних і астрономічних орієнтирів, апаратах управління супутниками і космічними кораблями, пристроях дослідження фізіологічних властивостей організму людини, для автоматичного управління виробничими процесами* в різних галузях промисловості. Ця апаратура знаходить широке застосування у різних сферах діяльності сучасного суспільства.

У зв'язку з цим умови експлуатації різних типів виробів можуть значно відрізнятися. Комплекс *експлуатаційних умов* може залежати від кліматичних особливостей місцевості, де застосовано апаратуру, а також – *від роду об'єкту* (корабля, літака, супутника тощо), на якому її встановлено.

Усе вище зазначене відносять до *умов експлуатації*, які визначають особливі *вимоги до конструкції* та параметрів пристроїв. Але є іще низка важливих вимог, які слід врахувати під час розроблення та виготовлення АРІ, і обумовлена особливостями кожного конкретного різновиду пристроїв реєстрації. Ці вимоги відносять до *експлуатаційних характеристик*. Наприклад, рівень акустичного шуму для кінознімальних камер, маса і розміри для зручності розміщення на плечі телеоператора для репортажних відеокамер тощо.

Апаратуру *реєстрації інформації* застосовують *за різних умов*. Комплекс експлуатаційних умов визначає кліматичний стан місцевості, де працює АРІ, механічний вплив об'єкта, де встановлено апаратуру (корабель, літак, автомашина тощо).

До кліматичного впливу відносять температуру навколишнього повітря, тиск повітря або газу, відносну вологість. *Нормальними кліматичними* вважають умови, якщо температура навколишнього повітря дорівнює $20 \pm 5^\circ\text{C}$, *відносна вологість* 50...80% і *атмосферний тиск* 0,09...0,1 МПа (720...780 мм рт. ст.) У випадку експлуатації АРІ в арктичних і антарктичних регіонах температура повітря знижується до $-70...0^\circ\text{C}$, а під час експлуатації на висоті 10 км над рівнем моря температура навколишнього середовища знижується до -56°C . Значне зниження температури призводить до зменшення зазорів в рухомих ланках (провідних валах і їх опорах, притискних і обвідних роликах МТС), спричиняє загушення мастильних речовин, збільшення кінематичних моментів обумовлених силами тертя в опорах і збільшення споживання електроенергії двигунами.

Властивість АРІ *зберігати параметри* у заздалегідь обумовлених межах у разі *зниження* температури називають *холодостійкістю*.

В екваторіальних регіонах температура повітря в тіні підвищується до $+55^\circ\text{C}$. Підвищення температури навколишнього середовища спричиняє в МТС *зміни зазорів і натяг шківів*, призводить до *появи* додаткових радіальних і

осьових *люфтів*, а, отже, сприяє і підвищенню *биття* приводних *валів*, сприяє *витіканню* і *випаровуванню мастила* з рухомих вузлів.

Властивість АРІ *зберігати параметри* в задалегідь встановлених межах у разі значного *збільшення* температури називають *теплостійкістю*.

Функціонування пристроїв на значній висоті над рівнем моря відбувається за умов зменшення атмосферного тиску. Наприклад, на висоті 5 км величина атмосферного тиску становить близько 0,05 МПа (350 мм рт.ст.), на 10 км – близько 0,022 МПа (160 мм рт. ст.), 15 км – близько 0,008 МПа (60 мм рт. ст.).

Внаслідок *зниження атмосферного тиску* в МТС може припинитись транспортування магнітної стрічки вакуумним приводним валом, робота вакуумних проміжних накопичувачів стрічки. На практиці це явище усувають, встановлюючи МТС в герметичний контейнер з нормальним атмосферним тиском або замінюючи вакуумні вали на звичайні з притискними роликками, а проміжні накопичувачі стрічки роблять так само, як роликові для важеля лабіринтів. Крім того, через зменшення тиску погіршується відведення тепла від електродвигунів, електромагнітів, блоків електроніки, унаслідок чого загальна температура МТС підвищується.

У разі *підвищення тиску повітря* або іншого газу виходять з ладу вакуумні привідні вали і проміжні накопичувачі в МТС.

Зменшення тиску навколишнього повітря супроводжується зменшенням його електричної міцності, що може призводити до пробоя повітряних проміжків. Крім того, у разі низького тиску погіршується відведення тепла від тіл, що нагріваються у процесі функціонування, внаслідок чого їх температура підвищується.

Обшивка лобової частини крила літака, що летить з надзвуковою швидкістю, може нагріватись через тертя із зустрічним потоком повітря до температури +150...+200°C. Розташована за обшивкою апаратура експлуатується за температури порядку +100°C і вище.

Підвищення температури може вплинути на функціонування АРІ, через збільшення опорів провідникових матеріалів і погіршення параметрів ізоляційних матеріалів (особливо органічного походження). Погіршення опору ізоляції і збільшення втрат, що мають місце в цьому випадку, призводять до появи витоків струму в електронних схемах, зменшення добротності контурів та інших негативних явищ. Одночасно відбувається зменшення електричної міцності діелектриків, що може призводити до пробоя в електричних схемах і повної відмови апаратури. Особливо сильно впливає підвищення температури на параметри германієвих напівпровідникових діодів в АРІ. У разі довготривалого функціонування за умов підвищеної температури можуть з'являтися *незворотні зміни параметрів ізоляційних матеріалів*. За наявності в конструкції матеріалів з різними коефіцієнтами лінійного розширення відбуватиметься зміна зазорів та натягу, що також може зумовити зміну параметрів радіоапаратури.

3.2. Маркування кліматичного виготовлення та категорії розміщення електрообладнання

На всі види електрообладнання встановлено вимоги, що визначають кліматичне виготовлення і категорію розміщення, а також умови транспортування, зберігання й експлуатації у частині впливу кліматичних чинників. Маркування кліматичного виготовлення і категорії розміщення електрообладнання регламентовано стандартом ДСТУ-15150-69 (2006).

Порядок маркування кліматичного виготовлення і категорії місць розміщення подано в табл. 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1. Кліматичне маркування електрообладнання

Кліматичні умови експлуатації обладнання	Позначення		
	Літери		Цифри
	Кирилиця	Латиниця	
<i>Електрообладнання, призначене для експлуатації на суходолі, річках, озерах:</i>			
для макрокліматичного району з помірним кліматом	У	N	0
для макрокліматичних районів з помірним і холодним кліматом	УХЛ	NF	1
для макрокліматичного району з вологим тропічним кліматом	ТВ	ТН	2
для макрокліматичного району із сухим тропічним кліматом	ТС	ТА	3
для макрокліматичних районів як із сухим, так і з вологим тропічним кліматом	Т	Т	4
для всіх макрокліматичних районів на суходолі, крім макрокліматичного району з дуже холодним кліматом (загальнокліматичне виготовлення)	О	U	5
<i>Електрообладнання, призначене для експлуатації в макрокліматичних районах з морським кліматом:</i>			
для макрокліматичного району з помірно-холодним морським кліматом	М	М	6
для макрокліматичного району із тропічним морським кліматом, у тому числі для суден каботажного плавання або інших, призначених для плавання тільки в цьому районі	ТМ	МТ	7
для макрокліматичних районів як з помірно-холодним, так і тропічним морським кліматом, у тому числі для суден необмеженого району плавання	ОМ	MU	8
Вироби, призначені для експлуатації в усіх макрокліматичних районах на суходолі й на морі, крім макрокліматичного району з дуже холодним кліматом (загальнокліматичне виготовлення)	В	W	9

Таблиця 3.2. Категорії місць розміщення електрообладнання

Основна категорія		Додаткова категорія	
Характеристика	Позн.	Характеристика	Позн.
Для експлуатації на відкритому повітрі (вплив сукупності кліматичних факторів, характерних для даного макрокліматичного району)	1	Для зберігання у процесі експлуатації у приміщеннях категорії 4 і роботи як за умов категорії 4, так і (короткочасно) за інших умов, у тому числі на відкритому повітрі	1.1
Для експлуатації під навісом або у приміщеннях (об'ємах), де коливання температури й вологості повітря несуттєво відрізняються від коливань на відкритому повітрі і є порівняно вільний доступ зовнішнього повітря, наприклад, у наметах, кузовах, причепах, металевих приміщеннях без теплоізоляції, а також в оболонці комплектного виробу категорії 1 (відсутність безпосереднього впливу сонячного випромінювання й атмосферних опадів)	2	Для експлуатації як вбудованого елементу всередині комплексних виробів категорій 1; 1.1; 2, у конструкції яких враховано можливість конденсації вологи на вбудованих елементах (наприклад, усередині радіоелектронної апаратури)	2.1
Для експлуатації в закритих приміщеннях (об'ємах) з природною вентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов, де коливання температури й вологості повітря та вплив піску й пилу істотно менші, ніж на відкритому повітрі, наприклад, у металевих з теплоізоляцією, кам'яних, бетонних, дерев'яних приміщеннях (відсутність впливу атмосферних опадів, безпосереднього сонячного випромінювання; істотне зменшення вітру; істотне зменшення або відсутність впливу сонячного випромінювання й конденсації вологи)	3	Для експлуатації в нерегулярно опалюваних приміщеннях (об'ємах)	3.1
Для експлуатації у приміщеннях (об'ємах) зі штучно регульованими кліматичними умовами, наприклад, у закритих виробничих та інших приміщеннях (об'ємах) без опалення або охолодження і вентиляції, у тому числі підземних приміщеннях, що добре вентилуються (відсутність впливу прямого сонячного випромінювання, атмосферних опадів, вітру, піску й пилу зовнішнього повітря; відсутність або істотне зменшення впливу сонячного випромінювання й конденсації вологи)	4	Для експлуатації в приміщеннях з кондиціонованим або частково кондиціонованим повітрям	4.1
		Для експлуатації у лабораторних, капітальних житлових й інших подібного типу приміщеннях	4.2

Основна категорія		Додаткова категорія	
Характеристика	Позн.	Характеристика	Позн.
Для експлуатації у приміщеннях (об'ємах) з підвищеною вологістю (наприклад, у підземних приміщеннях без опалення й вентиляції, у тому числі шахтах, підвалах, у ґрунті, у корабельних й інших приміщеннях, у яких можлива тривала наявність води або часта конденсація вологи на стінах і стелі, зокрема у трюмах, цехах текстильних, гідрометалургійних виробництв тощо)	5	Для експлуатації як вбудованих елементів усередині комплектних виробів категорій 5, конструкція яких унеможливає конденсацію вологи на вбудованих елементах (наприклад, всередині радіоелектронної апаратури)	5.1

За невідповідності кліматичного виготовлення та категорії розміщення апаратури реєстрації інформації фактичним умовам експлуатації термін її працездатності значно скорочується, а надійність функціонування не може бути гарантовано, електричне обладнання може спричинити пожежу.

3.3. Забезпечення тепло- і холодостійкості апаратури

Теплостійкість характеризує властивість апаратури зберігати здатність функціонувати у штатному режимі за умов підвищеної температури навколишнього середовища. Для забезпечення теплостійкості необхідно в першу чергу використовувати *теплостійкі матеріали* з високою теплопровідністю. Жорсткі механічні зв'язки необхідно здійснювати однорідними матеріалами для забезпечення мінімальної різниці щодо їх температурних коефіцієнтів розширення (табл. 3.3).

Таблиця 3.3. Температурний коефіцієнт лінійного розширення деяких матеріалів

Матеріал	$\alpha \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Матеріал	$\alpha \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
Інвар	0,9-1,2	Кварц	0,5
Вольфрам	3,2-3,4	Ситал	5
Хром	5,9	Кераміка	6-12
Титан	7,5-8,5	Гетинакс	20
Чавун	8,7-11,1	Текстоліт	33-40
Сталь	10,6-12	Компаунди	32-60
Залізо	11,9	Лавсан	50
Нікель	13,3	Склотекстоліт	3-11
Константан	15,2	Фторопласт	50-110
Мідь	16,6-17,1	Скло	60-120
Латунь	17,8-18,2	Полістирол	70
Срібло	19,6	Вініплекс	70
Алюміній	23,8	Скло органічне	80-140
Олово	23,8	Капрон	100
Магній	26,2	Поліетилен	100-180
Свинець	39,5	Поліуретан	130

У разі потреби забезпечити високу точність взаємного розташування елементів конструкції здійснюють *термокомпенсацію* уведенням в замкнену механічну систему ланок із оберненим знаком температурного коефіцієнта для компенсації зміни розміру основного елемента.

Холодостійкість характеризує властивість апаратури зберігати здатність функціонувати у штатному режимі за умов зниженої температури навколишнього середовища.

Якісні показники тепло- або холодостійкості визначають після випробувань апаратури в навколишньому середовищі з максимальною і мінімальною температурами по черзі.

Для забезпечення холодостійкості застосовують *морозостійкі* матеріали (наприклад, звичайна гума, як відомо, зберігає свої властивості тільки в діапазоні температур від 233К до 328К. У разі потреби забезпечити морозостійкість апаратури вибирають спеціальну гуму, кремнійорганічного типу, таку, що не втрачає еластичності за температур до 173К.

Крім того, апаратуру обладнують засобами *повітряного підігріву*, що запобігає замерзанню елементів апаратури і попереджує обмерзання. За умов холодного клімату апаратуру необхідно розміщувати в укриттях, добре захищених від безпосередньої дії снігу, дощу та вітру.

У разі застосування в апаратурі радіоелектронних компонентів, для нормальної роботи яких необхідно забезпечити постійну температуру навколишнього середовища (кварцові стабілізатори, контури задавальної частоти тощо), застосовують *термостабілізацію* таких елементів. В окремих випадках застосовують термостат – пристрій, що має певний внутрішній об'єм з автоматично підтримуваною заданою температурою. Цей спосіб забезпечує високу стабільність параметрів схеми. Регулювання температури усередині термостата здійснюють термоелементами, які управляють схемою підігріву внутрішнього об'єму.

3.4. Захист від температурних впливів

Мікросхеми та електро-радіоелементи функціонують в обмежених температурних діапазонах. Відхилення температури від зазначених діапазонів може призвести до *незворотних структурних змін компонентів*. Підвищена температура знижує діелектричні властивості матеріалів, прискорює корозію конструкційних і провідникових матеріалів. Із зниженням температури гумові деталі тверднуть і розтріскуються, а для більшості пластмас підвищується їх крихкість. Відмінності коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів можуть призвести до руйнування залитих компаундами конструкцій і, як наслідок, порушення електричних з'єднань, зміни характеру посадок – ослабленню кріплень тощо.

Нормальним температурним режимом є режим, за якого зміни функціональних параметрів і характеристик конструкції, компонентів, матеріа-

лів – у межах, зазначених у технічних умовах на них. Високу надійність і тривалий термін служби виробу можна гарантувати, якщо температура середовища усередині ЕА є нормальною і дорівнює 20...25°C. У той же час слід пам'ятати, що зміна температури відносно нормальної всередині ЕА на кожні 10°C в будь-яку сторону *зменшує термін служби* апаратури приблизно *вдвічі*. Забезпечення нормального теплового режиму потребує ускладнення конструкції, збільшення габаритів і маси, введення додаткового обладнання, призводить до витрат електричної енергії. Для багатьох видів електронного обладнання і апаратури реєстрації зокрема завдання забезпечити працездатність за умови низьких температур вирішують нагріванням приміщення упродовж деякого часу з одночасним вмиканням апаратури для підігріву. Після досягнення всередині пристрою нормальної температури його переводять в робочий режим. У процесі експлуатації температура всередині виробу буде підвищуватися і може виникнути необхідність у його охолодженні. Нагрівання зручніше робити електричними нагрівальними елементами, які встановлюють для стаціонарної апаратури в приміщенні, а для транспортованої – вбудованої в конструкцію. Довгий час температуру контролювали або термометрами, що розміщують в ЕА у зручних для спостереження місцях, або термореле, які автоматично вимикають нагрівачі після прогрівання апаратури. У сучасному електронному обладнанні використовують вбудовані в мікропроцесори і мікроконтролери датчики температури або спеціальні окремі мініатюрні датчики температури для вимірювання та автоматичного регулювання температури. У разі значного перепаду температури зовнішнього середовища і робочого обладнання під час інтенсивного нагрівання холодного повітря всередині приладу водяна пара конденсується на ще холодних поверхнях конструкції. Подальший нагрів призведе до нагрівання конструкції і випаровуванню вологи. Конденсація не буде відбуватись, якщо нагрівання здійснювати повільно.

Найчастіше конструктору доводиться вирішувати завдання *видалення надлишку теплоти*, що виникає в результаті функціонування електромеханічних та електронних складових апаратури. Передавання теплоти від нагрітої апаратури в навколишнє середовище здійснюється *кондукцією, конвекцією і випромінюванням*.

Системи охолодження класифікують за способом відведення тепла і застосовують залежно від величини питомого теплового потоку Q :

- *природно-повітряні*, якщо $Q \leq 0,2 \text{ Вт/см}^2$;
- *примусово-повітряні*, якщо $Q \leq 1 \text{ Вт/см}^2$;
- *рідинні*, якщо $Q \leq 20 \text{ Вт/см}^2$.

Крім зазначених способів відведення тепла конструктор має приділяти значну увагу відведенню тепла *теплопровідністю*, тобто *кондуктивному тепловідведенню*.

Попередній вибір системи охолодження здійснюють за графіками, наведеними на рис. 3.1.

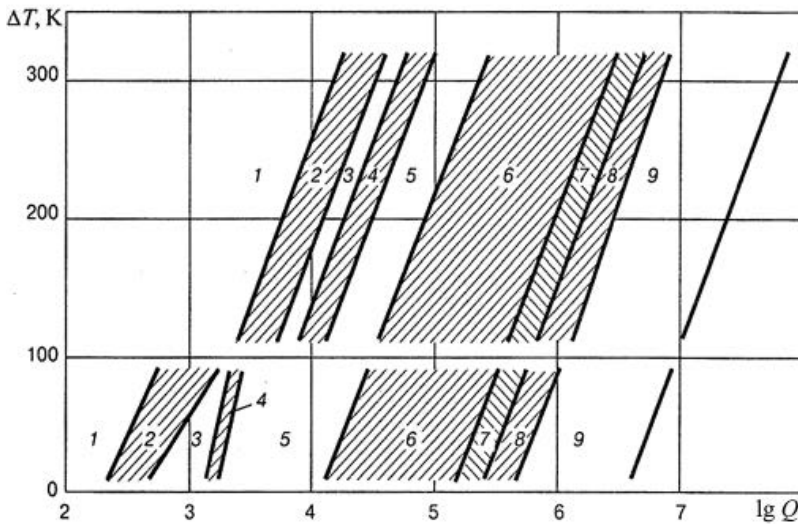


Рисунок 3.1. Графіки для визначення способу відведення надлишкового тепла

Нижні графіки застосовують для вибору способу охолодження блоків, шаф, стійок, верхні – для окремих теплонавантажених елементів (силових напівпровідникових приладів, мікросхем, дроселів, трансформаторів тощо). У площині графіку виділено два типи областей: для перших можна однозначно вказати спосіб охолодження, для других можливі два або навіть три альтернативних способи. До першого типу належать області: 1 – природне повітряне, 3 – примусове повітряне, 5 – примусове рідинне, 9 – примусове охолодження випаровуванням. Області другого типу заштриховано. У межах цих областей можливі такі способи охолодження: 2 – природне і примусове повітряне, 4 – примусове повітряне та рідинне, 6 – примусове рідинне і природне випаровуванням, 7 – примусове рідинне, примусове і природне випаровуванням, 8 – природне і примусове випаровуванням. Для заштрихованих областей уточнення способу охолодження здійснюють за додатковими графіками.

Види охолодження в порядку *підвищення ефективності* може бути розташовано у такий спосіб: *повітряне, рідинне, випарно-конденсаційне. Примусове охолодження ефективніше природного*, але, як правило, складніше у конструктивній реалізації. Крім того, системи примусового охолодження створюють у процесі роботи шум від вентиляторів, насосів, руху потоків рідини чи газу.

3.4.1. Тепловідведення кондукцією

Із збільшенням щільності компонування функціональних елементів у корпусі апаратури реєстрації інформації велика частка теплоти видаляється кондукцією. Для поліпшення умов відведення теплоти від елементів та вузлів, що виділяють тепло в конструкції, застосовують теплові з'єднувачі, спеціальні шини для тепловідведення, друковані плати на металевій основі тощо.

Тепловий потік – це кількість теплоти, що проходить через ізотермічну поверхню за одиницю часу. Розмірність теплового потоку збігається з розмірністю потужності. Одиниці вимірювання теплового потоку ват (1Вт) або ккал/год (1 ккал/год = 1,163 Вт або 1 Вт = 0,86 ккал/год). Тепловий потік, що проходить через одиничну ізотермічну поверхню, називають густиною теплового потоку, або питомим тепловим потоком, або *тепловим навантаженням* і позначають зазвичай q , вимірюють одиницями Вт/м² або ккал/ (м²·год).

Розрахунок кількості теплоти Q_K (кал/с), що передається в статичному режимі конструкцією, здійснюють за формулою

$$Q_K = \frac{\alpha_m \cdot S \cdot \Delta T}{l}, \quad (3.1)$$

де α_m – коефіцієнт теплопровідності, кал/(с·м·°C); S – площа, через яку проходить тепловий потік, м²; l – довжина шляху проходження теплового потоку, м; ΔT – різниця температур (перегрів) між охолоджуваним елементом конструкції та навколишнім середовищем, °C.

Використовують також іншу форму запису рівняння для визначення кількості кондуктивно відведеного тепла:

$$Q_K = G \cdot \Delta T, \quad (3.2)$$

де $G = \frac{\alpha_m \cdot S}{l}$ – теплопровідність каналу відведення тепла, ккал/ с·м·°C.

Величину обернену до теплопровідності називають *тепловим опором*,

$$R = \frac{1}{G} = \frac{l}{\alpha_m \cdot S}. \quad (3.3)$$

Коефіцієнти теплопровідності деяких конструкційних матеріалів наведено в табл. 3.4. Реальні конструкції деталей мають досить складну форму і це ускладнює визначення їх теплових опорів. Для здійснення теплових розрахунків використовують модель, що ґрунтується на аналогії поширення теплового потоку і струму в електричних колах (*тепло-електрична модель*).

Для того, щоб отримати *теплову модель* досліджуваного пристрою або функціонального вузла, необхідно виконати таку послідовність дій:

- на зроблену в масштабі досліджувану поверхню нанести ортогональну координатну сітку;
- на перетині ліній координатної сітки виділяють вузли, що характеризують еквівалентні точки підведення або відведення тепла;
- між вузлами у вертикальному та горизонтальному напрямках визначають теплові опори фрагментів пристрою за формулою (3.3);
- складають рівняння теплового балансу;
- для кожного вузла аналізованого об'єкта визначають температуру нагріву.

Таблиця 3.4. Коефіцієнти теплопровідності конструкційних матеріалів

Неметали	α_m , кал/(с·см·°С)	Метали	α_m , кал/(с·см·°С)
Повітря	0,000063	Титан	0,037
Гетинакс	0,00045	Сталь	0,10...0,14
Гума	0,0003... 0,0006	Цинк	0,24
Слюда	0,0017	Алюміній та його сплави	0,29...0,37
Скло	0,0021	Магній та його сплави	0,17...0,38
Склотекстоліт фольгований	0,043	Бронза	0,54
		Мідь	0,54

Для кращого розуміння процесу формування та застосування теплової моделі розглянемо спрощений приклад. Припустимо, що на друкованій платі є чотири мікросхеми. Позначимо ці мікросхеми як вузли Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , в яких розташовано елементи, що виділяють тепло (рис. 3.2). Кондуктивне тепловідведення тепла в нашому прикладі здійснюється через спеціальний з'єднувач, розташований у лівій частині плати. Вважаємо, що в цьому прикладі коефіцієнт теплопровідності плати у всіх напрямках однаковий. Відстані між елементами, що виділяють тепло, елементами і краями пластини однакові (в цьому випадку теплові опори між елементами і краями пластини – однакові). Для формування теплової моделі побудуємо на зображенні плати координатну сітку так, щоб усі теплотворні елементи опинились у вузлах цієї сітки.

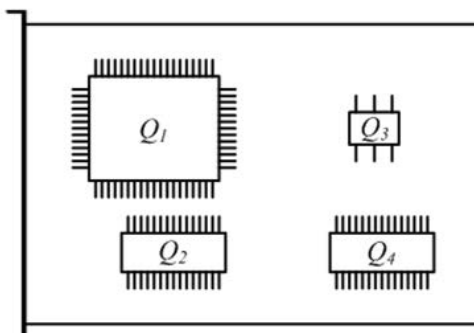


Рисунок 3.2. Схематичне зображення друкованої плати

Теплові опори умовно позначимо, як в електричних колах, а значення температур у вузлах моделі є аналогом *електричних потенціалів* (рис. 3.3). Значення теплових потоків можна розрахувати за методикою, за якою визначають силу струму в еквівалентному електричному колі.

T_1, T_2, T_3, T_4 – температура у відповідних вузлах сітки; T_k – температура корпусу; $R_1...R_6$ – теплові опори (у нашому прикладі вони однакові); $Q_1...Q_4$ – теплові потоки. Довільно призначаємо напрямки теплових потоків, що протікають через відповідні опори.

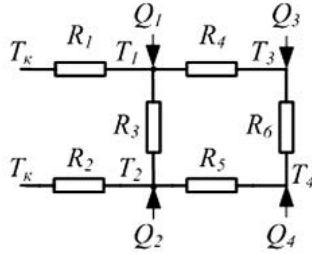


Рисунок 3.3. Теплова модель друкованої плати з мікросхемами

Після зроблених позначень можна записати систему рівнянь теплового балансу для вузлів $Q_1 \dots Q_4$:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= (T_1 - T_3)/R + (T_1 - T_2)/R + (T_1 - T_K)/R; \\
 Q_2 &= (T_2 - T_4)/R + (T_1 - T_1)/R + (T_2 - T_K)/R; \\
 Q_3 &= (T_3 - T_1)/R + (T_3 - T_4)/R; \\
 Q_4 &= (T_4 - T_3)/R + (T_1 - T_2)/R.
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Перепишемо систему так, щоб у правій частині рівнянь залишилась тільки температура:

$$\begin{aligned}
 Q_1 \cdot R &= (T_1 - T_3) + (T_1 - T_2) + (T_1 - T_K); \\
 Q_2 \cdot R &= (T_2 - T_4) + (T_2 - T_1) + (T_2 - T_K); \\
 Q_3 \cdot R &= (T_3 - T_1) + (T_3 - T_4); \\
 Q_4 \cdot R &= (T_4 - T_3) + (T_4 - T_2).
 \end{aligned}$$

Запишемо систему рівнянь в упорядкованому вигляді

$$\begin{aligned}
 Q_1 \cdot R + T_K &= 3 \cdot T_1 - 1 \cdot T_2 - 1 \cdot T_3 + 0 \cdot T_4; \\
 Q_2 \cdot R + T_K &= -1 \cdot T_1 + 3 \cdot T_2 + 0 \cdot T_3 - 1 \cdot T_4; \\
 Q_3 \cdot R &= -1 \cdot T_1 - 0 \cdot T_2 + 2 \cdot T_3 - 1 \cdot T_4; \\
 Q_4 \cdot R &= 0 \cdot T_1 - 1 \cdot T_2 - 1 \cdot T_3 + 2 \cdot T_4.
 \end{aligned}$$

Подібну систему рівнянь зручно розв'язувати матричним способом. У матричній формі система набуде вигляду:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \cdot R + T_K \\ Q_2 \cdot R + T_K \\ Q_3 \cdot R \\ Q_4 \cdot R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}.
 \tag{3.5}$$

Матриця-стовпчик у лівій частині містить відомі величини. Невідомими є температури відповідних вузлів. Якщо переписати систему відносно температур, то отримаємо

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \cdot R + T_K \\ Q_2 \cdot R + T_K \\ Q_3 \cdot R \\ Q_4 \cdot R \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Як випливає із наведеного прикладу така модель дозволяє звести процес розрахунку температури обумовленої кондуктивним теплообміном у критичних зонах до розв'язання алгебраїчного рівняння у матричній формі.

3.4.2. Тепловідведення конвекцією

Конвективне тепловідведення для забезпечення робочого теплового режиму складових АРІ й іншої електронної апаратури здійснюють кількома способами. Застосовують повітряне природне й примусове, а також водно-повітряне конвективне охолодження.

Конвекція – явище перенесення тепла струменями або потоками рідини чи газу (повітря).

Природне конвективне охолодження відбувається *внаслідок контактного передавання тепла* від нагрітої поверхні повітря, що знаходиться у безпосередній близькості до цієї поверхні, і подальшого заміщення нагрітих повітряних мас прохолоднішими. Рух повітря обумовлений тим, що нагріті шари повітря піднімаються вгору, а на їх місце надходять прохолодніші шари із навколишнього середовища. *Природне конвективне охолодження* широко використовують у побутовій і професійній апаратурі у тих випадках, коли густина теплових потоків від охолоджуваних поверхонь не перевищує 0,05 Вт/см². Для ефективного застосування методу охолодження природною конвекцією конструктор має особливо ретельно ставитись до раціонального компонування окремих складових пристрою всередині корпусу за критерієм забезпечення нормального теплового режиму.

У процесі компонування необхідно прагнути до *рівномірного розподілу* виділеної теплової енергії всередині корпусу і *відведення* цієї енергії назовні з достатньою швидкістю. Компоненти і вузли з великим тепловиділенням необхідно розташовувати у верхній частині корпусу або поблизу стінок. Критичні до перегріву компоненти доцільно розташовувати у нижній частині та в разі необхідності їх слід захищати тепловими екранами. Якщо між елементами, що активно виділяють тепло, і чутливими до перегріву модулями розмістити екран з великою відбивальною здатністю, тоді інтенсивність теплового випромінювання у бік чутливих елементів зменшено приблизно вдвічі.

Щоб не перешкоджати надходженню вільних конвективних потоків повітря всередину приладу, між поверхнею, на якій розташовано пристрій, та дном пристрою має бути шпарина, яку можна забезпечити установленням приладу на амортизатори або опорні ніжки. Між модулями та поверхнями, на яких вони

закріплені всередині приладу, необхідно залишати деякий просторовий *проміжок для вільної циркуляції повітря*. Вентиляційні отвори в корпусі пристрою роблять також на бічних та верхній поверхнях, залежно від його конструктивних особливостей. Щоб запобігти потраплянню пилу та бруду всередину пристрою вентиляційні отвори закривають спеціальними сітками, а в разі великогабаритного обладнання – повітряними фільтрами.

У процесі розрахунку теплового режиму апаратури з природним повітряним охолодженням важливо оцінити *кількість теплоти*, що виділяють усі нагріті поверхні приладу. Такий розрахунок для електричних та електронних функціональних модулів легко зробити, якщо визначити для кожного модуля *споживану електричну потужність*.

Для розрахунку кількості теплоти, яку можна відвести від певної поверхні, застосовують формулу

$$Q = 4,187 \cdot 10^{-4} \cdot h_c \cdot S \cdot \Delta T \text{ (Вт)}, \quad (3.7)$$

де S – площа охолоджуваної поверхні, см^2 , h_c – коефіцієнт конвективного теплопередавання, $\text{Вт/см} \cdot ^\circ\text{C}$, ΔT – різниця температур нагрітої поверхні та навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$.

Для визначення коефіцієнту конвективного теплопередавання застосовують співвідношення

$$h_c = 0,52 \cdot C(55 \cdot \Delta T / l)^{1/4}, \quad (3.8)$$

де C – стала величина, що залежить від орієнтації поверхні (для вертикальної площини $C=0,56$; для верхньої горизонтальної площини $C=0,52$; для нижньої горизонтальної площини $C=0,26$); l – усереднена довжина шляху теплового потоку яку визначають залежно від розташування охолоджуваної поверхні.

Для вертикально розташованих поверхонь цей шлях чисельно дорівнює площі поверхні поділеній на максимальний горизонтальний розмір цієї поверхні. Для горизонтально розташованої поверхні цей шлях чисельно дорівнює значенню, що отримано внаслідок ділення подвійної площі деталі на суму усереднених вертикального та горизонтального розмірів.

Примусове повітряне охолодження може бути загальним і локальним. Загальне примусове повітряне охолодження застосовують для *великогабаритних* пристроїв та систем. Як правило таке охолодження застосовують для обладнання розташованого в *шафах і стійках*. В окремих випадках таке охолодження застосовують у *герметичних корпусах* для обладнання спеціального призначення, але здебільшого його застосовують у *стаціонарному обладнанні*, розташованому в технічних апаратних і зосередженому в негерметичних корпусах.

Для *примусового* охолодження апаратури *автономними вентиляторами* в негерметизованих корпусах використовують дві схеми надходження охолод-

женого повітря: *знизу вгору* і *згори донизу*. За першою схемою повітря забирають у підлоги, за другою – у верхній частині приміщення. Забір повітря біля підлоги, де зосереджена найбільша кількість пилу, призводить до *небезпеки підвищеного забруднення* апаратури. Охолодження за схемою згори донизу має перевагу щодо цієї небезпеки, але *вимагає більшої витрати повітря*, оскільки його температура із збільшенням висоти всмоктування повітря зростає. Застосовують *припливну*, *витяжну* та *припливно-витяжну* схеми вентиляції. У припливній схемі вентилятор засмоктує зовнішнє повітря *всередину* виробу. У витяжній – нагріте повітря *виштовхується* з виробу. У припливно-витяжній – використовують *два вентилятори*: на вході повітряного потоку, всередину виробу і на виході.

Локальне примусове охолодження застосовують для активних елементів з *великим виділенням тепла*. Такими елементами здебільшого є мікросхеми різноманітних процесорів тощо. Зазначені системи охолодження складаються, як правило з *радіатора (тепловідводу)*, що забезпечує інтенсивне відведення тепла безпосередньо з поверхні мікросхеми і *вентилятора*, змонтованого на цьому радіаторі для ефективного відведення тепла внаслідок його обдуву повітряним потоком. Такі локальні системи охолодження (*cooler*, англ.) можуть бути різних розмірів залежно від розмірів охолоджуваної поверхні та необхідної інтенсивності відведення теплового потоку. На рис. 3.4 наведено приклад локальної охолоджувальної системи.

Правильній організації системи охолодження електронної апаратури приділяють велику увагу. Для деяких типів серійного обладнання принципи організації системи примусового охолодження навіть наведено у відповідних



Рисунок 3.4. Охолоджувальна система Zalman SNPS7700-AICu

стандартах. Наприклад, стандарт на конструювання корпусів комп'ютерів передбачає також *спеціальні рекомендації* стосовно організації примусового охолодження.

Стандартом передбачено охолодження обладнання системного блока наскрізним повітряним потоком, спрямованим від передньої стінки корпусу до задньої. Додатково повітря для охолодження обладнання всередині корпусу надходить через вентиляційні отвори у лівій стінці (рис. 3.5).

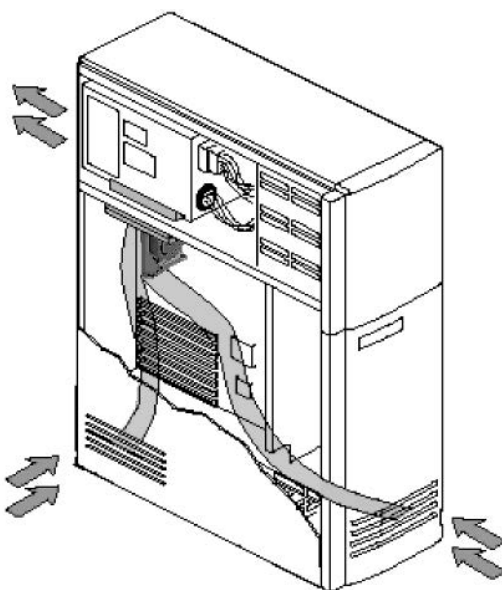


Рисунок 3.5. Напрямки потоку повітря в разі примусового охолодження для комп'ютерного корпусу стандарту ATX

Для забезпечення надійної роботи примусової повітряної охолоджувальної системи необхідно *правильно обирати тип вентилятора*.

Вентилятор складено з корпусу (зазвичай у вигляді рамки), електродвигуна і крильчатки, закріпленої за допомогою підшипників на одній осі з двигуном. Вентилятори відрізняються конструктивно, що обумовлює їх експлуатаційні властивості.

Вентилятор характеризують *продуктивністю* (обсягом перенесеного повітря за одиницю часу або інакше витратою, $\text{м}^3/\text{хв.}$), *потужністю споживання*, *шумовою характеристикою*, *терміном безвідмовної роботи* (табл. 3.5).

Для кожного типу АРІ слід вибирати вентилятор з урахуванням проектного часу роботи цього обладнання та найменших матеріальних витрат. Для обладнання, що має працювати протягом тривалого часу, варто обрати найбільш надійні вентилятори.

Під час експлуатації АРІ експлуатаційні умови можуть істотно змінюватись. Так, для *стаціонарної апаратури* залежно від приміщення, в якому її роз-

ташовано, температура повітря може змінюватись *не в дуже широких* межах, а для переносної та апаратури індивідуального користування температурний режим може змінюватись в *межах кількох десятків градусів*. За таких умов доцільно конструювати керовану систему примусового охолодження із застосування датчиків температури на охолоджуваному модулі. Залежно від температури охолоджуваного об'єкта можна вмикати/вимикати вентилятор або змінювати швидкість обертання крильчатки.

Таблиця 3.5. Час безвідмовної роботи вентилятора залежно від типу підшипника

Тип підшипника	Час безвідмовної роботи	
	Годин	Років
Підшипник ковзання (sleeve bearing)	10 000	1
Один підшипник ковзання, один підшипник кочення (ball bearing)	20 000	2
Два підшипника кочення (2 ball bearing)	30 000	3
Гідродинамічний підшипник	60 000 і більше	6

Кількість тепла Q ккал, що отримує повітряна маса m у разі збільшення її температури на ΔT , визначають співвідношенням

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (3.9)$$

де $c = 0,24$ ккал/кг·°С – питома теплоємність повітря.

Необхідну витрату повітря V_v , м³/год (м³/хв.), для охолодження модуля або конструктивного вузла, що споживає потужність P , Вт, визначають зі співвідношення

$$V_v = 0,86 \cdot \frac{k \cdot P}{c \cdot \rho \cdot \Delta T}, \quad (3.10)$$

де k – коефіцієнт запасу, яким враховують необхідне збільшення повітряного потоку, з урахуванням його часткового не ефективного використання (для загального охолодження в не герметизованих корпусах $k = 1,25$), ρ – густина повітря, що за нормальних умов (температура – 0°С, тиск – 100,0 кПа) становить 1,293 кг/м³. Раніше нормальним тиском вважали 760 мм рт. ст., що дорівнює 101 325 Н/м², або 101 325 Па.

Під час розрахунку тепловиділення в електронній апаратурі вважають, що вся спожита пристроєм електрична енергія перетворена на теплову. Нагадаємо, що між одиницями електричної та теплової енергії є такий зв'язок 1 кВт·год = 860 ккал.

У технічній документації на вентилятор наводять його продуктивність, виміряну за ідеальних умов, коли створений ним повітряний потік не зазнає додаткового опору навколишнього середовища крім опору повітря на шляху

поширення. У реальному обладнанні на шляху поширення повітряного потоку є деталі конструкції, що ускладнюють рух повітря і створюють додатковий аеродинамічний опір.

Швидкісний напір, створюваний вентилятором, характеризує кінетичну енергію повітряного потоку, обумовленого вентилятором і визначається зі співвідношення $\Delta P = \frac{\gamma v^2}{2}$, Н/м², де γ – густина повітря за робочої температури, v

– швидкість повітря, обумовлена крильчаткою вентилятора.

Для вибору вентилятора необхідно знати його характеристики та аеродинамічну характеристику охолоджуваної апаратури (рис. 3.6).

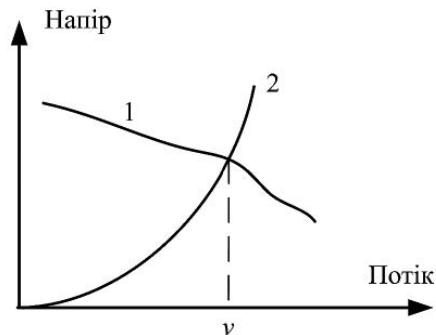


Рисунок 3.6. Аеродинамічні характеристики вентилятора 1 та повітряного каналу 2

Аеродинамічну характеристику повітряного каналу визначають експериментально. Точка перетину характеристики вентилятора (залежність напору від повітряного потоку), крива 1, і аеродинамічної характеристики охолоджуваної апаратури, крива 2, визначає максимальний повітряний потік v , який може створити обраний вентилятор для охолодження апаратури.

Якщо на підставі теплового розрахунку визначений із графіку потік буде не достатній, тоді треба вибрати більш потужний вентилятор і повторити розрахунок.

У випадку, якщо треба відводити значні теплові потоки, а система повітряного примусового охолодження, яку складено з радіатора та вентилятора не може забезпечити необхідне охолодження, то застосовують системи примусового охолодження з рідким холодоагентом.

3.4.3. Охолодження елементів конструкції тепловим випромінюванням

Властивість нагрітих тіл *випромінювати* теплові промені широко використовують під час конструювання електронних та механічних вузлів АРІ, що нагріваються внаслідок виділення теплоти під час функціонування.

За робочих температур, що мають місце під час роботи електронного обладнання вся спожита пристроєм або системою електрична енергія перетворюється в теплову. Нагріті тіла випромінюють електромагнітні хвилі переважно теплового діапазону. Тобто, уся випромінювана енергія є тепловою.

Потужність *випромінювання абсолютно чорного тіла* E_0 визначають за законом Стефана-Больцмана

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad , \text{Вт/м}^2, \quad (3.11)$$

де $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала випромінювання абсолютно чорного тіла.

Для здійснення технічних розрахунків формулу (3.9) застосовують у дещо модифікованому вигляді:

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad , \quad (3.12)$$

у цьому разі $C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Для *сірих поверхонь*, якими є поверхні усіх елементів АРІ, закон Стефана-Больцмана набуває вигляду

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad , \quad (3.13)$$

де C – коефіцієнт випромінювання сірої поверхні.

Для характеристики поверхонь застосовують параметр «ступінь чорноти тіла», який характеризує співвідношення

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C}{C_0} \quad . \quad (3.14)$$

Ступінь чорноти може набувати значень від 0 до 1. Розрахункове рівняння для випромінювання сірого тіла таке:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad . \quad (3.15)$$

Ступінь чорноти вказує, наскільки тіло наближається до абсолютно чорного тіла за своєю здатністю випромінювати. Він залежить від природи тіла, стану його поверхні (насамперед, шорсткості) і температури. Значення ступеня чорноти для деяких конструктивних матеріалів наведено у табл. 3.6 ($0,018 < \varepsilon < 0,98$).

Таблиця 3.6. Ступінь чорноти матеріалів

Матеріал	Температура, °С	ε
Алюміній:		
полірований	225-575	0,039-0,057
шорсткий	26	0,055
окислений за температури 600°C	200-600	0,11-0,19
Вольфрам	230-2230	0,053-0,31
Вольфрамова нитка	3300	0,39
Залізо:		
електролітне, ретельно поліроване	175-225	0,052-0,064
оброблене наждаком	20	0,242
окислене гладке	125-525	0,78-0,82
Сталь:		
окислена за температури 600°C	200-600	0,79-0,69
листова з щільним блискучим шаром окислу	25	0,82
окислена шорстка	40-370	0,94-0,97
Золото, ретельно поліроване	225-625	0,018-0,035
Латунь:		
полірована	245-355	0,028-0,031
не полірована, окислена під час нагрівання	200-600	0,61-0,59
Мідь:		
полірована	115	0,023
не полірована, окислена під час нагрівання	200-600	0,57-0,55
Залізо:		
оцинковане листове блискуче	28	0,228
оцинковане листове тьмяне	24	0,276
Емалі, лаки та фарби:		
Емаль біла, приплавлена до заліза	19	0,9
Лак:		
білий емалевий на залізній шорсткій пластині	23	0,91
чорний блискучий, розпорошений по залізу	25	0,83
чорний матовий	40-95	0,96-0,98
білий	40-95	0,80-0,95
Масляні фарби різних кольорів	100	0,86-0,96

Якщо нагріте тіло з температурою T_n і площею поверхні S знаходиться в середовищі з температурою T_c , тоді потік випромінювання з цієї поверхні визначають за співвідношенням

$$Q_{\epsilon} = \epsilon \cdot C_0 \cdot S \cdot \left[\left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] = \alpha_{\epsilon} \cdot S \cdot (T_{II} - T_c), \quad (3.16)$$

$$\text{де } \alpha_{\epsilon} = \epsilon \cdot C_0 \cdot 10^8 \frac{T_{II}^4 - T_c^4}{T_{II} - T_c} = 5,67 \cdot 10^8 \cdot \epsilon \cdot \frac{T_{II}^4 - T_c^4}{T_{II} - T_c},$$

ϵ – зведений ступінь чорноти системи, що приблизно дорівнює ступеню чорноти нагрітої поверхні.

У випадку, коли поблизу розташовано два нагрітих тіла, слід враховувати їх взаємний вплив. Потік теплової енергії, що надходить від більш нагрітого тіла (T_1) до менш нагрітого (T_2), визначають за співвідношенням

$$Q_{\epsilon} = C_{1-2} \cdot S \cdot \varphi \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.17)$$

$$\text{де } C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{S_1}{S_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)} - \text{коefficient взаємного випромінюван-}$$

ня, φ – усереднений кутовий coefficient, що враховує відносну частку потоку, яка надходить на поверхню (залежить від форми й розмірів поверхонь, їх взаємної орієнтації та відстані).

Якщо має місце співвідношення поверхонь $S_1 \gg S_2$, тоді $C_{1-2} = C_1$. У випадку, коли поверхні сумірні й паралельні, тоді $C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)}$.

Для запобігання взаємного впливу нагрітих елементів апаратури ефективним засобом є теплові екрани. Тепловий екран у вигляді плоскої пластини розташовують між елементами, що випромінюють теплові потоки. За умови, що випромінювальна здатність екрану сумірна з випромінювальною здатністю нагрітого тіла один екран зменшує потік випромінювання вдвічі. За наявності n екранів потік зменшується в $(n+1)$ разів. Ефект від застосування екранів збільшується, якщо використовувати екрани з низьким значенням coefficientа випромінювання.

Застосування радіаторів для охолодження функціональних елементів АРІ

Поверхні напівпровідникових елементів, що використовують в електронних пристроях, а також інших функціональних вузлів цих пристроїв не завжди можуть забезпечити відведення надлишкової теплоти конвекцією або випромінюванням, що призводить до надмірного збільшення температури відповідного вуз-

ла. Тому, для збільшення ефективності тепловідведення застосовують спеціальні конструктивні елементи – радіатори (*radiator* – англ. випромінювач). *Radiator* – спеціальний металевий елемент конструкції з великою ефективною поверхнею випромінювання, що має хороший тепловий контакт з охолоджуваною поверхнею, і забезпечує інтенсивне тепловідведення від нагрітого елемента.

У сучасній апаратурі застосовують радіатори різної конструкції (рис. 3.7). Їх використовують як у системах природного охолодження так і у системах примусового охолодження. Конструкція радіатора визначається особливістю форми охолоджуваного елемента, величиною теплового потоку, який необхідно відвести, наявним простором для розміщення радіатора, матеріалом із якого його виготовлено. Оскільки радіатор є допоміжним елементом конструкції (не виконує основні функції пристрою), то загальними вимогами до нього є мала вартість та малі масогабаритні показники.

Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення радіаторів є алюміній та алюмінієві сплави, оскільки цей матеріал легкий, дешевий і має хорошу теплопровідність. Проте, алюміній характеризується не дуже хорошою випромінювальною здатністю і тому доводиться використовувати спеціальні покриття. Для виготовлення радіаторів використовують також мідь, латунь, оцинковане залізо. Мідь має дуже хорошу теплопровідність й випромінювальну здатність, забезпечує хороший тепловий контакт з охолоджуваною поверхнею, проте – більшу порівняно з алюмінієм питому вагу (масу) і значно більшу вартість. Останнім часом для охолодження мікропроцесорів використовують гібридні радіатори, виготовлені з міді (основа) та алюмінію (ребриста або штирьова випромінювальна поверхня) (рис. 3.7д).

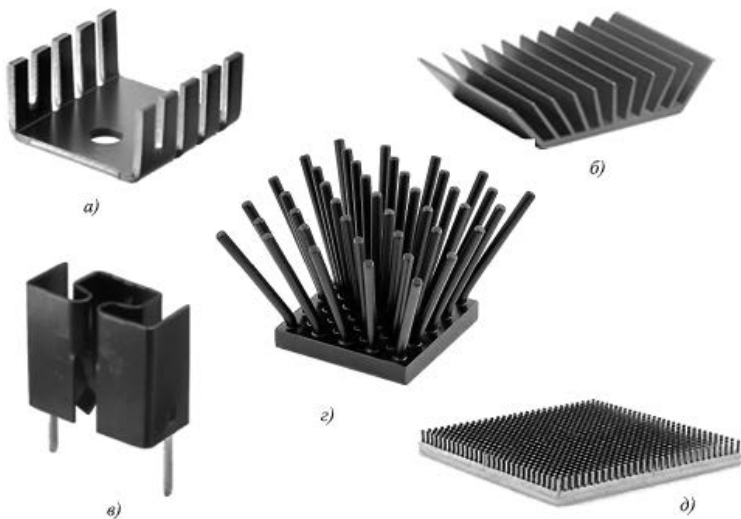


Рисунок 3.7. Приклади конструкцій радіаторів: а – для напівпровідникового приладу з різьбовим кріпленням, б – ребристий, в – для вертикально розташованого напівпровідникового приладу, г – голчастий, д – гібридний

Важливим завданням у разі застосування радіатора є необхідність забезпечити надійний і *ефективний тепловий контакт* з охолоджуваною поверхнею. Для забезпечення такого контакту відповідну поверхню напівпровідникового приладу і радіатора спеціально *формують* під час виготовлення – створюють пласку поверхню на всій площі теплового контакту. Проте, наявність мікронерівностей на контактних поверхнях призводить до виникнення повітряних шпарин і, як наслідок, *збільшення теплового опору*. Для поліпшення теплового контакту застосовують спеціальні *термічні пасти* та *гелі*. Пасти наносять тонким шаром на контактну поверхню і радіатор закріплюють прижимною арматурою, для забезпечення надійного контакту.

Розрахунок радіатора полягає у визначенні необхідної *площі поверхні* радіатора S_p , що забезпечує необхідні теплові параметри. Визначальними є розсіювана потужність P , різниця температур між радіатором та навколишнім середовищем та коефіцієнт теплопередавання радіатора α . Щоб з'ясувати температурний режим радіатора визначають максимально припустиму температуру охолоджуваного корпусу $T_{к.макс.}$:

$$T_{к.макс.} = T_{кр.макс.} - PR_{кр-к}, \quad (3.18)$$

де $T_{кр. макс.}$ – максимальна розрахункова температура кристала ($^{\circ}\text{C}$),
 $R_{кр-к}$ – тепловий опір між кристалом та поверхнею корпусу ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$).

Тепловий опір – здатність фізичного тіла (його поверхні або окремого шару) перешкоджати поширенню теплового руху молекул. Тепловий опір визначають за такою узагальненою формулою

$$R_t = (T_2 - T_1) / P, \quad (3.19)$$

де R_t – тепловий опір ділянки теплового кола, $\text{K}/\text{Вт}$;

T_2 – температура початку ділянки, K ;

T_1 – температура кінця ділянки, K ;

P – тепловий потік, що проходить через ділянку теплового кола, Вт .

Тепловий опір ділянки теплового кола, що має постійний переріз визначають зі співвідношення

$$R_t = l / (\alpha_m \cdot S), \quad (3.20)$$

де l – довжина ділянки теплового кола, м ;

α_m – коефіцієнт теплопровідності матеріалу $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;

S – площа поперечного перерізу, м^2 .

Тепловий опір послідовно з'єднаних ділянок теплового кола дорівнює сумі теплових опорів усіх ділянок цього кола: $R_k = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$.

Максимальне значення температури кристала наведено в технічній документації на відповідний напівпровідниковий прилад. Бажано розраховувати тепловий режим так, щоб робоча температура кристала сягала лише 70...80% від максимально можливої.

Усереднену температуру поверхні радіатора визначають за формулою

$$T_s = 0,96 [T_{кр.} - P(R_{кр-к} + R_{к-р})], \quad (3.21)$$

де $R_{к-р}$ – тепловий опір проміжку корпус-радіатор, наводять в технічній документації як один із обов’язкових параметрів для відповідного напівпровідникового приладу, що потребує охолодження.

Залежно від конструкції радіатора (пластинчастий, ребристий, голчастий) та перегріву (різниці температур радіатора та навколишнього середовища) використовують різні розрахункові співвідношення для визначення робочої поверхні радіатора.

Безпосереднє з’єднання охолоджуваної поверхні та радіатора *не забезпечує ідеальних умов* для передавання тепла через нерівності з’єднаних поверхонь. Тому з’єднання охолоджуваної поверхні з радіатором може бути здійснено застосуванням *спеціальних матеріалів*, що забезпечують менший тепловий опір на проміжку *поверхня – радіатор*. Це називають *тепловим інтерфейсом*. Матеріалами для реалізації теплового інтерфейсу можуть бути *термопаста, термоклей, термоскотч, термопрокладка*.

Термопаста є найбільш поширеним матеріалом для забезпечення надійного та довготривалого теплового інтерфейсу. Сучасні термопаста виготовляють із застосуванням мінеральних або синтетичних масел. Складовими паст (теплопровідним наповнювачем) можуть бути дрібнодисперсне, у вигляді мікрочастинок, металеве срібло, алюміній і їх оксиди (можливі й інші варіанти наповнювача, наприклад, частинки вуглецю або алмазу, нітриди бору). Залежно від наповнювача термопаста може бути хорошим діелектриком або провідником. Цю властивість слід враховувати під час вибору пасту для системи охолодження. Пасту необхідно наносити на охолоджувану поверхню тонким шаром, а надлишкову пасту після установаження радіатора слід ретельно видаляти. Застосування термопасту зумовлює зниження температури мікросхеми процесора на 10-20 градусів у порівнянні з температурою, що має місце у разі застосування радіатора без термопасту.

Для приблизного розрахунку радіатора можна скористатись співвідношенням

$$R_t = 50 / \sqrt{S}, \quad (^\circ\text{C}/\text{Вт}), \quad (3.22)$$

де S – площа поверхні тепловідведення в см^2 .

За відомого теплового опору R_t площу поверхні, що забезпечить необхідне тепловідведення, визначають за формулою

$$S = (50 / R_t)^2, \quad \text{см}^2. \quad (3.23)$$

Приклад 1. Необхідно забезпечити температуру охолоджуваної поверхні 85°C . Тепловий потік з охолоджуваної поверхні становить 30 Вт, температура навколишнього повітря 25°C .

Розв'язання. Визначаємо тепловий опір радіатора: $R_t = (85-25)/30 = 2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Обчислюємо необхідну поверхню радіатора: $S = (50/2)^2 = 625 \text{ см}^2$.

Приклад 2. Визначити тепловий потік, що може відвести радіатор площею 1000 см^2 , за умови, що перегрів становить 80°C , а тепловий опір радіатора $R_t = 1,6^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Розв'язання. На підставі формули (3.17) значення теплового потоку, який буде відведено за заданих умов: $P = \Delta T / R_t = 80/1,6 = 50 \text{ Вт}$.

3.5. Захист апаратури від шкідливих впливів навколишнього середовища

До шкідливих впливів навколишнього середовища можна віднести вологість повітря, наявність у повітрі дрібних твердих часток (пилу та піску), мікрофлори (цвілі) та мікрофауни (бактерій).

3.5.1. Захист апаратури від вологи

Відносну вологість розподілено на тринадцять ступенів *жорсткості* впливу на технічне обладнання (табл. 3.7).

Кількість вологи, що міститься в повітрі за різних кліматичних умов, може значно відрізнятись. У регіонах *помірного клімату* відносна вологість становить $65\ldots 70\%$, у *пустелях* – близько $5\ldots 10\%$, у *тропіках* – до $95\ldots 98\%$ за одночасного підвищення температури до $+40^\circ\text{C}$. Морська апаратура функціонує за вологості повітря, близької до тропічної, крім того, випаровування морської води містять солі тих речовин, які розчинені в морі.

Апаратура магнітного запису, наприклад, польова переносна, має нормально функціонувати за умов безпосереднього впливу атмосферних опадів (дощу або снігу), а іноді також і у воді. Значне зниження температури супроводжується утворенням водяного конденсату на поверхні або усередині пристрою. Подібне явище можливе в АМЗ літака під час проходження через зону туману (насичене вологою повітря), якщо температура апарату нижче температури повітря.

Підвищена вологість повітря і безпосередня дія атмосферних опадів зумовлює корозію на металах і їх покриттях, набухання і деформацію феромагнітної стрічки, її злипання на нерухомих елементах тракту МТС (стійках, голівках тощо). Здатність апаратури, функціонувати в середовищі з підвищеною відносною вологістю (із додатковим захистом або без нього) називають *вологостійкістю*.

Беручи до уваги важливість стійкості апаратури до впливу вологи, розроблено кілька міжнародних стандартів для класифікації вологостійкості корпусів електронної апаратури, зокрема, Європейський стандарт ІЕС-952.

Таблиця 3.7. Класифікація відносної вологості

Верхнє значення відносної вологості	Середньомісячне значення у найбільш теплий та вологий період	Тривалість дії протягом року, міс.	Ступінь жорсткості
80% за 25°C* і нижчих температурах без конденсації вологи	65% за температури 20°C	12	I
98% за 25°C* і нижчих температурах без конденсації вологи	80 % за температури 20°C	2	II
		6	III
100% за 25°C* і нижчих температурах з конденсацією вологи	80 % за температури 20°C	6	IV
100% за 25°C* і нижчих температурах з конденсацією вологи	90 % за температури 20°C	12	V
98% за 25°C* і нижчих температурах без конденсації вологи			VI
98% за 35°C* і нижчих температурах без конденсації вологи	80 % за температури 27°C	3	VII
		12	VIII
100% при 35°C* і нижчих температурах з конденсацією вологи	90 % за температури 27°C	12	IX
98% за 35°C* і нижчих температурах без конденсації вологи			X
98% за 35°C* і нижчих температурах без конденсації вологи	90 % за температури 27°C	4	XI
100% за 25°C* і нижчих температурах без конденсації вологи	90 % за температури 20°C	6	XII
98% за 25°C* і нижчих температурах без конденсації вологи			XIII

* За вищих температур відносна вологість нижча.

За цим стандартом для характеристики захисту корпусу використовують рейтинг у форматі IPxx, сутність якого розкрито нижче. Дві останні позиції у позначенні рейтингу – це перший та другий індекс, що характеризують клас захисту.

Перший індекс – клас захисту корпусів електронного обладнання від проникнення всередину сторонніх тіл:

Індекс	Опис
0	Захист відсутній
1	Захист від проникнення всередину оболонки великої ділянки поверхні людського тіла, наприклад рук, і від проникнення твердих тіл діаметром більше 50 мм
2	Захист від проникнення всередину корпусу пальців або предметів довжиною більше 80 мм і від проникнення твердих тіл діаметром більше 12 мм

Індекс	Опис
3	Захист від проникнення всередину оболонки інструментів, дроту, твердих тіл тощо діаметром або товщиною більше 2,5 мм
4	Захист від проникнення всередину оболонки дроту і твердих тіл діаметром більше 1 мм
5	Захист від проникнення пилу в корпус забезпечено не повністю, проте кількість пилу, що потрапляє всередину не може порушити функціонування виробу
6	Проникнення пилу унеможливлено повністю

Другий індекс – клас захисту корпусів електронного устаткування від впливу води:

Індекс	Опис
0	Захист відсутній
1	Краплі води, що падають на оболонку вертикально, не повинні шкідливо впливати на виріб
2	Краплі води, що падають на оболонку під кутом до 15 градусів від вертикалі, не повинні шкідливо впливати на виріб
3	Дощ, що падає на оболонку під кутом 60 градусів від вертикалі, не повинен мати шкідливого впливу на виріб
4	Вода, розбризкувана на оболонку в будь-якому напрямку, не повинна мати шкідливого впливу на виріб
5	Струмінь води, що потрапляє на оболонку з будь-якого напрямку, не повинен шкідливо впливати на виріб
6	Сильний струмінь води (100 л/хв. за тиску 100 кПа) або хвилі води не повинні потрапляти в оболонку в кількості, достатній для пошкодження виробу
7	Вода не повинна потрапляти в оболонку, занурену у воду на глибину приблизно 15 см, у кількості, достатній для пошкодження виробу, за умови приблизної рівності температури оболонки і води
8	Виріб придатний для тривалого занурення у воду за умов, установлених виробником

Захист АРІ від впливу вологи можна здійснювати локальними або загальними засобами. Локальними засобами є застосування захисних покриттів для окремих функціональних вузлів та деталей або застосування для них окремих герметичних захисних оболонок. Загальний захист можна забезпечити використанням герметичного, стійкого до впливу вологи корпусу, всередині якого розміщено усі функціональні вузли пристрою.

Герметизацію корпусу пристрою в цілому або окремого функціонального вузла здійснюють шляхом щільного з'єднання суцільних корпусних деталей за допомогою ущільнювачів та прокладок. Під час конструювання герметичного корпусу на етапі вибору ущільнювача необхідно враховувати умови експлуатації і, перш за все, зміну зовнішнього повітряного тиску, зовнішні механічні впливи й можливі перепади температури. Герметизацію корпусу може бути зроблено з не рознімними або рознімними швами. Перший тип швів переважно

використовують для захисту *малобагаритних вузлів* і пристроїв, другий – для відносно *великих блоків*, що потребують здійснення регламентних робіт, заміну окремих вузлів з плином часу тощо.

У не рознімних герметичних конструкціях шви роблять *паянням, зварюванням, заливкою, склеюванням* або *замазкою спеціальними компаундами* (герметиками). У *рознімних* герметичних конструкціях між з'єднаними деталями розміщують *еластичну прокладку*, а у внутрішньому об'ємі розташовують *поглинач вологи*, наприклад, силікагель. Для рознімних з'єднань застосовують металеві (зі свинцю або червоної міді) й не металеві (гумові, капронові тощо) прокладки. *Металеві прокладки* стягують *гвинтами* із зусиллям, що забезпечує деформування вище межі текучості. У разі використання *гумових* прокладок ущільнення досягають внаслідок *дії залишкових пружних деформацій*.

Залежно від конструктивних особливостей функціональних вузлів або пристрою в цілому герметизацію може бути здійснено різними способами, що обумовлює застосування різних технологічних процедур, складність і вартість реалізації.

Для АРІ застосовують *герметизацію* з використанням *ізоляційних матеріалів* та *непроникних для газів атмосфери оболонки*.

Захист виробів ізоляційними матеріалами здійснюють *просочуванням, заливкою, огортанням* й *опресовуванням*.

Просочування виробів полягає у заповненні наявних в них каналів електроізоляційним матеріалом. Одночасно із заповненням каналів під час просочування на всіх елементах конструкції утворюється тонкий ізоляційний шар, що захищає поверхню від впливу агресивного середовища. Одночасно із захисними функціями просочувальний матеріал підвищує електричну міцність виробу, скріплює механічно його окремі елементи, у багатьох випадках покращує теплопровідність. Просочування здійснюють зануренням виробів у рідкий ізоляційний матеріал. На повітрі рідкий матеріал, що залишився на поверхні деталі, твердне. Процес затвердіння може відбуватися за нормальної температури або із зовнішнім підігрівом. У разі використання просочувальних матеріалів, що на повітрі полімеризуються, необхідно застосовувати спеціальні прискорювачі.

У разі *герметизації заливкою* всі вільні порожнини у виробі, в тому числі й простір між елементами і корпусом, заливають електроізоляційним матеріалом (наприклад, епоксидною смолою, поліуретаном тощо), який після затвердіння утворює досить товстий захисний шар. Заливку виробу можна здійснювати в його постійному корпусі або використовувати для цього спеціальні рознімні форми, які після затвердіння матеріалу видаляють.

Герметизація огортанням за технікою виконання аналогічна операції просочування, однак тут використовують в'язкі ізоляційні матеріали, що мають хорошу адгезію з матеріалами елементів виробу. Шар матеріалу, що утворюється на поверхні деталей, у цьому випадку порівняно товстий (від часток до декількох міліметрів) і надійно захищає деталі від впливу агресивного середовища.

Захист виробів непроникними для газів оболонками – найбільш досконалий спосіб захисту вузлів і пристроїв АРІ, оскільки крім ефективного захисту, цей спосіб надає можливість розгерметизації виробу під час виробництва, експлуатації та ремонту.

Захисні покриття. Для захисту поверхні металевих і неметалевих матеріалів від агресивного зовнішнього середовища застосовують різні покриття, які за призначенням розподіляють на три групи: *захисні, декоративно-захисні та спеціальні.*

Захисні покриття призначено для захисту деталей від корозії, старіння, висихання, гниття та інших процесів, що спричинюють вихід апаратури з ладу.

Декоративно-захисні покриття окрім забезпечення захисту деталей надають їм гарний зовнішній вигляд.

Спеціальні покриття надають поверхні деталей особливі властивості або захищають їх від впливу особливих середовищ.

За матеріалом, з якого виготовлено покриття, їх поділяють на металеві та неметалеві.

Металеві покриття може бути нанесено різними способами: гарячим способом, гальванічним способом, дифузійним способом на діелектричних матеріалах і іншими способами.

Неметалеві покриття – це покриття лаками, емалями, ґрунтовками, а також протикорозійні покриття пластмасами.

Вибір того чи іншого виду покриття в кожному конкретному випадку залежить від матеріалу деталі, її функціонального призначення та умов експлуатації.

Для захисту пристроїв від *цвілі* може бути застосовано три способи.

Перший спосіб полягає у застосуванні матеріалів, які *стійкі* до утворення на них цвілі (застосування цього методу обмежене можливостями вибору конструкційних матеріалів).

Другий спосіб полягає у створенні усередині апаратури *мікроклімату*, що запобігає утворенню й розвитку цвілі. Головними чинниками такого мікроклімату є зменшення відносної вологості повітря та підвищена температура вразливих поверхонь (що може бути досягнуто за рахунок тепловиділення елементів апаратури під час функціонування).

Третій спосіб полягає у додаванні до складу лаку або емалі, якими покривають поверхню деталей, спеціальних хімічних речовин – *фунгіцидів*.

3.5.2. Загальна характеристика впливу вібрацій та ударних навантажень

На рухомих об'єктах, наприклад, автомашинах, літаках, кораблях, супутниках тощо АРІ зазнає *механічних впливів* (вібраційні навантаження, одноразові і багаторазові удари, лінійні (відцентрові) прискорення, що може призводити до механічного руйнування окремих функціональних вузлів і втрати працездатності апаратури в цілому. Тому, урахування механічних впливів у процесі

конструювання апаратури ресстрації інформації є одним із важливих чинників, що *забезпечує надійність* функціонування сконструйованої апаратури.

Основними параметрами стосовно оцінювання механічних впливів є маса, жорсткість й механічний опір (демпфірування). Для аналізу впливу вібрації на конструктивні вузли й пристрій в цілому досліджувані об'єкти розглядають як систему із зосередженими параметрами, у якій відомо *масу виробу m* , елемент *жорсткості* у вигляді пружини та елемент *механічного опору* у вигляді демпфера, що характеризуються параметрами k та r , відповідно:

k – коефіцієнт жорсткості чисельно дорівнює похідній характеристики відновлювальної сили або моменту з протилежним знаком;

r – коефіцієнт опору чисельно дорівнює відношенню з протилежним знаком дисипативної сили або моменту до відповідної узагальненої швидкості переміщення лінійної системи (рис. 3.8).

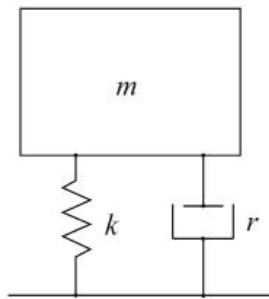


Рисунок 3.8. Модель механічної системи з одним ступенем свободи

У разі дослідження складних структур кожен складову такої системи подають з використанням зазначених вище елементів механічних зв'язків (пружини та демпфера). Число ступенів свободи є одним з найбільш важливих показників механічної системи, оскільки він визначає просторове положення системи в будь-який момент часу.

Детальний математичний опис механічної системи може бути надмірно складним, тому під час конструювання слід прагнути застосовувати максимально спрощені моделі, які в той же час відображають найбільш суттєві властивості реальної конструкції. Часто застосовують модель системи з одним ступенем свободи. За цією моделлю проаналізуємо особливості вібраційного впливу.

Розглянемо рівняння *балансу сил* такої системи. Позначимо зовнішню силу $F(t)$. Цій силі у будь-який момент часу протидіють сила інерції F_m , сила жорсткості F_k та сила демпфірування F_r . Рівняння балансу сил матиме вигляд

$$F(t) = F_m + F_k + F_r . \quad (3.24)$$

Вважаємо, що рух об'єкту відбувається у вертикальному напрямку (вдвож осі z). У динаміці сили можна подати як функції величини відхилення від рівноважного стану z :

$$F_m = m \frac{d^2 z}{dt^2}; \quad F_r = r \frac{dz}{dt}; \quad F_k = kz. \quad (3.25)$$

З урахуванням (3.25) рівняння балансу сил набуде вигляду

$$F(t) = m \frac{d^2 z}{dt^2} + r \frac{dz}{dt} + kz. \quad (3.26)$$

Отримане рівняння дозволяє з'ясувати як власні коливальні властивості системи, так і реакцію системи на зовнішній вплив (вимушені коливання).

Характеристики власних коливань системи знаходимо з рівняння

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + r \frac{dz}{dt} + kz = 0. \quad (3.27)$$

Розв'язком такого рівняння є функція $z = z_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, де z_0 – початкове відхилення системи від рівноважного стану, φ_0 – початкова фаза власного (вільного) коливання, $\delta = r/(2m)$ – коефіцієнт демпфірування,

$\omega_0 = \sqrt{k/m - \delta^2}$ – кругова частота власних коливань системи, $f_0 = \omega_0/(2\pi)$ – лінійна частота власних коливань.

В усіх реальних системах внаслідок *демпфірування* має місце загасання власних коливань, тому за відсутності зовнішніх впливів система перебуває у врівноваженому стані.

Характеристики вимушених коливань знайдемо з рівняння (3.27). Для наочності вважаємо, що зовнішній вплив змінюється за гармонійним законом з амплітудою F_m та частотою ω , тобто

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + r \frac{dz}{dt} + kz = F_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.28)$$

Розв'язком цього рівняння є функція:

$$z = z_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + z_B \sin(\omega t + \varphi).$$

Перший доданок у правій частині рівняння описує власні коливання, а другий – *вимушені* з амплітудою z_B та частотою ω .

У процесі експлуатації апаратура реєстрації інформації, особливо та, що розташована на рухомих об'єктах, зазнає впливу механічних сил, інтенсивність яких у часі змінюється за *складними законами*. Спектр частот механічних сил, що впливають на апаратуру, можуть співпадати з власними частотами механічної системи апаратури. У цьому випадку виникають *резонансні коливання*, *амплітуда* яких може значно перевищувати як власні коливання, так і вимушені коливання, що може *спричинити до руйнування* окремих функціональних вузлів апаратури.

Для оцінювання властивостей коливальної системи поблизу резонансу застосовують поняття *добротності системи*. Добротність характеризує у скільки разів амплітуда вимушених коливань під час резонансу перевищує амплітуду коливань на частотах, що значно відрізняються від резонансних.

$$Q = k/\omega_0 r = \omega_0 m/r = \omega_0/2\delta, \quad (3.29)$$

де δ – коефіцієнт демпфірування (загасання).

Визначимо реакцію системи на удар. Для цього скористаємось наведеною вище моделлю. Проаналізуємо реакцію системи під час її падіння на тверду й жорстку поверхню. Скористаємось рівнянням (3.27) і врахуємо, що коефіцієнт демпфірування дорівнює нулю. У такому разі можна записати

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + kz = 0. \quad (3.30)$$

Розглянемо ситуацію за таких початкових умов: $t = 0, z = z_{\text{п}}, dz/dt = v_0$.

Розв'язком рівняння (3.30) є функція

$$z = (v_0/\omega_0) \sin \omega_0 t - z_{\text{п}} \cos \omega_0 t,$$

де $z_{\text{п}} = mg/k$ – прогин корпусу пристрою, що впав на жорстку поверхню, під впливом маси пристрою,

$v_0 = \sqrt{2gh}$ – швидкість пристрою в момент зіткнення з жорсткою поверхню,
 g – прискорення вільного падіння,
 h – висота падіння,

$\omega_0 = \sqrt{k/m}$ – частота вібраційних коливань.

У результаті зіткнення з жорсткою поверхню корпус та несні елементи конструкції зазнають динамічної деформації, що характеризується максимальним z_{max} та повним динамічним зміщенням $z_{\text{пд}}$ (деформацією):

$$z_{\text{max}} = \sqrt{z_{\text{п}}^2 + v_0^2/\omega_0^2}, \quad z_{\text{пд}} = z + z_{\text{max}} = z_{\text{п}} [1 + \sqrt{1 + v_0^2/(\omega_0^2 z_{\text{п}}^2)}]. \quad (3.31)$$

Визначимо максимальне прискорення a_{max} , що буде мати місце під час падіння пристрою, та коефіцієнт ударного перевантаження $k_{\text{уд}}$:

$$a_{\text{max}} = d^2 z/dt^2 = \omega_0^2 z_{\text{п}} \sqrt{1 + v_0^2/\omega_0^2 z_{\text{п}}^2}, \quad k_{\text{уд}} = d^2 z/dt^2 \cdot \frac{1}{g}. \quad (3.32)$$

Таким чином за наявності в системі реєстрації інформації механізму транспортування стрічки на кожен елемент цього механізму діє сила $F = ma$, де m – маса елемента, a – прискорення. Під дією вібрацій відбувається деформація (одноразова або багаторазова) окремих елементів МТС, змінюються функціональні параметри (швидкість і рівномірність руху стрічки, частота обертання валів, маховиків тощо), виходять з ладу окремі елементи МТС і несна плита

механізму. Апаратуру реєстрації інформації, яка нормально витримує задані параметри і виконує свої функції за дії вібрацій (із додатковим захистом або без нього), називають *вібростійкою*.

Апаратура, яка може протистояти руйнівній дії довготривалих вібрацій в заданому діапазоні частот і прискорень, а також дії *ударів* певної інтенсивності і після цього нормально виконувати свої функції, називають *віброміцною* і *удароміцною*.

Під час перевірки надійності вібростійку АРІ перевіряють з усіма *амортизаторами* (якщо вони є) в режимі електричного навантаження зі зняттям робочих параметрів у всьому заданому діапазоні вібраційних частот.

Відношення сили, що з'являється в результаті дії прискорення, до ваги апарату P називають перевантаженням G :

$$G = \frac{F}{P} . \quad (3.33)$$

Значення перевантаження G характеризує, у скільки разів додаткова зовнішня сила F більше власної ваги апарату P . Якщо відома величина перевантаження G , то силу, яка діє на елемент конструкції, можна визначити зі співвідношення $F = P \cdot G$.

Якщо на апарат впливає синусоїдна вібрація, тоді для визначення величини перевантаження застосовують співвідношення

$$G \approx Af^2 / 250 , \quad (3.34)$$

де A – амплітуда вібрації, мм; f – частота вібрації, Гц.

Значення перевантаження G під час ударів, зазвичай, визначають експериментально спеціальними приладами, які називають *акселерометрами*. Орієнтовні значення G , що виникають під час експлуатації на різних рухомих об'єктах, наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Параметри вібраційного навантаження апаратури

Апаратура	Частота вібрації, Гц	Максимальні значення	
		Вібраційне прискорення (g)	Ударне навантаження (g)
Автомобільна	2...80	4	10
Авіаційна	3...40	10	10
Корабельна	5...35	2,5	12

Якщо апаратуру жорстко закріплено в кожному з трьох взаємно перпендикулярних напрямків, то під час випробувань джерело живлення АРІ від'єднують і електричні параметри не вимірюють. Вібраційні, ударні і лінійні навантаження розподілено на 20 ступенів жорсткості (табл. 3.5).

Таблиця 3.5. Максимальне ударне навантаження для різної апаратури

Навантаження		Частота, Гц	Максимальне прискорення, (g)	Тривалість удару, мс	Ступінь жорсткості		
1		2	3	4	5		
Вібраційне		1...35	0,5	–	I		
		1...60	1	–	II		
		1...60	2	–	III		
		1...80	5	–	III		
		1...100	1	–	V		
		1...200	5	–	VI		
		1...200	10	–	VII		
		1...600	5	–	VIII		
		1...600	10	–	IX		
		1...1000	10	–	X		
		1...2000	5	–	XI		
		1...2000	10	–	XII		
		1...2000	15	–	XIII		
		1...2000	20	–	XIV		
		1...3000	20	–	XV		
		1...5000	10	–	XVI		
		1...5000	20	–	XVII		
		1...5000	30	–	XVIII		
		1...5000	40	–	XIX		
		100...5000	40	–	XX		
Ударне навантаження	багаторазове	–	15	2...15	I		
		–	40	2...10	II		
		–	75	7...6	III		
		–	150	1...3	IV		
	одноразове	–	4	40...60	I		
		–	20	20...50	II		
		–	75	2...6	III		
		–	150	1...3	IV		
		–	500	1...2	V		
		–	1000	0,2...1	VI		
		–	1500	0,2...0,5	VII		
		–	3000	0,2...0,5	VIII		
		Лінійне (відцентрове) навантаження		–	10	–	I
				–	25	–	II
–	50			–	III		
–	100			–	IV		
–	150			–	V		
–	200			–	VI		
–	300			–	VII		

Якщо *перевантаження* під час вібрації і ударів *перевищують значення*, припустимі для вузлів і приладів, в конструкції АРІ або МТС *застосовують амортизатори*, які встановлюють між корпусом апарату і віброуючою основою.

Зручність зарядки тракту МТС стрічкою забезпечують вибраною кінематичною схемою і конструктивним виконанням його вузлів і декоративних елементів (кришок, фальш-панелей).

Для кожного різновиду радіоелектронної апаратури обумовлюють чинники навколишнього середовища, що впливають на функціонування цієї апаратури. Для кожного із цих чинників визначають граничні значення параметрів середовища (максимальне або мінімальне), за яких має бути забезпечено експлуатаційні параметри апаратури. Ці норми є критерієм для перевірки конструкції апаратури у процесі її типових випробувань (табл. 3.6).

Таблиця 3.6. Основні чинники навколишнього середовища, що враховують у процесі розроблення АРІ

Чинники і їх параметри	Режим випробування для кожної групи		
	Наземна	Корабельна	Авіаційна
Вібрація: частота, Гц; прискорення, (g)	10-70 1-4	0-120 1,5-2	5-2000 до 20
Ударні струси: прискорення, (g); тривалість, мс	10-15 5-10	1-5 5-10	6-12 до 15
Одиночні удари: прискорення, (g). Тривалість, мс	50-1000 0,5-10	до 1000 0,5-2	
Температура максимальна: робоча, К. гранична, К	323 333	303-333 338	333-473 353-523
Температура мінімальна: робоча, К гранична, К	233 223	233 223	213 213
Вологість відносна: насиченість, % температура, К	80-93 213	98-100 308-323	93-100 320-330
Акустичні шуми: рівень, дБ. частота, Гц	85-125 50-1000	75-140 50-1000	130-150 50-1000
Тиск атмосферний: максимальний, Па мінімальний, Па	10,6-104, 7-104	10,6-104 8,8-104	10,6-104 0,2-104
Лінійне прискорення: уповільнення, (g) відцентрове, (g)	2-4 2-5	–	4-6 4-10
Вігрове навантаження: робоче, м/с. граничне, м/с	до 50 до 70	до 50 до 70	–

Примітка. У зазначених межах величину дії змінюють залежно від ступеня жорсткості експлуатації для кожної групи апаратури (див. табл. 3.4).

3.5.3. Способи захисту апаратури від вібрації та ударів

Відомо, що в приладах, не захищених від вібрації і ударів, вузли, чутливі до динамічних перевантажень, виходять з ладу. Робити такі вузли настільки міцними, щоб вони безпосередньо витримували максимальні динамічні перевантаження, що виникають під час роботи, недоцільно, оскільки збільшення міцності призводить до збільшення маси, а внаслідок цього до неминучого зростання динамічних перевантажень. Тому вважають більш доцільним використовувати інші способи для зниження впливу перевантажень. Основним способом *ізоляції* АРІ від вібрації і ударів є розміщення її *на пружні опори*. Такими опорами є *гумові, метало-гумові або метало-пружинні амортизатори*.

Промисловість виготовляє для застосування в радіоелектронній апаратурі амортизатори різної конструкції та типорозміру. Найбільшого розповсюдження набули пластинчасті гумово-металеві амортизатори типів: АП (амортизатор з пружним елементом), АД (амортизатор з демпфіруванням), АФД (з фрикційним демпфіруванням).

Пружним елементом амортизатора АП є гумава шайба спеціальної форми. Пружним елементом амортизаторів типу АД є спіральна пружина, сконструйована так, що у разі збільшенні маси об'єкта її витки входять один в одного та осаджуються на опорну пластину й не беруть участі у подальшій роботі. Це призводить до збільшення жорсткості амортизатора, яку розраховують так, щоб частота власних коливань змінювалася незначно. Такі амортизатори називають *одночастотними*. Їх застосування дозволяє здійснювати амортизацію об'єктів різної маси із використанням невеликої кількості типорозмірів амортизаторів.

Один з недоліків амортизатора типу АД є залежність ступеня демпфірування від властивостей повітря. Цей недолік усунено в амортизаторах типу АФД використанням демпфера з сухим тертям. У цьому амортизаторі пружними елементами є конічні пружини, нижня з яких має більшу жорсткість. Профіль пружин розраховано так, що амортизатор є *одночастотним*.

Приклад амортизатора типу АД наведено на рис. 3.9

Залежно від робочої частоти, амортизатори є *низькочастотні, середньочастотні та високочастотні*. У низькочастотних амортизаторів частота власних коливань в навантаженому стані не перевищує 4 Гц, для середньочастотних – в межах (8...12) Гц і у високочастотних – в межах (20...30) Гц. Низькочастотні амортизатори ізолюють апаратуру від вібрацій з частотами в межах (5...600) Гц, середньочастотні – в межах (15...600) Гц і високочастотні – в межах (35...2000) Гц.

Між амортизаторами, що ізолюють апаратуру від вібрації, і амортизаторами, що ізолюють апаратуру від ударів, є істотна відмінність. Якщо перші (м'які опори) призначено для ізолювання від перевантаження коливальної системи, забезпечивши їй власну частоту нижче за частоту вимушених коливань, то другі (жорсткі опори) ізолюють систему, забезпечивши їй власну частоту вище за частоту вимушених коливань. Тому, для ізолювання від вібрації в більшості ви-

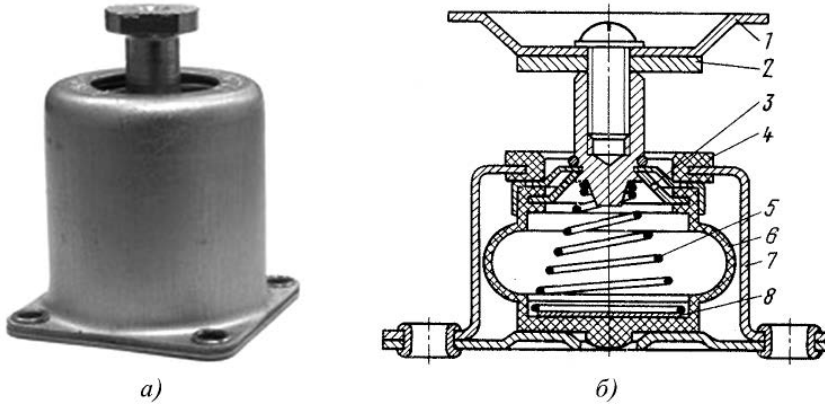


Рисунок 3.9. Амортизатор типу АД: *а* – зовнішній вигляд, *б* – переріз:
 1 – фрагмент корпусу пристрою; 2 – обмежувальна шайба; 3 – калібрований отвір;
 4 – гумовий фланець; 5 – пружина амортизатора; 6 – гумовий балон;
 7 – корпус амортизатора; 8 – опорна пластина

падків використовують середньочастотні амортизатори, тоді як для ізолювання від ударів використовують високочастотні амортизатори.

Проте на АРІ можуть *одночасно впливати і вібрації, і удари*. У таких випадках за умов порівняно слабкої вібрації і частих ударів використовують *протиударні амортизатори*. Якщо ж переважають вібрації з поодинокими ударами, використовують *віброізолювальні амортизатори*. Необхідно відзначити, що апаратура, захищена від вібрації, порівняно легко сприймає одиночні удари, тоді як захищена від ударів – не витримує вібрації. Цим пояснюється використання для амортизації переважно *віброізолювальних амортизаторів*.

У приладах, що мають невелику кількість вузлів (блоків), що потребують захисту від вібрації і ударів, доцільно амортизувати тільки ці вузли. В особливо складних випадках виникає необхідність амортизувати одночасно і прилади, і встановлені в них вузли.

Основними параметрами амортизаційної системи є: *частоти власних і вимушених коливань; максимальні амплітуди власних і вимушених коливань; жорсткість пружних опор; коефіцієнт демпфірування, коефіцієнт віброізоляції і коефіцієнт ефективності віброізоляції*.

Відношення частоти вимушених коливань f до власної резонансної частоти системи f_0 називають коефіцієнтом *розстроювання* $\gamma = f / f_0$.

Коефіцієнт віброізоляції η характеризує у скільки разів переміщення об'єкта $z_{об}$ або його перевантаження $G_{об}$ менше амплітуди переміщення A_0 основи, на якій розташовано об'єкт або її перевантаження G_0 , $\eta = z_{об} / A_0 = G_{об} / G_0$. Іншим показником, що характеризує якість віброізоляції, є коефіцієнт *ефективності віброізоляції* $E = (1 - \eta) \cdot 100\%$.

Якщо $\gamma = 1$, то виникає *резонансна вібрація* закріпленого на амортизаторах пристрою. Проте, внаслідок демпфірування амплітуда коливань закріпленого

на амортизаторах об'єкта не перевищує амплітуду коливання основи більше ніж у 5...10 разів. Чим більше демпфірування, тим менша амплітуда вимушених коливань закріпленого об'єкта.

Амортизаційні пристрої для АРІ слід конструювати з урахуванням таких вимог:

- забезпечувати можливість швидкого демонтажу АРІ з місця установки;
- додаткові конструктивні елементи, обумовлені використанням амортизаторів, не повинні призводити до істотного збільшення габаритів та маси всього пристрою АРІ.

Амортизатори може бути закріплено безпосередньо до корпусу захищеного об'єкту, а може бути закріплено до спеціальної амортизаційної рами, на якій розміщують захищений об'єкт.

В окремих випадках на амортизаційну раму покладають додаткові функції, що не мають безпосереднього стосунку до амортизації, вона виконує функції коробки кабельних з'єднань (коли на одну амортизаційну раму встановлюють кілька невеликих блоків).

Для збільшення жорсткості амортизаційні рами роблять профільованими з тонкого листового матеріалу, отвори виконують розбортовуванням. Для зменшення ваги рами виготовляють з алюмінієвих сплавів типу АМц або Д-16. У деяких випадках застосовують листову холоднокатану сталь завтовшки 1...2 мм.

Застосування амортизаторів призводить до збільшення ваги і габаритів АРІ.

Для АРІ на супутниках і ракетах амортизатори не використовують, а стійкість до механічних впливів забезпечують механічною міцністю і жорсткістю конструкції. Такий підхід обумовлено тим, що АРІ на таких об'єктах зазнає одночасної дії великих лінійних навантажень і вібрації, а за таких умов амортизатори нормально функціонувати не можуть.

Застосуванням амортизаторів можна зменшити перевантаження на АРІ, проте *не можна нейтралізувати їх повністю*, тому слід пам'ятати про перевантаження, які діятимуть і на амортизовану АРІ.

3.6. Характеристики надійності апаратури реєстрації інформації

Поняття надійності. *Надійність* є одним з основних параметрів АРІ, що залежить як від *надійності окремих електронних компонентів, механічних функціональних вузлів та електричних з'єднань*, так і від прийнятих *схемотехнічних та конструкторських рішень*. *Вимоги до надійності АРІ завжди є дуже високими*. Це пов'язано з тим, що від правильної роботи АРІ залежать достовірність отриманих результатів вимірювань і оброблення даних тощо. Питанням забезпечення надійності АРІ слід приділяти особливу увагу на всіх етапах проектування і виробництва цієї апаратури.

Надійність – здатність АРІ *безвідмовно* забезпечувати задані технічними умовами параметри протягом *усього гарантованого терміну* роботи за умови

дотримання режимів експлуатації, правил технічного обслуговування, зберігання, транспортування. Надійність АРІ залежить від надійності усіх вузлів і деталей, з яких цю апаратуру складено.

Тривалість роботи АРІ до *граничного стану*, встановленого нормативно-технічною документацією, називають *ресурсом апаратури*.

Під час оцінювання надійності апаратури реєстрації інформації визначають низку важливих характеристик виробів таких, як *працездатність, довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність, відновлюваність* тощо.

Придатність апаратури до використання оцінюють її станом. Якщо АРІ в даний момент часу задовольняє всім вимогам до основних параметрів, що характеризують процес виконання основних функцій апаратури (реєстрація інформації із заданими параметрами), а також до другорядних параметрів, що характеризують зовнішній вигляд і зручність експлуатації, то такий стан називають *справним*.

Несправний стан – це стан АРІ, за якого апаратура не задовольняє у даний момент хоча б одну з вимог щодо основних та другорядних параметрів. Розрізняють несправності *основні* та *другорядні*. Другорядні несправності називають *дефектами*. Наприклад, наявність незначних вм'ятин або іржі на корпусі апаратури, вихід з ладу лампочок підсвічування не можуть перешкоджати експлуатації АРІ.

Працездатність – це стан виробу, за якого виріб здатен забезпечувати задані функції з параметрами, встановленими вимогами технічної документації.

Основними експлуатаційними властивостями виробів з огляду на забезпечення надійної роботи є такі: *безвідмовність, напрацювання, ремонтпридатність, довговічність і придатність до зберігання*.

Напрацювання – тривалість роботи виробу (або обсяг виконаної роботи), яку вимірюють часом, циклами, періодами тощо. У процесі експлуатації або випробування виробу залежно від його призначення розрізняють добове або місячне напрацювання, напрацювання до виходу з ладу, усереднене напрацювання до виходу з ладу, гарантійне напрацювання тощо. Добове й місячне напрацювання оцінюють часом (циклами, періодами), протягом якого виріб знаходився в робочому режимі впродовж доби або місяця.

Напрацювання до виходу з ладу – усереднене значення напрацювання виробу між відмовами. Якщо напрацювання подано в одиницях часу, тоді застосовують термін *середній час безвідмовної роботи*. Середнє напрацювання до першої відмови – це середнє значення напрацювання виробів у партії (фіксованої кількості виробів) до першої відмови. Для виробів, ремонт яких не передбачено, цей термін рівнозначний поняттю середнього напрацювання до виходу з ладу.

Гарантійне напрацювання – це напрацювання виробу, яке гарантоване виробником за умови виконання певних вимог щодо правил експлуатації, зберігання та транспортування. Термін гарантії зазначають у технічній документації або угодах між виробником і замовником.

Безвідмовністю називають властивість виробу зберігати працездатність протягом деякого напрацювання без вимушеного переривання роботи. Безвідмовність вимірюють в тих самих одиницях, що й напрацювання.

Ремонтпридатність – властивість АРІ, що полягає у можливості попередження, виявлення та усунення відмов і несправностей шляхом здійснення технічного обслуговування та ремонтів.

Довговічність – властивість АРІ зберігати працездатність до граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонтів. Граничний стан визначається *технічною непридатністю* АРІ до подальшої експлуатації через зниження ефективності функціонування або вимог техніки безпеки. Граничний стан обумовлюють у технічній документації на виріб.

Здатність до зберігання – властивість виробу зберігати експлуатаційні показники протягом заданого терміну зберігання й після нього.

Відмова – подія, обумовлена втратою (повною або частковою) пристроєм здатності функціонувати зі збереженням нормативних параметрів та характеристик. За характером зміни параметрів апаратури відмови поділяють на раптові і поступові.

Раптові відмови характеризуються миттєвою зміною одного або декількох параметрів апаратури і виникають внаслідок раптової зміни фізичного стану елементів, з яких складається АРІ (наприклад, обрив або коротке замикання ліній електричних з'єднань). Усунення раптової відмови здійснюють заміною ушкодженого елемента справним або його ремонтом.

Поступові (параметричні) відмови характеризуються зміною одного або кількох параметрів апаратури з плином часу. Такі відмови виникають у результаті поступової зміни параметрів окремих складових допоки значення одного з параметрів не вийде за межі значень, що визначають нормальне функціонування елементів. Зазначені зміни можуть бути наслідком старіння елементів, впливу зовнішнього середовища (коливань температури, вологості, тиску) або механічних впливів. Усунення поступової відмови здійснюють заміною, ремонтом, регулюванням параметрів елемента, що відмовив або компенсацією відповідного параметра зміною параметрів інших елементів.

Інтенсивність відмов – характеристика інтенсивності відмов у часі. Графічне зображення інтенсивності відмов у часі часто називають «крива життя виробу».

Розрізняють три види відмов:

– *зумовлені неявними помилками* в конструкторсько-технологічній документації і виробничими дефектами у процесі виготовлення виробу;

– *обумовлені старінням і зношуванням* електронних компонентів та конструкційних елементів;

– *обумовлені випадковими чинниками* різного походження.

За причинно-наслідковими зв'язками розрізняють відмови *незалежні*, що не пов'язані з іншими відмовами, і *залежні*.

За повторюваністю виникнення відмови розподіляють на *одноразові (збої)* і *багаторазові*.

Збій – одноразова відмова, що виникає випадково й не обумовлена виходом з ладу складових частин пристрою. Після відновлення робочого режиму пристрій продовжує нормальне функціонування. Багаторазова відмова проявляється як збій, що виникає через певні проміжки часу.

За наявністю зовнішніх ознак розрізняють *відмови явні*, такі, що мають зовнішні прояви, та *неявні (приховані)*, для виявлення яких потрібно зробити певні дії.

За причиною виникнення відмови поділяють на *конструкційні, виробничі та експлуатаційні*, спричинені порушенням установлених норм і правил під час конструювання, виробництва або експлуатації АРІ.

За характером усунення відмови поділяють на *стійкі* і *самоліквідні*. Сстійку відмову усувають заміною елементів (модуля, функціонального вузла), що вийшли з ладу. Самоліквідні відмови усуваються самі, але можуть виникнути повторно. Наприклад, відмови обумовлені не достатньою стабільністю напруги електроживлення. Появу збоїв може бути обумовлено зовнішніми і внутрішніми чинниками. Зовнішніми чинниками може бути коливання напруги електроживлення, вібрації, коливання температури. Спеціальними заходами (стабілізація електроживлення, амортизація, термостабілізація тощо) вплив цих чинників може бути значно зменшено. Внутрішніми чинниками можуть бути флуктуаційні коливання параметрів елементів, несинхронність роботи функціональних вузлів, внутрішні шуми і наводки.

Безвідмовність – це здатність виробів виконувати передбачені для них функції в повному обсязі протягом часу, визначеного в технічній документації. Безвідмовність характеризують *ймовірністю безвідмовної роботи* $P(t)$, *частотою відмов* $f(t)$, *інтенсивністю відмов* $\lambda(t)$, *усередненим напрацюванням до відмови* $T_{\text{ср}}$. Для оцінювання надійності АРІ застосовують також *ймовірність відмови* $q(t) = 1 - P(t)$.

Більшість показників надійності визначають на підставі *статистичних даних*, отриманих під час спеціальних випробувань або під час експлуатації.

Для визначення *ймовірності безвідмовної роботи* та *частоти* їх виникнення застосовують співвідношення

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (3.35)$$

$$f(t) = \frac{n(t)}{N \cdot t}, \quad (3.35a)$$

де N – початкова кількість виробів для випробувань, $n(t)$ – кількість виробів, у яких виникли відмови протягом часу випробувань t .

Частоту відмов можна також визначити із застосуванням ймовірності відмов

$$f(t) = \frac{[q(t + \Delta t) - q(t)]}{\Delta t}. \quad (3.36)$$

Здійснивши граничний перехід ($\Delta t \rightarrow 0$), можна записати $f(t) = dq(t)/dt$. Останнє співвідношення дозволяє визначити ймовірності відмов через частоту відмов

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (3.37)$$

Ймовірність безвідмовної роботи протягом певного часу t також можна подати як залежність від частоти відмов

$$P(t) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (3.38)$$

В окремих випадках для правильного планування кількості необхідних електронних засобів зручно користуватись такою характеристикою, як інтенсивність відмов.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – кількість відмов за одиницю часу, яка припадає на усереднену кількість обладнання, що функціонувало протягом досліджуваного інтервалу часу. Чисельно значення інтенсивності відмов визначають за формулою

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n_i}{N_{cp} \cdot \Delta t_i}, \quad (3.39)$$

де $\Delta n_i = N_i - N_{i+1}$ – кількість відмов за інтервал часу Δt_i , ($N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$) – усереднена кількість обладнання, що функціонувало протягом досліджуваного інтервалу часу, N_i та N_{i+1} – кількість виробів, що функціонували на початку і в кінці досліджуваного інтервалу часу відповідно.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t)$ є безпосередньо пов'язані

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (3.40)$$

Для системи з N однотипних пристроїв інтенсивність відмов становитиме

$$\lambda_N(t) = N \cdot \lambda(t). \quad (3.41)$$

Усереднений час напрацювання до відмови безпосередньо залежить від ймовірності безвідмовної роботи,

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt . \quad (3.42)$$

Усереднений час напрацювання до відмови можна також визначити за статистичними даними

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^m \Delta n_i t_{cp} / N_i , \quad (3.43)$$

де $m = t / \Delta t_{cp}$ – кількість досліджуваних інтервалів, $t_{cp} = (t_{i+1} + t_i) / 2$ – тривалість інтервалу часу від початку досліджень до середини досліджуваного інтервалу, $\Delta t_{cp} = (t_{i+1} + t_i) / 2$ – тривалість інтервалів досліджень, Δn_i – кількість відмов, що сталась протягом i -го досліджуваного інтервалу часу.

Для кращого розуміння порядку застосування наведених співвідношень розглянемо приклад розрахунку характеристик надійності.

Приклад. На початок функціонування у системі встановлено 20 не обслуговуваних датчиків. За перший рік вийшли з ладу 12 датчиків, а за другий – 8. Визначити ймовірність безвідмовної роботи P_1 , частоту відмов f_1 , інтенсивність відмов $\lambda(1)$ за перший рік експлуатації, та усереднене напрацювання до відмови T_{cp} .

$$\text{Розв'язання: } P_1 = \frac{20-12}{20} = 0,4; f_1 = \frac{12}{20 \cdot 1} = 0,6 \text{ [1/рік];}$$

$$\lambda(1) = \frac{20-8}{20+8} \cdot 1 = \frac{6}{7} \text{ [1/рік]; } T_{cp} = \sum_{i=1}^2 \frac{12 \cdot 0,5 + 8 \cdot 1,5}{20} = 0,9 \text{ [років].}$$

3.7. Забезпечення надійності АРІ резервуванням апаратних засобів

Резервування – спосіб підвищення надійності апаратури шляхом застосування в одному пристрої (системі) окрім основного функціонального вузла (пристрою) *одного* або *кількох додаткових*, що ідентичні з основним вузлом (пристроєм) і забезпечують виконання відповідних функцій у разі відмови основного вузла (пристрою). Є кілька різновидів резервування:

– *постійне* (резервні елементи під'єднано разом з основними й функціонують в тому ж режимі, що й основні, так зване, «гаряче резервування». У разі виходу з ладу основного елемента резервний забезпечує виконання усіх функцій основного);

– *резервування заміщенням* (резервний елемент під'єднаний так само, як і основний, але активізується в робочий режим після з'ясування, що основний елемент втратив працездатність, так зване, «холодне резервування»).

Надійність системи з резервуванням оцінюють за показником безвідмовної роботи. Якщо $P(t)$ – надійність пристрою (системи) без резервування, тоді

застосування паралельно з основними елементами (пристроями) резервних призводить до збільшення ймовірності безвідмовної роботи $P^p(t)$, яку визначають за співвідношенням

$$P^p(t) = 1 - [1 - P(t)]^{m+1}, \quad (3.44)$$

де m – кількість резервних елементів (пристроїв), під'єднаних паралельно основному.

Резервування забезпечує суттєве збільшення надійності пристрою або системи, проте в апаратурі реєстрації інформації його застосовують в особливих випадках, оскільки для реалізації системи з резервуванням необхідно використовувати спеціальні системи діагностики та комутації, що призводить до зростання вартості, складності і масогабаритних показників в цілому. Резервування застосовують у край відповідальних системах. Наприклад, резервування є обов'язковим у космічних системах, у багатьох військових системах тощо.

3.8. Запитання для самоконтролю

1. Поясніть, чим обумовлено різноманітність вимог до конструкції АРІ.
2. Які параметри характеризують нормальні кліматичні умови?
3. Які особливості навколишнього середовища слід враховувати для АРІ, розміщеній на літаку?
4. На підставі чого і яким чином здійснюють кліматичне маркування апаратури?
5. На які категорії розподілено місця розміщення електрообладнання?
6. Поясніть, що таке тепло- та холодостійкість обладнання.
7. Які способи тепловідведення застосовують для електронної апаратури?
8. Яким чином конструктор може обрати необхідну систему охолодження апаратури?
9. Поясніть, у чому полягає тепловідведення кондукцією?
10. Поясніть принципи моделювання та розрахунку процесу кондуктивного теплообміну.
11. Що таке тепловий опір і якими параметрами визначається?
12. Поясніть принципи конвективного теплообміну.
13. Поясніть особливості організації примусового конвективного тепловідведення.
14. Поясніть, яким чином вентилятор охолоджувальної системи впливає на термін її працездатності.
15. Яке співвідношення між електричною потужністю та тепловою енергією?
16. Що визначає ступінь чорноти випромінювальної поверхні і яких значень він набуває?

17. Поясніть, яким чином можна збільшити ефективність теплообміну випромінюванням.

18. Для чого і яким чином застосовують теплові екрани в системах охолодження електронної апаратури?

19. Які конструкції радіаторів застосовують в системах охолодження електронних елементів?

20. Яким чином забезпечують надійний тепловий контакт між радіатором і поверхнею охолоджуваного електронного елемента?

21. Які складові використовують для виготовлення термопасти?

22. Скільки ступенів жорсткості вологості визначено в міжнародних стандартах і чим вони відрізняються?

23. Як класифікують корпуси електронної апаратури і що означають індекси в цій класифікації?

24. Як і для чого здійснюють герметизацію корпусів електронних пристроїв?

25. Поясніть, для чого використовують захисні покриття в конструкціях електронних пристроїв?

26. Які види захисних покриттів застосовують в електронній апаратурі і які способи застосовують для їх нанесення на відповідні поверхні?

27. Яких механічних впливів може зазнавати електронна апаратура у процесі експлуатації і до яких наслідків вони можуть призводити?

28. Поясніть принципи формування математичної моделі для дослідження реакції конструкції на механічні впливи?

29. Поясніть, що таке добротність механічної системи і яким чином її враховують під час конструювання АРІ?

30. Опишіть способи ізоляції апаратури від вібрації та ударів.

31. Поясніть, що таке віброміцність та удароміцність електронної апаратури.

32. Поясніть, що таке перевантаження механічної системи та як захищають електронну апаратуру від його впливу?

33. Поясніть, чим вплив ударного навантаження відрізняється від вібраційного.

34. На скільки ступенів жорсткості розподілено ударні і вібраційні навантаження, якими характеристиками відрізняються ці ступені?

35. Наведіть основні параметри амортизаційних систем.

36. Яким умовам мають відповідати амортизаційні пристрої для АРІ?

37. Які типи амортизаторів слід застосовувати для протидії ударним навантаженням і які для протидії вібраційним?

38. Поясніть, що таке надійність апаратури реєстрації інформації.

39. Якими експлуатаційними характеристиками визначається надійність АРІ?

40. Що таке відмова? Які різновиди відмов мають місце у процесі експлуатації електронної апаратури?

41. Яким чином визначають ймовірність безвідмовної роботи апаратури?

42. Що таке збій? Які різновиди збоїв виникають під час роботи електронної апаратури?

43. Яким чином ймовірність безвідмовної роботи пов'язана з частотою відмов?

44. Які різновиди резервування застосовують для підвищення надійності апаратури?

45. Як можна прогнозувати ймовірність безвідмовної роботи пристрою (системи) у разі їх повного резервування?

Розділ 4. Друковані плати

В усіх сучасних пристроях, що здійснюють фіксацію, індикацію, передавання, приймання інформації, керування різноманітними об'єктами тощо використовують електричні схеми, реалізовані із застосуванням радіоелектронних компонентів. *Друковані плати* у більшості електронних пристроїв є *основним конструктивним* елементом, на якому розміщено електронні компоненти, що забезпечують функціонування цього пристрою.

Друкована плата (англ. *printed circuit board*, PCB, або *printed wiring board*, PWB) – пластина з діелектрика, на поверхні або в об'ємі якої сформовано електропровідні лінії зв'язку електронної схеми. Друковану плату призначено для електричного і механічного з'єднання різних електронних компонентів. Відповідні контактні виводи електронних компонентів з'єднують на друкованій платі з елементами провідного рисунка зазвичай паянням.

Технологія друкованих плат за час існування зазнала значного розвитку, що обумовлено зміною масогабаритних характеристик електронних компонентів, розширенням функціональних можливостей окремих електронних компонентів, появою нових конструкційних матеріалів, розширенням сфер застосування електронних засобів. На сьогодні в електронних пристроях і, зокрема, в апаратурі реєстрації інформації, застосовують друковані плати, виготовлені *за різними технологіями*, що суттєво відрізняються параметрами та характеристиками. Для успішного конструювання АРІ необхідно знати *конструктивні параметри активних та пасивних компонентів*, що використовують для монтажу на друкованих платах, сучасні технології проектування друкованих плат, особливості конструктивних матеріалів та технології, які використовують для виготовлення друкованих плат.

4.1. Загальна характеристика друкованих плат

Про друковану плату говорять у вузькому та широкому розумінні. У вузькому розумінні – друкована плата є *основою для складання функціонального електронного вузла* і її вважають *окремою деталлю*. Друкована плата містить цілу низку окремих конструктивних елементів. У широкому розумінні друкована плата – це друкований вузол, який виготовлено шляхом монтажу навісних електронних компонентів на друкованій платі (деталі).

Терміни та визначення основних понять, що стосуються друкованих плат, встановлено ДСТУ 2646-94. Розглянемо основні з них:

друкований монтаж – спосіб монтажу, згідно з яким сполучення елементів електричного пристрою зроблено за допомогою друкованих провідників;

друкована плата – основа, на якій сформовано провідниковий рисунок, контактні площинки та необхідні отвори;

рисунок друкованої плати – зображення провідникового та (або) діелектричного матеріалів, отримане на друкованій платі із застосуванням певного технологічного циклу;

провідниковий рисунок – рисунок друкованої плати, утворений провідниковим матеріалом;

основа (друкованої плати) – діелектричний матеріал, на поверхні (рис. 4.1) або в об'ємі якого зроблено провідниковий рисунок;

однобічна друкована плата – друкована плата з провідниковим рисунком лише на одному боці;

товщина (друкованої плати) – товщина матеріалу основи друкованої плати, разом з товщиною провідникового рисунку;

друкований провідник – одна провідникова смужка, що з'єднує контактні місця схеми на провідниковому рисунку;

ширина друкованого провідника – поперечний розмір друкованого провідника на платі або кресленні;

контактна площинка – частина провідникового рисунку, з яким з'єднують контакт електронного компонента;

металізований отвір – отвір у друкованій платі з осадженим на стінках провідниковим матеріалом;

координатна сітка – сітка ліній, що визначає положення елементів рисунку друкованої плати у прямокутній або полярній системі координат;

вузол координатної сітки – точка перетину ліній координатної сітки;

крок координатної сітки – відстань між сусідніми лініями координатної сітки у лінійних або кутових одиницях.

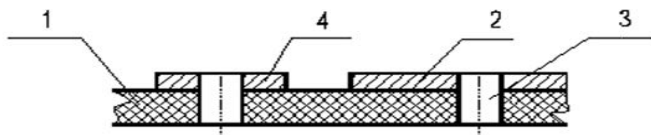


Рисунок 4.1. Фрагмент перерізу однобічної друкованої плати з основними елементами конструкції: 1 – основа плати; 2 – провідник; 3 – монтажний отвір; 4 – контактна площинка

У процесі проектування друкованої плати важливе значення мають такі додаткові елементи конструкції:

монтажний отвір – металізований або не металізований отвір, призначений для монтажу виводів навісних елементів;

кріпильний отвір – отвір, призначений для кріплення ДП або навісних елементів до ДП;

перехідний отвір – наскрізний отвір в одному або кількох шарах діелектрика основи друкованої плати, що забезпечує гальванічне з'єднання провідників, розташованих в різних провідникових шарах;

навісні елементи – електро- та радіокомпоненти (ЕРК), які встановлено на ДП і мають електричний контакт з друкованими провідниками;

сторона монтажу друкованої плати – це та сторона, на якій встановлюють навісні елементи;

вільні місця – ділянки поверхні друкованої плати, що залишились вільними після прокладання провідників та розміщення ЕРК;

вузькі місця – ділянки поверхні ДП, де ширина провідників, відстані між ними і контактними площинками менше рекомендованих (аж до мінімально допустимих).

Застосування друкованого монтажу в радіоапаратурі підвищує її надійність і забезпечує повторюваність експлуатаційних параметрів однакових виробів, сприяє механізації і автоматизації виробничих процесів.

4.2. Характеристика процесу проектування і конструювання друкованих плат

Проектування і конструювання ДП необхідно розглядати як процес, в основу якого покладено проект принципової схеми. У процесі проектування і конструювання можна виділити такі етапи:

- *конструктивно-технологічне визначення основних параметрів ДП;*
- *компонування;*
- *топологічне проектування;*
- *виготовлення комплекту документації.*

Визначення основних параметрів стосується типу і розмірів ДП, її усередненого ступеня складності, вибору способу топологічного проектування, методів виготовлення оригіналу рисунка ДП, процесів монтажу навісних елементів на друкованих платах безпосередньо і в панелі.

Етап компонентування складається з визначення *розмірів ДП* з урахуванням отворів і пазів уздовж зовнішнього контуру, вибір конструктивних матеріалів, товщини шарів міді, захисних покриттів, маркування та методів нанесення шарів для багатошарової ДП. Компонування рисунка ДП пов'язане з визначенням розмірів провідників і зазорів між ними, розміщенням елементів рисунка ДП.

Топологічне проектування складається з *розміщення навісних елементів, прокладання провідників (трасування)* і перевірки результатів проектування.

Крім електричних і механічних вимог, специфічних для електронної апаратури, під час здійснення проектних та конструкторських робіт необхідно звертати увагу на:

- *економічність* проектування;
- можливість забезпечити *необхідну точність* у процесі виготовлення оригіналу рисунка ДП;
- застосування *обов'язкових нормалей* на конструювання;
- *вартість виготовлення* і подальшого застосування ДП;
- *випробування ДП* і функціональних вузлів;
- *ремонтпридатність*.

Зазначені параметри є найбільш важливими, якщо необхідно визначити розміри функціонального блоку або пристрою, спираючись на оптимально спроектовані ДП. У разі створення універсальних типових конструкцій ДП су-

часні комп'ютерні засоби проектування дають змогу конструкторам швидко та якісно розробити кілька варіантів ДП різних розмірів.

Проектування і конструювання слід здійснювати *комплексно*, аналізуючи на кожному етапі усі параметри, що впливають на конструкцію та технологічні процеси. Для цього необхідно, щоб розробники і конструктори ДП мали достатні знання у сфері *топологічного проектування*, технології виготовлення оригіналу і *фотошаблону*.

У процесі конструювання важливе місце посідає конструювання типових ДП. За результатами аналізу типу виробу і розміру серії його виробництва, числа різних типів ДП в одному приладі і загальних витрат на проектування, а також функціональних та конструктивних вимог, необхідно встановити, чи можна використовувати *типові* ДП. Типові ДП – це плати, призначені для установаження і монтажу навісних елементів або для електричного з'єднання функціональних вузлів (об'єднувальні панелі), для яких передбачено максимально можливу кількість однакових конструктивних деталей, з яких завдяки альтернативній конфігурації провідників можна формувати усі вузли, блоки, прилади або системи приладів. Однаковими конструктивними *характеристиками типових ДП* є, наприклад:

- *габаритні розміри*;
- *конструкція і розміщення навісних елементів*;
- *забезпечення контактних з'єднань* навісних елементів;
- *елементи рисунка ДП*;
- *процес монтажу* функціональних вузлів;
- *базові і монтажні отвори*;
- *навантаження на контакт*;
- *формування шарів* друкованої плати;
- *шари для електромагнітного екранування*.

Типові ДП застосовують в електронних системах оброблення інформації, пристроях управління і регулювання, в системах обчислювальної техніки та інших численних електронних приладах. Їх впровадження дозволяє отримати *суттєву економію*:

- під час конструювання й виготовлення приладів – внаслідок використання *однотипних складальних одиниць* та деталей;
- на етапі *топологічного проектування* – завдяки *економному застосуванню* машинних методів проектування;
- на етапі конструювання – внаслідок *одноразового виготовлення* та *застосування уніфікованої* конструкторської та технологічної документації;
- у процесі виготовлення оригіналу рисунка ДП – внаслідок можливості *застосувати економні методи*;
- на етапах виготовлення та випробування ДП – внаслідок *менших витрат на технологічну оснастку* та випробування обладнання;
- у процесі виготовлення і випробування функціональних вузлів;
- під час *технічного обслуговування* приладів.

На відміну від типових ДП *нетипові плати* застосовують головним чином у побутовій електронній апаратурі, електронних приладах *невеликих габаритів*, для яких передбачено великі обсяги виробництва, *вкрай мініатюрних пристроях*, у разі приєднання елементів управління і особливих елементів (наприклад, реле, двигунів) до друкованої плати, у разі формування на їх основі спеціальних функціональних вузлів.

Ступінь складності друкованої плати значною мірою впливає на вартість ДП. Більш високий ступінь складності ДП обумовлює необхідність використання більш дорогого обладнання, а також більших виробничих витрат, що призводить до зростання вартості виробів в цілому.

Друковані плати можуть містити різну кількість площин, в яких сформовано друковані провідники. Залежно від числа провідникових шарів плати бувають:

а) *однобічні* друковані плати (ОБДП);

б) *двобічні* друковані плати (ДБДП):

1) без металізації отворів;

2) з металізацією отворів;

в) *багатошарові* друковані плати (БШДП).

Залежно від загальної складності електричної схеми і якісних вимог розробник має визначити кількість шарів друкованої плати. Для сучасних цифрових електронних функціональних вузлів з високими тактовими частотами застосовують *багатошарові друковані плати* (щонайменше чотиришарові). У таких платах один внутрішній провідниковий шар є спільною шиною, а другий внутрішній шар є шаром провідників напруг електроживлення. Така конструкція плати забезпечує малий рівень електромагнітної емісії (наведення, або індукції у ближній зоні та випромінювання – у дальній) і малі значення перехресних завад між сигнальними лініями.

Вартість однобічних плат складає 10...20% від вартості двобічних плат, що робить їх цілком конкурентними, особливо у сфері побутової електроніки. Приклад однобічної друкованої плати наведено на рис. 4.2.

Типові геометричні параметри ОБДП:

– максимальні розміри заготовки – 400 мм x 330 мм;

– мінімальний діаметр отвору – 0,6 мм;

– мінімальна ширина провідника – 0,15 мм;

– мінімальний проміжок між доріжками – 0,15 мм;

– товщина фольги – 36 мкм;

– товщина плати – 0,4...1,6 мм.

Відносно нескладні електронні схеми реалізують на однобічній платі з використанням дешевих фольгованих матеріалів, але часто необхідно застосовувати багато перемичок, що робить ці плати схожими на двобічні плати. Перемичка – це з'єднання між друкованими провідниками, реалізоване із застосуванням додаткового провідника в ізоляційній оболонці. Такий спосіб виготовлення друкованої плати може бути рекомендовано тільки для низькочастотних схем (робочі частоти менше 1МГц).

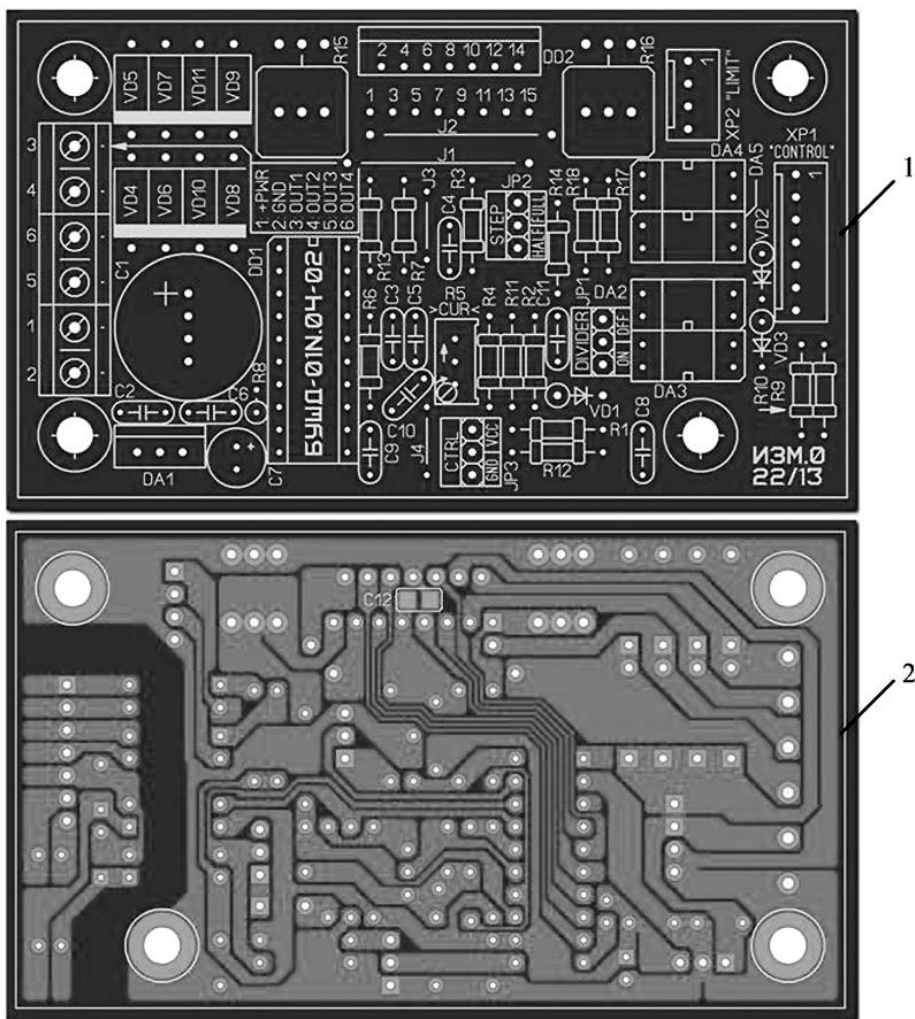


Рисунок 4.2. Зовнішній вигляд одnobічної друкованої плати:

1 – сторона монтажу, 2 – сторона паяння

Двобічна друкована плата має кращі порівняно з одnobічними платами показники. Сигнальні лінії та лінії електроживлення на таких платах прокладають з обох боків. Двобічні друковані плати забезпечують реалізацію більш складних порівняно з одnobічними платами функціональних вузлів, електричні схеми яких характеризуються великою кількістю міжелементних зв'язків.

Двобічні плати складають значну частку загального світового обсягу виробництва друкованих плат. Таку увагу розробників до цього виду плат можна пояснити своєрідним компромісом між їх відносно малою вартістю і достатньо високими можливостями. Приклад двобічної друкованої плати наведено на рис. 4.3.

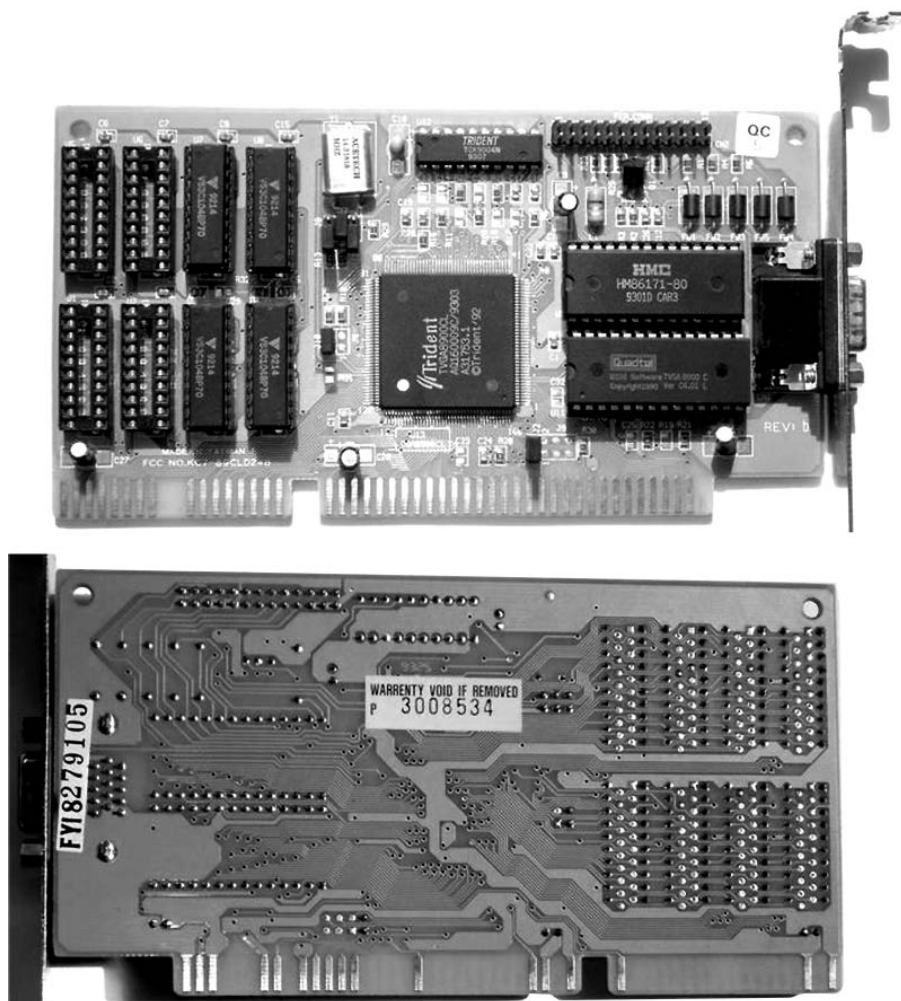


Рисунок 4.3. Зовнішній вигляд друкованого функціонального вузла з використанням двобічної друкованої плати

Технологічний процес виготовлення двобічних та однобічних плат складається з багатьох однакових операцій. Ці операції більш узагальнено можна вважати як складові процесу виготовлення багатошарових друкованих плат.

Для більшості двобічних плат проектні норми «провідник/проміжок» складають 0,25/0,25 мм (плати з такою нормою становлять 40% від загального обсягу виробництва), 0,2/0,2 мм (18%) і 0,15/0,15 мм (18%). Гнучкість технологічних вимог дозволяє використовувати таку плату для виготовлення широкого кола сучасних виробів. Монтаж електрорадіокомпонентів (ЕРК) на таких платах можна здійснювати установленням контактних виводів у монтажні отвори або із застосуванням технології поверхневого монтажу.

Типові параметри двобічних плат:

- максимальні розміри заготовки – 300 мм x 250 мм, в окремих випадках 500 мм x 500 мм або навіть більше;
- мінімальний діаметр отвору – 0,4...0,6 мм;
- мінімальна ширина провідника – 0,15 мм;
- мінімальний проміжок між провідниками – 0,15 мм;
- товщина фольги – 18..36 мкм;
- товщина плати – 0,4...2,0 мм.

Двобічна друкована плата, не завжди може задовольнити вимогам стосовно рівня електромагнітного випромінювання та стійкості до зовнішніх завад особливо для малосигнальних та високочастотних схем.

Для багатьох сучасних пристроїв лише багатошарова друкована плата (БШДП) може задовольнити високі вимоги до конструкції. Багатошарові друковані плати складають дві третини світового виробництва друкованих плат в ціновому численні, хоча кількісно поступаються одно- і двобічним платам.

Конструктивно БШДП значно складніші за двосторонні плати. Вони містять додаткові екранні шари (спільна шина і живлення), а також можуть містити кілька внутрішніх сигнальних шарів. На рис.4.4 схематично наведено фрагмент перерізу багатошарової друкованої плати.

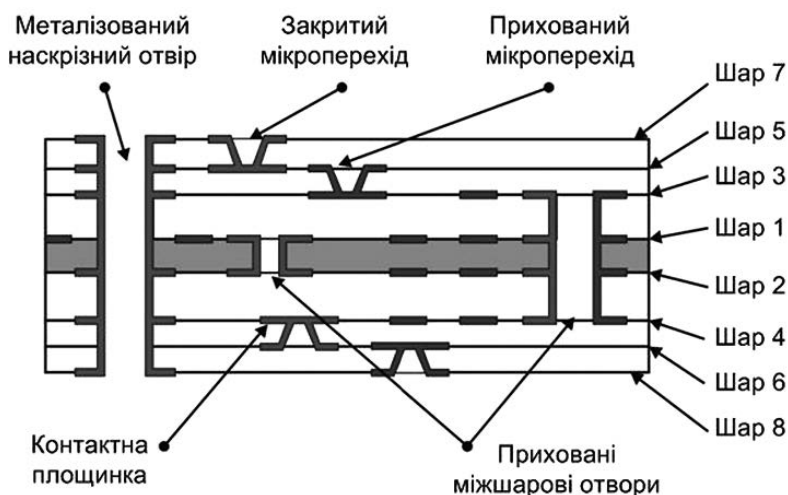


Рисунок 4.4. Елементи конструкції багатошарової друкованої плати

Для забезпечення комутації між шарами БШДП застосовують міжшарові переходи (*vias*) і мікропереходи (*microvias*).

Міжшарові переходи роблять з використанням наскрізних металізованих отворів, що об'єднують фрагменти друкованих провідників зовнішніх та внутрішніх шарів у лінії електричних зв'язків відповідно до принципової схеми. Застосовують наскрізні, закриті та приховані міжшарові переходи.

Закритий перехід – це сполучний металізований канал, видимий тільки з верхньої або нижньої сторони плати. *Приховані переходи* використовують для з'єднання провідників внутрішніх шарів плати. Їх застосування дає змогу значно спростити трасування плати. Наприклад, 12-шарову конструкцію БШДП можна звести до еквівалентної 8-шарової.

Спеціально для поверхневого монтажу розроблено мікропереходи, що з'єднують між собою контактні площинки та сигнальні шари, рис. 4.5.

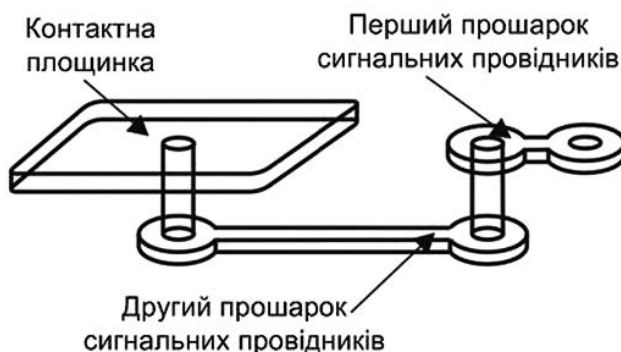


Рисунок 4.5. Схематичне зображення внутрішнього міжшарового мікропереходу

Для виготовлення БШДП застосовують пошарове з'єднання кількох ламінованих фольгою діелектриків. З'єднання здійснюють із застосуванням спеціальних клейових прокладок, які називають *препреги*.

У разі використання багатьох шарів можуть виникнути складнощі з металізацією наскрізних отворів малого діаметра. Проте, навіть враховуючи такі труднощі, вважають за краще досягати високої щільності монтажу за рахунок більшого числа відносно дешевих шарів, ніж меншим числом високощільних, але, відповідно, дорожчих внутрішніх шарів. Як приклад, одну із можливих структур багатошарової плати наведено на рис. 4.6.

У сучасному виробництві використовують *кілька технологій* виготовлення БШДП, що обумовлює відмінності в їх структурі. Більш детально це питання пояснено нижче.

Основним видом монтажу ЕРК на сучасних БШДП є *поверхневий монтаж*. На платах монтують як *корпусні* мікросхеми, так і *безкорпусні*, які після розпаювання контактних з'єднань *заливають компаундом*.

Порівняльну характеристику ОБДП, ДБДП та БШДП наведено в табл. 4.1.

У процесі розроблення конструкції виробу слід прагнути обмеженої кількості типорозмірів плат. Для практичного виконання даного положення організаціям-розробникам необхідно періодично систематизувати використовувані розміри плат і після відповідного аналізу за допомогою головної корпоративної організації зі стандартизації вживати заходи до скорочення кількості типорозмірів.

МАТЕРІАЛ	ТОВЩИНА
Мідна фольга	0,017
Препрег	0,19+/-0,02
Мідна фольга	0,035
Склотекстоліт	0,51+/-0,05
Мідна фольга	0,035
Препрег	0,36+/-0,03
Мідна фольга	0,035
Склотекстоліт	0,51+/-0,05
Мідна фольга	0,035
Препрег	0,36+/-0,03
Мідна фольга	0,035
Склотекстоліт	0,51+/-0,05
Мідна фольга	0,035
Препрег	0,19+/-0,02
Мідна фольга	0,017

Рисунок 4.6. Структура БШДП, що містить 8 провідникових шарів

Друковані плати рекомендовано робити прямокутної форми. Конфігурацію плат, відмінну від прямокутної, слід використовувати тільки за необхідності.

Максимальний розмір сторони друкованої плати, як одношарової, так і багатшарової, не повинен перевищувати 500 мм. Це обмеження визначається вимогами міцності і щільності монтажу. За щільністю розміщення друкованого монтажу плати поділяють на два класи: *клас А* – плати з *нормальною щільністю* монтажу і *клас Б* – плати зі *збільшеною щільністю монтажу*. Щільність монтажу визначають на підставі мінімальної ширини провідників і відстані між ними. Ці параметри однакові і залежать від методу виготовлення: 0,5...0,8 мм – для плат класу А і 0,2...0,4 мм – для плат класу Б.

Для уніфікації і зручності процесу виробництва рекомендовано дотримуватись певного *співвідношення сторін* друкованих плат: 1:1; 1:2; 2:3; 2:5.

Можливе застосування плат більших габаритів і з іншим співвідношенням сторін у технічно обґрунтованих випадках, за узгодженням з відділом головної технології підприємства-виробника друкованих плат.

Плати всіх розмірів рекомендують робити з щільністю монтажу, відповідно *класу А*.

Щільність монтажу, відповідну *класу Б*, слід використовувати на малогабаритних платах (до 120x180 мм).

У технічно обґрунтованих випадках припустимим є застосовувати щільність монтажу *класу Б* для середньогабаритних плат (до 200 мм x 240 мм).

Великогабаритні плати (до 240 мм x 360 мм) слід робити тільки за *класом А*. Рекомендовано конструювати плати завтовшки 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм. Можливо використовувати проміжну до зазначених вище товщину.

Рекомендовано такі *граничні відхилення* товщини плати:

- $\pm 0,15$ мм – у разі товщини до 1 мм, разом з граничним значенням;
- $\pm 0,20$ мм – у разі товщини плати від 1 до 2 мм, разом з граничним значенням;
- $\pm 0,30$ мм – у разі товщини плати від 2 до 3 мм, разом з граничним значенням.

Значення відхилень може бути змінено за узгодженням з відділом головного технолога підприємства-розробника друкованих плат.

Таблиця 4.1. Порівняльні характеристики друкованих плат

	ОБДП	ДБДП без металізованих отворів	ДБДП з металізованими отворами	БШДП
Переваги	Висока точність в отриманні елементів друкованого малюнка; відсутність металізованих отворів; можливість монтажу елементів у металевому корпусі без прокладки; мала вартість друкованої плати (найменша).	Вища комутаційна спроможність і менші розміри; порівняно низька вартість.	Висока міцність кріплення виводів елементів друкованої плати; висока комутаційна спроможність; менші габарити.	Найбільша комутаційна спроможність; найменші габарити.
Недоліки	Найнижча комутаційна здатність; найбільші габаритні розміри; невисока міцність кріплення компонентів в монтажних отворах.	П'яти виводи необхідно з двох сторін.	Значне ускладнення технології виготовлення; підвищена вартість.	Найскладніша технологія виготовлення; найвища вартість; практично повна непридатність до ремонту.

Точність виготовлення друкованих плат залежить від комплексу технологічних характеристик і з практичних міркувань визначає основні параметри елементів друкованої плати. У першу чергу це стосується мінімальної ширини провідників, мінімального проміжку між елементами провідникового рисунка і низки інших параметрів.

У міждержавному стандарті (ГОСТ 23751-86), що на тепер є чинним в Україні, передбачено *п'ять класів точності* друкованих плат, і в конструкторській документації на друковану плату має бути вказано відповідний клас, що обумовлює певний необхідний *рівень технологічного оснащення* виробництва, табл. 4.2. Тому, вибір класу точності завжди пов'язаний з конкретним виробництвом. Спроба вирішити це завдання у зворотному порядку може призвести до того, що проект не буде реалізовано.

Таблиця 4.2. Основні конструктивні параметри плат різних класів точності

Умовне позначення	Номінальне значення основних параметрів для класу точності				
	1	2	3	4	5
t , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
S , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
b , мм	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
f	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

У таблиці застосовано такі позначення:

t – ширина друкованого провідника;

S – відстань між краями сусідніх елементів провідникового рисунка;

b – ширина гарантійної смужки;

f – відношення номінального значення діаметра найменшого з металізованих отворів до товщини друкованої плати.

Зображення елементів друкованої плати наведено на рис. 4.7.

Друковані плати 3-го класу точності – найбільш поширені, оскільки, з одного боку, забезпечують досить високу щільність трасування і монтажу, а з іншого – для їх виробництва потрібне звичайне, хоча і спеціалізоване, обладнання.

Друковані плати 4-го класу точності виготовляють на високоточному обладнанні, але вимоги до матеріалів, устаткування і приміщень нижче, ніж для п'ятого класу.

Виготовлення друкованих плат 5-го класу точності вимагає застосування унікального високоточного обладнання, спеціальних (зазвичай, дорогих) матеріалів, безусадкової фотоплівки і навіть створення у виробничих приміщеннях «чистої зони» із забезпеченням постійного теплового режиму. У той же час друковані плати п'ятого класу невеликого розміру можна виготовити на обладнанні, яке забезпечує виготовлення плат четвертого класу. Комплексно вирішити усі зазначені проблеми можна тільки на спеціалізованому виробництві.

Виготовлення друкованих плат 2-го і 1-го класів здійснюють на звичайному обладнанні, а іноді навіть на обладнанні, не призначеному для виготовлення друкованих плат. Такі друковані плати з невисокими конструктивними параметрами призначено для недорогих пристроїв з малою щільністю монтажу. До цього класу належать друковані плати аматорського і макетного рівня, часто одиничного або дрібносерійного виробництва.

У країнах ЄС використовують іншу класифікацію друкованих плат за рівнем точності, табл. 4.3. Відповідно до цієї класифікації регламентують не лише конструктивні параметри, але і крок трасування, що фактично пов'язує рівень виробництва з параметрами друкованих плат і ступенем інтеграції елементної бази.

Таблиця 4.3. Вимоги до точності конструктивних елементів друкованих плат за класифікацією ЄС

Рівень	Ширина провідника, проміжку	Крок трасування		Крок виводів	
		Зовнішні шари	Внутрішні прошарки	Планарні	Матричні
0	0,2	1,25	0,625	0,625	2,5
1	0,15	0,625	0,625	0,5	1,25
2	0,1	0,625	1	0,5	1
3	0,075	0,5	1	0,5	1
4	0,05	0,5	0,5	0,25	0,5
5	0,05	0,25	0,25	0,25	0,25

4.3. Вимоги до конструктивних елементів друкованих плат

Товщину друкованої плати слід вибирати з урахуванням методу виготовлення, на підставі механічних вимог, які визначено для конструкції друкованого вузла. Товщину плати *забезпечують*:

– для одно- і двосторонніх плат підбором матеріалу за відповідними технічними умовами і стандартами;

– для багатошарових друкованих плат – підбором товщини матеріалів друкованих шарів і товщини клейових прокладок. Сумарну товщину клейових прокладок рекомендовано робити не менше подвійної товщини провідників, розташованих на внутрішніх прошарках.

Центри монтажних і перехідних отворів треба розташовувати у вузлах координатної сітки.

Центри отворів під виводи багатоконтактних навісних елементів, виводи яких не підлягають додатковому формуванню і не кратні кроку координатної сітки, розташовувати за такими правилами:

– якщо в конструкції навісного елемента є два або більше виводів, відстані між якими кратні кроку координатної сітки, то центри отворів під ці виводи обов'язково розташовувати у вузлах сітки, а центри отворів для решти виводів розташовувати згідно кресленню на даний елемент;

– якщо в конструкції елемента немає виводів, відстані між якими кратні кроку координатної сітки, то у вузлі сітки розташовувати центр одного з отворів, прийнятого за основний, а центр одного з решти отворів розташовувати на вертикальній або горизонтальній лінії координатної сітки.

Розташування, розміри і конфігурацію *кріпильних і інших* конструктивних отворів, наприклад, під корпуси навісних елементів, слід вибирати залежно від вимог конструкції. Центри кріпильних отворів рекомендовано розташовувати у вузлах координатної сітки. Як виняток, у разі компоновки складних електронних вузлів, за умов наявності спеціальних вимог, допускають розміщення окремих отворів під виводи навісних елементів не у вузлах координатної сітки.

Застосування різних діаметрів отворів в одній друкованій платі слід обмежувати. Не рекомендують застосовувати більше трьох різних діаметрів монтажних і перехідних отворів.

Діаметри монтажних і перехідних отворів слід вибирати згідно таких рекомендацій:

– не металізовані отвори – залежно від діаметрів виводів навісних елементів, що встановлюють у ці отвори;

– металізовані отвори – залежно від діаметрів виводів навісних елементів і товщини плати, в якій роблять отвори. У технічно обґрунтованих випадках можливе застосування отворів інших діаметрів.

Допуски на оброблення отворів:

– +0,10 мм – для отворів діаметром до 0,8 мм;

– +0,12 мм – для отворів діаметром від 1,0 мм;

– +0,20 мм – для зенкування металізованих отворів усіх діаметрів.

Відстань між центрами отворів на друкованих платах необхідно витримувати з допуском $\pm 0,2$ мм, за винятком відстаней між центрами взаємозв'язаних отворів під виводи навісних елементів з великою кількістю виводів, а також спеціальних отворів в окремих шарах плат, що виготовляють методом «виводів назавні», допуски для яких слід обумовлювати окремо.

Для багатошарових і складних плат *класу Б* рекомендують використовувати допуск $\pm 0,1$ мм.

Отвори на платі слід розташовувати так, щоб відстань між краями отворів (без урахування зенкування) була не менше товщина плати.

Для металізованих отворів на одно- і двобічних платах, а також отворів на зовнішніх шарах багатошарової плати, необхідно передбачати контактні площинки. На внутрішніх шарах (за їх наявності) контактні площинки мають бути для тих отворів, які пов'язані з ними електрично.

Допускають наявність *контактних площинок* на внутрішніх шарах навколо металізованих отворів, електрично не пов'язаних з цими шарами.

Металізовані отвори всіх видів, а також не металізовані монтажні отвори слід розташовувати в зоні контактної площинки.

Контактні площинки можуть мати довільну форму і бути сформованими у вільну від провідників сторону. Контактні площинки рекомендовано робити прямокутної або близької до неї форми.

На одно- і двобічних платах і на всіх шарах багатошарових плат слід витримувати відстань між краєм провідника, контактної площинки, екрану і краєм плати, а також краєм не металізованого отвору, паза, вирізу тощо, що дорівнює товщині плати, з урахуванням допуску на габарит плати.

Друковані провідники треба робити однакової ширини по всій довжині. Для проходження вузького місця допускають звуження провідника до мінімально допустимих значень його ширини. Довжина такої ділянки має бути мінімальною.

У разі прокладання провідника шириною 0,3...0,4 мм великої довжини рекомендовано через 25...30 мм передбачати перехідні отвори або місцеве

розширення провідника на кшталт контактної площинки, розмірами не менше 1x1 мм або з іншим співвідношенням сторін, але зі збереженням площі розширеного фрагмента. Ці додаткові елементи призначено для більш надійного кріплення провідникової доріжки до поверхні діелектричної основи.

Перетин провідників усувають переходом на іншу сторону плати за допомогою монтажного або перехідного отвору. Для плат з насиченим монтажем можливе застосування як металізованих, так і не металізованих отворів-перемичок, які слід з'єднувати за тими ж правилами, що і навісні елементи.

Провідники завширшки понад 5 мм рекомендовано робити згідно правил формування екранів. Екрани як зовнішніх, так і внутрішніх шарів слід робити з *вирізами*. Екрани без вирізів допускають тільки на зовнішніх шарах за узгодженням з відділом головного технолога підприємства-виробника. *Вирізи* в екранах можуть бути як *шпарини* прямокутної форми, форми овалу, круга або «сітки». Форму вирізів визначає конструктор і зазначає на кресленні. Зазначена структура екранів забезпечує рівномірний розподіл тепла по поверхні плати під час нанесення технологічних покриттів та монтажу електронних компонентів паянням.

У процесі розроблення друкованих плат необхідно робити *перевірочні розрахунки* стосовно можливості прокладання провідників на заданій відстані l_{\min} (відстань між центрами доріжок), визначення мінімальних значень діаметра контактної площинки та визначення повної товщини БШДП. На рис. 4.7 наведено параметри елементів друкованої плати, які враховують у процесі геометричних конструктивних розрахунків.

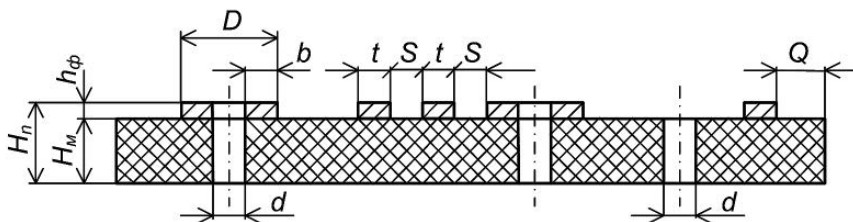


Рисунок 4.7. Параметри елементів друкованої плати: H_n – загальна товщина друкованої плати, H_m – товщина основи друкованої плати, h_ϕ – товщина фольги, b – гарантійна смужка, D – діаметр контактної площинки, d – діаметр отвору, S – ширина проміжку між сусідніми елементами провідникового рисунка, t – ширина друкованого провідника, Q – відстань від зовнішньої межі плати, вирізу або пазу до елемента провідного рисунку

Найменший номінальний розмір контактної площинки розраховують за формулою

$$D = (d + \Delta d_{\text{в.о.}}) + 2 \cdot b + \Delta t_{\text{в.о.}} + 2 \cdot \Delta d_{\text{мп}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{п.о.}}^2), \quad (4.1)$$

де $\Delta d_{\text{в.о.}}$ – верхнє граничне відхилення діаметра отвору від номінального значення, $\Delta t_{\text{в.о.}}$ – верхнє граничне відхилення діаметра контактної площинки від номінального значення, $\Delta d_{\text{мп}}$ – величина підтравлювання діелектрика в отворі, що дорівнює 0,03 мм для ОБДП, а для ДБДП та БШДП та гнучких друкованих плат – нулю, $\Delta t_{\text{п.о.}}$ – нижнє граничне відхилення діаметра контактної площинки, T_D – значення позиційного допуску розташування центрів контактних площинок, мм, T_d – значення позиційного допуску розташування осей отворів, мм.

Найменшу номінальну ширину зони на поверхні провідникового шару l для прокладання кількох (n) друкованих провідників розраховують за формулою

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + t \cdot n + S \cdot (n + 1) + T_l, \quad (4.2)$$

де D_1, D_2 – діаметри сусідніх контактних площинок, n – кількість провідників, T_l – значення позиційного допуску друкованого провідника, мм.

Розрахункову товщину багат шарової друкованої плати рекомендовано оцінювати за формулою

$$H_{\text{п}} = \sum H_{\text{ш}} + (0,6 \div 0,9) \cdot \sum H_{\text{пр}}, \quad (4.3)$$

де $H_{\text{ш}}$ – товщина одного шару друкованої плати, $H_{\text{пр}}$ – товщина одного шару прокладки між шарами.

Нижче наведено таблиці значень геометричних величин, що визначають критичні розміри елементів друкованої плати.

Мінімальне значення гарантійної смужки b наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Мінімальне значення гарантійної смужки

Умовне позначення	Мінімальне значення гарантійної смужки для класу точності				
	1	2	3	4	5
b , мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025

Граничні відхилення діаметрів монтажних отворів Δd наведено у табл. 4.5.

Граничні відхилення ширини Δt друкованого провідника, контактної площинки, кінцевого друкованого контакту, екрану для вузького місця визначаються значеннями, наведеними у табл. 4.6.

Значення позиційних допусків розташування осей отворів T_d у діаметральному значенні наведено в табл. 4.7.

Діаметральне значення позиційного допуску дорівнює подвоєному найбільшому допустимому значенню геометричного відхилення від номінального значення. Таке відхилення позначають літерою «Т».

Таблиця 4.5. Граничні відхилення діаметрів монтажних отворів

Діаметр отвору d , мм	Наявність металізації	Граничні відхилення діаметрів отворів Δd для класів точності				
		1	2	3	4	5
1 мм і менше	без металізації	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
	з металізацією без оплавлення	+0,05 -0,15	+0,05 -0,15	+0 -0,10	+0 -0,10	+0 -0,075
	з металізацією та з оплавленням	+0,05 -0,18	+0,05 -0,18	+0 -0,13	+0 -0,13	+0 -0,13
більше 1 мм	без металізації	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
	з металізацією без оплавлення	+0,10 -0,20	+0,10 -0,20	+0,05 -0,15	+0,05 -0,15	+0,05 -0,15
	з металізацією та з оплавленням	+0,10 -0,23	+0,10 -0,23	+0,05 -0,18	+0,05 -0,18	+0,05 -0,18

Таблиця 4.6. Граничні відхилення ширини друкованого провідника

Наявність металічного покриття	Граничне відхилення ширини друкованого провідника Δt , мм, для класу точності				
	1	2	3	4	5
Без покриття	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	+0 -0,03
З покриттям	+0,25 -0,20	+0,15 -0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$

Примітка. Можливо встановлювати інші значення граничних відхилень за умови дотримання стандартної величини допуску.

Таблиця 4.7. Значення позиційних допусків

Розмір друкованої плати вздовж більшої сторони	Значення позиційного допуску розташування осей отворів T_d , мм, для класу точності				
	1	2	3	4	5
180 мм та менше	0,20	0,15	0,08	0,05	0,05
більше 180, до 360 мм	0,25	0,20	0,10	0,08	0,08
більше 360 мм	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10

Позиційний допуск на розташування осей отворів, призначених для просторової фіксації або призначених для автоматизованого установлення навісних елементів, встановлено за *четвертим класом* точності, на розташування монтажних отворів – *не нижче третього класу* не залежно від складності плати.

Граничні відхилення відстані між центрами двох отворів друкованої плати визначають, як половину суми позиційних допусків розташування центрів цих отворів.

Значення позиційних допусків розташування центрів контактних площадок T_D у діаметральному значенні наведено у табл. 4.8.

Таблиця 4.8. Значення позиційних допусків розташування центрів контактних площинок

Тип друкованої плати	Розмір друкованої плати вздовж більшої сторони, мм	Значення позиційних допусків розташування центрів контактних площинок T_D , мм, для класу точності				
		1	2	3	4	5
ОБДП, ДБДП, ГДП, БШДП (зовнішній шар)	180 та менше	0,35	0,25	0,15	0,10	0,05
	більше 180, до 360	0,40	0,30	0,20	0,15	0,08
	більше 360	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
БШДП (внутрішній шар)	180 та менше	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10
	більше 180, до 360	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
	більше 360	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20

Значення позиційних допусків розташування центрів (осей) елементів провідникового рисунка відносно центру (осі) будь-якого іншого елемента провідникового рисунка T_l у діаметральному значенні наведено у табл. 4.9.

Таблиця 4.9. Значення позиційних допусків розташування центрів

Тип друкованої плати	Значення позиційного допуску розташування друкованого провідника T_l , мм, для класу точності				
	1	2	3	4	5
ОБДП, ДБДП, ГДП, БШДП (зовнішній шар)	0,20	0,10	0,05	0,05	0,02
БШДП (внутрішній шар)	0,3	0,15	0,10	0,08	0,05

4.4. Матеріали для виготовлення друкованих плат

4.4.1. Загальна характеристика матеріалів основи друкованих плат

Матеріали основи друкованих плат мають задовольняти різноманітним вимогам щодо їх електричних, хімічних та механічних властивостей. Для *цифрових плат* необхідно забезпечити можливість прокладати *багаторозрядні сигнальні шини*, для *надвисокочастотних* плат необхідно забезпечити *малі втрати енергії* під час поширення сигналів у межах друкованої плати, для *елементів з великим виділенням тепла* у процесі функціонування (наприклад, світлодіоди підвищеної яскравості) необхідно забезпечити інтенсивне *тепловідведення*, для обладнання, що функціонує за умов *підвищеної або* пониженої температури, *підвищеної вологості* необхідно забезпечити *надійність функціонування* за впливу цих чинників. Найбільш поширеними матеріалами є *склотекстоліти, гетинакси, фторопласти*.

Склотекстоліт – шаруватий пластик. Це – шаруватий листовий матеріал, що складається з кількох шарів *склотканини*, склеєних між собою методом га-

рячого пресування, з додаванням термореактивних епокси-фенольних сполук. Склотекстоліт листовий використовують як електроізоляційний матеріал у багатьох галузях промисловості. Склотекстоліт – екологічно чистий матеріал, характеризується високими діелектричними та механічними властивостями, тепло- та вологостійкістю, довговічністю.

Гетинакс – шаруватий пластик. Це – електроізоляційний шаруватий пресований матеріал, що має *паперову основу*, просочену *фенольною* або *епоксидною смолою*. В основному гетинакс використовують як основу заготовок друкованих плат. Матеріал має низьку механічну міцність, його легко обробляти і він є відносно дешевим. Гетинакс широко використовують для дешевого виготовлення плат низьковольтної побутової апаратури. У розігрітому стані цей матеріал можна ефективно штампувати, завдяки чому можна виготовити плату будь-якої форми разом з усіма отворами.

Текстоліт – електроізоляційний конструкційний матеріал, який застосовують для виробництва підшипників ковзання, шестерень та інших деталей, а також в електро- та радіотехніці. Текстоліт є шаруватим пластиком на основі *тканини з волокон із полімерною сполучною речовиною* (наприклад, бакеліту, поліефірної смоли, епоксидної смоли). Текстоліт на основі склотканини називають склотекстолітом або склопластиком. Листовий склотекстоліт, вкритий мідною фольгою (СФ), є поширеним матеріалом для виготовлення заготовок друкованих плат.

Фторопласт. У радіоелектронній апаратурі, до якої висувають різноманітні й досить високі вимоги, часто застосовують фторопласт-4, що є продуктом *полімеризації тетрафторетілену*. Друковані плати з цього матеріалу мають винятково високі діелектричні, механічні, фізико-механічні властивості і характеризуються великою нагрівостійкістю (до $+300^{\circ}\text{C}$), морозостійкістю (-70°C), вологостійкістю і стійкістю до дії багатьох агресивних середовищ. До недоліків його слід віднести текучість на холоді під навантаженням понад 30 кгс/см^2 , токсичність у разі нагрівання понад $300\dots 400^{\circ}\text{C}$ (за цієї температури виділяється фтор) і порівняно високу вартість.

Фольговані армовані фторопластові діелектрики (ФАФ). Листи фторопластові фольговані армовані ФАФ-4Д виготовляють шляхом пресування шарів склотканини і двостороннього облицьовування з мідної гальваностійкої електrolітичної фольги, завтовшки $0,035\text{ мм}$ або $0,05\text{ мм}$. Металізацію отворів в листах ФАФ-4Д роблять методом безпосередньої або хіміко-гальванічної металізації, під час якої заготовку витримують в розчині нафталін-натрію. Отвори для металізації можна отримати шляхом свердління або фрезерування, для чого використовують свердлильно-фрезерні верстати. Фольговані фторопластові діелектрики використовують для виготовлення основ високочастотних друкованих плат, а також для електричної ізоляції, призначеної для друкованих деталей приймально-передавальної апаратури.

Товщину листа фольгованого фторопластового діелектрика вимірюють разом з мідною фольгою на його поверхнях. Залежно від товщини листа ФАФ-4Д бувають трьох різновидів:

- від 0,1 мм до 0,2 мм;
- від 0,25 мм до 1,0 мм;
- від 1,5 мм до 5 мм.

Основними показниками якості фольгованого фторопластового діелектрика є стріла прогину і міцність зчеплення фольги. Показники стріли прогину безпосередньо залежать від товщини листа ФАФ-4Д, тоді як на міцність зчеплення фольги впливають умови експлуатації фольгованого фторопластового діелектрика:

- за нормальних умов цей показник ≥ 18 Н/см;
- за умов температурного нагріву і нормальної вологості ≥ 15 Н/см.

FR-4. Клас матеріалів під загальною назвою Fire Retardent – вогнетривкий) за класифікацією NEMA (National Electrical Manufacturers Association, USA), відомий у нас як «склотекстоліт» (СФ). Дані матеріали є найбільш поширеними для виробництва ДБДП, БШДП, а також ОБДП з підвищеними вимогами до механічної міцності. FR-4 є *композитним матеріалом на основі склотканини*. Зазвичай ці матеріали матового жовтуватого кольору або прозорі, звичний зелений колір їм надає паяльна маска, яку наносять на поверхню друкованої плати. Клас горючості UL94-V0. Залежно від властивостей і сфери застосування виокремлюють такі підкласи FR-4:

- *стандартний*, з температурою оскління $T_g \sim 130^\circ\text{C}$, з ультрафіолетовим блокуванням (UV blocking) або без нього. Найбільш поширений і широко використовуваний тип, одночасно найменш дорогий з FR-4;
- з *високою температурою* оскління, $T_g \sim 170^\circ\text{C} \dots 180^\circ\text{C}$;
- *сумісний з технологіями безсвинцевого лудіння і паяння*;
- *безгалогенний*, сумісний з технологіями безсвинцевого лудіння і паяння;
- з *нормованим трекінг-індексом*, $CTI \geq 400$ та $CTI \geq 600$;
- *високочастотний*, з низькою відносною діелектричною проникністю $\epsilon \leq 3,9$ і малим тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta \leq 0,01$.

Температура оскління – температура, за якої у процесі охолодження полімер переходить з високоеластичного або в'язкотекучого у склоподібний стан. Зазвичай позначають T_g .

CTI (The Comparative Tracking Index) – напруга електричного пробою по поверхні матеріалу, виміряна для проміжку завширшки 3 мм.

UL94 – це стандарт, який застосовує міжнародна організація *UL* (лабораторія з техніки безпеки) для випробувань на займистість і протипожежну безпеку пластикових матеріалів, які використовують у пристроях і системах. Під час випробувань *UL94HB* (горизонтальне згоряння) досліджують згоряння горизонтально розташованого пластикового зразка, а в разі більш жорстких випробувань, *UL94V* (вертикальне згоряння) досліджують згоряння вертикального зразка. У специфікації стандарту *UL94* наведено точні дані про обладнання, умови і випробувальні системи, які слід застосовувати.

СЕМ-3. Клас матеріалів СЕМ-3 за класифікацією NEMA. *Композитний* матеріал зі *скловолоконно-епоксидною основою* зазвичай молочно-білого кольору або прозорий. Широко застосовують у виробництві ДБДП з металізацією. За властивостями дуже близький до FR-4 і відрізняється, лише меншою механічною міцністю. Матеріал є дешевою альтернативою FR-4 для абсолютної більшості застосувань. Матеріал можна легко обробляти механічно (фрезерування, штампування). Клас горючості – UL94-V0. Залежно від властивостей і сфери застосування виокремлюють такі підкласи СЕМ-3:

- *стандартний*, з ультрафіолетовим блокуванням (UV blocking) або без нього;

- *високотемпературний*, сумісний з технологіями безсвинцевого лудіння і паяння;

- *безгалогенний*, без вмісту фосфору і сурми;

- *з нормованим трекінг-індексом*, СТИ ≥ 600 .

СЕМ-1. Клас матеріалів СЕМ-1 за класифікацією NEMA. Ці *композитні* матеріали виготовляють на *фенольно-паперовій основі* з двома шарами *склотканини* зовні. Зазвичай молочно-білого або молочно-жовтого кольору. Не сумісні з процесом металізації отворів, тому їх використовують тільки для виробництва ОБДП. Діелектричні властивості близькі до FR-4, механічні властивості дещо гірші. СЕМ-1 є альтернативою FR-4 для виробництва однобічних друкованих плат, коли ціна є визначальним фактором. Матеріал можна легко обробляти механічно (фрезерування, штампування). Клас горючості – UL94-V0. Залежно від властивостей і сфери застосування виокремлюють такі підкласи СЕМ-1:

- *стандартний*;

- *високотемпературний*, сумісний з технологіями безсвинцевого лудіння і паяння;

- *безгалогенний*, без вмісту фосфору і сурми;

- *з нормованим трекінг-індексом*, СТИ ≥ 600 ;

- *вологостійкий*, з підвищеною стабільністю розмірів.

FR-1/FR-2. Клас матеріалів FR-1 та FR-2 за класифікацією NEMA. Ці *композитні* матеріали виготовляють на *фенольно-паперовій основі* і використовуються тільки для виробництва ОБДП. FR-1 та FR-2 мають схожі характеристики. FR-1 відрізняється від FR-2 лише більш високою температурою оскління. Зважаючи на схожість характеристик і сфер застосування FR-1 та FR-2, більшість виробників матеріалів виробляють лише один з цих матеріалів, частіше FR-1. Матеріал можна легко обробляти механічно (фрезерування, штампування). Клас горючості – UL94-V0. Виокремлюють такі підкласи:

- *стандартний*;

- *безгалогенний*, без вмісту фосфору і сурми;

- *токсичний*;

- *з нормованим трекінг-індексом*, СТИ ≥ 400 , ≥ 600 ;

- *вологостійкий*.

4.4.2. Параметри матеріалів основи друкованих плат

Значення допустимих робочих напруг між елементами провідникового рисунка, розташованими в сусідніх шарах друкованих плат для фольгованих гетинаксів та склотекстолітів, наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10. Значення допустимих робочих напруг в сусідніх шарах

Відстань між елементами провідникового рисунка, мм	Значення робочої напруги, В	
	Фольгований гетинакс (ГФ)	Фольгований склотекстоліт (СФ)
Від 0,1 до 0,2	–	25
більше 0,2 до 0,3	–	50
більше 0,3 до 0,4	75	100
більше 0,4 до 0,5	150	200
більше 0,5 до 0,75	250	350
більше 0,75 до 1,5	350	500

Значення допустимих робочих напруг між елементам провідникового рисунка, розташованих на зовнішньому шарі друкованої плати, наведено в табл. 4.11.

Таблиця 4.11. Значення допустимих робочих напруг на зовнішньому шарі друкованої плати

Відстань між елементами провідникового рисунка, мм	Значення робочої напруги, В							
	Чинники зовнішнього впливу							
	Нормальні умови		Відносна вологість (93 ±3)% за температури (40±2)°С протягом 48 год.		Понижений атмосферний тиск			
					53600 Па (400 мм рт. ст.)		666 Па (5 мм рт. ст.)	
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Від 0,10 до 0,20	–	25	–	15	–	20	–	10
більше 0,20 до 0,30	30	50	20	30	25	40	20	30
більше 0,30 до 0,40	100	150	50	100	80	110	30	50
більше 0,40 до 0,70	150	300	100	200	110	160	58	80
більше 0,70 до 1,20	300	400	230	300	160	200	80	100
більше 1,20 до 2,00	400	600	300	360	200	300	100	130
більше 2,00 до 3,50	500	830	360	430	250	400	110	160
більше 3,50 до 5,00	660	1160	500	600	330	560	150	210
більше 5,00 до 7,50	1000	1500	660	830	500	660	200	250
більше 7,50 до 10,00	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
більше 10,00 до 15,00	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

Значення опору друкованих провідників довжиною 1 м наведено в табл. 4.12.

Допустиме струмове навантаження на елементи провідникового рисунка в залежності від допустимого перевищення температури провідника відносно температури навколишнього середовища вибирають для:

- фольги – від $100 \cdot 10^6$ до $250 \cdot 10^6$ А/м² (від 100 до 250 А/мм²);
- гальванічної міді – від $60 \cdot 10^6$ до $100 \cdot 10^6$ А/м² (від 60 до 100 А/мм²).

Таблиця 4.12. Опір друкованих провідників залежно від розмірів їх перерізу

Товщина друкованого провідника, мкм		Значення опору, Ом (не більше)										
без покриття	з покриттям	Ширина друкованого провідника, мм										
		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	1,00
20	–	–	5,83	4,37	3,50	2,91	2,18	1,75	1,45	1,25	1,09	0,87
35	–	–	–	2,50	2,01	1,66	1,25	1,00	0,83	0,71	0,52	0,50
50	–	–	–	1,75	1,40	1,16	0,87	0,70	0,58	0,50	0,43	0,35
5	40	8,60	5,74	4,30	3,44	2,86	2,14	1,72	1,42	1,23	1,07	0,86
20	70	4,20	2,78	2,09	1,67	1,39	1,04	0,83	0,69	0,59	0,52	0,42
35	80	3,20	2,12	1,60	1,28	1,06	0,79	0,64	0,52	0,45	0,39	0,32
50	90	2,60	1,71	1,29	1,04	0,86	0,64	0,52	0,43	0,37	0,32	0,26
–	40	10,0	6,60	5,00	4,00	3,32	2,50	2,00	1,65	1,42	1,25	1,00

Температурні характеристики склотекстолітів та гетинаксів наведено в табл. 4.13 та 4.14 відповідно.

Вітчизняний фольгований гетинакс марок ГФ-1-35, ГФ-2-35, ГФ-1-50 та ГФ-2-50 розрахований на роботу за відносної вологості 45...76% і температури 15...35 С°, матеріал основи має коричневий колір.

4.4.3. Матеріали фінішного покриття друкованих плат

Для збереження здатності друкованих плат до паяння після зберігання, забезпечення надійного монтажу електронних компонентів і збереження у процесі експлуатації властивостей паяних або зварних з'єднань необхідно захищати мідну поверхню контактних площинок друкованої плати спеціальним покриттям поверхні, так званим *фінішним покриттям*.

Таблиця 4.13. Параметри деяких типів фольгованого склотекстоліту

Тип матеріалу	Гранична експлуатаційна температура, °С до	Температура оскління, Tg °С
СФ-1-35Г, СФ-2-35Г, СФ-1-50Г, СФ-2-50Г, СФ-1Н-50Г, СФ-2Н-50Г, СФ-1-70Г, СФ-2-70Г	85	
СФН	100	
СТФ-1-35Г, СТФ-2-35Г	105	
СТНФ	110	
СОНФ-У	155	
СЕМ-3		130
FR-4		135...170
FR-5		160
ДФМ-59		270
СФВН		290

Таблиця 4.14. Параметри деяких типів фольгованого гетинаксу

Тип матеріалу	Гранична експлуатаційна температура, °С до	Температура оскління, Tg °С
ГФ-1-35, ГФ-1-35Г, ГФ-2-35, ГФ-2-35Г, ГФ-1-50, ГФ-1-50Г, ГФ-2-50, ГФ-2-50Г	85	
FR-2		105
FR-3		110
FR-1		130
СЕМ-1		130

У виробництві друкованих плат застосовують різні *фінішні покриття*. З'ясуємо характеристики та особливості застосування найбільш поширених.

Покриття HAL або HASL (від англійського Hot Air Leveling або Hot Air Solder Leveling – *вирівнювання* гарячим повітрям) з використанням *припоїв* на основі сплаву олово-свинець (Sn-Pb), наприклад, ПОС61, ПОС63, і вирівнювання поверхні повітряним ножом. Таке покриття, на даний момент найпоширеніше, є класичним, найбільш відомим і давно використовуваним. Забезпечує *відмінну здатність до паяння* друкованих плат навіть після тривалого зберігання. Покриття HAL технологічне і не дороге. Покриття є сумісним з усіма відомими методами монтажу і паяння – ручним, паянням хвилею, оплавленням в печі тощо. До негативних властивостей даного виду фінішного покриття можна віднести наявність свинцю – одного з найбільш токсичних металів, забороненого до використання на території Європейського Союзу директивою RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directives – директива про заборону на використання небезпечних і токсичних речовин), а також те, що покриття HAL не задовольняє умовам площинності контактних площинок для монтажу мікросхем з дуже високим ступенем інтеграції. Покриття непридатне для технології монтажу кристалів зварюванням безпосередньо на плату (COB – Chip on board).

Покриття HAL безсвинцеве – варіант покриття HAL, але з використанням безсвинцевих припоїв, наприклад, Sn100; Sn96,5/Ag3,5; SnCuNi; SnAgNi. Покриття повністю задовольняє вимогам RoHS і має дуже хорошу здатність до зберігання та паяння. Це фінішне покриття наносять за вищої температури ніж HAL на основі ПОС, що обумовлює підвищені вимоги до базового матеріалу друкованої плати і електронних компонентів щодо термостійкості. Покриття сумісне з усіма способами монтажу і паяння як з використанням безсвинцевих припоїв, так і з використанням олов'яно-свинцевих припоїв, але вимагає уважного ставлення до температурного режиму паяння. У порівнянні з HAL на основі ПОС, дане покриття є більш дорогим за рахунок більшої вартості безсвинцевих припоїв, а також за рахунок більшої енергоємності.

Покриття Gold Flash – покриття групи Ni/Au. Товщина покриття: Ni – 3...7 мкм, Au – 0,05...0,2 мкм. Покриття наносять хімічним способом. Високотехнологічне покриття, що має хорошу здатність до зберігання та паяння. Забезпечує хорошу площинність друкованих площинок плати, що робить його незамінним у разі застосування мікросхем високого ступеня інтеграції. По-

криття повністю задовольняє вимогам RoHS. Покриття сумісне з усіма способами монтажу і паяння, а також придатне для монтажу кристалів мікросхем зварюванням безпосередньо на плату (COB). Покриття Gold Flash має хороші властивості для паяння безсвинцевими припоями, оскільки запобігає виникненню крихкості паяних з'єднань, викликаному утворенням інтерметалідів олово-мідь. Утворення інтерметалідів не відбувається через те, що між мідною основою і припоєм знаходиться бар'єрний нікелевий шар.

Покриття Gold Fingers – покриття групи Ni/Au. Товщина покриття: Ni – 5...9 мкм, Au – 0,2...1,0 мкм. Покриття наносять електрохімічним осадженням (гальваніка). Використовують для нанесення на кінцеві контакти і ламелі (контактні площадки ножових з'єднувачів). Має високу механічну міцність, стійкість до стирання та несприятливого впливу навколишнього середовища. Незамінне там, де важливо забезпечити надійний і довговічний електричний контакт.

Імерсійне олово – хімічне покриття, яке задовольняє вимогам RoHS та забезпечує хорошу площинність друкованих площадок плати. Технологічне покриття сумісне з усіма способами пайки. Імерсійне олово забезпечує хорошу здатність до паяння й після тривалого зберігання – гарантійний термін зберігання 1 рік (здатність до паяння зберігається до декількох років). Такі тривалі терміни здатності до паяння забезпечують завдяки використанню прошарку органометалу як бар'єру між міддю контактних площадок й безпосередньо оловом. Бар'єрний прошарок запобігає взаємній дифузії міді та олова, утворенню інтерметалідів і рекристалізації олова. Фінішне покриття імерсійним оловом з підшарком органометалу завтовшки 1 мкм має рівну, плоску поверхню, зберігає здатність до паяння і можливість здійснити кілька процедур повторного паяння навіть після тривалого зберігання, маючи технічні характеристики покриття, що повністю відповідають сучасним вимогами до друкованих плат.

Покриття OSP (від англійського Organic Solderability Preservatives) – група органічних фінішних покриттів, які наносять безпосередньо на мідь контактних площадок і забезпечують захист мідної поверхні від окислення в процесі зберігання і паяння. Дешева фінішна покриття, забезпечує рівну, плоску поверхню, добре підходить для поверхневого монтажу і задовольняє вимогам RoHS. OSP – дешева альтернатива HAL. Має обмежений термін зберігання (місяці) і не може бути використане у режимі багатопрохідного паяння. Наприкінці пайки шар OSP, виконавши свою функцію, втрачає здатність забезпечувати подальші процеси паяння.

4.5. Вибір методу виготовлення друкованих плат

Вибір методу виготовлення плат необхідно здійснити під час *ескізного* конструювання апаратури, у процесі якого визначають *основні габарити* і типорозміри плат і потрібну для даного виробу *цільність монтажу*.

Метод виготовлення плат слід обирати на підставі *вимог до електричних параметрів* схеми виробу, *кліматичних* та *механічних* вимог до його конструкції і забезпечення необхідної надійності за різних умов експлуатації.

У процесі виготовлення виробів апаратури ресстрації інформації застосовують *кілька методів* виготовлення жорстких друкованих плат:

– *комбінований* (позитивний і негативний) для виготовлення двобічних і однобічних друкованих плат за нормами класу Б, призначених для використання в найбільш відповідальній апаратурі;

– *хімічний* – для виготовлення однобічних друкованих плат, призначених для застосування в апаратурі загального користування;

– *метод з металізацією наскрізних отворів* – для виготовлення багатошарових друкованих плат.

У технічно і економічно обґрунтованих випадках може бути застосовано інші конструктивно-технологічні варіанти виготовлення багатошарових друкованих плат, наприклад: *попарного пресування, відкритих контактних площинок, зовнішніх виводів, пошарового нарощування.*

Під час конструювання друкованих плат часто використовують позначення наведені нижче:

a – *відстань від краю плати, отвору, вирізу або «вікна» в платі до друкованого провідника (еквівалент величини Q на рис. 4.7);*

b – *ширина контактної площинки у вузькому місці (гарантійний поясок);*

C – *сумарний коефіцієнт, що враховує зміну діаметрів отворів, контактних площинок, міжцентрової відстані і зсув шарів у процесі виготовлення плати тощо;*

*C*₁ – *розрахунковий коефіцієнт C, коли допуск на відхилення розмірів між центрами отворів становить 0,1 мм;*

*C*₂ – *розрахунковий коефіцієнт C, коли допуск на відхилення розмірів між центрами отворів становить 0,2 мм;*

d – *діаметр отвору;*

*d*_{закл} – *діаметр заклепки;*

*d*_з – *діаметр зенкування;*

*d*_в – *діаметр виводу навісного елемента;*

*d*_к – *діаметр контактної площинки;*

*F*_к – *площа контактної площинки;*

*F*_{мет} – *площа металізації;*

K – *сумарний коефіцієнт, що враховує зміну ширини провідника у процесі виготовлення плат;*

l – *відстань між центрами двох монтажних отворів;*

*l*_{min} – *відстань, необхідна для прокладання у вузькому місці між двома отворами або контактними площинками n провідників, що мають мінімально допустимі для даного методу виготовлення значення ширини і відстаней між ними, за умови обов'язкового врахування сумарних коефіцієнтів K і C;*

t – *ширина провідника;*

S – *відстань між провідниками;*

*S*₀ – *відстань між контактними площинками або провідником і контактною площинкою.*

4.6. Електричні характеристики друкованих плат

Залежно від *технології* виготовлення друкованих провідників, вони мають *різні електричні властивості*. У табл. 4.15 наведено значення електричного опору друкованих провідників, виготовлених різними методами.

Таблиця 4.15. Значення опору друкованих провідників завдовжки 1 м

Метод виготовлення плати	Товщина провідника, мкм	Ширина провідника, мм							
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,5
		Опір, Ом							
Хімічний	50	1,16	0,87	0,70	0,58	0,50	0,44	0,35	0,20
Комбінований	80	0,83	0,62	0,50	0,41	0,35	0,31	0,25	0,17
	90	0,74	0,55	0,44	0,37	0,32	0,27	0,22	0,14
Металізація крізних отворів	35	1,66	1,25	1,00	0,92	0,71	0,62	0,50	0,33
	50	1,16	0,87	0,70	0,58	0,50	0,44	0,35	0,20
Попарне пресування	35	1,90	1,42	1,14	0,90	0,81	0,71	0,57	0,38
Відкриті контактні площинки	35	1,66	1,25	1,00	0,92	0,71	0,62	0,50	0,33
Метод зовнішніх виводів	70	0,72	0,54	0,43	0,36	0,31	0,27	0,21	0,14
Пошарове нарощування	35	2,01	1,80	1,50	1,31	1,00	0,80	0,60	0,40

Опір друкованих провідників окремих шарів (наприклад, зовнішніх) може бути *зменшено*, за необхідності, *гальванічним нарощуванням*.

Густина струму в друкованому провіднику має не перевищувати 20 А/мм² для зовнішніх шарів і 15 А/мм² для внутрішніх шарів. Наприклад, для провідника завширшки 0,5 мм і товщини фольги 35 і 50 мкм максимально допустимі струми становитимуть:

- для зовнішніх шарів 0,35 і 0,50 А, відповідно;
- для внутрішніх шарів 0,26 і 0,37 А, відповідно.

Піл час конструювання друкованих плат для апаратури широкого вжитку можна розраховувати ширину провідників для *густини струму* 30 А/мм².

Крім обмеження густини струму у процесі конструювання елементів друкованої плати слід враховувати *обмеження* щодо *різниці потенціалів* між сусідніми провідними елементами. Провідники друкованих електронних вузлів завжди захищають *захисним покриттям* від впливу навколишнього середовища. Це покриття одночасно збільшує *стійкість конструкції* до електричного *пробою* між провідниковими елементами зовнішніх шарів. У табл. 4.16 наведено граничні значення різниці потенціалів між сусідніми провідниками плати в робочому режимі.

Таблиця 4.16. Допустима робоча напруга для плат, захищених лаком

Відстань між провідниками, мм	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5	2,5
Напруга, В, не більше	50	75	100	125	150	175	200	250	300	400	500

Якщо між електричними колами друкованого вузла робоча напруга складає *понад 250 В*, тоді для реалізації таких вузлів *не рекомендують* використовувати *багатошарові* друковані плати.

Міжшарова ємність друкованих провідників багатошарових плат в порівнянні з одно- і двобічними платами має більше значення внаслідок зменшення товщини діелектричних прошарків до 0,1 мм. Крім того, в межах однієї БШДП внаслідок застосування матеріалів з різною товщиною і діелектричною проникністю міжшарова ємність може бути різною між різними провідниковими площинами.

Для попередніх розрахунків міжшарової ємності з метою їх спрощення, величину діелектричної проникності для всіх матеріалів рекомендовано брати $\epsilon = 6$. Уточнені результати можна отримати лише під час безпосереднього вимірювання ємності відповідних зразків друкованих плат.

4.7. Особливості конструювання друкованих плат, які виготовляють хімічним методом

Суть методу полягає у виготовленні плат шляхом *травлення* фольгованого діелектрика без подальшої металізації. Елементи конструкції такої плати наведено на рис. 4.8.

Монтажні отвори слід виконувати *без зенкувань*. Допускають зенкування монтажних отворів з боку розташування елементів, що мають виводи штиркового типу. Інші отвори можуть мати зенкування з двох боків.

Діаметр монтажних отворів, в які ставлять заклепки діаметром $d_{\text{закл}}$, слід вибрати з умови $d = d_{\text{закл}} + 0,1$ мм.

Контактну площинку можна зменшити з одного або з двох боків до величини b (ширина контактної площинки у вузькому місці), наведеної у табл. 4.17.

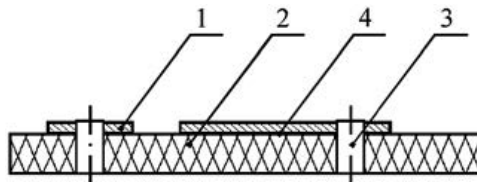


Рисунок 4.8. Конструкція однієї друкованої плати:

1 – контактна площинка, 2 – діелектрична основа плати,

3 – монтажний отвір, 4 – провідник, що переходить в контактну площинку

У разі зменшення контактної площинки з однією або з двох сторін до 0,2 мм (плати класу А) площа частини контактної площинки, що залишилася, без урахування площі отвору повинна складати 2...4 мм² (і більше).

Таблиця 4.17. Ширина контактної площинки у вузькому місці, мм

Клас	t	S	S_0	K	C_1	C_2	b
А	0,50	0,60	0,50	0,15	–	0,62	0,80
Б	0,30	0,30	0,30 (0,20)*	0,10	0,40	0,60	0,15

Розрахунок мінімальної відстані між монтажними отворами, між якими запроєктовано прокладання n провідникових доріжок для плат виготовлених хімічним способом слід здійснювати за формулами

$$l_A = \frac{d_1 + d_2}{2} + 1,25n + 1,42, \quad (4.4)$$

$$l_B = \frac{d_1 + d_2}{2} + 0,70n + 1,00. \quad (4.5)$$

4.8. Особливості конструювання плат, що виготовляють комбінованим методом

Суть *комбінованого методу* (позитивного або негативного) полягає в у *травленні* фольгованого діелектрика з подальшою металізацією отворів. Конструкцію такої плати наведено на рис. 4.9.

Металізовані отвори роблять як із зенкуванням, так і без зенкування. За наявності зенкування отворів допускають:

- для *позитивного методу* – зменшення контактної площинки до зенкування з одного або з обох боків;
- для *негативного методу* – зменшення контактної площинки до 0,15 мм, відраховуючи від краю зенкування.

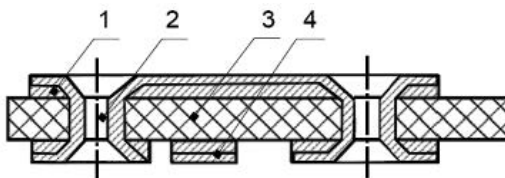


Рисунок 4.9. Конструкція друкованої плати виготовленої комбінованим методом:

- 1 – контактна площинка, яка переходить у провідник;
- 2 – металізований отвір;
- 3 – основа плати;
- 4 – провідник

За відсутності зенкування для позитивного і негативного методів можливе зменшення контактної площинки до величин b .

Отвори без зенкування слід робити за узгодженням з відділом головного технолога підприємства-виробника. Параметри елементів плати наведено в табл. 4.18.

Перевірочний розрахунок укладання провідників для комбінованого методу слід робити за наведеними нижче формулами.

Таблиця 4.18. Геометричні параметри елементів друкованої плати для комбінованого методу, мм,

Клас	t	S	S_0	K	C_1	C_2	b
А	0,60	0,60	0,50	0,20	–	0,70 (0,60)*	0,30
Б	0,30	0,40	0,30	0,10	0,40	0,70 (0,60)*	0,15

$$l_A = \frac{d_1 + d_2}{2} + 1,4n + 1,7, \quad (4.6)$$

$$l_B = \frac{d_1 + d_2}{2} + 0,8n + 1,0. \quad (4.7)$$

4.9. Особливості конструювання багат шарових друкованих плат

Залежно від особливостей конструкції багат шарових плат виділяють кілька різновидів друкованих плат:

- багат шарові друковані плати *без наскрізних отворів*;
- багат шарові друковані плати *з наскрізними отворами*;
- багат шарові друковані плати *на металевій підкладці тільки з наскрізними отворами*;
- багат шарові друковані плати *на металевій підкладці з не наскрізними отворами*.

Рівень виробництва друкованих плат визначають складністю конструкції друкованої плати й відповідно до міжнародної класифікації поділяють на:

- А – *малої складності*;
- В – *середньої складності* (стандартна технологія);
- С – *великої складності*.

На складність плати багато в чому впливають особливості фізичної реалізації електронних компонентів, які необхідно на ній змонтувати. Основні корпуси сучасних активних електронних компонентів наведено на рис. 4.10.

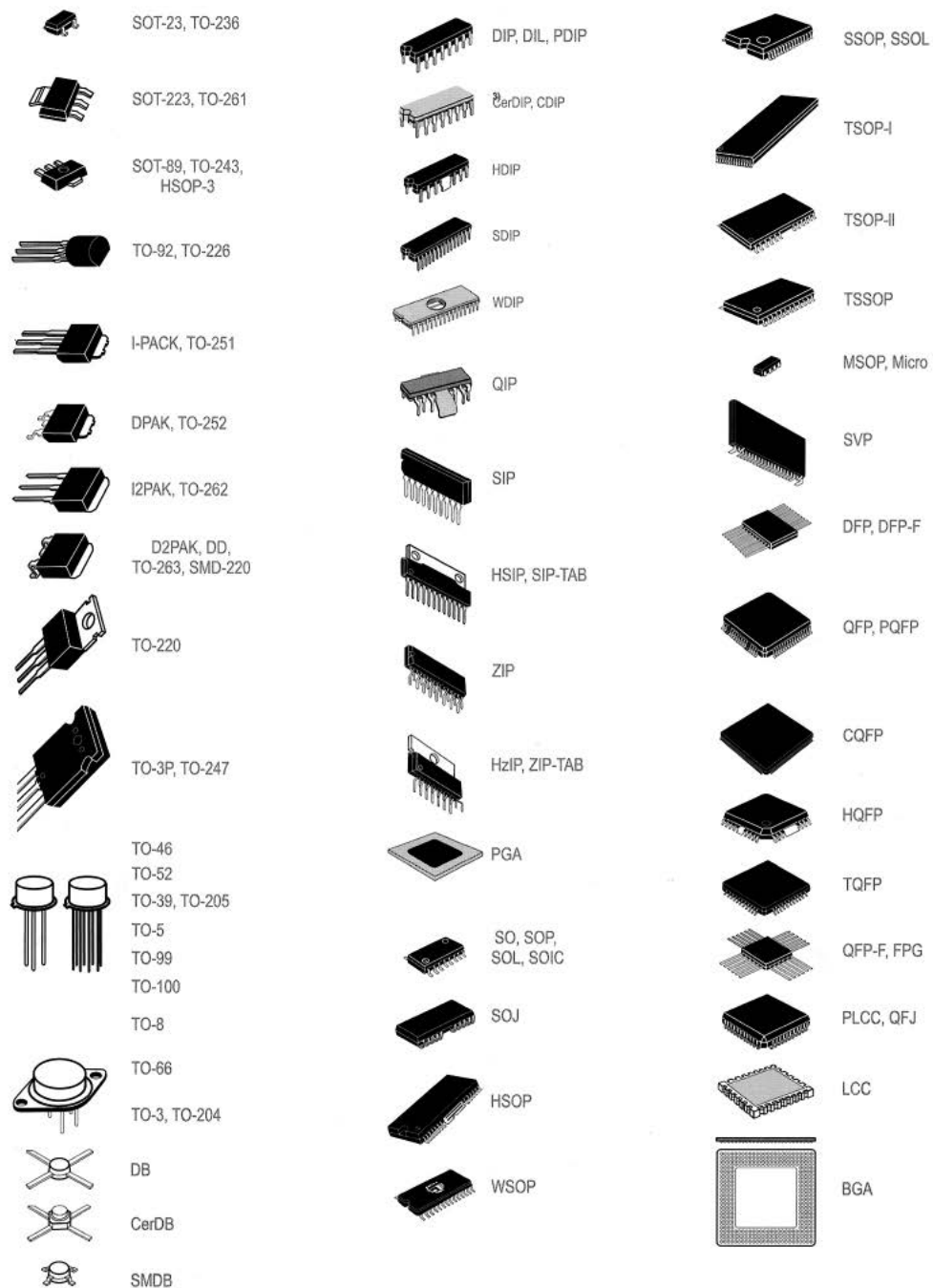


Рисунок 4.10. Корпуси сучасних активних електронних компонентів

У процесі конструювання багат шарових друкованих плат застосовують міжнародні терміни та позначення, найбільш поширені з яких наведено нижче.

ADHESIVE (адгезив) – *клей*.

BGA – (Ball Grid Array) – корпус мікросхеми, у якого виводами електричних з'єднань є *кульки* (або стовпчики) з *припою*, розташовані на нижній поверхні корпусу. Корпус призначено для поверхневого монтажу.

CHIP COMPONENT – загальний термін, який застосовують для позначення будь-якого компонента з *двома виводами*, призначеного для *поверхневого монтажу* (в основному пасивних SMT компонентів – резисторів, конденсаторів, діодів, індуктивностей). Також використовують для позначення окремих мікросхем для поверхневого монтажу.

COB – (Chip On Board) – загальний термін, який застосовують для позначення *безкорпусного компонента* (кремнієвого кристалу), який монтують безпосередньо на друковану плату.

CSP – (Chip Scale Package) – корпус елемента, загальні розміри якого перевищують розмір кремнієвої підкладки *не більше ніж на 20%*.

DIP – (Dual Inline Package) – корпус елемента з *двома рядами виводів*, призначений для монтажу в наскрізні отвори в друкованій платі.

FLIP CHIP – технологія монтажу безкорпусних компонентів (COB), за якою *кремнієву підкладку* «перевертають» і *встановлюють безпосередньо на друковану плату* (без використання технології Wire Bonding).

FPT – (Fine Pitch Technology) – технологія монтажу компонентів з *малим кроком виводів*.

PLCC – (Plastic Leaded Chip Carrier) – *корпус елемента* прямокутний або квадратний за формою з виводами з усіх чотирьох боків. Крок виводів зазвичай 1,27 мм, тобто цей корпус не є корпусом типу Fine pitch. Корпус призначено для поверхневого монтажу.

SMT – (Surface Mount Technology) – *технологія поверхневого монтажу*.

SOIC – (Small Outline Integrated Circuit) – корпус елемента з *двома рядами виводів*. Корпус призначено для поверхневого монтажу.

SOLDER PASTE – *паяльна паста*.

TAB – (Tape Automated Bonding) – процес монтажу безкорпусних елементів *безпосередньо на поверхню друкованої плати*. Монтаж здійснюють із застосуванням тонкої провідникової рамки. За цієї технології елементи спочатку розташовують на полімерній (майларовій) стрічці.

THT – (Trough Hole Technology) – технологія монтажу *DIP мікросхем*.

UFPT – (Ultra Fine Pitch Technology) – технологія монтажу мікросхем з *дуже малим кроком виводів* (менше 0,5 мм).

WIRE BONDING – метод електричного з'єднання кремнієвої підкладки з контактними площинками на друкованій платі з використанням тонкого (0,025...0,05 мм) *золотого* або *алюмінієвого дроту*.

У складі сучасної апаратури реєстрації інформації *пасивні електронні компоненти* становлять *трохи більше 2% за вартістю, але приблизно 70% за кількістю* (а в деяких пристроях – до 90...95%).

За класифікацією Європейської асоціації промисловості пасивних компонентів (European Passive Components Industry Association – EPCIA) до пасивних електронних компонентів (ПЕК) віднесено:

- конденсатори;
- резистори;
- варистори;
- терморезистори і датчики;
- котушки індуктивності, дроселі та трансформатори;
- фільтри електромагнітних завод (протишумові фільтри);
- високочастотні фільтри (на поверхнево-активних хвилях або мікрохвильовій кераміці).

До ПЕК належать також *п'єзоелектричні компоненти, електронні з'єднувачі, реле, перемикачі*. Проте частіше ці комплектуючі виокремлюють в окрему групу електромеханічних компонентів.

Геометричні параметри найбільш поширених пасивних електронних компонентів для поверхневого монтажу наведено на рис. 4.11.

Позначення корпусів резисторів для поверхневого монтажу та значення геометричних величин наведено в табл. 4.19.

Мініатюризація РЕА примушує виробників ПЕК налагоджувати виготовлення все *менших за розмірами компонентів* і зміщує структуру попиту на чіп-компоненти в бік малих розмірів. Зокрема, на тепер серед керамічних чіп-конденсаторів найбільш широко застосовують елементи типорозмірів 0201 (0,6x0,3 мм), 0402 (1x0,5 мм) і 0603 (1,6x0,8 мм). Серед танталових чіп-конденсаторів попит швидше зростає на конденсатори типорозмірів 0603 і 0805 (коди J і P), серед чіп-резисторів – 0201 і 0402.

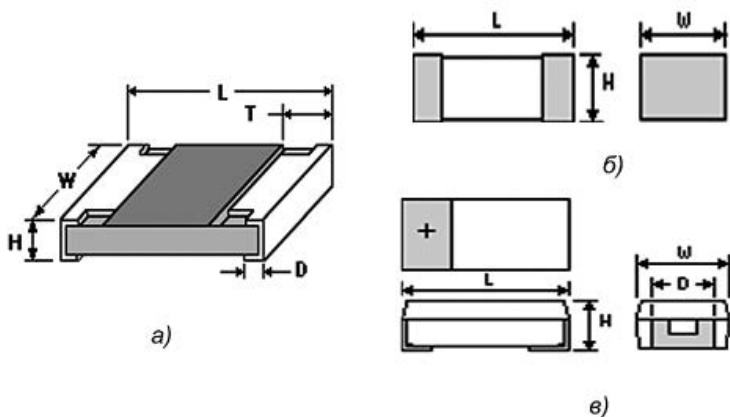


Рисунок 4.11. Найбільш поширені пасивні компоненти для поверхневого монтажу:

a – резистор, *б* – керамічний конденсатор, *в* – танталовий конденсатор

Таблиця 4.19. Типорозміри резисторів для поверхневого монтажу

Типорозмір ЕРСІА	Типорозмір метричний	L (мм)	W (мм)	H (мм)	D (мм)	T (мм)
0402	1005	1,0±0,1	0,5±0,05	0,35±0,05	0,25±0,1	0,2±0,1
0603	1608	1,6±0,1	0,85±0,1	0,45±0,05	0,3±0,2	0,3±0,2
0805	2012	2,1±0,1	1,3±0,1	0,5±0,05	0,4±0,2	0,4±0,2
1206	3216	3,1±0,1	1,6±0,1	0,55±0,05	0,5±0,25	0,5±0,25
1210	3225	3,1±0,1	2,6±0,1	0,55±0,05	0,4±0,2	0,5±0,25
2010	5025	5,0±0,1	2,5±0,1	0,55±0,05	0,4±0,2	0,6±0,25
2512	6332	6,35±0,1	3,2±0,1	0,55±0,05	0,4±0,2	0,6±0,25

Розпочато серійне виготовлення дуже малих керамічних конденсаторів і резисторів типорозміром 01005 (0,4x0,2 мм), які, наприклад, встановлюють в проміжку між выводами мікросхеми з кроком 0,5 мм із зазорами між ламелями і чіп-компонентом 15 мкм. Зараз виробники вивчають питання про можливість використання ще менших мініатюрних компонентів – 0,24x0,12 мм.

Геометричні розміри найбільш уживаних керамічних та танталових конденсаторів наведено у табл. 4.20 та 4.21 відповідно.

Монтаж електронних компонентів на друкованій платі у більшості випадків здійснюють з одного боку плати. Проте, у сучасних електронних пристроях для зменшення габаритів і забезпечення нормального функціонування електронних вузлів часто доводиться розташовувати електронні компоненти з обох боків, рис. 4.12. Для того, щоб забезпечити таку можливість, треба друковану плату сконструювати відповідним чином.

Таблиця 4.20. Типорозміри керамічних конденсаторів для поверхневого монтажу

Типорозмір ЕІА	Типорозмір метричний	L (мм)	W (мм)	H (мм)
0402	1005	1,0	0,5	0,55
0603	1608	1,6	0,8	0,9
0805	2012	2,0	1,25	1,3
1206	3216	3,2	1,6	1,5
1210	3225	3,2	2,5	1,7
1812	4532	4,5	3,2	1,7
1825	4564	4,5	6,4	1,7
2220	5650	5,6	5,0	1,8
2225	5664	5,6	6,3	2,0

Таблиця 4.21. Типорозміри танталових конденсаторів для поверхневого монтажу

Типорозмір	Типорозмір метричний	L (мм)	W (мм)	H (мм)	D (мм)
A	3216	3,2	1,6	1,6	1,2
B	3528	3,5	2,8	1,9	2,2
C	6032	6,0	3,2	2,5	2,2
D	7343	7,3	4,3	2,9	2,4
E	7343H	7,3	4,3	4,1	2,4

A Двосторонній монтаж вивідних компонентів не рекомендовано

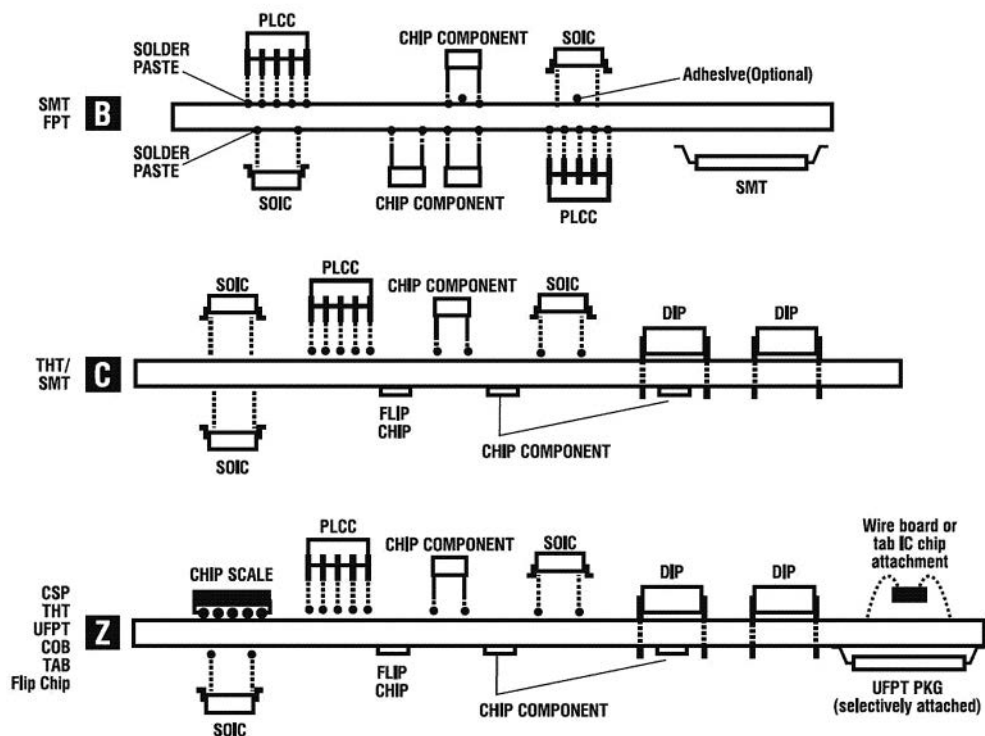


Рисунок 4.12. Приклади класів плат за складністю монтажу

За складністю монтажу плати поділяють на кілька класів:

A – друковані плати призначені тільки для монтажу компонентів з *виводами* для монтажу;

B – друковані плати призначені тільки для монтажу *SMD компонентів*;

C – друковані плати призначені для монтажу електронних компонентів двох попередніх класів (найпростіший монтаж);

X – друковані плати призначені для монтажу електронних компонентів попередніх класів та нових груп (*складний монтаж* із застосуванням технологій *TH, SM, fine pitch та BGA*);

Y – друковані плати призначені для монтажу електронних компонентів попередніх класів та нових груп (*складний монтаж* із застосуванням вивідних компонентів, *SMD компонентів, ultrafine pitch та CSP*);

Z – друковані плати призначені для монтажу електронних компонентів попередніх класів та нових груп (*складний монтаж* із застосуванням вивідних компонентів, *SMD компонентів, ultrafine pitch, COB, flip-chip та TAB*).

Друковані плати (а також комплектація, технологія складання електронних блоків, їх ремонт тощо) може бути віднесено до одного з трьох класів виробів:

1 клас. Електронні вироби загального призначення (побутова електроніка). До цього класу віднесено товари широкого вжитку, деякі комп'ютери та комп'ютерну периферію. У друкованих платах, призначених для цього класу виробів, незначні недосконалості не грають великої ролі, і головною вимогою є нормальне функціонування кінцевого електронного блоку.

2 клас. Спеціалізовані електронні вироби (промислова електроніка). До цього класу належить телекомунікаційне обладнання, складні промислові комп'ютери та інструменти, де потрібні високі експлуатаційні характеристики і тривалий термін використання. У цих пристроях *безперебійна робота* бажана, але не обов'язкова. Певні косметичні недосконалості допустимі.

3 клас. Електронні вироби високої надійності (спецтехніка). До цього класу віднесено обладнання, для якого *безперебійна робота є вирішальною*. Вимушена зупинка обладнання є неприпустимою, воно має функціонувати весь час, коли потрібно. Наприклад, це системи підтримки життєзабезпечення або система контролю за польотами. У цьому класі необхідно забезпечити високий рівень надійності, безперебійне функціонування, експлуатаційні вимоги є дуже жорсткими.

4.10. Особливості конструювання багатошарових друкованих плат, виготовлених методом металізації наскрізних отворів

Суть методу полягає у виготовленні *внутрішніх шарів хімічним методом*, пресуванні шарів у монолітну заготовку і виготовленні зовнішніх шарів комбінованим, позитивним методом з одночасною металізацією отворів (рис. 4.13).

Металізовані отвори слід робити без *зенкування*. Допускають *зенкування* отворів за узгодженням з відділом головного технолога підприємства-виробника.

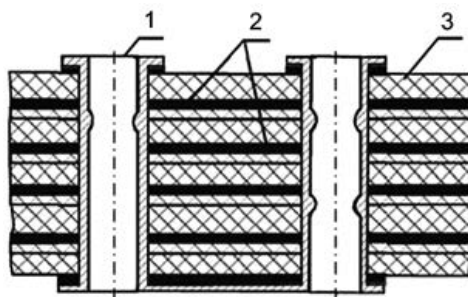


Рисунок 4.13. Фрагмент друкованої плати, виготовленої методом металізації наскрізних отворів: 1 – металізований отвір (перехідний або монтажний); 2 – провідник; 3 – діелектрик

Для плат завтовшки 1,6 мм і менше слід застосовувати металізовані отвори діаметром не менше 0,8 мм. Діаметри контактних площинок на внутрішніх шарах слід робити не менше 1,5 мм. На зовнішніх шарах провідники рекомендовано прокладати за *нормами класу А*. Між отворами, розташованими на відстані 2,5 мм і менше, не дозволено прокладати провідники. На внутрішніх прошарках між отворами, розташованими на відстані 2,5 мм, у вузькому місці слід прокладати провідник шириною 0,3 мм незалежно від наявності в отворі контактної площинки. У разі збільшення діаметрів отворів (товщина плати більше 1,6 мм), розташованих на відстані 2,5 мм провідник між ними на внутрішніх прошарках не дозволено прокладати.

Відстань від краю металізованого отвору до краю провідника на внутрішніх прошарках плати має бути не менше 0,6 мм.

Геометричні параметри елементів багатошарової плати, виготовленої методом металізації наскрізних отворів, наведено в табл. 4.22.

Перевірочний розрахунок укладання провідників слід робити за наведеними нижче формулами.

Для зовнішніх шарів

$$l_A = \frac{d_1 + d_2}{2} + 1,4n + 1,7, \quad (4.8)$$

$$l_B = \frac{d_1 + d_2}{2} + 0,7n + 1,1. \quad (4.9)$$

Таблиця 4.22. Геометричні параметри елементів друкованої плати у разі застосування методу металізації наскрізних отворів, мм

Шар	Клас	t	S	S_0	K	C_1	C_2	b
Зовнішній	А	0,60	0,60	0,50	0,20	–	0,70	0,30
Внутрішній	А	0,50	0,60	0,50	0,15	–	0,70	0,30
	Б	0,30	0,30	0,30 (0,25)*	0,10	0,50	0,70	0,15

Для внутрішніх прошарків

$$l_A = \frac{d_1 + d_2}{2} + 1,25n + 1,7, \quad (4.10)$$

$$l_B = \frac{d_1 + d_2}{2} + 0,7n + 1,1. \quad (4.11)$$

4.11. Особливості конструювання багат шарових плат, виготовлених методом попарного пресування

Сутність методу попарного пресування полягає у виготовленні комбінованим методом двох плат-заготовок з перехідними металізованими отворами і витравленим рисунком провідників на одній із сторін заготовок, яка надалі є внутрішнім шаром. На наступному етапі між заготовками розміщують ізоляційну прокладку і спресовують їх. Завершують формування плати виготовленням друкованих провідників на зовнішніх площинах комбінованим методом і формуванням монтажних отворів. Фрагмент плати виготовленої методом попарного пресування наведено на рис. 4.14.

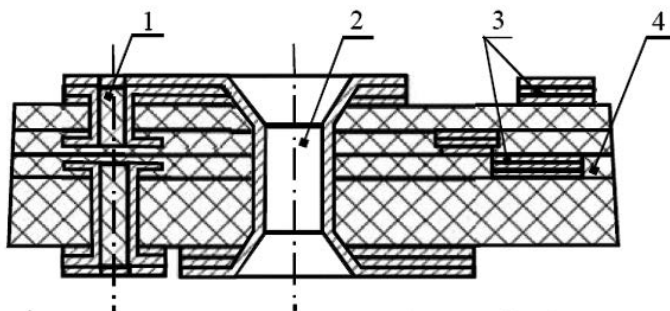


Рисунок 4.14. Друкована плата, виготовлена методом попарного пресування:

- 1 – перехідний отвір, що забезпечує перехід з 1-го на 2-й прошарок;
- 2 – отвір (монтажний), що забезпечує перехід з 1-го на 4-й прошарок;
- 3 – провідник; 4 – діелектрик

Металізовані отвори можна робити як із зенкуванням, так і без зенкування. За наявності зенкування отворів допускається зменшення контактної площинки до зенкування з одного або з двох боків. За відсутності зенкування контактні площинки можна зменшувати до величин b , вказаних у табл. 4.23.

Таблиця 4.23. Геометричні параметри елементів друкованої плати для методу попарного пресування

Клас	t	S	S_0	K	C_1	C_2	b
А	0,60	0,60	0,50	0,20	–	0,65** 0,75	0,30
Б	0,30	0,40	0,30	0,10	0,55	0,65** 0,75	0,15

Відстань від краю металізованого отвору до краю провідника на внутрішніх прошарках плати має бути не менше 0,6 мм. Перевірочний розрахунок укладання провідників слід робити за формулами, наведеними нижче.

Для зовнішніх шарів

$$l_A = \frac{d_1 + d_2}{2} + 1,4n + 1,65, \quad (4.12)$$

$$l_B = \frac{d_1 + d_2}{2} + 0,85n + 1,05. \quad (4.13)$$

Для внутрішніх шарів

$$l_A = \frac{d_1 + d_2}{2} + 1,4n + 1,05, \quad (4.14)$$

$$l_B = \frac{d_1 + d_2}{2} + 0,85n + 0,75. \quad (4.15)$$

4.12. Особливості конструювання багат шарових друкованих плат, виготовлених методом пошарового нарощування

Сутність методу полягає в *послідовному виготовленні* друкованих шарів електрохімічним осадженням міді на заздалегідь перфоровані заготовки діелектрика. Міжшарові з'єднання слід робити у вигляді металізованих переходів у перфораціях діелектрика. Фрагмент друкованої плати, виготовленої методом пошарового нарощування, наведено на рис. 4.15.

Діаметри отворів для контактних переходів слід робити не менше 0,8 мм.

Не припустимим є вихід контактного переходу за межі контактної площинки. У разі переходу через шар для контактного переходу треба забезпечувати контактні площинки на всіх проміжних шарах.

Перевірочний розрахунок для прокладання провідників між отворами слід робити за наведеною нижче формулою з урахуванням рекомендованих значень геометричних параметрів друкованих елементів, табл. 4.24.

$$l_B = \frac{d_1 + d_2}{2} + 0,7n + 0,4. \quad (4.16)$$

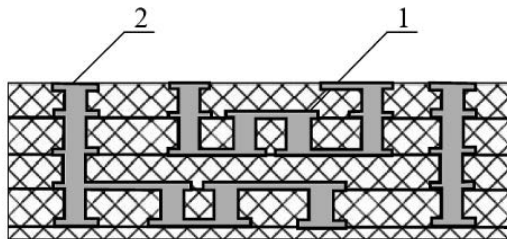


Рисунок 4.15. Фрагмент друкованої плати, виготовленої методом пошарового нарощування:
1 – контактна площинка 1-го прошарку; 2 – контактний перехід

Таблиця 4.24. Геометричні параметри елементів друкованої плати для методу пошарового нарощування

Клас	t	S	S_0	K_1	C_1	b
А	–	–	–	–	–	–
Б	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	–

4.13. Особливості конструювання друкованих плат призначених для автоматизованого монтажу

Підготовлення друкованої плати до автоматизованого монтажу можна розділити на кілька *етапів*:

- *перевірка* друкованої плати на відповідність вимогам для поверхневого монтажу компонентів;

- *розміщення* реперних знаків;

- *створення технологічної заготовки* (панелі з плат) з урахуванням технічних характеристик монтажного обладнання, кількості плат у замовленні, особливостей виготовлення і вартості трафарету тощо;

- *розміщення* «технологічних зон» на панелі.

Під час конструювання необхідно дотримуватись наведених нижче вимог щодо *розміщення компонентів* та *друкованих провідників* на поверхні друкованих плат:

- усі поверхнево-монтавні компоненти бажано *розміщувати на одній боці* плати; у разі, якщо цю вимогу виконати не можливо, слід *розділити* компоненти на «легкі» і «важкі» і розміщувати їх з різних боків плати; наприклад, *пасивні компоненти*, розмістити з *одного боку*, а мікросхеми – з *іншого*;

- *розміри контактних площинок* слід робити відповідно *рекомендаціям* для даного типорозміру корпусу (інформацію про розміри яких можна уточнити в технічній документації на компонент або у стандарті IPC-7351);

- *проміжки між компонентами* необхідно робити не менше тих, що наведено на рис. 4.16;

- *компоненти* слід *розташовувати не ближче* 1,25 мм від краю заготовки;

- у разі *паяння хвилею* усі компоненти слід *розташовувати у напрямку розповсюдження хвилі* припою (рис. 4.17), а у разі застосування у виробництві плат технології паяння оплавленням орієнтація компонентів не має принципового значення;

- *полярні компоненти*, за можливості, слід орієнтувати *однаково*;

- слід застосовувати *максимальну кількість компонентів з однаковим типорозміром* корпусу. Наприклад, резистори і конденсатори типу 0805. Підбір компонентів подібним чином дозволяє максимально продуктивно використовувати автоматизоване обладнання з револьверними головками;

- *максимальна висота* компонента 20 мм;

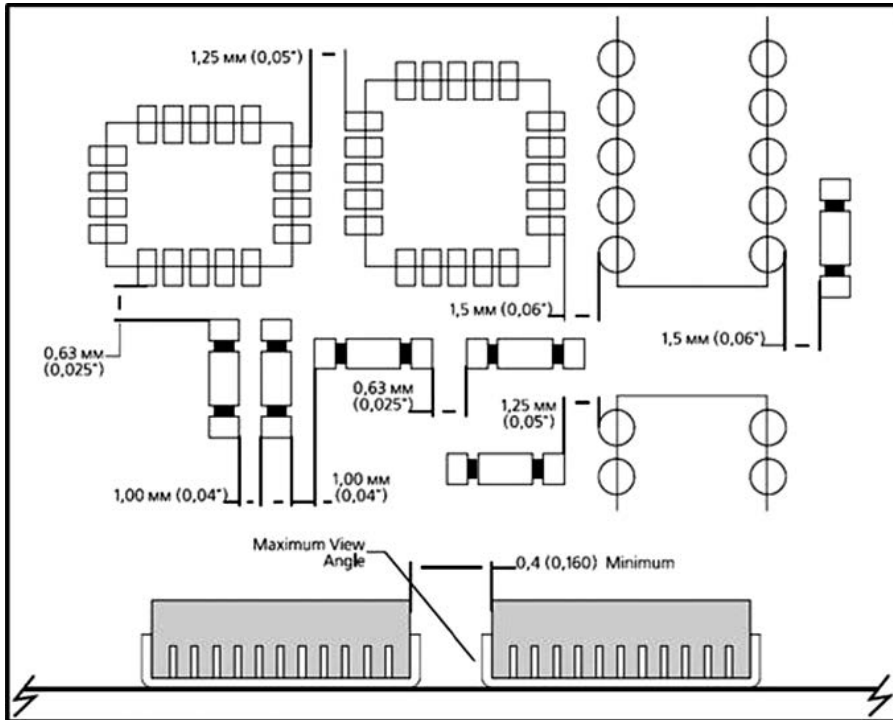


Рисунок 4.16. Вимоги до мінімальних проміжків між компонентами поверхневого монтажу

- *максимальна маса компонента 25 г;*
- *для компонентів з кроком виводів 0,5 мм і менше, за можливості, залишати місце (на лінії, що є продовженням діагоналі компонента, або по центру) для розміщення локальних реперних знаків (рис.4.17);*
- *деформація заготовки плати не повинна бути більше:* на площині паяння SMT компонентів 1 мм плюс товщина плати, а зі зворотного боку – 0,5 мм плюс товщина плати (припустима деформація залежить від типу автоматизованого обладнання та способу паяння);
- *для запобігання деформації у процесі виробництва плати та монтажу під час нагрівання у печі, сегменти вкриті суцільною фольгою (полігони) на зовнішніх та внутрішніх шарах (для багатошарових плат) необхідно розміщувати рівномірно по поверхні плати і робити їх у вигляді сітки з провідників;*
- *провідники і перехідні отвори, розміщені під компонентами, необхідно закривати захисною маскою;*
- *перехідні отвори, що знаходяться під корпусами BGA, необхідно закривати захисною маскою;*
- *відстань від краю не металізованих отворів до контактної площинки або провідника має бути не менше 0,5 мм.*

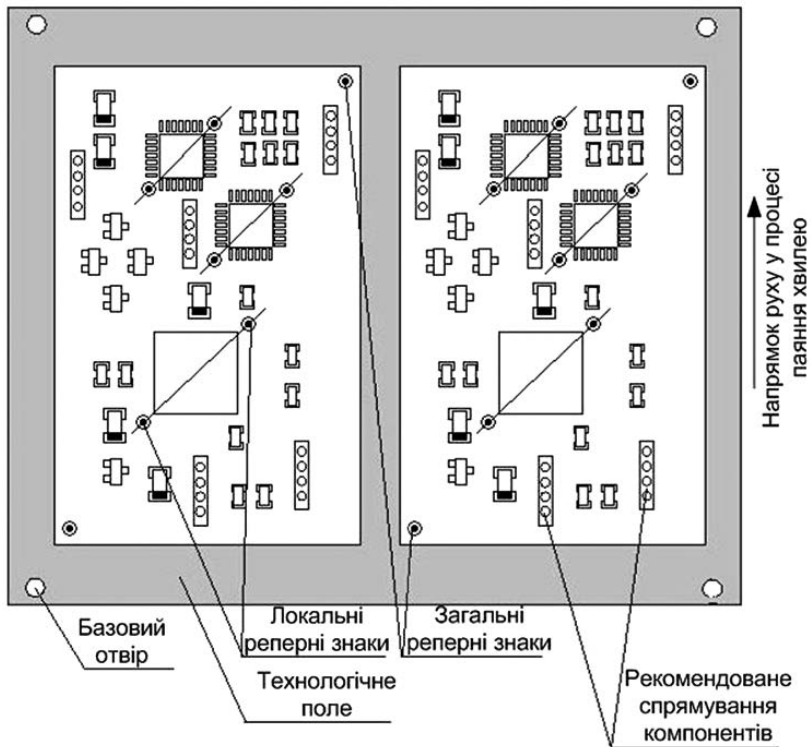


Рисунок 4.17. Технологічна заготовка плати для автоматизованого поверхневого монтажу

Конструктивні особливості з'єднання провідників з площинками SMT.

Для зменшення *відтоку тепла* від контактних площинок під час паяння (щоб запобігти появі «холодних» пайок) необхідно:

- *використовувати вузькі провідники*, що з'єднують безпосередньо контактну площинку і широкий провідник, як наведено на рис. 4.18; ширину відповідного «вузького» провідника слід вибирати залежно від класу точності плати та від величини струму, що проходить по ньому, усі перемички між ніжками SMT мікросхем необхідно розташовувати поза зоною паяння (рис. 4.19);

- *площинки SMT компонентів*, які розташовано на великих полігонах, *слід відокремлювати* від полігону перемичками («тепловий бар'єр») (рис. 4.20).

Рекомендації щодо виготовлення перехідних отворів:

- *не можна розташовувати перехідні отвори на контактних площинках компонентів*; на рис. 4.18 наведено рекомендоване розташування перехідних отворів і контактних площинок;

- у випадках, коли не вдається витримати проміжок між контактною площинкою та отвором рекомендованої величини – перехідний отвір більш ніж 0,25 мм, *можна зменшити* цей проміжок, за умови, що перехідний отвір закритий маскою і проміжок між вікном в масці для SMD площинки і самим отвором в платі не менше, ніж 0,15 мм.

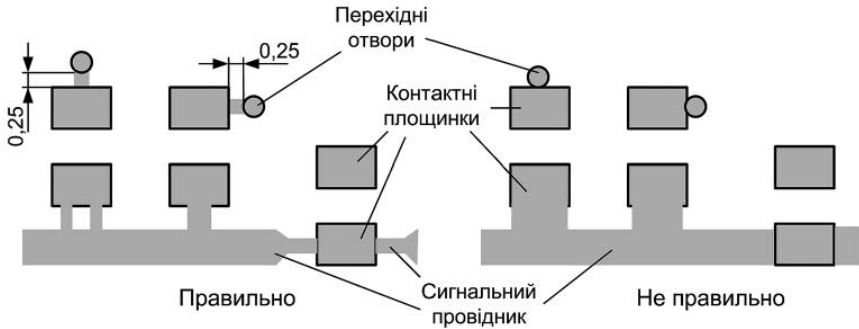


Рисунок 4.18. Приклади підведення широких провідників до контактних площинки

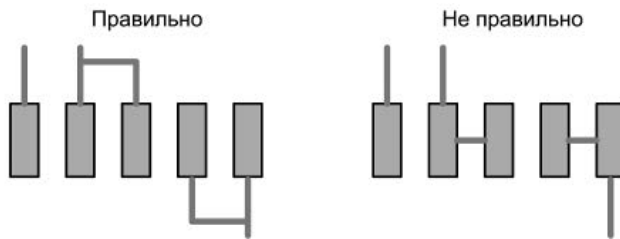


Рисунок 4.19. Приклад підведення провідників до контактних площинки мікросхем

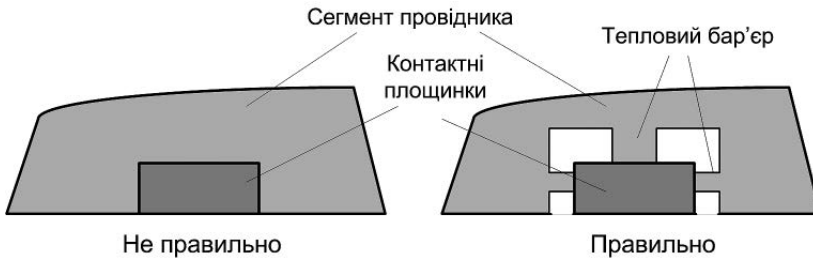


Рисунок 4. 20. Приклад розташування контактних площинки на сегментах провідників

Рекомендації щодо *маркування* на платі:

- маркування на платі слід робити *методом шовкографії* або в прошарку провідників;
- *графічні і позиційні* позначення компонентів мають вказувати на полярність і орієнтацію компонентів на платі;
- у разі необхідності слід передбачати на платі місце для нанесення дати виготовлення плати та класу горючості;
- маркування методом шовкографії бажано розташовувати тільки *на сегментах плати, вкритих захисною маскою*;
- маркування компонентів, розташованих поруч один з одним, слід робити так, щоб вони *не перетинались і не накладались один на одного*.

Для виготовлення *серії плат* із застосуванням автоматизованого монтажу перед початком виробництва з одиночної плати створюють *технологічну заготовку* у вигляді панелі з плат (рис. 4.17), або одиночної плати з технологічними зонами (смугами).

Технологічні зони одночасно виконують кілька функцій:

- забезпечують *фіксацію* заготовки в трафаретному принтері (під час нанесення паяльної пасти), а також на лінії для автоматичного установалення компонентів;
- дають змогу розміщувати компоненти у *безпосередній близькості* до краю плати;
- забезпечують місце для розміщення *реперних знаків*;
- забезпечують додаткову *жорсткість заготовки* у разі її малої товщини і наявності в ній великої кількості внутрішніх вирізів.

Технологічні зони, як правило, розташовують уздовж *довгої сторони* заготовки і мають ширину 5 мм. На краях технологічних зон мають бути отвори діаметром 3,3 мм для фіксації заготовки в трафаретному принтері. Від заготовки технологічні зони відокремлюють методом скрайбування або містками.

Скрайбування (англ. *scribe* – шкрябати) є поширеною технологічною процедурою для поділу пластини на окремі складові. Скрайбування полягає у створенні в матеріалі канавки вздовж лінії розділення окремих частин заготовки.

У разі, якщо застосування технологічних зон неприпустиме через особливості конструкції, на платі слід передбачити зони вільні від компонентів, які мають такі ж характеристики, що й технологічні зони.

Реперні знаки (Мітки відліку. Fiducial Marks).

Мітка відліку є центром системи координат на етапі складання плати.

Цю мітку використовують для коригування похибки вимірювання поточних координат у процесі функціонування автоматизованої лінії установалення електронних компонентів. Зазначені похибки накопичуються у процесі автоматичного установалення компонентів на плату. Існує два види міток початку відліку: загальні (*Global fiducials*) і локальні (*Local fiducials*).

– *загальні мітки* використовують для всієї плати або, у випадку кількох плат об'єднаних у панель, для координатної прив'язки всієї панелі. Потрібно мінімум дві загальні мітки, зазвичай розташовані у діагонально-протилежних кутках плати на максимально можливій відстані одна від одної. Загальні мітки необхідно робити на всіх шарах, що містять компоненти.

– *локальні мітки* використовують для прив'язки конкретного компонента (зазвичай з великою кількістю виводів і маленьким кроком між ними) для обчислення координат (*X, Y offsets*). Локальні мітки відліку розташовують зазвичай по діагоналі, на периметрі зони, в якій має бути розташовано відповідний компонент. У разі нестачі вільного місця можна використовувати одну локальну мітку відліку переважно в центрі зони розташування компонента.

Усі мітки необхідно розташовувати *поза зонами*, де розташовано провідники та компоненти. У сучасному виробництві переважно застосовують мітки відліку у формі зафарбованого кола, $A = (0,8...3,0)$ мм ($0,03''... ,12''$), рис. 4.21. Рекомендований розмір «А» мітки відліку 1 мм. На друкованій платі (на панелі) мітки відліку мають бути однієї форми і розміру. Загальні мітки можна робити більшого розміру, ніж локальні.

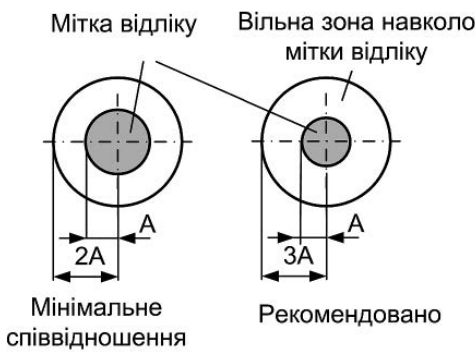


Рисунок 4.21. Структура мітки відліку

Навколо мітки необхідно робити *зону вільну* від провідників, компонентів та захисної маски (заборонена зона). Усі мітки треба зображати в шарі провідників. Мітки не можна вкривати маскою, вони повинні мати гладке металеве покриття, що добре відбиває світло (нікель, сплави олова, срібло). Між мітками та краєм плати має бути відстань не менше 5 мм ($0,2''$) плюс ширина забороненої зони. Рекомендовано розміщувати мітки в точках, як наведено на рис. 4.22.

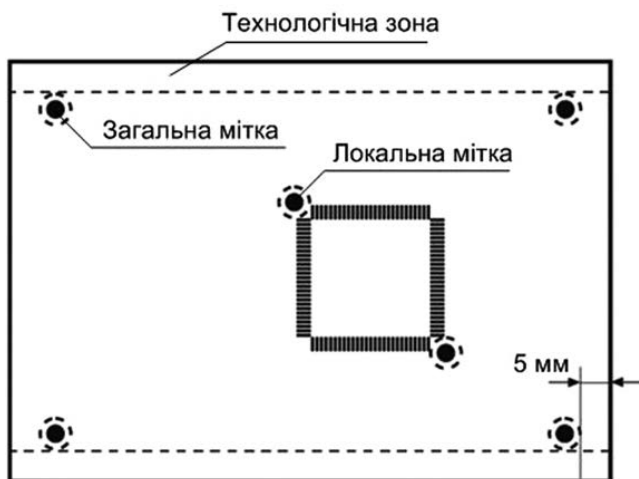


Рисунок 4. 22. Схема розташування міток відліку на платі

4.14. Засоби автоматизованого проектування друкованих плат

З визначення мети процесу проектування друкованої плати випливає, що процес починається з концепції і закінчується складанням і тестуванням. Засоби автоматизованого проектування використовують для автоматизації або збільшення швидкості і точності кожного етапу цього процесу. Ці засоби можна розділити на три основні групи, залежно від того на якому етапі їх застосовують:

- засоби автоматизованого конструювання (*CAE – computer-aided engineering*);
- системи автоматизованого проектування (*САПР, CAD – computer-aided design*);
- засоби автоматизованого виробництва (*CAM – computer-aided manufacturing*). Із назв зазначених засобів можна зрозуміти, що їх використовують відповідно для проектування схем, фізичного конструювання друкованої плати та виготовлення плат без монтажу або з монтажем.

Програми автоматизованого проектування друкованих плат

Засоби автоматизованого проектування застосовують для *перетворення електричного кола*, описаного принциповою схемою, у проект фізичної реалізації друкованої плати. Засоби проектування САПР зазвичай застосовує фахівець з проектування друкованих плат, який має досвід у сфері виробництва та складання плат, а не інженер-електротехнік. Існує велика кількість систем САПР запропонованих різними виробниками, але усі вони мають схожі інтерфейси і базові складові. Ці засоби містять *таблиці з'єднань* електричних схем, *перелік компонентів*, *правила трасування* та *розміщення компонентів* на платі тощо. Системи САПР можуть бути різного ступеня складності. Найпростіші системи дозволяють проектувальнику створювати схеми контактних площинок для виводів компонентів і форму друкованої плати, а потім вручну з'єднувати виводи компонентів провідниковими доріжками. Найбільш комплексні засоби САПР дозволяють автоматично визначати оптимальне положення кожного компонента друкованої плати (авторозміщення) і потім автоматично з'єднувати (автотрасування) всі виводи із дотриманням правил компоновання. У процесі проектування застосовують правила, у яких визначено, які компоненти має бути розміщено в групах або поблизу з'єднувачів, який простір потрібно забезпечити між сусідніми трасами та компонентами, максимально допустиму довжину провідників між точками на схемі тощо.

Вихідними даними програмних засобів проектування є інформаційні файли, які необхідні для виробництва, збирання та тестування друкованої плати. До цих файлів віднесено тестові таблиці з'єднань, файли для фотоплотера, відомості матеріалів, файли для монтажу та складальні креслення.

Засоби САПР складено з *програми трасування схем* (трасувальник), *розміщення компонентів* (компоувальник), засобів тестування і засобів створення вихідних файлів (постпроцесор – система кінцевого оброблювання).

Засоби розміщення компонентів використовують для розташування компонентів на поверхні друкованої плати. Засоби розміщення зазвичай є складовою частиною повної системи САПР, а не окремим модулем. *Вхідними даними* для автоматизованих засобів розміщення є:

- *список компонентів* або відомість матеріалів;
- *список з'єднань* в електричній схемі або спосіб з'єднання компонентів;
- *форми, розміри і просторове розміщення виводів* компонентів;
- *форма друкованої плати* із зазначенням сегментів, куди компоненти розміщувати не можна (вільні зони);
- *інструкції* щодо фіксованого розташування компонентів, таких як з'єднувачі;
- *правила електричних з'єднань*, такі як максимальна й мінімальна відстань між точками електричного кола;
- *правила теплового режиму*, в яких визначено, які частини слід тримати віддалено або поблизу джерел потоку повітря.

Програмні засоби розміщення компонентів можуть бути різними і забезпечувати робочі режими від повністю ручного до повністю автоматизованого. Усі програмні компонувальники мають певну форму графічного зворотного зв'язку з проектувальником, що дозволяє оцінювати якість розміщення з прогнозуванням можливості трасування або з'єднання із застосуванням необхідного числа сигнальних шарів. У більшості трасувальників застосовують правила розміщення, в яких передбачено достатній простір між компонентами для успішного складання, перероблення і випробування.

Трасувальники друкованих плат є частиною системи САПР, вони прокладають лінії електричних з'єднань між компонентами, як це визначено списками електричних з'єднань, складеними за принциповою схемою, після того як був завершений етап з розміщення компонентів.

Трасувальники можуть забезпечувати різні режими проектування від повністю ручного режиму, в якому проектувальник визначає, де будуть розміщені траси, за допомогою відповідних засобів графічного інтерфейсу (комп'ютерного дисплея та маніпулятора), до повністю автоматизованого, за якого спеціалізована програма бере список з'єднань і, на підставі правил розміщення і правил створення проміжків між компонентами, а також правил трасування, виробляє всі рішення, необхідні для повної реалізації усіх з'єднань.

Основною перевагою ручного трасування є те, що проектувальник може зробити кожне з'єднання відповідно до власного розуміння конструктивних особливостей певного фрагменту схеми. Основним недоліком ручного трасування є те, що його можна здійснювати досить повільно і це потребує багато часу. Для прокладання однієї лінії електричного з'єднання та її перевірки часто доводиться витратити кілька хвилин.

Із застосуванням автоматизованих трасувальників тривалість процесу прокладання ліній між выводами електронних компонентів значно скорочується. Однак можливість детального контролю форми кожного провідника обмеже-

на властивістю автотрасувальника виконувати формальні правила трасування з'єднань. У деяких сучасних автотрасувальниках закладено можливість узгоджувати трасу за дуже складними правилами (алгоритмом трасування). Істотною проблемою автотрасувальників є те, що інколи вони не в змозі знайти спосіб успішного прокладання усіх з'єднувальних ліній. Коли таке відбувається, проектувальник може додати більше місця для провідників за рахунок додаткових шарів або спробувати завершити трасування в ручному режимі. Важливою функцією хорошого автотрасувальника є варіант трасування у ручному режимі, оскільки це суттєво впливає на успішне здійснення фінальної операції, яка часто буває необхідною для завершення трасування. Майже всі трасувальники мають комплект засобів перевірки, і це гарантує, що остаточне трасування узгоджено зі списком електричних з'єднань і, що було дотримано всіх правил стосовно резервування вільного простору між компонентами.

Програма трасування може бути складовою частиною системи САПР або окремим модулем, який можна використовувати у складі системи САПР.

Існують *два типи трасувальників*, загальні властивості яких наведено нижче.

Трасувальник з координатною сіткою. Цей тип трасувальника (сітковий трасувальник) у процесі функціонування розміщує провідники на попередньо задану координатну сітку. Усю поверхню, призначену для розведення ліній електричного зв'язку вкрито регулярною сіткою, яка забезпечує належний проміжок між провідниками, якщо провідники проводять по лініям сітки. Такий різновид трасувальника є першим варіантом програми, запропонованої в разі як автоматизованого, так і ручного трасувальника, що надходить у складі системи САПР. Основними недоліками трасувальників з координатною сіткою є складність керування прокладанням провідникових доріжок більш ніж однієї ширини без втрати щільності їх розміщення і необхідність розташовувати кінцеві точки з'єднувальних ліній на сітці трас для їх успішного з'єднання. З'єднання компонентів поза координатною сіткою зазвичай необхідно робити вручну і перевіряти аналогічним чином.

Трасувальник без координатної сітки. Розташування провідників в цьому різновиді програми трасування (безсітковий трасувальник) не залежить від координатної сітки. Замість неї програма розміщує якомога більше провідників, які тільки можна розмістити на наявній поверхні плати за умови дотримання правил резервування вільних проміжків, встановлених інженером-конструктором для забезпечення належних електричних характеристик з метою оптимізувати технологічний процес виготовлення. За допомогою цього різновиду програми трасування можна легко обробляти траси різної ширини, що розташовуються на одному провідниковому шарі. Після здійснення трасування програма розподіляє невикористаний простір на рівні частини. Перевага цього методу полягає у можливості оптимізувати технологічність процесу виготовлення за рахунок підтримування якомога більших проміжків між компонентами. Недоліком цього різновиду програми трасування є те, що зазвичай вона залежить від шару, на якому здійснюється прокладання провідників, що передбачає не-

обхідність розташовувати всі провідники або горизонтально, або вертикально. Зазначена особливість є суттєвим недоліком у разі використання технології *SMT*, де для з'єднання компонентів не використовують наскрізних отворів.

Для багатьох сучасних схем необхідно застосовувати дуже потужні програми трасування особливо для тих, де наявні регулярні матриці елементів з дуже великим числом штиркових виводів, таких як процесори або багатопроцесорні системи. Цей різновид трасувальникові є основним робочим засобом для конструювання цифрових пристроїв дуже високої складності, в яких багато регулярних структур, і потрібно реалізувати прогнозовані проміжки і довжини трас, щоб забезпечити необхідну швидкодію та продуктивність.

Трасувальник з урахуванням форми. Цей тип трасувальника розпізнає форми вже встановлених на монтажній поверхні елементів і прокладає провідники в обхід. Вільний простір між провідниками та іншими об'єктами, такими як наскрізні отвори, застосовані для переходу на інший шар, і контактні площадки, використовується як простір для трасування. Цей тип трасувальників широко застосовують для конструювання плат за технологією *SMT*.

Засоби перевірки. За допомогою цих програмних засобів здійснюють перевірку відповідності трасування друкованої плати правилам резервування вільного простору між трасами, між отворами і трасами шляхом порівняння фактичних проміжків, наявних в готових трафаретах, з тими, які встановлено правилами конструктора плат. Вони також дають змогу перевірити, що всі лінії з'єднання присутні відповідно до списку з'єднань й відсутні з'єднання з об'єктами, з якими з'єднання не передбачено (інші електричні кола або механічні елементи на друкованій платі). Деякі засоби перевірки також забезпечують перевірку дотримання правил прокладання лінії зв'язку і того, що перекриття з сусідніми трасами знаходиться в допустимих межах. Комплект засобів перевірки зазвичай є складовою частиною системи САПР.

Генератори вихідних файлів. Після трасування друкованої плати та перевірки точності всіх з'єднань система САПР містить інформацію про конструкцію плати у формі робочих комп'ютерних записів (файлах). Для того, щоб ці дані можна було використати для виготовлення друкованої плати, їх слід перетворити у файли з форматом, який можна використовувати на технологічному обладнанні, такому як фотоплотери, тестери і монтажне обладнання. Системні модулі, що генерують вихідні файли, виконують необхідні перетворення. Більшість систем САПР мають обмежений набір модулів для формування інструментальних файлів. Для деякого обладнання генератори або перетворювачі (конвертори) доводиться замовляти окремо.

Перелік програмних засобів для проектування друкованих плат доволі великий, тому для прикладу наведемо стислі характеристики кількох з них.

Sprint-Layout – простий, але дуже ефективний програмний пакет для проектування друкованих плат малої і середньої складності. Програма дуже популярна серед радіоаматорів.

Eagle – поштрене програмне забезпечення для креслення електричних схем і подальшого автоматичного трасування друкованих плат. Є версія з певними функціональними обмеженнями, що розповсюджується безкоштовно.

DipTrace – система автоматизованого наскрізного проектування електричних схем і трасування друкованих плат. Програмне забезпечення містить модулі: Schematic і PCB Layout (для розроблення плат за допомогою ручного або автоматичного трасування). Є дві версії програмного пакету: Freeware (безкоштовна з обмеженнями) і Shareware (платна).

ExpressPCB – проста у навчанні і зручна в роботі система ручного проектування друкованих плат. Основними позитивними характеристиками ExpressPCB є: безкоштовне розповсюдження, легкість освоєння, швидкість створення власної бази радіодеталей і мікросхем, коректність роботи програми. Для ExpressPCB характерні кращі якості, що є у програми Sprint Layout.

Altium Designer – професійна система автоматизованого проектування друкованих плат від розробників добре відомої системи P-CAD, що надає найширші можливості для створення електронних пристроїв.

DesignSpark PCB – потужна, зручна і безкоштовна система проектування для професійного створення електронних схем та друкованих плат, має функцію автотрасування. Підтримує експорт в Spice-симулятори.

Pad2Pad – невелике і зручне програмне забезпечення для конструювання друкованих плат різного ступеня складності (Freeware).

P-CAD – одна з перших і найпоширеніших комп'ютерних систем автоматизованого проектування друкованих плат радіоелектронних та обчислювальних пристроїв. Останню офіційну версію P-CAD 2006 SP2 розробили у 2006 році.

4.15. Запитання для самоконтролю

1. Що таке друкована плата?
2. Поясніть поняття «друкований монтаж».
3. Для чого поле друкованої плати вкривають координатною сіткою під час конструювання?
4. Чим обумовлено необхідність застосовувати однобічні, двобічні й багатопшарові друковані плати у процесі виробництва електронної апаратури?
5. Назвіть елементи друкованої плати і поясніть їх призначення.
6. Які чинники визначають обмеження геометричних розмірів друкованих плат?
7. Чим монтажний отвір відрізняється від перехідного? Чи може монтажний отвір бути перехідним?
8. Що таке «вузькі місця» на друкованій платі і чому вони виникають?
9. Які етапи виділяють у процесі конструювання друкованих плат?
10. На які додаткові чинники необхідно звертати увагу під час здійснення проектних та конструкторських робіт зі створення друкованої плати?
11. Що таке типові друковані плати, де і для чого їх застосовують?

12. Які конструктивні характеристики є однаковими для типових друкованих плат?
13. Де і чому доводиться використовувати нетипові друковані плати, чим вони відрізняються від типових?
14. Які максимальні розміри рекомендовано для однобічних друкованих плат, чим обумовлено обмеження розмірів?
15. Поясніть конструкцію однобічної друкованої плати. Що розміщують на кожному боці такої плати?
16. Поясніть конструкцію двобічної друкованої плати.
17. Чим обумовлено використання багатошарових друкованих плат?
18. Поясніть конструкцію багатошарової друкованої плати.
19. На які класи поділяють друковані плати за щільністю монтажу?
20. Надайте порівняльну оцінку позитивним та негативним характеристикам ОБДП, ДБДП та БШДП.
21. Скільки класів точності передбачено у чинному в Україні стандарті для друкованих плат?
22. Якими параметрами відрізняються плати різних класів точності?
23. Поясніть, чим відрізняється європейська класифікація для точності друкованих плат від тої, що застосовують на тепер в Україні?
24. Якої форми контактні площинки рекомендовано застосовувати на друкованих платах?
25. Яку конструкцію рекомендовано застосовувати для широких провідників (ширше 5 мм) і чому?
26. Які вимоги мають забезпечувати матеріали друкованих плат?
27. Які матеріали використовують для виготовлення однобічних та двобічних друкованих плат?
28. Які матеріали використовують для виготовлення багатошарових друкованих плат?
29. Яку структуру і властивості має склотекстоліт для друкованих плат?
30. Чим відрізняються гетинакси та склотекстоліти як матеріали основи друкованих плат?
31. Що таке температура оскління?
32. Наведіть характеристики матеріалів друкованих плат групи FR-4.
32. Наведіть характеристики матеріалів друкованих плат групи СЕМ-3.
33. Наведіть характерні властивості фольгованих армованих фторопластових діелектриків.
34. Що таке фінішне покриття друкованої плати і які матеріали для цього використовують?
35. Наведіть властивості фінішного покриття HASL.
36. Наведіть властивості фінішного покриття Gold Flash.
37. Наведіть властивості фінішного покриття OSP.
38. Поясніть основні операції комбінованого методу виготовлення жорстких друкованих плат.

39. Назвіть радіоелектронні елементи, що віднесено до пасивних компонентів.

40. Які типорозміри пасивних компонентів є найбільш поширеними у процесі виробництва сучасних друкованих плат?

41. Які електричні характеристики елементів друкованої плати необхідно враховувати під час конструювання?

42. Яку класифікацію застосовують для характеристики складності друкованих плат у міжнародній практиці, що характеризує клас складності?

43. Яку електронну апаратуру виготовляють за першим класом складності?

44. Яку електронну апаратуру виготовляють за другим класом складності?

45. Яку електронну апаратуру виготовляють за третім класом складності?

46. Надайте стисле пояснення технології виготовлення БШДП методом металізації наскрізних отворів.

47. Надайте стисле пояснення технології виготовлення БШДП методом парного пресування.

48. Надайте стисле пояснення технології виготовлення БШДП методом шарового нарощування.

49. З яких етапів складається процес конструювання друкованих плат для автоматизованого монтажу.

50. Яких рекомендацій слід дотримуватись щодо розміщення компонентів та друкованих провідників на поверхні друкованих плат під час конструювання плат для автоматизованого монтажу?

51. Яких рекомендацій слід дотримуватись щодо проектування форми контактних площинок та їх з'єднання з сигнальними лініями та перехідними отворами під час конструювання плат для автоматизованого монтажу?

52. Для чого використовують реперні знаки на друкованій платі, призначеній для автоматизованого монтажу?

53. Для чого використовують технологічні зони на заготівці для виготовлення друкованих плат?

54. Що є вхідними даними для автоматизованих засобів розміщення компонентів на поверхні друкованої плати?

55. Яке призначення програм трасувальників друкованих плат і які режими їх функціонування є найбільш поширеними?

56. Яка послідовність дій конструктора у разі застосування автоматизованої комп'ютерної системи проектування друкованих плат?

57. Яку документацію можна підготувати засобами автоматизованого комп'ютерного проектування друкованих плат для документального забезпечення виробництва?

Розділ 5. Конструювання гнучких і гнучко – жорстких друкованих плат

Гнучкі друковані плати – це всілякі системи *гнучких шлейфів*, виготовлених у вигляді друкованих плат, які можуть містити одно-, дво- і багатошарові структури, що призначено для з'єднання функціональних вузлів електронної апаратури. Їх конструкції можуть бути повністю гнучкими або комбінацією жорстких і гнучких частин. Збільшення попиту на гнучкі схеми і, особливо, на гібридні жорстко-гнучкі багатошарові друковані плати обумовлено такими чинниками.

1. Гнучкі схеми надають можливість створювати *унікальні конструкції*, що дає змогу вирішувати питання міжсхемних з'єднань і монтажу, із забезпеченням їх гнучкості.

2. За допомогою таких схем виробники друкованих плат можуть виготовляти складні гнучкі шлейфи та інші конструкції з *гарантовано високим* відсотком виходу придатних до експлуатації пристроїв.

3. У гнучких платах застосовують найбільш *прогресивні адгезійні* системи, такі як акрилові, для формування гнучких композиційних матеріалів.

4. Гнучкі плати забезпечують *підвищену ефективність і надійність* кінцевих систем. У порівнянні з жорстким монтажем друковані плати, виготовлені з матеріалів на основі поліімідів, акрилатів, поліефірів і епоксидних смол, *еконімічно ефективніші*, оскільки їх застосування забезпечує:

- більше *творчих можливостей* конструктору;
- більш *високу продуктивність* у процесі виробництва плат та монтажу готових виробів;
- *виграш* щодо масогабаритних показників кінцевого виробу;
- *простоту* безпомилкового монтажу й складання кінцевого виробу.

5.1. Типи гнучких друкованих плат

У міжнародних стандартах ІЕС та ІРС гнучкі плати класифіковано за типом конструкцій на п'ять типів.

Тип 1. Однобічна гнучка друкована плата, що містить один провідниковий шар, зі зміцненням конструкції або без нього (рис. 5.1).

Тип 2. Двобічна гнучка друкована плата, що містить два провідникові шари й наскрізні металізовані отвори, зі зміцненням конструкції або без нього (рис. 5.2).

Тип 3. Багатошарова гнучка друкована плата, що містить три і більше провідникових шари з наскрізними металізованими отворами, зі зміцненням конструкції або без нього (рис. 5.3).

Тип 4. Гнучко-жорстка друкована плата, що містить три і більше провідникових шари з наскрізними металізованими отворами (рис. 5.4).

Тип 5. Гнучка або гнучко-жорстка друкована плата, що містить два або більше провідникових шари без наскрізних металізованих отворів.

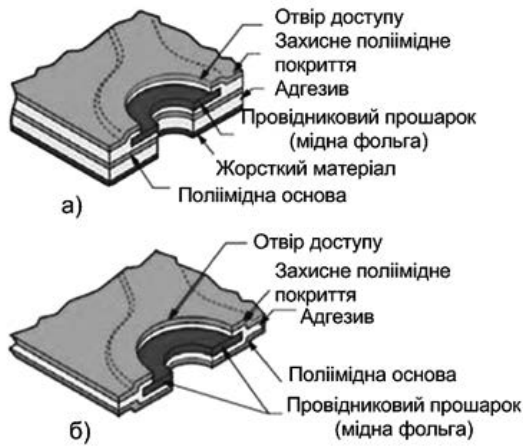


Рисунок 5.1. Фрагменти однобічних гнучких друкованих плат:
а – з механічним підсиленням, *б* – без підсилення



Рисунок 5.2. Структура двобічної гнучкої друкованої плати

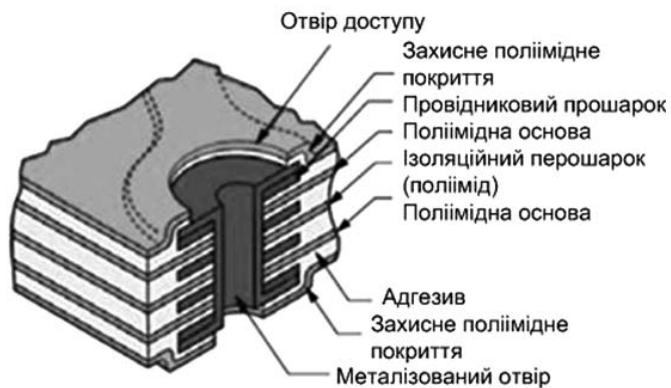


Рисунок 5.3. Пошарова структура гнучкої багатощарової друкованої плати

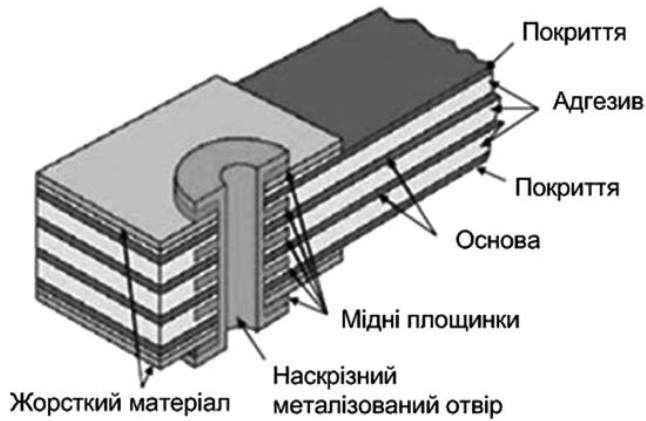


Рисунок 5.4. Фрагмент гнучко-жорсткої друкованої плати

Гнучкі плати, так само як і жорсткі, класифікують за призначенням, що також необхідно враховувати і вказувати в конструкторській документації. За цією класифікацією плати розподілено на категорії *A, B, C, D*.

Категорія А. До цієї категорії віднесено гнучкі плати, гнучкість яких проявляється тільки у процесі складання кінцевого виробу (*статична стійкість*). На рис. 5.5 наведено гібридний вузол для військового приладу спостереження, в якому застосовано багатошарову гнучко-жорстку друковану плату.

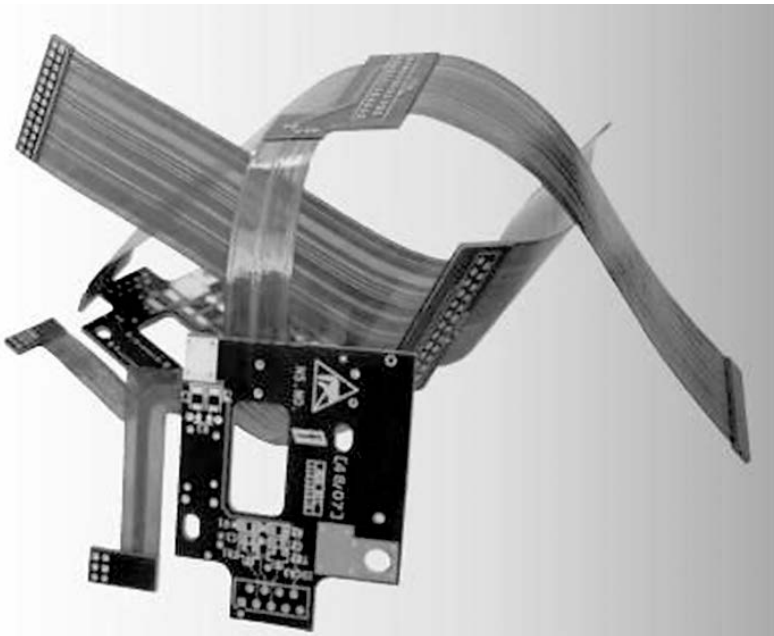


Рисунок 5.5. Багатошарова гнучко-жорстка плата (6-шарів) для військового приладу спостереження

Тут гнучкість гнучкої частини плати використовують тільки у процесі складання. Перевага таких конструкцій полягає у підвищеній їх надійності внаслідок відсутності рознімних або паяних з'єднань.

Категорія В. До цієї категорії віднесено гнучкі плати, що постійно згинаються у процесі функціонування (*динамічно стійкі*). Ці плати поділяють на: «*періодично*» гнучкі (сотні і тисячі циклів перегинів) і «*безперервно*» гнучкі (мільйони і мільярди циклів перегинів). Для таких плат у конструкторській документації вказують стійкість до певної кількості перегинів і умови (радіуси) перегинів.

Категорія С. Плати цієї категорії – це плати для *високотемпературного* застосування (більше 105°C).

Категорія D. Плати цієї категорії – це плати, що мають сертифікацію UL, тобто мають *підвищену вогнестійкість*, зіставну з вогнестійкістю жорстких плат.

5.2. Матеріали для гнучких друкованих плат

Для гнучких плат та гнучких частин гнучко-жорстких плат використовують низку сучасних матеріалів, що суттєво відрізняються від матеріалів для традиційних жорстких плат. Вибір матеріалу залежить від умов експлуатації. Характеристики матеріалу для гнучких друкованих плат, які обов'язково слід брати до уваги такі:

- *розмірна стабільність*;
- *тепlostійкість* (можливе паяння без руйнувань і зменшення гнучкості);
- *стійкість до розриву*;
- *прийнятні електричні властивості*;
- гнучкість під дією *екстремальних температур*;
- *мале водопоглинання* (не призводить до розшарування або відшарування у разі нагрівання);
- *хімічна стійкість* (у процесі виробництва та експлуатації);
- *негорючість*.

Крім зазначених спеціальних характеристик до уваги слід брати також загальні характеристики матеріалу такі, як *стабільність характеристик*, наявність кількох джерел постачання, *вартість*, *витрати матеріалу* на одиницю виробу тощо.

Основними конструкційними матеріалами гнучких друкованих плат є *базовий матеріал* (матеріали основи гнучкої плати), адгезив, металева фольга або фольгований матеріал, покривні плівки.

Адгезив – речовина, здатна з'єднувати матеріали шляхом поверхневого зчеплення. Адгезиви бувають природними та синтетичними. Скріплювальна дія адгезиву обумовлена створенням молекулярних зв'язків між ним і поверхнями з'єднуваних матеріалів. Мікронерівності, що заповнюються адгезивом, збільшують площу контакту між прилеглими поверхнями. Після застигання адгезиву поверхні з'єднано склеюванням.

Місце матеріалів у структурі багат шарової гнучкої плати наведено на рис. 5.3.

5.3 Матеріали для основи гнучких плат

Найбільш поширеними матеріалами для основи гнучких плат є поліефірні плівки з поліетилентерефталатів (лавсан, майлар, Mylon, Melinex, Luminor, Celanar) і різні системи поліімідів.

Полііміди – це термостійкі поліконденсатні полімери на основі ароматичних тетракарбонових кислот і ароматичних діамінів.

У виробництві гнучких друкованих плат поліімідні плівки є домінуючим матеріалом. Є кілька формул поліімідів, що відомі за назвами торгових марок, таких, як Kapton, Arical, Novax, Espanex, Upilex тощо.

До позитивних конструкційних властивостей поліімідних плівок можна віднести такі:

- дуже хороша *гнучкість* за всіх припустимих температур;
- хороші *електричні властивості*;
- дуже хороша *хімічна стійкість* (за винятком взаємодії з гарячими концентрованими лугами);
- дуже хороша *стійкість до розриву* (але погана стійкість до поширення розриву);
- певні типи поліімідів мають додаткові позитивні характеристики (*коефіцієнт розширення*, узгоджений з міддю, *зменшену механічну напруженість* у ламінатах);

- поліімід можна *хімічно протравлювати* в гарячих лугах;
- робочий *діапазон температур*: $-200...+300^{\circ}\text{C}$.

Недоліки поліімідів:

- *високе вологопоглинання* (до 3% від початкової маси);
- *відносно висока вартість*.

Іншим поширеним матеріалом для основи гнучкої друкованої плати є поліефірні плівки.

Поліефірні плівки (поліетилентерефталат, PETF) також мають низку позитивних властивостей, що й обумовлює їх використання у багатьох електронних пристроях і, зокрема, у пристроях реєстрації інформації.

До позитивних характеристик поліефірних плівок відносять такі:

- *відносно низька температура переходу* в пластичний стан (можна легко формувати потрібний профіль);
- *дуже низька вартість*;
- хороша *стійкість до розриву* і поширення розриву;
- *дуже хороша гнучкість*;
- хороша *хімічна стійкість*;
- *мале вологопоглинання*;
- *хороший баланс електричних характеристик*;
- *широкий робочий діапазон температур* ($-60...+105^{\circ}\text{C}$).

Недоліками поліефірних плівок є:

- *дуже обмежена здатність* до паяння (мають низьку точку плавлення);

- не можна використовувати за дуже низьких температур (стають крихкими);
- недостатня розмірна стабільність.

5.4. Адгезиви

Адгезиви використовують для з'єднання мідної фольги з базовою плівкою, а також для об'єднання прошарків у багатошарових і гнучко-жорстких конструкціях друкованих плат. Конструктивні властивості адгезивів є визначальними й водночас критичними для властивостей кінцевого виробу. Часто адгезиви є тим елементом, що обмежує термічні властивості гнучких друкованих плат, коли використовують поліімід як базовий матеріал.

Широко застосовують акриловий адгезив, клеї на основі модифікованої епоксидної смоли, поліімідний адгезив. Зазначені адгезиви мають істотно різні властивості.

Акриловий адгезив має найбільше поширення, він добре поєднується з поліімідними плівками (має такий же коефіцієнт розширення, як поліімід, і так само, як поліімід, його можна протравлювати в лузі).

Епоксидні клеї та клеї на основі модифікованої епоксидної смоли не сполучаються з поліімідними плівками оскільки вони крихкі. Але вони незамінні для склеювання твердої частини гнучко-жорстких друкованих плат.

Поліімідний адгезив добре поєднується з поліімідними плівками, але вимагає дуже високої температури оброблення.

5.5. Фольга

У виробництві гнучких друкованих плат для створення провідникового рисунка переважно використовують мідну фольгу. У рідкісних спеціальних випадках раніше застосовували нікелеву фольгу або нержавіючу сталь, коли передбачалось, що з'єднання виводів компонентів з друкованими провідниками буде здійснено зварюванням. У табл. 5.1 наведено конструктивні параметри різних фольгових матеріалів для провідників гнучких плат.

Виняткове використання міді обумовлено її хорошою провідністю, здатністю добре зчеплюватись з іншими покриттями, хорошою пластичністю і, що дуже важливо, однорідністю з матеріалами металізації різноманітних елементів електричних з'єднань (зокрема наскрізних і закритих отворів), які теж роблять міддю. Отримати тонку мідну фольгу технічно складне завдання.

Для формування фольги застосовують кілька різних технологій. Відповідно до цих технологій фольга буває стандартна електролітична, високочастотна електролітична, відпалена електролітична, гарячекатана, холоднокатана, відпалена катана, катана з подальшим низькотемпературним відпаленням. Використовують також способи металізації гнучких плівок напыленням і хімічним осадженням.

Фольга зі спеціальних мідних сплавів має більший опір, але і більшу міцність, і забезпечує хорошу стійкість до перегинів, порівнянну з катаною фольгою. Крім того, така фольга більш стійка під час виробництва ламінату – менше дефектів.

Таблиця 5.1. Конструктивні параметри різних фольгових матеріалів для провідників гнучких плат

Метал фольги	Питомий опір, Ом·см·10 ⁻⁶	Теплопровідниковість, Вт/(м·К)	Міцність до розтягування, кг/мм ²	Пластичність, %
Мідь холоднокатана відпалена	1,72	393	38	20
Мідь електролітична	1,77	393	30	12
Алюміній	4,33	225	18	30
Нержавіюча (нікелева) сталь	75	6	100	40
Берилієва бронза	8	83	70-200	35-60 (1-4 – після відпалення)

Останнім часом використовують спеціальні види двошарової фольги для формування на платі резистивних елементів, рис. 5.6.

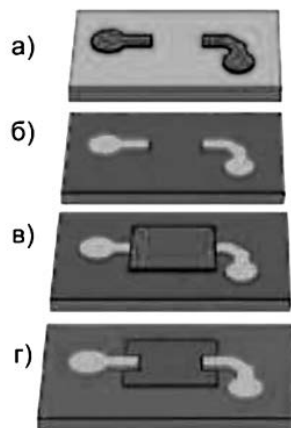


Рисунок 5.6. Послідовність формування резистивного елемента із застосуванням двошарової мідної

Спрощено процес формування резистивного елемента можна подати такою послідовністю операцій: на верхньому шарі мідної фольги формують провідникові лінії як для забезпечення безпосередніх електричних зв'язків, так і для забезпечення контакту з відповідним резистивним елементом (рис. 5.6 а,б) потім за допомогою фотошаблону формують тіло резистивного елемента (рис. 5.6 в,г).

5.6. Покривні плівки

Покривні плівки або *захисні шари* – аналоги паяльної маски для жорстких друкованих плат, але вони мають бути гнучкими. Правильне використання покривних плівок збільшує стійкість гнучких плат до перегинів.

Матеріали покривних плівок – не повністю полімеризовані полімери на основі *акрилатів, поліуретанів, акрілепоксидів* тощо.

Якщо для оголення монтажних поверхонь застосовують фотолітографічні процеси, у плівки вводять *фотоініціатори*, що призводять до вибіркового затвердіння плівок під дією ультрафіолетового випромінювання. Іншими методами забезпечення доступу до монтажних поверхонь є свердління або висікання плівок, тобто механічне оброблення.

Захисний шар – це гнучке діелектричне покриття, нанесене на гнучку друковану плату після створення на ній рисунка всіх провідників і контактних площинок. Захисний шар використовують для того, щоб *захистити провідники* на поверхні гнучкої друкованої плати від *агресивного впливу навколишньої атмосфери* і можливих *коротких замикань провідників між собою* та з іншими навколишніми металевими конструкціями.

Захисний шар виготовляють з гнучкого матеріалу, який може набувати форми, необхідної для функціонування пристрою. Існують два типи захисних покриттів: *плівкові* та *маскові*.

Суцільна захисна плівка складається з *адгезиву* і *діелектричної плівки*, по-слідовно нанесених на гнучку друковану плату. Для динамічних конструкцій важливо витримувати баланс механічних властивостей між провідниковими шарами та захисною плівкою.

Захисна маска – це діелектричне покриття, яке наносять на ділянки гнучкої плати *ламініванням сухої плівки, шовкографією, напиленням* або *поливом*.

Шовкографія – трафаретний метод нанесення малюнка за допомогою сітчастого трафарету, через капіляри якого фарбу продавлюють спеціальним інструментом (ракелем).

Для *більш точної* реалізації захисного малюнка для покриття може бути використано *фоточутливий матеріал*.

На поверхню захисного шару, а також на діелектричну основу гнучкої друкованої плати для екранування провідників від впливу зовнішніх електричних полів може бути нанесено *провідникові фарби* на основі *срібла, міді* або полімерів зі значним вмістом вуглецю.

5.7. Покриття монтажних поверхонь (покриття для паяння)

Поверхні, призначені для *паяння* повинні мати здатність до *змочування припоем* і довгостроково *зберігати цю здатність*. Для успішного паяння електронних модулів покриття компонентів і друкованих плат (фінішні покриття) мають бути добре *узгодженими* за своїми властивостями оскільки під час па-

яння вони знаходяться в однакових умовах відносно припою, флюсу й стосовно температурно-часового режиму. Сформовані традиції щодо покриттів для паяння сьогодні доводиться змінювати у зв'язку із застосуванням у виробництві побутової апаратури *безсвинцевих технологій паяння*.

Велика розмаїтість фінішних покриттів віддзеркалює той факт, що всі вони мають певні вади і не задовольняють одночасно вимоги щодо вартості, змочуваності, здатності зберігати свої властивості протягом тривалого часу тощо.

Серед фінішних покриттів, що використовують у процесі виготовлення гнучких плат, такі:

- OSP (Organic Solderability Preservative);
- NiAu (ENIG – Electroless Ni & Immersion Gold – хімічний нікель і іммерсійне золото);
- ImmAg (Immersion Ag);
- ImBi (Immersion Bi);
- Pd (Electroplate or Electroless Pd – хімічний або гальванічний паладій);
- NiPd (Electroless Ni & Immersion Pd);
- NiPdAu (Electroless NiPd & Immersion Au);
- ImmSn (Immersion Sn);
- NiSn (Electroplate Ni & Sn);
- SnAg (Electroplate Sn & Ag);
- HASL (Hot-Air Solder Leveling).

У цьому переліку найбільш уживаними фінішними покриттями друкованих плат є OSP, ENIG, ImmSn, ImmAg та HASL.

Оскільки більшість із зазначених фінішних покриттів використовують й у процесі виготовлення жорстких друкованих плат розглянемо характеристики окремих покриттів із наведеного списку.

Покриття ENIG (~ 4 мкм Ni + ~ 0,1 мкм Au) є певною альтернативою HASL-процесам. ENIG не призводить до іонних забруднень і придатне до багаторазового паяння за високих температур. Функція тонкого шару золота – захист нікелю від окислення, а сам нікель є бар'єром, що запобігає взаємній дифузії золота й міді.

Характерний для покриття ENIG дефект – чорні контактні площинки. Вони з'являються на поверхні внаслідок оголення нікелю і виділення фосфору, якщо тонкий шар золота розчиняється у припої раніше, ніж припій змочить нікель. Фосфор неминуче занурюється в нікель у процесі його хімічного осадження. Припій скочується з фосфорованої і окисленої поверхні нікелю, через що і проявляється ефект чорної контактної площинки. Чорні контактні площинки можуть виникати також у разі перевищення нормативного часу паяння або як наслідок неправильного вибору флюсу. Перетримка інтенсифікує утворення інтерметалідів олова з нікелем і олова з фосфором, що є в нікелі. Виділення фосфору на поверхні нікелю може спричинити також процес золочення. Осадження золота з нейтральних електролітів зменшує ймовірність цих явищ.

Для ENIG важко підібрати флюси, а його ціна приблизно на 25% вище, ніж у OSP. Позитивні характеристики ENIG:

- життєздатність більше року;
- пласка контактна поверхня;
- хороша змочуваність припоєм за умови правильного вибору флюсу;
- не окислюється у разі застосування для натискних та ковзних контактів.

Імерсійне олово (ImmSn) – ще одна альтернатива HASL-процесам.

Популярність ImmSn зростає внаслідок забезпечення доброї змочуваності і простоти процесу осадження. ImmSn забезпечує безпроблемне і краще паяння, ніж ENIG.

Раніше існували обмеження для застосування ImmSn через утворення інтерметалічних сполук $CuXSnY$. У такому випадку здатність до паяння зникала через два тижні, оскільки товщина імерсійного олова не перевищує 1 мкм і $CuXSnY$ швидко поглинає цей тонкий шар.

Останнім часом технологію удосконалили і можливість зазначеного вище явища усунуто введенням бар'єрного металевого прошарку. Тепер здатність до паяння ImmSn (0,5-0,8 мкм) з бар'єрним прошарком (0,08-0,1 мкм) зберігається не менше року.

Переваги ImmSn з бар'єрним прошарком:

- відносно низька вартість процесу осадження;
- хороша і тривала здатність до паяння;
- пласка поверхня покриття (на відміну від HASL);
- хороші умови для забезпечення непаяних гальванічних з'єднань Press-Fit (запресовування штирів з'єднувачів у металізовані отвори плат).

Імерсійне срібло (ImmAg). Товщина ImmAg не перевищує 200 нм, тому витрати на реалізацію цього покриття незначні. Життєздатність ImmAg набагато вище, ніж OSP, але трохи менше, ніж ENIG. Може відбуватись зміна кольору покриття у процесі зберігання, складання та паяння, що є результатом забруднення повітряного середовища сульфатами і хлоридами. Пожовтіння не позначається на властивостях ImmAg. Застосування протиокислювальних покриттів гальмує процес пожовтіння і збільшує життєздатність покриття. ImmAg менш популярне в Європі, ніж у США, де воно більш доступне.

Для гнучких плат, якщо не задано інше, застосовують покриття *олово-свинць з оплавленням*.

Покриття нікелем на гнучкій частині застосовувати не рекомендовано внаслідок його крихкості. Через руйнування нікелю тріщини в захисному покритті будуть поширюватись по поверхні контактних площинок, що призведе до руйнування мідних провідників.

5.8. Особливості проектування гнучкої частини плати, обґрунтованість використання багатoshарової структури

Під час проектування гнучких друкованих плат слід брати до уваги різні аспекти, зокрема, *економічні, технічні, технологічні*. Вартість матеріалів є визначальним чинником вартості жорстких друкованих плат, а для гнучких плат ця залежність значно посилюється оскільки вартість матеріалів для гнучких плат у два-три рази більше. У результаті аналізу чинників, що визначають функціональні та економічні показники гнучких друкованих плат загальною вимогою є забезпечення *мінімальної кількості прошарків* гнучкої частини друкованої плати.

На прийняття рішення стосовно *кількості прошарків* гнучкої частини впливають:

- *кількість сигнальних провідників*, які мають пройти через гнучку частину;
- *ширина провідника*, необхідна для протікання заданого струму;
- *відстань між провідниками*, необхідна для забезпечення електричної ізоляції;
- *необхідність екранування* електромагнітного випромінювання;
- *імпеданс* (хвильовий опір узгоджених ліній зв'язку);
- *вимоги до напруги електричного пробоя*;
- *механічна форма* гнучкої частини, що дозволяє прокласти усі необхідні провідники.

У процесі проектування гнучкої плати доводиться мати справу з деякими конструктивними елементами, що відсутні у жорстких друкованих плат. Такими елементами є округлення, вирізи, розрізи, елементи підсилення конструкції тощо. Приклади особливих елементів конструкції гнучких плат наведено на рис. 5.7.

Гнучкі друковані плати можуть мати доволі складну конфігурацію, необхідну для забезпечення бажаних функціонально-конструктивних властивостей

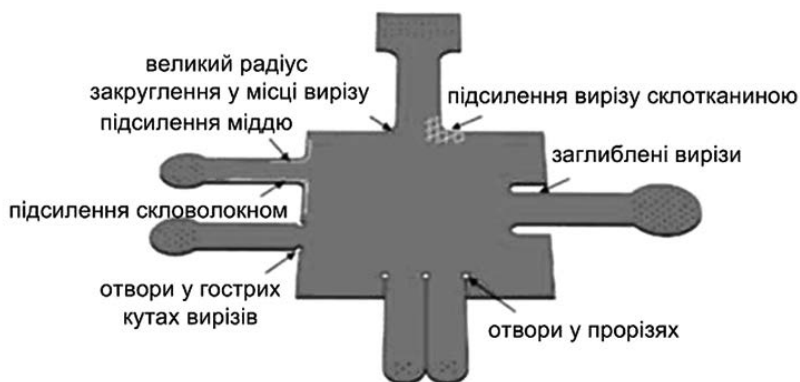


Рисунок 5.7. Додаткові елементи конструкції гнучких друкованих плат

кінцевого електронного пристрою. Приклад такої плати зокрема наведено на рис. 5.5. Крім прямих ділянок гнучких шлейфів можуть бути різноманітні відгалуження і з'єднання з сегментами жорстких друкованих плат. У місцях відгалужень та з'єднань півки основи та друковані провідники зазнають механічних впливів, що можуть призвести до їх руйнування. Тому, важливою процедурою є проектування контуру гнучкої плати.

Для забезпечення необхідної міцності та довготривалості в експлуатації гнучкої друкованої плати необхідно усі відгалуження робити з урахуванням рекомендацій, сформованих на підґрунті накопиченого досвіду.

Мінімальний радіус у внутрішніх кутах контуру плати має становити 1,6 мм. Проте, більший радіус забезпечує більш високу надійність виробу і має кращу стійкість до розриву (рис. 5.7).

Для забезпечення підвищеної стійкості до розриву може бути необхідним використати *додаткові матеріали у внутрішніх кутах*. Найбільш ефективно використовувати не витравлену мідну фольгу і додаткове кріплення шлейфів у місцях, де не використовується їх гнучкість. Усі розрізи і вирізи треба закінчувати отвором діаметром 1,5 мм або більше, як наведено на рис. 5.7. Це особливо важливо, якщо сусідні частини гнучкої плати мають рухатись незалежно.

Світовий досвід виготовлення та експлуатації гнучких друкованих плат дозволив сформувані нижченаведені *рекомендації* щодо розташування конструктивних елементів поблизу контурів плати.

Мінімальна відстань між *зовнішнім краєм плати і внутрішнім краєм не металізованих отворів* (або внутрішніх вирізів) має бути *не менше 0,5 мм*.

Мінімальна відстань від краю переходу (між гнучкою і жорсткою частинами) до *внутрішнього краю металізованого отвору* має бути *не менше 1,9 мм*.

Товщина різних частин плати жорсткої частини багат шарових гнучких і гнучко-жорстких плат *мають бути однакової товщини* для забезпечення коректної металізації отворів.

Вкрай небажано закладати різну товщину для кількох жорстких частин. Це може не тільки підвищити вартість виготовлення проекту, але і призвести до неможливості його практичної реалізації. Найкращим рішенням є *однакова структура* для всіх жорстких частин гнучко-жорсткої плати.

Провідники гнучкої частини. Для забезпечення *максимального динамічного часу життя* (тип використання – категорія В) і максимальної надійності із забезпеченням статичної гнучкості (тип використання – категорія А) провідники у гнучкій частини (рис. 5.8) слід проектувати з дотриманням таких умов:

- перпендикулярність до напрямку вигину;
- рівномірний розподіл в зоні вигину;
- максимальна ширина в зоні вигину;
- відсутність додаткової нарощеної металізації;
- постійна ширина;
- «шахове» розташування в сусідніх шарах (рис. 5.9);

- кількість шарів в гнучкій частині має бути зведено до мінімуму;
- металізовані наскрізні отвори робити не можна;
- «нейтральна вісь вигину» повинна проходити через центр перетину провідника, рис. 5.9.

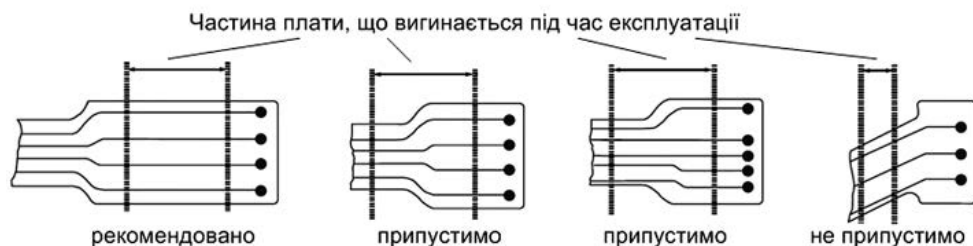


Рисунок 5.8. Приклади конструкції гнучкої зони

Збалансованою є конструкція, в якій застосовано матеріали однакової товщини, що мають однаковий модуль жорсткості з обох сторін провідника. Це особливо важливо для гнучких друкованих плат призначених для застосування в динамічному режимі (рис. 5.9).

Розрахунок мінімально припустимого радіусу перегину (рис. 5.10) для однієї гнучкої плати слід робити із застосуванням формули

$$R = C (100 - E_B) / 2E_B - D, \quad (5.1)$$

де R – мінімальний радіус перегину, мм; C і D – товщина міді і діелектрика відповідно, мм; E_B – величина деформації міді, %.

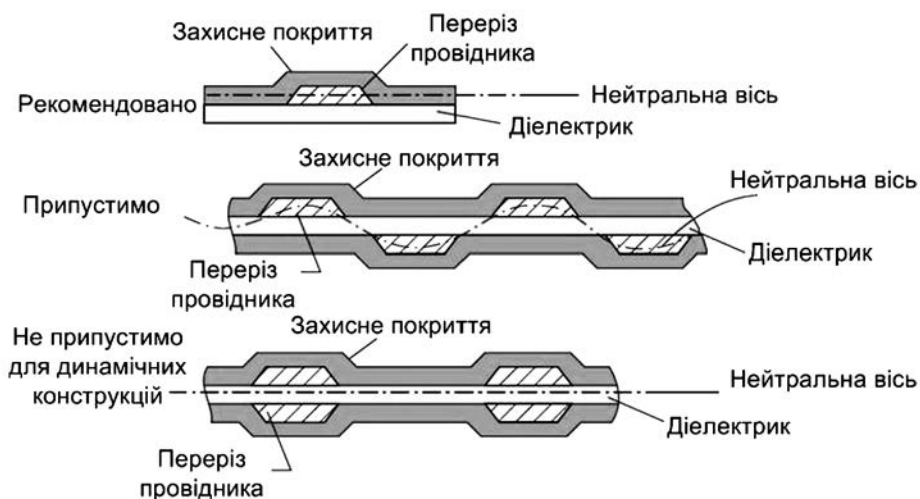


Рисунок 5.9. Схема розташування провідників у перерізі гнучкої плати

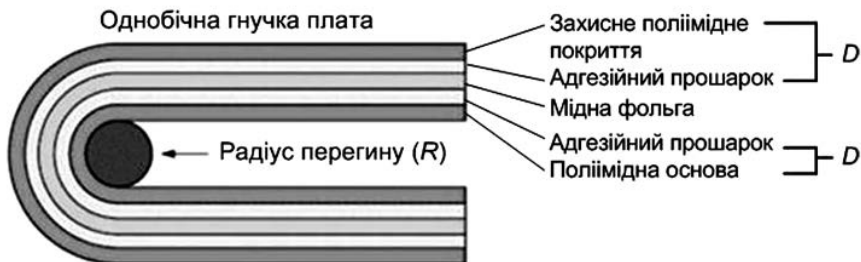


Рисунок 5.10. Схематичне зображення гнучкої плати у місці перегину

На підставі припустимої величини деформації міді, можна визначити мінімальний радіус перегину. Для проектів з одноразовим згинанням використовують граничне допустиме подовження міді на розрив 16%, зі згинанням плати під час її встановлення – 10%, а для динамічних гнучких застосувань – 0,3%.

Приклад. Обчислимо радіуси перегину для однобічної плати. Для розрахунку візьмемо такі значення товщини прошарків різних матеріалів: поліімід 50 мкм, адгезив 25 мкм, мідь 35 мкм. Отже, $D = 75$ мкм, $C = 35$ мкм.

Розв’язання. Загальна товщина гнучкої плати $T = 185$ мкм. Для плати з одноразовим згинанням ($E_B = 16\%$) мінімальний радіус перегину за формулою (5.1) – $R = 16,9$ мкм, а відношення $R/T = 0,09$. Для гнучкої друкованої плати, для якої передбачено перегин для устанавлення ($E_B = 10\%$) $R = 0,08$ мм, $R/T = 0,45$. Для гнучкої друкованої плати призначеної для багаторазових перегинів ($E_B = 0,3\%$) $R = 5,74$ мм, $R/T = 31$.

Щоб оцінити, як змінюються вимоги до радіуса перегину у разі збільшення кількості провідникових шарів, розглянемо вимоги до радіусу перегину двобічної гнучкої друкованої плати. Під час розрахунку вважаємо, що товщина окремих прошарків має такі значення: поліімід 50 мкм, адгезив $25 \cdot 2 = 50$ мкм, мідна фольга $35 \cdot 2 = 70$ мкм. Таким чином, товщина ламінованого діелектрика становить $d = 100$ мкм, товщина одного шару мідної фольги $C = 35$ мкм. Загальна товщина гнучкої друкованої плати становитиме $T = 2D + d + 2C = 320$ мкм.

Радіус перегину для двобічної плати буде

$$R = (d/2 + C) \cdot (100 - E_B) / (E_B - D). \quad (5.2)$$

Мінімальний радіус перегину для двобічних плат різного призначення, визначений за формулою (5.2) становитиме:

– для плати, розрахованої на одноразове згинання ($E_B = 16\%$) – $R = 0,371$ мм, $R/T = 1,16$;

– для плати, гнучкість якої розраховано для устанавлення в апаратурі ($E_B = 10\%$) – $R = 0,69$ мм, $R/T = 2,15$.

– для плати, призначеної для багаторазових перегинів ($E_B = 0,3\%$) – $R = 28,17$ мм, $R/T = 88$.

З наведених прикладів випливає, що збільшення кількості провідникових шарів у гнучкій платі призводить до значного збільшення мінімального радіусу перегину. У разі проектування гнучкої друкованої плати з кількома провідниковими прошарками для забезпечення необхідної гнучкості може бути використано конструкцію без склеювання окремих прошарків у гнучкій зоні друкованої плати.

Важливе значення для забезпечення надійності гнучкої та гнучко-жорсткої друкованої плати має правильне виконання безпосереднього з'єднання гнучкої та жорсткої частин.

Край жорсткої плати (елемент зміцнення конструкції), що безпосередньо контактує з гнучкою частиною, необхідно спроектувати зі скошеною фаскою або радіусом, або його слід пом'якшити нанесенням додаткового шару адгезиву для запобігання пошкодження гнучкої частини (рис. 5.11).



Рисунок 5.11. Конструктивні елементи для з'єднання гнучкої та жорсткої частин друкованої плати

Іноді використовують адгезивні потовщення (антидеформаційне підсилення) на межі переходу між жорсткою і гнучкою частинами плати типу 4 або по краю елемента підсилення, а для плат типів 1, 2, 3 з частковим підсиленням. Як матеріал для потовщення (елементи підсилення) може бути використано гнучкі епоксидні композиції, акрили, силікони, полісульфіди та інші матеріали. Потовщення від краю твердої частини зазвичай роблять завбільшки 1,0...2,5 мм. Такі потовщення рекомендовано використовувати з метою зменшення різких навантажень на матеріали в точці переходу.

5.9. Запитання для самоконтролю

1. Поясніть, що таке гнучкі друковані плати.
2. Чому останніми роками зростає попит на гнучкі друковані плати?
3. Назвіть типи гнучких та жорстко-гнучких плат.
4. Поясніть, яку структуру має однібічна гнучка друкована плата.
5. Поясніть, яку структуру має двобічна гнучка друкована плата.
6. На якому етапі складання або функціонування електронного приладу використовують гнучкі властивості друкованої плати категорії А?

7. На якому етапі складання або функціонування електронного приладу використовують гнучкі властивості друкованої плати категорії В?
8. Які вимоги мають забезпечувати матеріали для гнучких друкованих плат?
9. Для чого використовують адгезив в конструкції друкованої плати?
10. Які найбільш поширені матеріали для основи гнучких друкованих плат застосовують в сучасному виробництві?
11. Які матеріали використовують для захисних шарів гнучких друкованих плат?
12. Чому у сучасному виробництві використовують велику кількість різних матеріалів для фінішного покриття контактних площинок?
13. Які основні вимоги до фінішного покриття контактних площинок гнучких друкованих плат?
14. У чому полягає процес шовкографії?
15. Чим обумовлено перехід на без свинцеві технології і як це впливає на процес виготовлення друкованих плат?
16. Які додаткові конструктивні елементи використовують в конструкції гнучкої друкованої плати?
17. Як укріплюють бічні відгалуження гнучких шлейфів для надання їм підвищеної стійкості?
18. Від чого залежить припустимий радіус перегину гнучкої друкованої плати?
19. Які елементи конструкції застосовують для підвищення надійності з'єднання гнучкої і жорсткої частин конструкції друкованої плати?

Розділ 6. Електричні з'єднання та забезпечення електромагнітної сумісності апаратури реєстрації інформації

6.1. Різновиди електричних з'єднань в електронній апаратурі

Електричні з'єднання *всередині* електронних пристроїв забезпечують *обмін електричними сигналами* між функціональними вузлами та радіоелектронними компонентами згідно реалізованого алгоритму функціонування, а також підведення електричної енергії до активних вузлів електронного пристрою від джерел електроживлення.

Зовнішні електричні з'єднання забезпечують обмін *сигналами між автономними електронними пристроями та блоками*, а також підведення *електричної енергії* від зовнішніх джерел електроживлення і, зокрема, електромережі змінного струму.

Електричні з'єднання реалізують *провідниковими лініями зв'язку*, а також *контактними групами* спеціальних механічних (перемикачі) та електромеханічних (електричні реле різних типів) пристроїв, з'єднувачів.

Залежно від місця застосування електричні з'єднання мають задовольняти різним вимогам, а їх фізична реалізація може мати суттєві відмінності. Тому, розрізняють *внутрішньомодульні, міжмодульні, внутрішньоблокові та міжблокові* електричні з'єднання.

Лінія електричного з'єднання завершується *гальванічним контактом* зі входом або виходом активного функціонального вузла або виводом пасивного елемента. Лінія може бути однорідною або гібридною, тобто, складатись з провідників різного типу. Гальванічний контакт забезпечують *паянням, рознімним з'єднувачем, механічним притискним контактом* (пружинним або різьбовим), *зварюванням*.

В електронній апаратурі й в апаратурі реєстрації інформації зокрема набули поширення такі з'єднувальні лінії:

– *провід над площиною*, яку з'єднано зі спільною шиною джерела живлення;

– *вита пара*;

– *смужкова лінія*;

– *мікросмужкова лінія*;

– *коаксіальний кабель*;

– *друковані провідники на поверхні однорідного діелектрика*;

– *друковані провідники на різних шарах однорідного діелектрика*.

За функціональним призначенням розрізняють *сигнальні лінії* електричних з'єднань, що застосовують для передавання електричних сигналів, та *лінії електроживлення*, що застосовують для підведення електричної енергії до складових електронного пристрою.

Усі лінії електричних з'єднань (ЛЕЗ) мають *прямий* і *зворотний* провід. Зворотний провід називають *спільним, спільною шиною* або лінією *нульового потенціалу*. В англійській технічній літературі цей провід позначають *GND* (*ground* – «земля»). У вітчизняній літературі також, особливо останнім часом, можна зустріти термін «земля» для позначення зворотного проводу (шини). Проте, слід використовувати інші зазначені вище терміни, оскільки термін «земля» застосовують у разі здійснення *уземлення* якогось об'єкту, тобто, у разі електричного з'єднання об'єкту з масивним металевим предметом, зануреним у поверхневий шар Землі. Англійською ж *уземлення* позначають як «*earthing*».

ЛЕЗ можуть бути неекрановані та екрановані. *Екрани* забезпечують захист ліній від впливу електричних, магнітних і електромагнітних полів.

Залежно від конструктивних особливостей зворотного провідника ЛЕЗ поділяють на *несиметричні* (а) – з одним спільним провідником для багатьох ЛЕЗ, *симетричні* (б), що складаються з двох однакових ізольованих провідників, та *коаксіальні* (в) – зі зворотним провідником, яким є зовнішня провідна оболонка коаксіального кабелю (рис. 6.1).

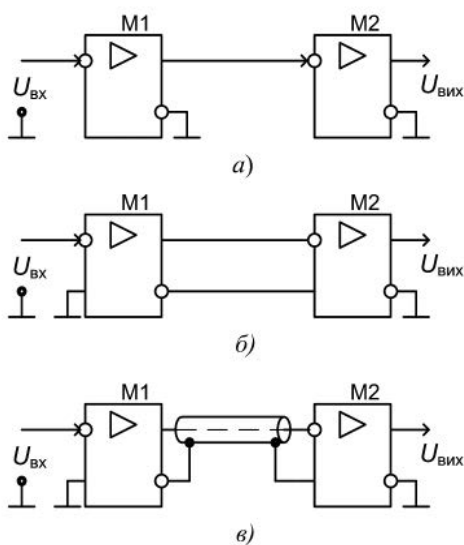


Рисунок 6.1. Різновиди ліній електричного зв'язку

Для успішної реалізації покладених на них функцій ЛЕЗ мають задовольняти таким загальним вимогам:

- *мінімальні* активні та індуктивні паразитні *опори*;
- *мінімальні паразитні ємності* відносно інших компонентів електричного кола і елементів корпусу (шасі, стінок корпусу);
- *однорідний* вздовж лінії *хвильовий опір*;
- *мінімальне електричне та магнітне поле* навколо лінії під час протікання струму;

– *здатність* передавати сигнали у *широкому діапазоні частот*, струмів і напруг (залежно від призначення лінії);

– *мінімальна товщина ізоляції* з відносною діелектричною проникністю, близькою до 1;

– *придатність* до об'єднання у джгути, шлейфи тощо;

– *придатність* до застосування в технологіях *автоматизованого монтажу*.

У реальних конструкціях застосовують *різноманітні типи ЛЕЗ* залежно від призначення і функціональних особливостей апаратури. На вибір типу ЛЕЗ впливають форма сигналів, їх амплітуда і частота, припустиме ослаблення сигналу на одиницю довжини лінії, механічна гнучкість, технологічні вимоги та інші чинники.

У процесі передавання електричних сигналів лініями електричних з'єднань може бути *спотворення* форми і спектра сигналів, їх загасання. До спотворення сигналу призводить *неузгодженість параметрів* вихідних та вхідних каскадів електронних схем з параметрами ЛЕЗ, взаємний вплив інших розташованих поблизу ЛЕЗ, *затримка сигналів* в ЛЕЗ. Правильний вибір ЛЕЗ для електронного пристрою та якісна їх реалізація багато в чому визначає правильність функціонування та надійність електронного пристрою.

Електричний сигнал поширюється через провідник струму, яким може бути *металевий дріт, плівкові і друковані провідники*. У поперечному перерізі дроти бувають круглими або прямокутними, плівкові і друковані провідники – прямокутними. Провід захищають діелектричними ізоляційними оболонками, а за необхідності – ще й металевими екранами.

Передавання електричних сигналів *надвисоких частот* у міжблокових з'єднаннях здійснюють із застосуванням спеціальних ліній – *хвилеводів*, а у внутрішньоблокових – переважно із застосуванням *мікросмушкових ЛЕЗ*. Останнім часом значного поширення набули оптоволоконні сигнальні лінії. Носієм сигналу в таких лініях є електромагнітна хвиля оптичного діапазону, середовищем поширення – діелектричне волокно.

Лінії електроживлення характеризує більший поперечний переріз струмопровідних жил та друкованих провідників порівняно з сигнальними ЛЕЗ, що обумовлено значно більшою силою струму, який протікає через такі провідники.

6.1.1. Короткі лінії електричних з'єднань

З урахуванням особливостей поширення сигналів усі сигнальні лінії електричних з'єднань поділяють на електрично довгі та електрично короткі.

Електрично короткою у разі передавання *гармонійного сигналу* називають ЛЕЗ, довжина якої визначається співвідношенням

$$l_{\kappa} \leq \frac{0,1 \cdot c}{f \sqrt{\varepsilon}}, \quad (6.1)$$

де f – частота сигналу, c – швидкість світла, ε – відносна діелектрична проникність середовища, що оточує лінію електричного з'єднання.

Тобто, це така довжина ЛЕЗ, під час поширення вздовж якої сигнал зазнає малих змін. Інколи в літературі наводять значення числового коефіцієнта у чисельнику (6.1) – в межах (0,1...0,2).

Оцінювання типу лінії для імпульсних сигналів слід здійснювати за гармонікою *максимальної частоти*, значення якої наближено визначають зі співвідношення $f = 0,4/t_{\phi}$, де t_{ϕ} – тривалість фронту сигналу, визначена між рівнями 0,1 і 0,9 амплітуди сигналу.

Наведемо особливості функціонування короткої лінії електричних з'єднань. На схемі (рис. 6.2а) модуль М1 – передавач та модуль М2 – приймач сигналу з'єднано короткою ЛЕЗ.

Для аналізу електричних процесів, що мають місце під час передавання електричних сигналів, застосовують схемну модель короткої лінії, що складено із урахуванням паразитних ємності та індуктивності (рис. 6.2б). Активним опором лінії нехтують. Модуль М1, що формує електричний сигнал, згідно такої моделі подають джерелом напруги U з внутрішнім опором R_1 . Модуль М2, що є приймачем сигналу, в моделі враховують вхідним опором R_2 .

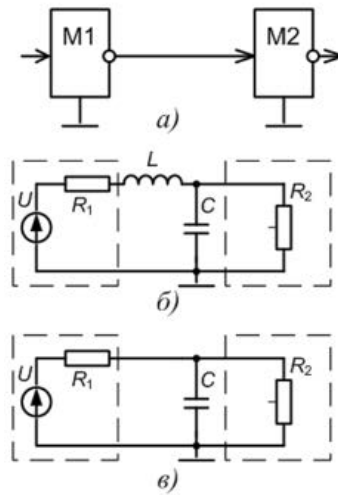


Рисунок 6.2. Схемна модель короткої лінії:
а – умовне зображення лінії електричного з'єднання,
б – модель з урахуванням паразитних L і C ; в – спрощена модель

За умови $R_2 \gg R_1$ еквівалентною схемою індуктивно-ємнісної короткої лінії спільно з опором R_1 є резонансний контур, в якому можливе виникнення коливальних з частотою

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1/(LC)}. \quad (6.2)$$

У разі виникнення коливального процесу напруга на вході модуля М2 може багаторазово перетнути поріг її спрацьовування і спричинити багаторазову

зміну її стану. Якщо період власних коливань такого контуру набагато менше тривалості фронту сигналу, тоді лінія не впливатиме на нормальне функціонування активних вузлів схеми. Умовою відсутності коливань у лінії є співвідношення $L \leq CR_1^2/4$. У цьому випадку індуктивністю лінії можна знехтувати і модель набуває вигляду, наведеного на (рис. 6.2в).

Передавальна характеристика ємнісної ЛЕЗ призводить до зменшення амплітуди синусоїдального сигналу і до затримки сигналу на вході модуля М2 відносно до вихідного сигналу модуля М1. В окремих випадках сигнали на вході і виході ЛЕЗ можуть істотно відрізнятись. Якщо ЛЕЗ навантажено на порогову схему, тоді у разі передавання прямокутного імпульсу амплітудою U відбудеться затримка спрацьовування схеми на час

$$t_{\text{зт}} = \tau \cdot \left| \ln\left(1 - \frac{U_{\text{пор}}}{U}\right) \right|, \quad (6.3)$$

де $\tau = R_1 C$ – стала часу, $U_{\text{пор}}$ – пороговий рівень вхідної напруги приймального елемента. Якщо тривалість імпульсу набагато більше τ , тоді він надійде на вхід логічного елемента практично без спотворень. У випадку передавання дуже короткого імпульсу лінія електричного з'єднання є інтегровальним колом, що обумовлює збільшення тривалості фронтів і зменшення його амплітуди.

6.1.2. Довгі лінії електричних з'єднань

Електрично довгими лініями називають такі лінії електричних з'єднань, для яких у разі передавання сигналу, що є гармонійним коливанням справедливе співвідношення

$$l_{\text{д}} \geq \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon}}. \quad (6.4)$$

Однією з найважливіших характеристик електрично довгої ЛЕЗ є її хвильовий опір Z_0 .

Хвильовий опір – це опір лінії електромагнітній хвилі, що поширюється в прямому напрямку за відсутності відбитих від кінців лінії сигналів.

Хвильовий опір залежить від первинних електричних параметрів ЛЕЗ і частоти сигналу. Електромагнітною хвилею, що поширюється лінією електричного зв'язку вважаємо сукупність хвиль напруги і струму, обумовлених відповідно електричною та магнітною складовою електромагнітного поля. Співвідношення між миттєвим значенням напруги і струму за таких умов є хвильовим опором $Z_0 = U/I$. Хвильовий опір пов'язаний з первинними електричними параметрами лінії (рис. 6.3) – погонним опором R_0 (провідністю G_0), індуктивністю L_0 та ємністю C_0 співвідношенням

$$Z_0 = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)}. \quad (6.5)$$

Хвильовий опір є комплексною величиною і складається з активної і реактивної частини. Залежність хвильового опору від частоти зростає в області низьких частот ($2\pi fL_0 \ll R_0$) і має ємнісний характер. В області високих частот $2\pi fL_0 > R_0$, $2\pi fC_0 \gg 1/R_0$ і величина хвильового опору набуває постійного значення $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$, яке і використовують для характеристики ЛЕЗ.

Параметри лінії розподілені вздовж усїєї лінії, але на еквівалентній електричній схемі ЛЕЗ їх апроксимують параметрами, зосередженими на малих фрагментах лінії. Кожний фрагмент подають електричним колом із зосередженими параметрами. Такими параметрами є розподілені паразитні ємність C_n , індуктивність L_n та опір R_n , де n – номер фрагмента. Під час моделювання складають модель, в якій всі фрагменти однакові та всі розподілені електричні параметри також однакові.

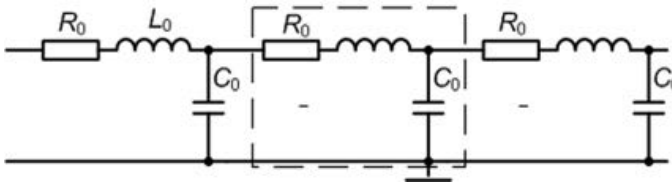


Рисунок 6.3. Еквівалентна модель довгої лінії електричного з'єднання

Для визначення мінімально необхідної кількості ланок для моделювання довгої лінії електричних з'єднань, еквівалентну схему одного фрагмента розглядають, як фільтр низьких частот, частота зрізу якого f_{30} не менше верхньої частоти сигналу f_{max} , що передають цією лінією. Частоту зрізу фільтру зазначеної конфігурації можна визначити зі співвідношення

$$f_{30} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{L_n C_n}}. \quad (6.6)$$

З іншого боку розподілені ємність та індуктивність пов'язані з хвильовим опором лінії співвідношенням

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_n}{C_n}}. \quad (6.7)$$

Хвильовий опір лінії можна визначити через геометричні параметри лінії та відносну діелектричну проникність середовища навколо провідників. Із системи рівнянь (6.6) та (6.7) можна визначити, що

$$L_n = \frac{Z_0}{\pi \cdot f_{30}}, \quad C_n = \frac{1}{\pi \cdot f_{30} \cdot Z_0}. \quad (6.8)$$

На підставі отриманих співвідношень можна визначити необхідну для апроксимації ЛЕЗ кількість ланок електричного кола:

$$n \geq \frac{C_1}{C_n}, \quad (6.9)$$

де C_1 – повна ємність лінії електричного з'єднання, визначена за геометричними параметрами провідників або експериментально, C_n – ємність елементарної ланки, визначена зі співвідношення (6.8).

Приклад. Розглянемо довгу ЛЕЗ на друкованій платі завдовжки 0,25 м, через яку передають імпульсні послідовності з фронтом імпульсу 1 нс. Хвильовий опір лінії $Z_0 = 50$ Ом, повна ємність лінії 80 пФ. Еквівалентна відносна діелектрична проникність середовища навколо сигнального провідника $\varepsilon_{\text{сп}} = 4$. Необхідно визначити кількість елементарних ланок n для моделювання властивостей цієї ЛЕЗ.

Розв'язання.

Визначимо вищу гармоніку спектру сигналу за співвідношенням (6.1) $f = 0,4 / (0,5 \cdot 10^{-9}) = 400 \cdot 10^6$ (Гц) = 800 МГц.

Визначимо часткові значення ємності та індуктивності для елементарної ланки $L_n = \frac{50}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^8} = 4 \cdot 10^{-8}$ (Гн), $C_n = \frac{1}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^8 \cdot 50} = 15,92 \cdot 10^{-12}$ (Ф).

Визначимо кількість елементарних ланок n для моделювання властивостей заданої лінії електричного зв'язку за співвідношенням (6.9): $n \geq \frac{80}{15,92} = 5,02$.

Оскільки кожна додаткова елементарна ланка в моделі призводить до її ускладнення і збільшення обсягу обчислень, у даному випадку доцільно вибрати $n = 5$, що забезпечить достатньо високу точність моделі.

6.1.3. Параметри з'єднувальних ліній

Важливим параметром лінії електричних з'єднань є *затримка* поширення сигналу за час проходження одиничного відрізка цієї лінії (нс/м).

Час затримки лінії без навантаження визначають за формулою

$$\tau_{з,р,0} = 3,33 \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{сп}} \mu}. \quad (6.10)$$

Час затримки навантаженої лінії визначають із співвідношення

$$\tau_{з,р,1} = Z_0 C_0 \sqrt{1 + C_n / (C_0 \cdot l)}, \quad (6.11)$$

де $\varepsilon_{\text{сп}}$ – ефективне значення відносної діелектричної проникності діелектрика, що оточує провідник лінії електричного з'єднання, μ – відносна магнітна проникність середовища (для більшості діелектриків $\varepsilon_{\text{сп}} = 5 \dots 8$, $\mu = 1$), C_n – ємність навантаженої лінії, l – геометрична довжина лінії.

У разі наявності неоднорідного діелектрика навколо провідника (наприклад, провідник друкованої плати, обмежений склотекстолітом знизу і охоплений повітрям згори) ε_{ef} визначають, як середнє арифметичне відносно діелектричної проникності діелектриків, що охоплюють провідник.

Первинними електричними параметрами одиничної лінії електричних з'єднань є погонні опір R_0 , паразитні індуктивність L_0 та ємність C_0 , а для групових сигнальних з'єднань, ще й взаємні індуктивність M_{12} та ємність C_{12} , що обумовлюють взаємодію двох близько розташованих провідників.

Для внутрішньблокових з'єднань найбільш поширеними є лінії, реалізовані друкованими провідниками. Такі лінії називають *смужковими* та *мікросмужковими*. Інколи використовують з'єднання *одиничними проводами, витою парою та коаксіальним кабелем*.

Міжблокові з'єднання реалізують із застосуванням *проводів, кабелів, джгутів, гнучких шлейфів*.

Електричні параметри ЛЕЗ обумовлені геометричними *розмірами* провідників, *відстанню* між провідниками та *відносною діелектричною проникністю* оболонок навколо провідників.

Структуру смужкових ліній наведено на рис. 6.4.

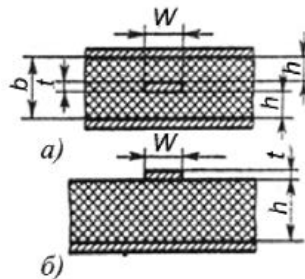


Рисунок 6.4. Схематичне зображення поперечного перерізу смужкових ліній електричного зв'язку: *а* – провідник БДШП між двома металевими площинами, *б* – провідник ДБДП над металевою площиною

Смужкова лінія, рис. 6.4*а* має такі власні погонні ємність C_0 (Ф/м) та індуктивність L_0 (Гн/м):

$$C_0 = 0,355 \cdot 10^{-10} \varepsilon_{\text{ef}} \cdot W / [b(1-t/h)], \quad (6.12)$$

$$L_0 = \frac{1,38}{3 \cdot 10^6} \log \frac{16h}{\pi W}. \quad (6.13)$$

Хвильовий опір у випадку $W/b \geq 0,35$ визначають за співвідношенням

$$Z_0[Ом] = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{ef}}}} \ln \frac{4b}{0,567W + 0,67t}, \quad (6.14)$$

а для випадку $W/b < 0,35$ та $t/b < 0,25$ –

$$Z_0 [Ом] = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} \ln \frac{4b}{0,67\pi \cdot (0,8W + t)}. \quad (6.15)$$

Електричні параметри *мікросмушкової* лінії (6.4б) пов'язані з її розмірами такими співвідношеннями:

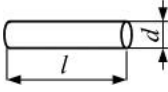
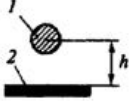
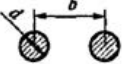
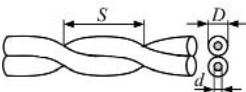
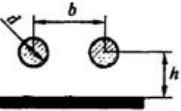
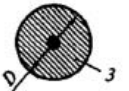
$$C_0 = \varepsilon_{\text{эф}} \cdot 10^{-9} \cdot W / (4\pi h), \quad (6.16)$$

$$L_0 = 3,77 \cdot \mu h / 3 \cdot 10^6 \cdot W, \quad (6.17)$$

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}} + 1,41}} \ln \frac{5,98 \cdot h}{0,8 \cdot W + t}. \quad (6.18)$$

Електричні параметри *проводових* ліній електричних з'єднань наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Електричні параметри проводових ліній

Тип лінії електричного з'єднання	Ємність (C_0), пФ/м	Індуктивність (L_0), мкГн/м	Хвильовий опір (Z_0), Ом
	–	$0,2(\ln 4/d - 0,75)$	–
	$\frac{24 \cdot \varepsilon}{\lg(4h/d)}$	$0,46 \cdot \lg\left(\frac{4h}{d}\right)$	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg\left(\frac{4h}{d}\right)$
	$\frac{12,1 \cdot \varepsilon}{\lg(2b/d)}$	$0,4\mu(\ln \frac{2b}{d} + 0,25)$	$\frac{276}{\sqrt{\varepsilon}} \lg(2b/d)$
	$\frac{12,1 \cdot \varepsilon}{\lg(2D/d)}$	$0,46 \cdot \lg \frac{2D}{d}$	$\frac{276}{\sqrt{\varepsilon}} \lg\left(\frac{2D}{d}\right)$
	$\frac{24,3 \cdot \varepsilon \cdot \lg k}{\lg^2\left(\frac{4h}{d} \lg^2 k\right)}$	$0,46k,$ $k = \sqrt{b^2 + 4h^2} / b$	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg\left(\frac{4h}{d} \sqrt{1 + \frac{4h^2}{b^2}}\right)$
	$24,1 \cdot \varepsilon / \lg(D/d)$	$0,46 \cdot \lg\left(\frac{D}{d}\right)$	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg\left(\frac{D}{d}\right)$

Примітка. 1 – переріз сигнального провідника, 2 – спільна шина, 3 – екран коаксіального кабелю, d – діаметр сигнального провідника, h – відстань між провідником та спільною шиною, b – відстань між провідниками, S – крок скрутки виті пари.

Виту пару можна виготовити зі звичайного монтажного проводу. Сучасні виті пари виготовляють з кроком скрутки від 2 до 32 мм. Виту пару використовують для реалізації *симетричних ліній*. Один провід – сигнальний, другий – з'єднаний зі спільною шиною. Таким чином, *вита пара є частково екранованою лінією зв'язку*. За умови, що *крок скрутки* становить 10 мм погонна ємність *неекранованої* виті пари є в межах 0,35...0,5 пФ/м, а для *екранованої* виті пари – в межах 0,5...1,0 пФ/м.

6.1.4. Взаємна ємність та індуктивність провідників друкованої плати

Електромагнітний зв'язок друкованих провідників на поверхні однорідного діелектрика (рис. 6.5) характеризують взаємною розподіленою ємністю $C_{\text{во}}$ та взаємною індуктивністю $M_{1,2}$.

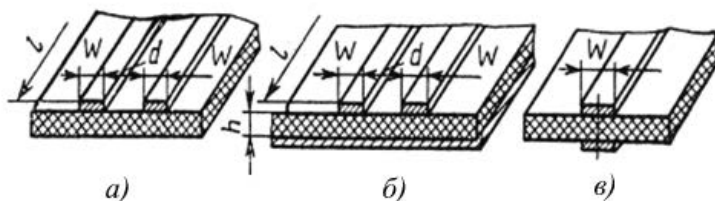


Рисунок 6.5. Структури провідників на друкованій платі

Взаємну лінійну ємність $C_{\text{во}}$ та взаємну індуктивність $M_{1,2}$ близько розташованих провідників на *однобічній друкованій платі* (рис. 6.5,а) визначають за нижче наведеними співвідношеннями.

Для випадку $W/d > 1$,

$$C_{\text{вз}} [\text{Ф/м}] = 5,65 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\text{эф}} l_{\text{вз}} \ln \left(4 + \frac{8W}{d} \right), \quad (6.19)$$

у разі $W/d < 1$,

$$C_{\text{вз}} [\text{Ф/м}] = 2,78 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\text{эф}} l_{\text{вз}} / \ln \left(4 + \frac{4d}{W} \right). \quad (6.20)$$

Відзначимо, що відносна похибка визначення величини ємності у разі застосування (6.19) не більше 0,01%, для формули (6.20) – не більше 0,04%.

Якщо співвідношення ширини провідника W і кроку розташування провідників на платі d має проміжне значення стосовно умов зазначених для формул (6.19) та (6.20), тоді можна застосовувати будь-яку з них для визначення приблизних значень. Точність результату у такому разі буде достатньою для оціночних розрахунків.

Взаємну індуктивність $M_{1,2}$ визначають за співвідношенням

$$M_{1,2}[\Gamma_H] = 2l_{\text{вз}} \left\{ 2,31 \lg \left[\frac{2W}{(d+W)} \right] + (d+W)/l_{\text{вз}} + 1 \right\} \cdot 10^{-8}, \quad (6.21)$$

де $l_{\text{вз}}$ – довжина ділянки взаємної лінії зв'язку.

У разі застосування на друкованій платі додаткової металізації, наприклад, у двобічній або багатошаровій платі (рис. 6.5б), взаємну ємність друкованих провідників визначають за співвідношеннями

$$C_{\text{вз}}[\Phi] = 0,333 \varepsilon_{\text{эф}} l_{\text{вз}} / \left\{ B(B+2) \cdot \rho(x) \cdot \left[\rho(x) \cdot 0,175 B/x \right] \right\} \cdot 10^{-9}, \quad (6.22)$$

$$\text{де } B = \frac{2d}{W}, \quad x = \frac{2h}{W}, \quad \rho(x) = 2 \arctg \frac{1}{2x} + \frac{1}{2} \ln(4x^2 + 1).$$

Взаємну ємність друкованих провідників, розташованих на різних шарах друкованої плати (рис. 6.5в), називають *міжшаровою*. Цю ємність за умови $W/h > 10$ розраховують за формулою (6.19), оскільки крайовими ефектами в цьому разі можна знехтувати. Для урахування крайового ефекту слід застосувати співвідношення

$$C_{\text{вз}}[\Phi] = \left\{ 27,8 \cdot \varepsilon_{\text{эф}} \cdot l_{\text{вз}} / \left[x \cdot \rho(E) \right] \right\} \cdot 10^{-12}. \quad (6.23)$$

6.1.5. Перехресні завади між лініями електричних з'єднань

З'єднувальні лінії на друкованих платах, особливо у цифрових схемах, доводиться розташовувати близько одна до одної, що призводить до їх взаємного впливу. Проявом цього впливу є *перехресні завади*. Подібні завади можуть виникати у провідних лініях міжблокових електричних з'єднань, що розташовані близько одна до одної.

Якщо під час проходження електричного сигналу через з'єднувальну лінію у лінії, яка знаходиться поблизу з нею, виникає струм або напруга, що можуть сприйматись як певний сигнал елементами схеми з'єднаними з цією лінією, тоді такий *наведений* (паразитний) сигнал називають *перехресною завадою*. Перехресною її називають тому, що завади можуть виникати в будь-якій із близько розташованих ліній під час проходження сигналу через інші лінії, тобто, лінії мають *взаємний* (*перехресний*) вплив.

Перехресні завади може бути обумовлено *електричною*, *магнітною* та *електромагнітною* взаємодією близько розташованих ЛЕЗ. Мікромініатюризація і збільшення щільності розташування провідників обумовлюють необхідність на етапі конструювання передбачити рішення, що забезпечать зменшення рівнів завад до значень, що не впливають на нормальне функціонування електронного пристрою навіть за найбільш несприятливих умов. *Рівень* завад залежить від *взаємної індуктивності* провідників і *міжпровідникової ємності*, що обумовлюють відповідно *індуктивну* і *ємнісну* складові взаємних завад.

Ємнісна складова зростає із зростанням швидкості зміни напруги на вході ЛЕЗ і величин опорів на кінцях лінії, індуктивна складова завади – із зростанням швидкості зміни струму в лінії і збільшенням навантаження на з'єднувальну лінію.

Перехресні завади виникають через наявність сигналу в сусідніх ЛЕЗ, (рис. 6.6а). Утворення перехресних завад пов'язано з наявністю *ємнісного* та *індуктивного паразитного зв'язку* між близько розташованими ЛЕЗ. Через значні розбіжності параметрів реальних ЛЕЗ точний розрахунок таких ліній робити не доцільно, оскільки не можна врахувати усі особливості кожної конкретної лінії.

Основний спосіб спрощення розрахунку перехресних завад – заміна розподілених параметрів взаємного зв'язку зосередженими, якими є інтегральні значення відповідних реактивностей усього з'єднання. Перехід до зосереджених параметрів доцільний лише для коротких ліній зв'язку, тобто за умови $t_{\phi} > 4\tau_3$.

На рис. 6.6б наведено еквівалентну схему двох близько розташованих ліній електричних з'єднань. Лінія, що з'єднує модулі М1 та М2 є активною (модуль М1 є джерелом сигналу, а модуль М2 – його приймачем), а лінія, що з'єднує модулі М3 та М4 є пасивною.

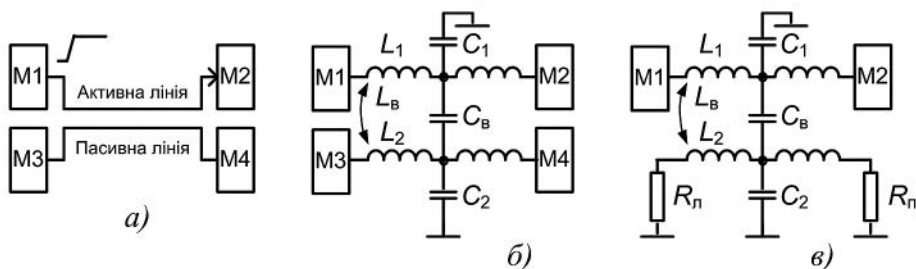


Рисунок 6.6. Схема взаємодії: а – двох ліній зв'язку, б – їх еквівалентна схема з зосередженими параметрами, в – схемна модель з урахуванням навантаження пасивної лінії

Значення параметрів, наведених на еквівалентних схемах (рис. 6.6), визначено таким чином: $C_1 = C_{10}l_1$; $L_1 = L_{10}l_1$; $C_2 = C_{20}l_2$; $L_2 = L_{20}l_2$; $C_b = C_{b0}l_{b3}$; $L_b = L_{b0}l_{b3}$, де L_{b3} – довжина ділянки взаємодії ліній зв'язку; C_{10} та C_{20} – погонні розподілені ємності окремих ліній зв'язку; l_1 та l_2 – довжина відповідних ліній зв'язку.

Для спрощення граничних умов необхідно проаналізувати вхідні і вихідні характеристики модулів пасивної лінії та лінеаризувати їх. Отримані лінійні еквіваленти вхідного та вихідного опорів елементів є кінцевим навантаженням пасивної лінії в схемі для розрахунку завад. Обґрунтуванням такої лінеаризації є порівняно невеликі коливання робочої точки від свого статичного положення, що, як правило, обумовлено низьким рівнем припустимих завад. Після лінеаризації характеристик логічних елементів пасивного кола, схема (рис. 6.6б) має

вигляд, наведений на рис. 6.6в. На цій схемі $R_{л}$ та $R_{п}$ – еквівалентні опори на лівому та правому кінцях пасивної лінії. На підставі припущення про слабкий взаємозв'язок можна вважати, що перехідні процеси в активній лінії не залежать від перехідних процесів формування завад. Не будемо також враховувати вплив власних реактивностей активного кола. Розглянемо окремо ємнісний та індуктивний наведені паразитні сигнали, що є складовими сигналу завади.

6.1.6. Ємнісна складова перехресної завади

Схему взаємодії ліній електричних з'єднань обумовлену ємнісними з'язками наведено на рис. 6.7а, а її еквівалентну схему з урахуванням вхідної ємності приймального модуля (М4) і зроблених вище припущень – на рис. 6.7б.

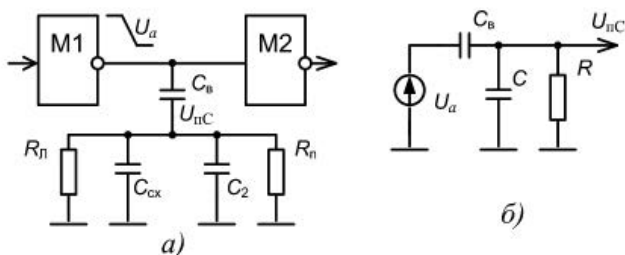


Рисунок 6.7. Схема взаємодії ліній електричних з'єднань обумовленої ємнісними з'язками

На еквівалентній схемі $R = R_{л}R_{п} / (R_{л} + R_{п})$; $C = C_2 + C_{сх}$; $C_2 = C_0 l_2$.

Диференціальне рівняння, що описує процес наведення ємнісної завади, буде таким:

$$C_{в} \frac{d(U_a - U_{пс})}{dt} = \frac{U_{пс}}{R} C \frac{dU_{пс}}{dt}, \quad (6.24)$$

де U_a – амплітуда сигналу активної лінії, $U_{пс}$ – ємнісна складова перехресної завади.

На підставі припущення, що фронт сигналу в активній лінії наростає лінійно ($dU_a / dt = a$) запишемо:

$$dU_{пс} / dt = \alpha C_{в} / (C_{в} + C) - U_{пс} / [R(C_{в} + C)]. \quad (6.25)$$

Розв'язком цього рівняння в інтервалі часу $0 < t \leq t_{\phi U}$ є

$$U_{пс} = \alpha RC_{в} \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad (6.26)$$

де $\tau = R(C_{в} + C)$; U_a , $t_{\phi U}$ – перепад напруг в активній лінії та тривалість його фронту відповідно. Вважаємо, що $\alpha = U_a / t_{\phi U}$, тоді отримаємо

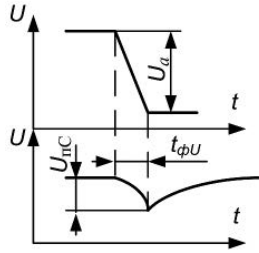


Рисунок 6.8. Епюри напруги в активній лінії

$$U_{nC} = (U_a RC / t_{\phi U}) \cdot (1 - e^{-t/\tau}). \quad (6.27)$$

Ємнісна завада за знаком збігається з фронтом імпульсу, який наводить заваду в лінії зв'язку. На рис. 6.8 наведено епюри напруги в активній лінії під час зміни стану модуля М1 з логічного стану «1» (високий рівень сигналу) у «0» (низький рівень сигналу) та перехресну заваду негативної полярності в пасивній лінії. У момент часу $t = t_{\phi U}$ завада досягає максимального значення:

$$U_{nCmax} = (U_a R_b C / t_{\phi U}) \cdot (1 - e^{-t_{\phi U}/\tau}). \quad (6.28)$$

Після завершення фронту імпульсу $t > t_{\phi U}$ завада зменшується за експоненціальним законом внаслідок заряду ємностей:

$$U_{nC} = U_{nCmax} \cdot e^{-(t-t_{\phi U})/\tau}. \quad (6.29)$$

Розглянемо, як приклад, співвідношення між негативною та позитивною ємнісними завадами для мікросхем ТТЛ. Ємнісна завада позитивної полярності наводиться переднім фронтом $t_{\phi U}^+$, а негативна – спадом імпульсу $t_{\phi U}^-$. Негативна завада небезпечна, якщо керуючий елемент у пасивному колі знаходиться в стані логічної «1», а позитивна – якщо керуючий елемент у стані логічного «0», Формули для визначення величини позитивної або негативної завади такі:

$$U_C^+ = \frac{U}{t_{\phi U}^+} \cdot \frac{R_{\text{вих}}(0) R_{\text{вх}}}{R_{\text{вих}}(0) + R_{\text{вх}}} \cdot C_B (1 - e^{-t/\tau}), \quad (6.30)$$

$$U_C^- = \frac{U}{t_{\phi U}^-} \cdot \frac{R_{\text{вих}}(1) R_{\text{вх}}}{R_{\text{вих}}(1) + R_{\text{вх}}} \cdot C_B (1 - e^{-t/\tau}), \quad (6.31)$$

де $R_{\text{вих}}(1)$, $R_{\text{вих}}(0)$ – вихідний опір схеми в стані «1» та «0» відповідно;

$R_{\text{вх}}$ – вхідний опір схеми.

Знаходимо співвідношення між величинами позитивної та негативної завад:

$$\frac{U_C^-}{U_C^+} = \frac{t_{\phi U}^+}{t_{\phi U}^-} \cdot \frac{R_{\text{вих}}(1)(R_{\text{вих}}(0) + R_{\text{вх}})}{R_{\text{вих}}(0)(R_{\text{вих}}(1) + R_{\text{вх}})} \quad (6.32)$$

Для ТТЛ мікросхем мають місце такі співвідношення вхідних та вихідних опорів: $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{вих}}(1)$, $R_{\text{вих}}(1) \gg R_{\text{вих}}(0)$; $R_{\text{вх}} \approx 1$ кОм, $R_{\text{вих}}(1) \approx 100 \dots 200$ Ом; $R_{\text{вих}}(0) \approx 15 \dots 30$ Ом.

За таких значень параметрів схеми рівняння (6.32) можна записати у вигляді:

$$\frac{U_C^-}{U_C^+} \approx \frac{t_{\phi U}^+}{t_{\phi U}^-} \cdot \frac{R_{\text{вих}}(1)}{R_{\text{вих}}(0)} \quad (6.33)$$

Оскільки $t_{\phi U}^+ = 2t_{\phi U}^-$, а також на підставі співвідношення величин $R_{\text{вих}}(1)$ та $R_{\text{вих}}(0)$, можна зробити висновок, що ємнісна завада негативної полярності щонайменше у 10 разів більше завади позитивної полярності.

6.1.7. Індуктивна складова перехресної завади

Еквівалентну схему, що спричиняє виникнення індуктивної перехресної завади наведено на рис. 6.9. Проаналізуємо максимальне значення індуктивної завади. У разі лінійного закону зміни фронту струму в активній лінії електрична рушійна сила (ЕРС), наведена в електричному колі пасивної лінії обумовлена взаємоіндукцією становитиме,

$$E_{\text{п}} = L_a I_a / t_{\phi I} \quad (6.34)$$

де I_a і $t_{\phi I}$ – амплітуда струму в активній лінії та тривалість його фронту відповідно.

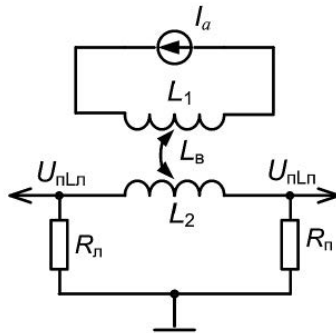


Рисунок 6.9. Еквівалентна схема виникнення індуктивної перехресної завади

З урахуванням (6.34) для оцінювання амплітуди індуктивної складової перехресної завади на лівому $U_{\text{нЛп}}$ та правому $U_{\text{нЛп}}$ кінцях пасивної лінії можна записати два рівняння:

$$U_{\text{нЛ}} = \frac{E_{\text{п}} R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}} = \frac{I_a}{t_{\phi U}} \cdot \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}} L_{\text{в}}, \quad (6.35)$$

$$U_{\text{нЛ}} = \frac{E_{\text{п}} R_{\text{п}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}} = \frac{I_a}{t_{\phi U}} \cdot \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}} L_{\text{в}}, \quad (6.36)$$

де $I_a = \sum_{i=1}^{N_a} I_{ai}$; N_a – кількість елементів, що є навантаженням активної лінії;

I_{ai} – струм, що споживає один елемент навантаження.

Наведена індуктивна перехресна завада є максимальною у разі найбільшої кількості елементів навантаження в активній лінії. Індуктивна завада, за умови узгодженого з'єднання ліній, за знаком протилежна фронтові сигналу (рис. 6.10а), що її обумовлює, а в разі зустрічного з'єднання ліній – знак завади співпадає зі знаком фронту імпульсу (рис. 6.10б). З урахуванням того, що $t_{\phi U}^+ > t_{\phi U}^-$, у разі зустрічного з'єднання $U_L^- > U_L^+$, а у разі узгодженого з'єднання – навпаки.

У реальних конструкціях ліній зв'язку має місце ємнісна та індуктивна взаємодія одночасно. Відносні значення тривалості завади, обумовленої індуктивністю характеризуються значеннями T_3 , що задовольняє співвідношенню $t_{\phi} / T_3 < 1$.

Сумарну заваду у разі зустрічного з'єднання ліній можна визначити за співвідношенням:

$$U_{\text{н}\Sigma 3} = \frac{U_a RC_{\text{в0}} I_{\text{в3}}}{t_{\phi U}} (1 - e^{-t_{\phi U} / \tau}) + \frac{I_a R_{\text{л}} L_{\text{в0}} I_{\text{в3}}}{t_{\phi U} (R_{\text{л}} + R_{\text{п}})} (1 - e^{-t_{\phi U} / \tau}), \quad (6.37)$$

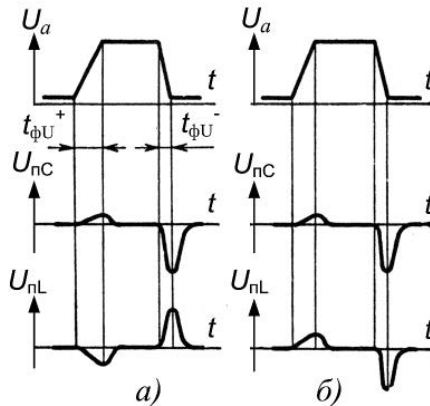


Рисунок 6.10. Сигналограми індуктивної завади

а у разі узгодженого з'єднання

$$U_{\Pi\Sigma y} = \frac{U_a R C_{B0} I_{B3}}{t_{\Phi U}} \left(1 - e^{-t_{\Phi U}/\tau}\right) - \frac{I_a R_{\Pi} L_{B0} I_{B3}}{t_{\Phi U} (R_{\Pi} + R_{\Sigma})} \left(1 - e^{-t_{\Phi U}/\tau}\right). \quad (6.38)$$

За результатами аналізу графіків на рис. 6.10 можна зробити висновок, що максимальною буде негативна сумарна завада у разі зустрічного ввімкнення ліній електричного з'єднання:

$$U_{\Sigma}^- = \left[\frac{U_a}{t_{\Phi U}^-} \cdot \frac{R_{\text{вих}}(1) R_{\text{вх}} C_{B0} I_{B3}}{R_{\text{вих}}(1) + R_{\text{вх}}} \left(1 - e^{-t_{\Phi U}^-/\tau}\right) + \frac{I_{a0}}{t_{\Phi I}^-} \cdot \frac{R_{\text{вх}} L_{B0}}{R_{\text{вих}}(1) + R_{\text{вх}}} \cdot \left(1 - e^{-t_{\Phi I}^-/\tau}\right) \right]. \quad (6.39)$$

Якщо $I_{ai} = I_{a0} = \text{const}$ тоді, з формули (6.37) можна отримати співвідношення ємнісної та індуктивної складових перехресної завади:

$$\frac{U_c}{U_L} = \frac{U_a t_{\Phi I} C_{B0}}{N_a I_{a0} t_{\Phi U} L_{B0}} R_{\text{вих}}. \quad (6.40)$$

З огляду на те, що для схем ТТЛ $U_a t_{\Phi I} / (I_a t_{\Phi U}) = 10^3$, остаточно можна записати:

$$U_c / U_L = (C_{B0} / L_{B0}) \cdot (R_{\text{вих}} / N_a) \cdot 10^3. \quad (6.41)$$

Питання щодо співвідношення ємнісної та індуктивної складових перехресної завади має важливе значення для визначення способу зменшення рівня цих завод.

6.2. Електромагнітна сумісність та заводостійкість технічних засобів електронних засобів

Електромагнітна сумісність (ЕМС) технічних засобів – це здатність технічних засобів функціонувати із заданою якістю в певному електромагнітному середовищі, не створювати у процесі функціонування неприпустимих електромагнітних завод іншим технічним засобам і неприпустимих електромагнітних дій на біологічні об'єкти.

Термінологія в галузі ЕМС визначена в Міжнародному електротехнічному словнику (International Electrotechnical Vocabulary – IEV) – глава 161 – Електромагнітна сумісність, який впроваджено в Україні як національний стандарт: ДСТУ – ІЕС 60050 – 161 «Словник електротехнічних термінів. Глава 161. Електромагнітна сумісність»: 2003. Наведемо деякі терміни з цього стандарту, необхідні для подальшого опанування матеріалу:

161-01-07 *електромагнітна сумісність*; ЕМС (electromagnetic compatibility; EMC) – спроможність обладнання чи системи задовільно функціонувати в навколишній електромагнітній обстановці та не створювати не-

допустимих електромагнітних завад будь-чому в цій обстановці (Підкреслено словосполучення, визначення яких наведено як терміни в стандарті);

161-01-01 **електромагнітна обстановка**; ЕМО (electromagnetic environment) – сукупність електромагнітних явищ, наявних у даному місці.

161-01-06 **електромагнітна завада**; ЕМЗ (electromagnetic interference) – електромагнітне збурення, яке погіршує характеристики обладнання, каналу передавання чи системи;

161-01-05 **електромагнітне збурення** (electromagnetic disturbance) – будь-яке електромагнітне явище, яке може погіршити характеристики пристрою, обладнання чи системи або несприятливо вплинути на живу та неживу матерію.

(В англомовній літературі терміни *electromagnetic disturbance* та *electromagnetic interference* зазвичай застосовують в однаковому сенсі – як електромагнітна завада – треба визначати за текстом).

Умовно можна визначити *п'ять аспектів* проблеми ЕМС: *інженерний, економічний, захисту інформації, маркетинговий та біологічний*. У цьому навчальному посібнику розглянемо, головним чином, інженерний аспект.

Реалізація ЕМС технічних засобів має на меті:

– забезпечити функціонування технічних засобів без порушення нормального режиму, в разі впливу на них електромагнітних завад;

– запобігти створенню електромагнітних завад технічними засобами або обмежити їх;

– запобігти несприятливому електромагнітному впливу на біологічні об'єкти або обмежити рівень такого впливу;

– забезпечити регламентовану стандартами якість електричної енергії в електричних мережах загального призначення.

Стойкість технічних засобів до впливу електромагнітних завад (*завадостійкість технічних засобів*) – це здатність технічних засобів зберігати передбачену якість функціонування навіть за умови впливу на них регламентованих стандартами електромагнітних завад (вплив на інформаційні канали).

Якість функціонування технічних засобів визначають на *етапі розроблення технічних умов*. Основним завданням досліджень цього етапу є аналіз *електромагнітної обстановки* – сукупності електромагнітних явищ та (або) процесів у заданій частині простору або заданому провідному середовищі в частотному і часовому діапазонах.

Електромагнітне явище природного або штучного походження, що зменшує або може зменшити якість функціонування технічного засобу називають електромагнітною *завадою*. Електромагнітна завада може бути *індукована* (у *ближній зоні*) та/або *випромінена* (у *дальній зоні*) в *навколишній простір* або поширюватись в провідному середовищі (*кондуктивна*). Існує багато підходів до класифікації електромагнітних завад, що враховують як джерела їх виникнення, так і характер впливу на технічні засоби. Наведену нижче класифікацію широко використовують фахівці під час вирішення завдань в галузі ЕМС.

Найбільш поширеною електромагнітною завадою природного походження є *електромагнітний імпульс*, що виникає під час удару *блискавки*.

Електромагнітні завади штучного походження можна розподілити на створені *функціональними* джерелами і створені *нефункціональними* джерелами (індустріальними).

Функціональним називають джерело електромагнітної завади *іншим* пристроєм (системам), якщо для цього пристрою (системи) створювана *завада* є *корисним сигналом*. До таких джерел віднесено, насамперед, передавальні пристрої *радіозв'язку*, а також апаратуру, що використовує *кола електроживлення* для *передавання інформації*.

Нефункціональними називають джерела, для яких створення завад є супроводжувальним (*побічним*) ефектом в процесі роботи. До таких джерел можна віднести будь-які провідні комунікації, що створюють електромагнітні поля, комутаційні пристрої, імпульсні блоки електроживлення апаратури, зварювальні апарати тощо.

Електростатичний розряд з тіла людини також є створювана нефункціональним джерелом завада. Принципова відмінність між функціональними і нефункціональними джерелами полягає в тому, що для другого типу джерел рівень електромагнітних завад часто можна *знижити шляхом доопрацювання конструкції* такого пристрою, в той час як для функціональних джерел завад такий шлях зазвичай не можливо реалізувати.

Залежно від середовища поширення електромагнітні завади поділяють на індуктивні та кондуктивні. Індуктивними називають завади, що поширюються (у ближній зоні) у формі електромагнітних полів у непровідних середовищах. Кондуктивними завадами є струми, що протікають провідними конструкціями та спільною шиною. Розподіл завад на індуктивні та кондуктивні є умовним, оскільки в реальності є єдиний електромагнітний процес, що має місце в провідному та непровідному середовищах. У процесі поширення завади можуть трансформуватись з індуктивних у кондуктивні і навпаки.

За *спектральними* характеристиками електромагнітні завади поділяють на:

- вузькосмугові та широкосмугові;
- низькочастотні і високочастотні.

До *вузькосмугових* віднесено завади від систем зв'язку на носійній частоті, систем живлення змінним струмом тощо. Особливістю цих завад є те, що характер зміни завади у часі є синусоїдальним або близький до нього. Структура спектру такої завади близька до лінійчастої (максимальний рівень завади – на основній частоті, піки меншого рівня – на частотах гармонік).

Широкасмугові завади є несинусоїдальними і зазвичай – це окремі імпульси, або їх послідовності. Для *періодичних* широкосмугових сигналів спектр – містить великий набір піків на частотах, кратних частоті основного сигналу. Для *аперіодичних* завад спектр є безперервним і його характеризують спектральною щільністю.

Типовими широкосмуговими завадами є:

- імпульси, утворені в результаті *блискавки*;
- імпульси, що виникли внаслідок *комутаційних операцій*;
- *електростатичні розряди*;
- *шум*, створюваний в *мережі електроживлення апаратури* внаслідок функціонування імпульсного блоку живлення;
- *навмисні електромагнітні завади*, створювані засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ);
- *навмисні електромагнітні завади*, створювані з *кримінальною метою*.

До низькочастотних віднесено завади в діапазоні 0...9 кГц. У більшості випадків такі завади виникають внаслідок функціонування силових електроустановок і ліній.

Високочастотні вузькосмугові завади (з частотою вище 9 кГц) зазвичай виникають внаслідок функціонування різних систем зв'язку. Високочастотними є всі відомі типи імпульсних завод. Іноді також застосовують поняття радіочастотної завади (діапазон від 150 кГц до 1...2 ГГц) і завади НВЧ (частоти порядку кількох гігагерців).

Стандартами в галузі ЕМС регламентовано такі основні види завод:

1. *Мікросекундні імпульсні* завади великої енергії, що виникають через стрибки напруги в результаті комутаційних перехідних процесів і розрядів блискавки.

2. *Наносекундні імпульсні* завади, що виникають в результаті комутаційних процесів (переривання індуктивних навантажень, розмикання контактів реле тощо) і впливають на порти електроживлення і сигналів уведення/ виведення.

3. *Електростатичні розряди* безпосередньо від оператора або опосередковано внаслідок виникнення розряду від оператора на розташовані поблизу технічні засоби, предмети та обладнання.

4. *Радіочастотне електромагнітне поле* в смузі частот від 80 до 1000 МГц, джерелами якого є портативні приймачі, що застосовує експлуатаційний персонал та служби безпеки, стаціонарні радіо і телевізійні передавачі, радіопередавачі рухомих об'єктів, різні промислові джерела випромінювання. До числа джерел радіочастотного електромагнітного поля також відносять радіотелефони та інші радіопередавачі, що функціонують на частотах від 0,8 до 3 ГГц і, в яких застосовано методи модуляції із змінною обвідною.

5. *Кондуктивні завади*, наведені радіочастотними електромагнітними полями, спричинені переважно радіопередавальними пристроями у смузі частот від 50 кГц до 80 МГц.

6. *Кондуктивні завади* в смузі частот від 0 до 150 кГц, обумовлені впливом несиметричних напруг на вхідні порти електроживлення змінного і постійного струму, сигнальні порти, порти керування та порти введення/виведення сигнальних потоків.

7. *Коливальні спадні* завади таких різновидів:

а) поодинокі коливальні спадні завади, що виникають в низьковольтних силових лініях та лініях управління і сигналізації технічних засобів, які отри-

мують електроживлення від низьковольтних розподільних електричних мереж і систем електропостачання промислових підприємств;

б) *повторювані коливальні спадні* завади, що виникають головним чином в силових лініях, а також лініях управління та сигналізації на електричних підстанціях високої (вище 35 кВ) та середньої (6...35 кВ) напруги. Повторювані коливальні спадні завади можуть бути обумовлені спрацьовуванням одного окремого вимикача.

8. *Динамічні зміни напруги* електроживлення таких різновидів:

- *провали,*
- *переривання,*
- *викиди.*

Крім наведених вище *додатково* виділено завади, що можуть виникнути у процесі функціонування *систем електроживлення*:

1. Коливання напруги електроживлення, що впливають на вхідні порти електроживлення змінного струму.

2. Зміни частоти напруги на вхідних портах електроживлення змінного струму.

3. Спотворення синусоїдальності напруги електроживлення внаслідок впливу додаткових гармонік системи живлення.

4. Магнітне поле промислової частоти.

5. Імпульсне магнітне поле.

6. Спадне коливальне магнітне поле.

7. Струми короточасних синусоїдальних завад частотою 50 Гц в колах захисного і сигнального уземлення.

8. Струми мікросекундних імпульсних завад в колах захисного і сигнального уземлення.

Залежно від умов експлуатації в технічних умовах на технічні засоби може бути розглянуто інші види завад з урахуванням специфіки електромагнітної обстановки.

Для характеристики місця надходження або випуску електромагнітної завади застосовують термін «порт».

Порт – межа між електронним пристроєм та зовнішнім електромагнітним середовищем (затискач, з'єднувач, клема, вхід/вихід лінії електричного зв'язку).

Порт корпусу – фізична межа, через яку може відбуватись випромінювання створене електронним пристроєм або навпаки – можуть проникати зовнішні електромагнітні поля в робочий об'єм електронного пристрою. Для вбудованих пристроїв фізичну межу визначають за параметрами основного пристрою.

Порт з'єднання кабелю – порт, в якому провідник або кабель з'єднано з електронним пристроєм.

6.3. Захист конструкції від впливу завад

Завади, що впливають на функціонування електронної апаратури можна розділити на *внутрішні* та *зовнішні*. Залежно від типу завад слід обирати шляхи зменшення їх впливу.

Внутрішні завади виникають всередині електронної апаратури в робочому режимі. Джерелами електричних завад є *блоки та кола електроживлення, функціональні вузли* з відносно великими потенціалами. Джерелами *магнітних завад* є *трансформатори та дроселі*. До виникнення внутрішніх завад можуть спричинити *кола синхронізації та керування*, а також інші сигнальні кола, що передають імпульсні послідовності.

Зовнішніми для електронної апаратури завадами є завади, що виникають під час функціонування *зварювальних апаратів, електродвигунів*, контактної мережі *електротранспорту*, завади від *телекомунікаційного обладнання та побутової техніки*, а також завади обумовлені *електростатичними розрядами та атмосферними явищами* тощо.

Для боротьби з зовнішніми завадами, а також для зменшення емісії власного електромагнітного випромінювання застосовують повне або часткове *екранування* електронного пристрою. У разі часткового екранування екрани застосовують тільки для функціональних вузлів, що чутливі до завад або є джерелами електромагнітного випромінювання.

Для зменшення взаємного впливу функціональних вузлів електронного пристрою прагнуть спроектувати *раціональну конструкцію* електронного пристрою і зокрема ліній електричних з'єднань, як сигнальних так і ліній електричного живлення. В окремих випадках для забезпечення електромагнітної сумісності внутрішніх вузлів електронного пристрою також застосовують екранування від електричних та магнітних полів.

Екранування є ефективним засобом захисту апаратури від індуктивних завад, впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів.

Залежно від виду екранованого поля розрізняють *магнітостатичне, електростатичне та електромагнітне екранування*.

Ефективність екранування – *SE* (shielding effectiveness) визначають як відношення величин, що характеризують рівень завади за відсутності та за наявності екрана. Такими величинами можуть бути напруженості електричного та магнітного полів, а також напруги і струми в екранованій схемі. Наприклад, ефективність екранування магнітного поля визначають за формулою

$$SE = \frac{H}{H_{\text{екр}}} \geq 1, \quad (6.42)$$

де H та $H_{\text{екр}}$ – напруженості магнітного поля в заданій точці без екрану та з екраном, відповідно.

Магнітостатичне екранування здійснюють одним з двох способів.

Перший полягає у застосуванні суцільного екрану з феромагнітного матеріалу. Цей спосіб забезпечує захист у разі впливу низькочастотного ($f = 0 \dots 3$ кГц) магнітного поля відносно невеликої інтенсивності. Якість екрану залежить від товщини стінок корпусу. У разі збільшенні частоти завади магнітна проникність феромагнітних матеріалів зменшується, що знижує ефективність екранування.

Величину наведеного магнітним полем сигналу завади $U(B)$ можна визначити за формулою

$$U = S dB_s / dt, \quad (6.43)$$

де B_s – складова магнітної індукції, перпендикулярна площині контуру, Тл, S – площа контуру сигнального кола, м².

Щоб *запобігти виникненню завади* або щоб *зменшити її рівень* необхідно вживати таких заходів:

- закрити електричне коло, яке треба захистити від впливу завади, екраном;
- *орієнтувати провідники* контуру так, щоб магнітні силові лінії поля не перетинали контур, а проходили вздовж нього;
- *зменшити площу* контуру.

Екрани виготовляють із феромагнітних матеріалів (пермалой, сталь) з високою магнітною проникністю.

Пермалой – прецизійний залізо-нікелевий сплав з магнітно-м'якими властивостями із вмістом нікелю (Ni) (22...84 %). Може мати додаткові домішки кількох інших компонентів (молібден, кобальт, хром тощо). Сплав має високу відносну магнітну проникність ($\mu \sim 100\,000$) та малу коерцитивну силу.

Екран із зазначених матеріалів має магнітний опір значно менше, ніж у повітря. За цієї умови силові лінії зовнішнього магнітного поля $H_{звн}$ викривляються, і їх основна частина концентрується в екрані, напруженість поля всередині екранованого простору знижується (рис. 6.11а). Якщо джерело завади, наприклад, трансформатор, знаходиться всередині екрану, то силові лінії поля не поширюються назовні (рис. 6.11б). Цей вид екранування ще називають *магнітним шунтуванням*. Магнітостатичні екрани з'єднувати зі спільною шиною системи живлення не обов'язково.

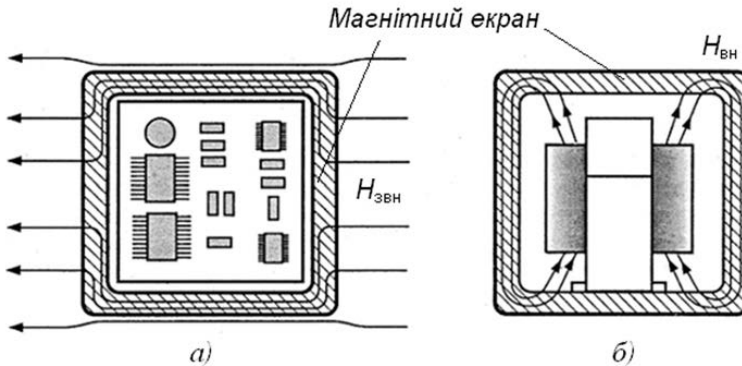


Рисунок 6.11. Приклади екранування від впливу низькочастотних магнітних полів:
 а – схема захисту функціональних модулів від зовнішнього магнітного поля,
 б – схема просторового обмеження магнітного поля від внутрішнього джерела

Ефективність екранування магнітостатичним екраном визначають за формулою:

$$SE = \frac{\mu d}{D}, \quad (6.44)$$

де μ – відносна магнітна проникність екрана; d – товщина стінок екрану; D – діаметр еквівалентного сферичного екрану (довжина стінки кубічного екрану).

Для зменшення магнітного опору необхідно передбачити достатню товщину екрану, а також передбачити мінімум стиків і швів, що орієнтовано поперек силових ліній. На практиці, щоб не збільшувати вагу конструкції, зазвичай роблять екрани завтовшки (d) не більше 2 мм. Тому досягти відчутної ефективності одношарових екранів можна тільки у разі застосування матеріалів з високим значенням магнітної проникності μ .

Приклад. Оцінити ефективність екранування однакових за розмірами екранів, виготовлених з конструкційної сталі ($\mu = 100$) та з пермалоя 79 НМ ($\mu = 25000$), геометричні розміри яких характеризуються параметрами $d = 1$ мм, $D = 150$ мм.

Розв'язання.

Ефективність екрану з конструкційної сталі:

$$SE = 100 \cdot 1 : 150 \approx 1,6 \text{ або } SE_{\text{дб}} \approx 4,08 \text{ дБ.}$$

Ефективність екрану з пермалоя:

$$SE = 25000 \cdot 1 : 150 \approx 1,6 \text{ або } SE_{\text{дб}} \approx 44,4 \text{ дБ.}$$

Оскільки магнітна проникність феромагнітних матеріалів істотно залежить від напруженості магнітного поля, під час оцінювання ефективності екранування потрібно у формулу підставляти значення μ відповідне реальній напруженості поля в екрані.

Ефективність екранування можна підвищити, якщо застосувати багатошарову конструкцію з тонких екранів, розділених діелектричними прошарками. Проміжок між шарами екрану роблять таким, щоб він приблизно дорівнював відстані між першим шаром і найближчим краєм екранованого об'єкту.

Слід зазначити, що зі збільшенням частоти змінного магнітного поля в екрані виникають *вихрові струми*, що призводять до ослаблення поля, яке спричиняє заваду, а також починає впливати *поверхневий ефект*, тобто, відбуваються ті ж процеси, що і в наведених нижче електромагнітних екранах. Однак на низьких частотах ці явища незначні і переважним чинником залишається магнітне шунтування. Із зростанням частоти поля зменшується ефективний переріз екрану, і вплив вихрових струмів починає домінувати над магнітним шунтуванням. Тобто, ослаблення низькочастотних і високочастотних полів одним і тим же екраном ґрунтується на різних фізичних ефектах.

Другий спосіб магнітостатичного екранування полягає у застосуванні екрану з матеріалу, що має малий питомий електричний опір. У такому екрані під дією зовнішнього поля $H_{\text{звн}}$ виникають *вихрові струми*, поле яких (наведене поле $H_{\text{нвн}}$) *компенсує зовнішнє* поле (рис. 6.12). Ефективність такого екранування зростає зі збільшенням частоти завад. Форма екрану має незначний вплив на якість екранування, що залежить головним чином від фізичних властивостей матеріалу.

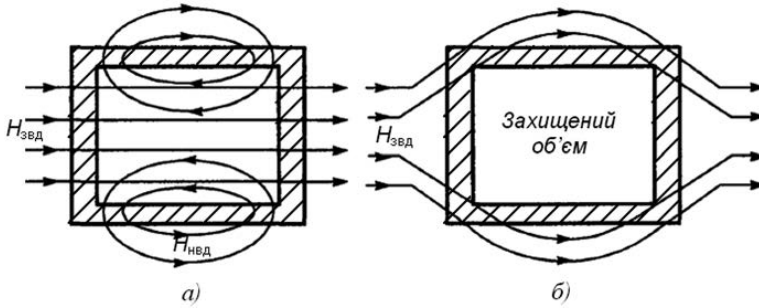


Рисунок 6.12. Схема магнітостатичного екранування немагнітним екраном:
 а – схематичне зображення магнітних полів в зоні захищеного об'єкту,
 б – конфігурація ліній магнітної індукції в зоні дії немагнітного екрану

Екранування височастотних магнітних полів (частоти вище 3 кГц) здійснюють електромагнітними екранами з матеріалів з великою електропровідністю – міді, алюмінію, латуні. Використовують також феромагнетики з хорошою електропровідністю (конструкційна вуглецева сталь), що дозволяє одночасно послабити й низькочастотні магнітні поля. Як було зазначено вище, поле завади $H_{звд}$ (рис. 6.12а) наводить у стінці екрану вихрові струми. Магнітне поле цих струмів $H_{нвд}$ всередині екрана спрямовано назустріч зовнішньому полю, а зовні – в тому ж напрямку, що й $H_{звд}$. У результаті, в об'ємі, захищеному екраном, поле послаблюється, а зовні – посилюється, тобто, відбувається «витіснення» зовнішнього поля з простору, обмеженого екраном (рис. 6.12б).

Вихрові струми в екрані розподіляються в межах його перерізу нерівномірно, що обумовлено поверхневим ефектом – ослабленням магнітного поля, що проникає всередину металу. Причиною поверхневого ефекту є екранування внутрішніх шарів вихровими струмами, що циркулюють у поверхневих шарах. Внаслідок *поверхневого ефекту* густина вихрових струмів і напруженість магнітного поля всередині екрану *знижується* за експоненціальним законом:

$$j(x) = j_0 \exp(-x/\delta), \quad (6.45)$$

де $j(x)$ – густина струму на глибині x ; j_0 – густина струму на поверхні металу; δ – ефективна *глибина проникнення (skin depth)* поля в стінку екрану, що характеризує ступінь прояву поверхневого ефекту.

На глибині δ напруженість поля зменшується в e разів. Значення δ розраховують за формулою

$$\delta = 1,41 \sqrt{\frac{1}{\omega \mu_0 \mu \sigma}}, \quad (6.46)$$

де σ – питома провідність матеріалу екрану, $1/(\text{Ом}\cdot\text{м})$ (величина зворотна питомому електричному опору); μ_0 – магнітна стала й дорівнює $1,257 \times 10^{-6}$ Гн/м; μ – відносна магнітна проникність; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Прояв поверхневого ефекту посилюється зі збільшенням добутку $\mu\sigma$. Для немагнітних матеріалів $\mu \approx 1$, тому за інших однакових умов глибина проникнення поля для феромагнетиків ($\mu \gg 1$) буде менше. Це пояснюється більш високою концентрацією магнітного поля у феромагнітному екрані, а отже, і більш сильними вихровими струмами. Для прикладу в табл. 6.3 наведено значення ефективної глибини проникнення поля δ в метали. У разі застосування феромагнітного екрану слід брати до уваги, що з одного боку такі екрани мають високу ефективність екранування, а з іншого – мають сильний вплив на середовище, які вони захищають. Дане явище обумовлене втратами на *гістерезис*, а також підвищеним рівнем втрат на *джоулеве тепло* внаслідок протікання вихрових струмів в екрані через гіршу електропровідність феромагнетиків. З цієї причини застосовувати феромагнітні екрани для екранування високочастотних полів слід після ретельного аналізу.

Таблиця 6.3. Значення ефективної глибини проникнення поля δ в метали, мм

Частота f , МГц	Мідь	Латунь	Алюміній	Сталь		Пермалой
				$\mu = 50$	$\mu = 100$	
10^2	6,7000	12,4000	8,8000	–	1,540	0,380
10^3	2,1000	3,9000	2,7500	–	0,490	0,120
10^4	0,6700	1,2400	0,8800	–	0,154	0,038
10^5	0,2100	0,3900	0,2750	–	0,049	0,012
10^6	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	–	–
10^7	0,0210	0,0390	0,0275	0,0070	–	–
10^8	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	–	–

З табл. 6.3 випливає, що зі збільшенням частоти поля глибина проникнення (δ) магнітного поля в тіло екрана зменшується, і товщину екрана можна зменшити. Для ослаблення полів частотою 100 кГц достатньо використовувати екран товщиною 1 мм. На більш високих частотах можна застосовувати *екранні покриття* у вигляді фольги, *шару металу*, напиленого на *діелектричну основу*, шару *електропровідної фарби*. Змінне магнітне поле, частота коливаний якого більше 10 МГц, можна достатньо ефективно екранувати, якщо на діелектричний корпус нанести *мідне* або *срібне покриття* або наклеїти *алюмінієву фольгу* завтовшки 0,1 мм.

Екранування внаслідок виникнення вихрових струмів обумовлено двома чинниками: зворотним полем, створеним струмами, що протікають в екрані, і поверхневим ефектом. На високих частотах, у разі $d > \delta$ діють обидва зазначених чинники. Ефективність екранування в цьому випадку визначають за формулою

$$SE = \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8m\mu\delta} \right) \exp\left(\frac{d}{\delta}\right), \quad (6.47)$$

де D – довжина меншого ребра прямокутного екрану, або діаметр циліндричного, або сферичного екрану; m – коефіцієнт форми екрану ($m = 1$ для прямокутного, $m = 2$ для циліндричного, $m = 3$ для сферичного екрану).

Для низькочастотних полів, коли має місце співвідношення $d < \delta$, поверхневий ефект незначний. У таких випадках діє переважно зворотнє поле вихрових струмів і ефективність екранування визначають за формулою

$$SE = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \mu_0 \delta D d}{2m} \right)^2}. \quad (6.48)$$

Електростатичне екранування найбільш ефективно може бути організовано застосуванням суцільної оболонки з металу з високою провідністю (мідь, срібло або алюміній). Оболонку необхідно ретельно з'єднати зі спільною шиною вторинного джерела електроживлення. Форма оболонки і товщина стінок на якість екранування практично не впливають.

Сутність електростатичного екранування полягає в *замиканні силових ліній* електростатичного поля на еквіпотенціальну поверхню металевого екрана і *відведення* електричних зарядів на *спільну шину* джерела електроживлення (на корпус приладу). З'єднання зі спільною шиною електростатичного екрана є необхідним елементом реалізації електростатичного екранування.

Застосування металевих екранів повністю усуває вплив електростатичного поля. У разі використання діелектричних екранів, що щільно прилягають до екранованого елемента, можна послабити поле джерела завади в ϵ раз, де ϵ – відносна діелектрична проникність матеріалу екрану.

Основним завданням екранування *електричних полів* є зниження ємності зв'язку (*паразитної*) між екранованими елементами конструкції. Отже, ефективність екранування визначає в основному співвідношення ємностей зв'язку між джерелом і рецептором завади до і після установа екрану. Тому, будь-які дії, що призводять до зниження ємності зв'язку, збільшують ефективність екранування.

Екранувальні властивості, металевого листа істотно залежать від *якості з'єднання екрану з корпусом приладу* і окремих частин екрану між собою. Особливо важливо не робити з'єднувальних проводів між частинами екрана і корпусом. У діапазонах метрових і коротших довжин хвиль з'єднувальні провідники довжиною в *кілька сантиметрів* можуть значно *погіршити* ефективність екранування. На більш коротких хвилях (дециметрового і сантиметрового діапазонів) *з'єднувальні провідники і шини* між екранами застосовувати *не можна*. Для отримання високої ефективності екранування електричного поля в такому разі необхідно застосовувати безпосереднє суцільне *з'єднання* окремих частин екрану. Вузькі щілини і отвори в металевому екрані, розміри яких малі порівняно з довжиною хвилі, практично не погіршують екранування електричного поля.

На частотах понад 1 ГГц зі збільшенням частоти ефективність екранування знижується. Основні особливості електричних екранів, можна сформулювати таким чином:

– конструкція екрана має бути такою, щоб силові лінії електричного поля замикалися на стінки екрану і не виходили за його межі;

– для низькочастотних завад глибина проникнення (δ) більше товщини (d), тобто $\delta > d$, ефективність електростатичного екранування практично визначає якість електричного контакту металевого екрана з корпусом пристрою і мало залежить від матеріалу екрану і його товщини;

– для високочастотних завад має місце співвідношення $\delta < d$ й ефективність екрану, що функціонує в електромагнітному режимі, визначає його товщина, провідність і магнітна проникність матеріалу.

Електромагнітне екранування використовують найбільш часто, оскільки у більшості випадків потрібно захищати апаратуру не від статичних полів, а від змінних або флуктуаційних полів. Для захисту від високочастотних завад слід переважно використовувати немагнітні метали. Значно більшого ефекту можна досягти, якщо застосувати не однорідні екрани, а багат шарові. Це пояснюється наявністю в них кількох меж, що розділяють поверхні, з яких складається екран. На кожній з цих меж відбувається часткове відбивання електромагнітної хвилі. Найбільш ефективні екрани з комбінації магнітних і немагнітних шарів. Магнітні шари розташовують з боку надходження електромагнітного поля.

Інтенсивність електричної та магнітної складових електромагнітного поля всередині металевого екрану зменшується залежно від глибини занурення в тіло екрану за експоненціальним законом.

Ефективність екранування для електромагнітного поля у разі застосування однорідного екрану визначають за формулою

$$SE = \frac{z_{\text{пов}}}{z_{\text{мет}}} \cdot \exp\left(\frac{d}{\delta}\right), \quad (6.49)$$

де $z_{\text{пов}} = 377$ Ом – характеристичний опір повітря (вакууму);

$z_{\text{мет}} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu}{\sigma}}$ – модуль характеристичного опору металу. Значення $z_{\text{мет}}$ в сот-

ні, тисячі разів менше, ніж $z_{\text{пов}}$. Ефективність екранування електромагнітного поля випромінювання металевим екраном висока. Наприклад, для екрану з алюмінієвої фольги товщиною 0,1 мм вона досягає 127 дБ на частоті 10 МГц і зростає із збільшенням частоти.

Електронну апаратуру професійного призначення і апаратуру реєстрації інформації зокрема здебільшого виготовляють в металевих корпусах. Таке рішення щодо конструктивного оформлення пристроїв обумовлено необхідністю забезпечити надійну заводостійкість обладнання.

Реальний корпус крім надійного екранування має забезпечувати охолодження електронного пристрою, введення сигнальних кабелів і кабелів електроживлення, захист від пилу, вологи, механічних пошкоджень і корозії. Крім функціональних вимог корпус має задовольняти певним додатковим вимогам: бути не дорогим, мати якомога меншу масу і естетичний зовнішній вигляд.

Одночасно задовольнити усі зазначені вимоги доволі складно.

Можна виділити певні характерні особливості сучасних корпусів електронних пристроїв та приладів.

Найчастіше для виготовлення корпусів електронних приладів використовують сталь, алюміній та його сплави або пластик з металевим напилюванням. У кожному разі прагнуть зменшити товщину стінок і панелей конструкції. Здебільшого корпуси мають форму паралелепіпеда, що дозволяє більш ефективно використовувати внутрішній об'єм для розміщення електронних вузлів та блоків.

Корпуси виготовляють з окремих деталей. У таких конструкціях застосовують знімні кришки і панелі. Це полегшує доступ до розташованих всередині функціональних вузлів та інших елементів конструкції для обслуговування або заміни. Проте, наявність знімних елементів конструкції неминуче призводить до появи щілин та зазорів, що погіршують екранувальні властивості в цілому. Так само негативно на якість екранування впливає наявність отворів для введення кабелів та забезпечення вентиляції. Захисні і декоративні покриття теж ускладнюють організацію якісного екранування, оскільки вони, як правило, не електропровідні й заважають забезпеченню надійного електричного контакту між панелями корпусу.

Для поліпшення екранувальних властивостей корпусів електронної апаратури необхідно:

- зменшити величину шпарин між панелями;
- забезпечити надійний електричний контакт між провідними деталями корпусу;
- забезпечити електромагнітний захист кабельних ввідів і вентиляційних отворів.

Як приклад реалізації цих заходів наводимо конструкцію корпусів фірми Schroff серії RatiopacPRO-air для встановлення в апаратних стійках. На рис. 6.13 наведено їх зовнішній вигляд, а на рис. 6.14 – складові частини.

Від величини шпарин між панелями збірного корпусу безпосередньо залежить ефективність екранування.

$$SE_{дБ} = 20 \lg (\lambda/2L) \text{ (дБ)}, \quad (6.50)$$

де λ – довжина хвилі екранованої завади;

L – довжина шпарини.

Для зменшення впливу шпарин зазвичай використовують додаткові пружинні та еластичні прокладки між елементами конструкції з електропровідних матеріалів. Прокладки роблять знімними, завдяки чому ступінь електромагнітної захищеності, а отже, і вартість корпусу можна змінювати в залежності від умов застосування.

Найкращі механічні й електричні характеристики мають прокладки з берилієвої бронзи, проте цей матеріал дорогий та шкідливий екологічно. Крім того, у разі його взаємодії з деякими металами утворюється гальванічна пара, що



Рисунок 6.13. Зовнішній вигляд корпусів серії RatiopacPRO-air

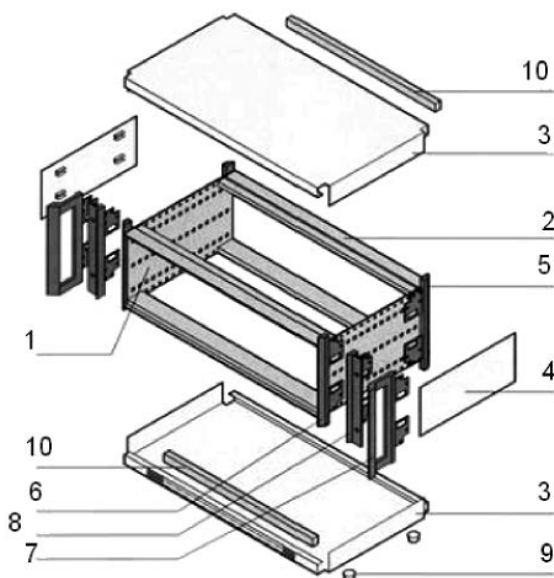


Рисунок 6.14. Складові елементи конструкції корпусів серії RatiopacPRO-air:
 1 – бічна панель, 2 – горизонтальна рейка, 3 – кришка з контактами заземлення,
 4 – бічна кришка, 5 – задня накладка, 6 – накладка, 7 – передня ручка,
 8 – 19” монтажний кронштейн, 9 – ніжка корпусу, 10 – плоский фільтр

провокує *електрохімічну корозію*. Альтернативними є прокладки з *нержавіючої сталі* або *полімерних матеріалів*.

Полімерні прокладки виготовляють як з електропровідних матеріалів, так і з діелектриків. В останньому випадку смужку або шнур з еластичного матеріалу поміщають в оболонку з металізованої синтетичної тканини. Такі прокладки частіше застосовують для знімних деталей, наприклад, лицьових панелей модулів.

Під час вибору полімерної прокладки враховують *температурний діапазон*, в якому передбачено експлуатацію виробу, необхідну *корозійну стій-*

кість матеріалу, ширину зазору, що перекриває прокладка. Найчастіше застосовують *спінений неопрен (neoprene), полівінілхлорид (PVC), поліуретан (PU)*. Наведений перелік матеріалів розташовано у порядку збільшення ширини зазору, на який розрахована прокладка.

Для забезпечення відповідності вентиляційних вікон вимогам ЕМС використовують *решітки та перфоровані панелі*. Основним питанням під час їх конструювання є вибір *розмірів* і форми *отворів*. Максимальну можливу величину *отворів* (діаметр або, якщо отвори не круглі – довжину) визначають за тією ж формулою (6.50), що і розмір щілин між панелями. Кількість і форму отворів вибирають так, щоб за збереження необхідної механічної міцності панелі, домогтися максимального значення *коефіцієнта відкритої поверхні FAR (Free Area Ratio)*. Коефіцієнт характеризує здатність панелі пропускати повітряний потік і його визначають, як відношення сумарної площі отворів до загальної площі панелі.

6.4. Захист від завад ліній зв'язку та мережі живлення

6.4.1. Захист сигнальних ліній від завад

Під час розроблення електронних систем значну увагу слід приділити питанням захисту від завад, що надходять через інформаційні лінії зв'язку, кола управління, мережі електроживлення.

Можна виділити два типи подібних завдань: захист ЕА від завад, що надходять ззовні, і захист зовнішніх електричних кіл від завад, що може створювати ЕА. Методи забезпечення заводозахищеності в обох випадках однакові – екранування проводів і застосування фільтрів.

Екранування. Для забезпечення нормального функціонування інформаційних ліній зв'язку головною проблемою зазвичай є необхідність ослаблення індуктивної завади з частотою мережі електроживлення 50 Гц. Основний спосіб ослаблення таких завад – це *зменшення площі замкнених контурів* з малим повним опором, що утворюють сигнальні провідники. З цією метою *скручують проводи* диференціальної пари або сигнального проводу зі спільним.

Для прокладання зовнішніх та внутрішніх сигнальних ліній різного призначення можна використовувати проводи та кабелі різної конструкції. Сучасна промисловість забезпечує широкий асортимент сигнальних проводів. Сигнальні провідні жили можуть бути захищені тільки зовнішнім діелектричним покриттям, а можуть бути ще й додатково захищені ззовні металевим екраном. Всередині екрану може бути прокладено один, два проводи або кілька проводів. Проводи типу «*вита пара*» можуть бути також неекрановані або екрановані. В одному екрані може бути від однієї до чотирьох витих пар. Широко використовують також екрановані кабелі, проводи всередині яких не скручені.

Екрани для провідних ліній виготовляють *сплетінням* тонких мідних дротининок, що утворює суцільну плетену екранну оболонку, або з алюмінієвої фольги з дренажним провідником.

Деякі схеми екранування індуктивних завад з використанням екранованих проводів і витих пар наведено на рис. 6.15.

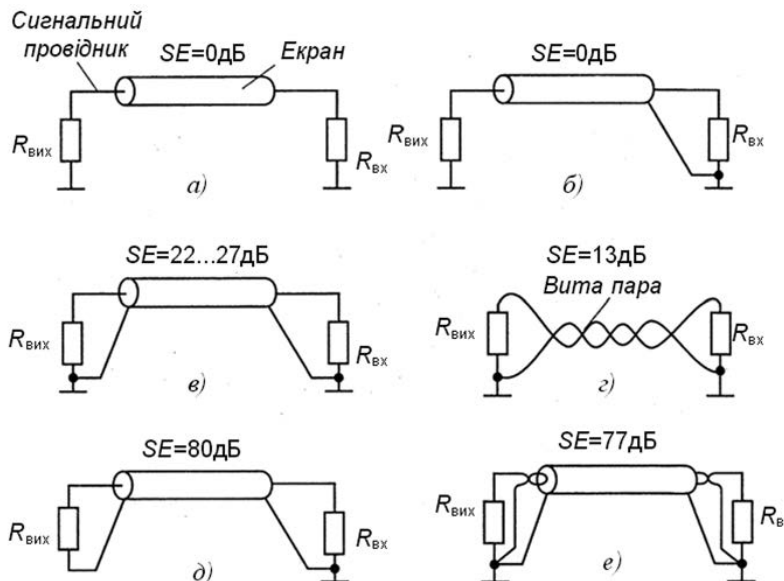


Рисунок 6.15. Способи реалізації сигнальних ліній для зменшення впливу індуктивних завад від мережі електроживлення частотою 50 Гц:
а – екран не під'єднано; *б* – екран під'єднано з боку уземленого вхідного кола;
в – екран під'єднано з двох боків з уземленням; *г* – лише вита пара;
д – екран під'єднано з двох боків, уземлення лише з боку вхідного кола;
е – екран під'єднано з двох боків з уземленням з двох боків та застосуванням витиї пари

Наведені на рис. 6.15 значення ефективності екранування отримано для таких значень вихідного та вхідного опорів функціональних вузлів, між якими прокладено сигнальні лінії: вихідний опір джерела сигналу $R_{\text{вих}} = 100 \text{ Ом}$, вхідний опір приймача сигналу $R_{\text{вх}} = 1 \text{ МОм}$.

Екран ліній зв'язку необхідно з'єднувати зі спільною шиною («корпусом»). Під час конструювання не можна передбачати з'єднання екрану зі спільною шиною за допомогою проміжних проводів. Екран слід з'єднувати з корпусом безпосередньо паянням, зварюванням або надійним затискачем.

Екран лінії електричного з'єднання, що не з'єднаний з корпусом, не захищає від впливу завад (рис. 6.15*а*). У разі з'єднання з корпусом тільки одного кінця екрану є ослаблення ємнісних зв'язків, але індуктивна завада не послаблюється (рис. 6.15*б*). Найбільшої ефективності екранування *SE* можна досягти, якщо екран є зворотним проводом (рис. 6.15*д*), проте це неможливо в тих

випадках, коли вихід джерела сигналу гальванічно розв'язаний з іншими схемами джерела сигналу (наприклад, із застосуванням трансформатора). У разі, коли джерело сигналу та приймач сигналу з'єднано зі спільною шиною, можна застосувати схему, в якій *виту пару* поміщено в *уземлений* з двох кінців екран (рис. 6.15e). Усі наведені схеми, за винятком першої, одночасно забезпечують захист і від *ємнісних* завад.

Екрановані проводи здебільшого мають зовнішню діелектричну захисну оболонку, але не обов'язково (можуть бути без захисної оболонки). Для запобігання з'єднанню екранів *без захисної оболонки* між собою і з корпусом в незапланованих місцях на них надягають *ізолювальні трубки*.

У разі застосування екранованих проводів для реалізації сигнальних ліній слід враховувати вхідні напруги й те, що екрановані проводи мають значну погонну ємність (близько 100 пФ/м), внаслідок чого в разі передавання високочастотних сигналів вони можуть створювати значне навантаження для джерела сигналу. Під час вибору конструкції лінії електрозв'язку ЛЕЗ необхідно також враховувати, що такі проводи дорожче, мають більший діаметр, а їх застосування ускладнює процес монтажу, тому застосовувати їх слід тільки в обґрунтованих випадках.

6.4.2. Запобігання завадам у системі електроживлення

Електроживлення електронної апаратури здійснюють від автономних джерел постійної напруги або від загальної мережі електроживлення змінної напруги частотою 50 Гц. В окремих випадках може бути застосовано й інші джерела: окремі електрогенератори змінної напруги частотою 400 Гц, автономні електрогенератори змінної напруги частотою 50 Гц, джерела безперебійного живлення тощо.

Високочастотні *електромагнітні завади* (радіозавади) можуть надходити в апаратуру реєстрації інформації, радіо- та іншу апаратуру з *мережі електроживлення* і *через ємності* між обмотками трансформатора потрапляти в основну схему.

Слід також завжди вживати заходів для захисту мережі електроживлення від електромагнітних завад, що виникають внаслідок функціонування імпульсних джерел живлення, колекторних електродвигунів та інших пристроїв, під час роботи яких є переривання струму або виникає іскріння. За відсутності *протизавадових фільтрів* завади від зазначених вище пристроїв здатні порушити роботу електронної апаратури, встановленої на відстані кількох метрів і більше від джерела завад, а також може призвести до порушення функціонування апаратури, що живиться від тієї ж мережі електроживлення.

Для захисту від високочастотних радіозавад основним способом є застосування *індуктивно-ємнісних протизавадових фільтрів*.

Конструктивно та схемотехнічно такі фільтри мають суттєві відмінності залежно від потоку енергії, який необхідно забезпечити для роботи електронного пристрою або системи, спектру високочастотних завад, які треба відфільтрувати.

У більшості випадків захист від високочастотних електромагнітних завад забезпечують застосуванням LC -фільтрів, які з'єднують з кабелем електроживлення, біля джерела завад або безпосередньо на мережному з'єднувачі пристрою. Крім LC -фільтрів використовують також конструктивно більш прості фільтри у вигляді феритових кілець, що охоплюють кабель, через який надходить енергія електроживлення або передають інформаційний сигнал.

Феритовий фільтр – один з найпростіших і дешевих типів інтерференційний фільтр призначений для встановлення на вже наявні кабелі та проводи. Феритовий фільтр – це кільце або циліндр, який одягають на провід (кабель) сигнальної лінії або лінії електроживлення. Значного поширення набули розбірні фільтри з фіксаторами, які можна надіти на кабель і закріпити в потрібному місці. Такий фільтр виготовляють у вигляді двох напівциліндрів розміщених у пластиковому корпусі з двох половинок. Феритовий фільтр одягають на кабель на відстані 3...5 см від його кінця (з одного або з двох боків). Феритові фільтри виготовляють різних типорозмірів з різними електричними властивостями. На рис. 6.16 наведено зовнішній вигляд феритових фільтрів компанії TDK, а на рис. 6.17 – залежність модуля імпедансу з'єднувальної лінії в зоні розташування феритового фільтру.



Рисунок 6.16. Зовнішній вигляд феритових фільтрів компанії TDK

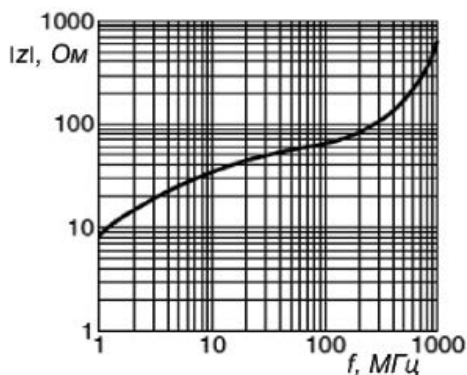


Рисунок 6.17. Графік залежності імпедансу лінії електричних з'єднань від частоти з феритовим фільтром ZCAT1518-0730

Основними технічними параметрами феритових фільтрів компанії TDK є: робочий температурний діапазон від 0 до + 50°C та діапазон опору – 25...50 Ом (10...100 МГц) або 30...35 Ом (50...500 МГц).

Для зменшення *флуктуаційних завад* на лінії живлення встановлюють також феритове кільце, на яке намотують кілька витків провідника сигнальної лінії або лінії живлення. Такий фільтр використовують на внутрішніх лініях пристроїв.

Провідні світові та вітчизняні фірми виготовляють широкий асортимент LC-фільтрів для з'єднувальних ліній систем електроживлення електронної апаратури. Для кращого розуміння принципів функціонування та застосування таких фільтрів проаналізуємо схему фільтра наведену на рис. 6.18.

У схемі мережного фільтра (рис. 6.18) конденсатор C_1 (їх позначають – C_x) зменшує *симетричні (differential mode)* завади, а конденсатори C_2 та C_3 (їх позначають C_y), а також протизавадний дросель (такі дроселі позначають, як трансформатор TV) зменшують *несиметричні (common mode)* завади. Опір TV змінному струму частоти мережі електроживлення малий і дорівнює активному опору його обмоток, а для *несиметричної* завади визначальною є реактивна складова опору, яку орієнтовно визначають через $4L$, де L – індуктивність однієї обмотки TV . Застосовують дроселі з великою індуктивністю

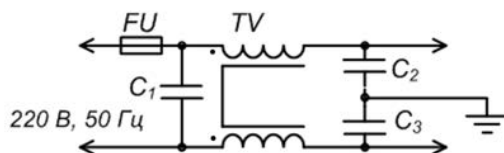


Рисунок 6.18. Приклад схеми протизавадного мережного фільтра

через повні обмеження щодо величини конденсаторів C_y . Для захисту пристроїв від надмірного збільшення вхідної напруги і сили струму на рис. 6.18 у схемі наведено плавкий запобіжник FU . Для захисту від викидів вхідної напруги застосовують також газорозрядники, варистори, стабілітрони, транзисторні обмежувачі перехідної напруги (TVS – *transient voltage suppressors*).

6.4.3. Проектування друкованої плати з урахуванням вимог електромагнітної сумісності

Щоб забезпечити електромагнітну сумісність функціональних вузлів усередині пристрою треба приділити особливу увагу *конструюванню ліній безпосереднього електроживлення* цих вузлів від вторинного джерела електроживлення та конструкції спільної шини оскільки у процесі функціонування пристрою через не правильну конструкцію можуть існувати *кондуктивні* (гальванічні) завади.

За результатами попереднього аналізу принципової електричної схеми та вимог щодо реалізації пристрою необхідно вибрати тип друкованої плати (ОШД, ДШДП чи БШДП). Електрична схема може містити тільки *аналогові* функціональні вузли, тільки *цифрові* функціональні вузли або *комбінацію* аналогових та цифрових. Крім того, як аналогова, так і цифрова частина пристрою може містити *низькочастотні* та *високочастотні* компоненти.

Залежно від структури схеми все поле друкованої плати слід розподілити на сегменти відповідно до оброблюваних сигналів. Приклад такого розподілу наведено на рис. 6.19.

Найбільш *вразливою* до впливу завад є *однобічна* друкована плата оскільки на ній не можна забезпечити екранування сигнальних провідників провідною площиною спільної шини. У разі проектування двобічної або багат шарової плати слід *розділити* площину спільної шини (зробити відповідні розрізи ме-

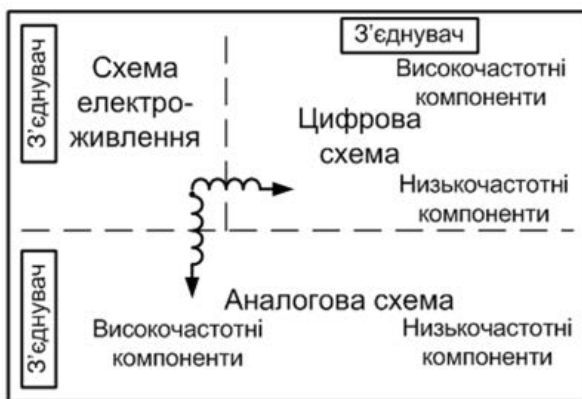


Рисунок 6.19. Приклад розташування компонентів на друкованій платі

талевого прошарку) таким чином, щоб *сигнальні провідники* відповідної частини схеми (аналогової чи цифрової) знаходились *над відповідним сегментом* спільної шини. У цьому випадку не буде загрози наведення завад внаслідок емнісного зв'язку між сегментом спільної шини та сигнальним провідником. Сегменти спільної шини треба з'єднувати на платі провідниками з *малим опором* у точці максимально наближеній до шини нульового потенціалу джерела живлення.

У разі відсутності суцільного сегменту спільної шини *зворотний провідник* лінії сигнального з'єднання слід прокладати так, щоб він був *якнайближче до прямого* провідника, а його конфігурація повторювала трасу прямого провідника. В цьому випадку *не утворюється* контур *чутливий* до впливу флуктуаційного магнітного поля. Провідники, що знаходяться в різних прошарках слід прокладати за *перпендикулярними напрямками* щоб максимально *зменшити емнісний зв'язок* між сигнальними лініями.

Основні рекомендації щодо забезпечення ЕМС друкованої плати такі:

1) *не можна* прокладати лінії електричних з'єднань на друкованій платі, щоб *виникали замкнуті контури*;

2) слід проектувати *доріжки живлення* з *максимальним перерізом* і *встановлювати конденсатори* розв'язки напруги живлення для кожного активного компонента схеми, та виконувати інші рекомендації виробника електронних компонентів;

3) слід ретельно планувати *траси зворотних струмів* цифрових і аналогових блоків, треба прокладати доріжки так, щоб *цифрові зворотні струми не проходили через аналогову* схему;

4) для живлення активних компонентів схеми слід використовувати з'єднання типу «*зірка*» для спільної шини або застосовувати *багатошарові друковані* плати з окремими прошарками спільної шини та живлення;

5) *аналогові та цифрові* блоки, *високочастотні та низькочастотні* компоненти слід розміщувати окремо один від одного;

6) за можливості слід використовувати *роздільні* блоки *електроживлення* для цифрової і аналогової схем;

7) *високочастотні* блоки слід розміщувати компактно і прокладати *сигнальні доріжки мінімальної довжини*.

6.5. Характеристики монтажних проводів та коаксіальних кабелів

Монтажні проводи – це проводи, що застосовують для прокладання ліній електричних з'єднань в електро- та радіоелектронній апаратурі. Вони бувають *жорсткими і гнучкими*. Жорсткі проводи (дроти) містять однодротову струмопровідну жилу, у гнучких – струмопровідну жилу зроблено з багатьох скручених певним чином дротинок. *Дротинки* виготовляють з *міді*. У деяких випадках їх *вкривають шаром олова, срібла, а в деяких випадках – золота*.

Промисловість виробляє багатожильні монтажні проводи в яких кількість круглих д्रोїнок може становити 3, 7, 12, 17, 19, 27, 37.

Жили монтажних проводів *луджені*, тому їх можна легко з'єднувати *па-янням*. Жили монтажних струмопровідних проводів *ізолюють* лавсановими, капроновими або скляними нитками, поліетиленом, полівініл-хлоридом. Оболонкою з капрону захищена пластмасова ізоляція проводів деяких марок. В інших випадках струмопровідні жили спочатку обмотані нитками з триацетатного шовку, а після на обмотку нанесено ізоляцію з поліетилену або полівінілхлориду. Ізоляцію з поліетилену і полівінілхлориду часто роблять суцільною, але використовують також плівки з цих матеріалів (плівкова ізоляція).

Залежно від призначення монтажні проводи бувають також *екранованими* і *лакованими*. У монтажних проводів невелика площа перерізу жил – від 0,05 до 6 мм², оскільки їх не призначено для великого струмового навантаження.

Вибір перерізу монтажного проводу залежить від сили робочого струму та припустимого перегріву. У табл. 6.4 наведено густину струму для проводів різного діаметра за умови, що нагрів становить 20°C відносно навколишньої температури.

Таблиця 6.4. Припустимі струми навантаження мідних монтажних проводів

Електричний параметр	Діаметр проводу, мм									
	0,25	0,35	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,5
Густина струму, А/мм ²	14	13	12	10	10	10	9	9	8	8
Сила струму, А	0,7	1,3	2,5	4	7	10	14	17	20	30

З наведених даних випливає, що для проводів меншого перерізу максимально припустима густина струму є відносно більшою. Таке співвідношення обумовлено кращим теплообміном для проводів меншого діаметра.

Значення параметрів монтажних проводів визначають за формулами:

– опір, $R = 1,27 \cdot \rho \cdot l / d^2$;

– довжина, $l = 0,785R \cdot d^2 / \rho$;

– припустима сила струму, $I = 0,785 j \cdot d^2$;

– падіння напруги, $U = I \cdot \rho \cdot l \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) / s$,

де ρ – питомий опір матеріалу проводу, Ом·мм²/м; d – діаметр проводу, мм; l – довжина проводу, м; s – площа перерізу проводу, мм²; j – допустима густина струму, А/мм²; I – сила струму, А; α – температурний коефіцієнт опору матеріалу проводу, 1/°C; ΔT – збільшення температури проводу (перегрів), °C; U – падіння напруги на проводі довжиною l , В.

Питомий опір міді становить 0,0175, срібла – 0,016, золота – 0,023 (Ом·мм²/м).

Маркування монтажних проводів здійснюють *літерами* (3-5 літер) та *цифрами*. Літери характеризують *особливості конструкції* проводу.

Літеру М зазвичай ставлять на першому місці, що позначає *монтажний провід*. Виняток складають деякі проводи з ізоляцією з пластмаси, у позначенні яких літера М відсутня.

Усі інші літерні позначення визначають матеріал, з якого складається ізоляція, і деякі інші особливості конструкції проводу, наприклад:

В – *полівінілхлоридна* ізоляція;

Г – *гнучкий* провід з багатодротовими жилами;

Д – провід з *подвійною* обмоткою;

Л – провід *лакований*;

П – *поліетиленова* ізоляція;

С – ізоляція зі *скловолокна*;

Ц – *плівкова* ізоляція;

Ш – з ізоляцією з поліамідного *шовку*;

Э – *екранований* провід (якщо літера стоїть на *останньому* місці);

Э – *емальований* провід (якщо літера стоїть *за літерою* М).

Приклади маркування проводів:

МГСП – **монтажний провід, гнучкий, багатодротовий, з обмоткою зі скляних ниток і поліетиленовою ізоляцією;**

МГШДЛ – **монтажний провід, гнучкий, багатодротовий, з подвійною обмоткою з поліамідного шовку, лакований;**

МШВ – **монтажний провід, однодротовий, з обмоткою з триацетатного шовку, з суцільною ізоляцією з полівінілхлоридного пластикату;**

МШДЛ – **монтажний провід, однодротовий, з подвійною обмоткою з поліамідного шовку, лакований;**

МГЦСЛЭ – **монтажний провід, багатодротовий, гнучкий, з плівковою ізоляцією, з обплетенням зі скловолокна, лакований, екранований.**

Коаксіальний кабель є двопровідною лінією електричного зв'язку (рис. 6.20).

Сигнал передають *внутрішньою* жилою, зовнішній циліндричний провідник (екран) з'єднують зі *спільною* шиною. Екран сучасного кабелю залежно від призначення цього кабелю може бути виготовлено із суцільної алюмінієвої трубки (гладкої або гофрованої), або зі сплетіння тонких мідних дротинок, або з алюмінієвої трубки та сплетіння одночасно. Коаксіальний кабель забезпечує *хорошу завадозахищеність*. Коефіцієнт екранування сучасних кабелів перевищує 100 дБ.

Коефіцієнт екранування коаксіального кабелю – це величина, що характеризує ступінь ослаблення потужності зовнішнього випромінювання, яке надходить на сигнальну жилу кабелю. Коефіцієнт екранування для коаксіального кабелю позначають літерою К і визначають за співвідношенням

$$K = 10 \lg P_{\text{зл}} / P_{\text{зв}}, \quad (6.51)$$

де $P_{\text{зл}}$ – залишкова потужність зовнішньої завади у місці розташування сигнального провідника, захищеного екраном, $P_{\text{зв}}$ – потужність зовнішньої завади у місці розташування сигнального провідника *за відсутності* екранувальної оболонки.

На тепер у світі виробляють коаксіальні кабелі широкого асортименту. Зовнішній діаметр різних кабелів може набувати значень в межах від 0,6 мм (для

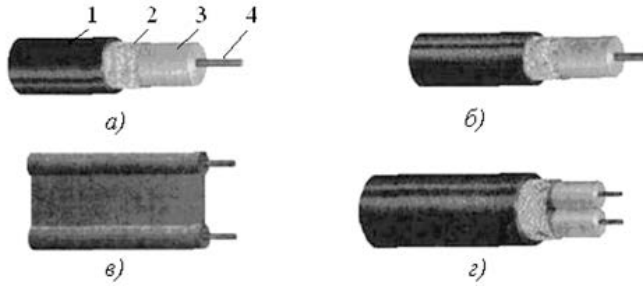


Рисунок 6.20. Структура та різновиди коаксіальних кабелів:

а – несиметричний коаксіальний з суцільним внутрішнім провідником, *б* – несиметричний коаксіальний з багатожилльним внутрішнім провідником, *в* – симетричний стрічковий коаксіальний кабель, *г* – симетричний екранований кабель (РД) 1 – зовнішня захисна оболонка, 2 – зовнішній провідник (екран), 3 – внутрішній ізолятор, 4 – сигнальний провідник

внутрішньо модульного застосування) до 120 мм (для магістральних ліній зв’язку). *Хвильовий опір* різних коаксіальних кабелів може набувати значень від 3200 Ом до 50 Ом.

Маркування кабелю згідно ГОСТ 11326.0-78 вказує на його різновид, хвильовий опір, діаметр, групу ізоляції та нагрівостійкості, порядковий номер. Радіочастотні кабелі випускають трьох типів: РК – радіочастотні *коаксіальні кабелі*; РД – радіочастотні *симетричні* кабелі, *двожилльні* або з *двох* коаксіальних пар; РС – радіочастотні кабелі зі *спіральними провідниками* коаксіальні або *симетричні*.

Кабелі за конструкцією ізоляції поділяють на три групи:

1) кабелі з *суцільною ізоляцією*, у яких весь простір між внутрішнім та зовнішнім провідниками (коаксіальні кабелі) або між струмопровідними жилами і їх екраном (симетричні кабелі) заповнений суцільною ізоляцією або обмоткою з ізоляційних стрічок;

2) кабелі з *повітряною ізоляцією*, у яких на внутрішньому провіднику (коаксіальні кабелі або симетричні кабелі з двох коаксіальних пар) або на жилах (симетричні кабелі) через певний проміжок встановлено шайби з ізоляційного матеріалу, чи застосовано інший ізоляційний каркас між внутрішнім і зовнішнім провідниками або між жилами і їх екраном;

3) кабелі з *напівповітряною ізоляцією*, у яких трубку з ізоляційного матеріалу зроблено суцільною або у вигляді обмотки зі стрічок розташованої поверх або під ізоляційним каркасом, розміщеним між внутрішнім і зовнішнім провідниками (коаксіальні кабелі або симетричні кабелі з двох коаксіальних пар) або на кожній з двох жил (симетричні кабелі). До напівповітряної ізоляції зараховують також пористо-пластмасову, балонну ізоляцію та ізоляцію у вигляді шлицьованої трубки.

Балонна ізоляція – повітряно-пластмасова ізоляція, утворена періодично обтисненою трубкою з внутрішнім діаметром, більшим діаметра струмопровідної жили або внутрішнього провідника.

Перше число означає значення номінального хвильового опору.

За номінальним хвильовим опором встановлено такі ряди кабелів:

- типу РК – 50, 75, 100, 150 і 200 Ом;
- типу РС – 50, 75, 100, 150, 200, 400, 800, 1600 і 3200 Ом;
- типу РД – 75, 100, 150, 200 і 300 Ом.

У технічно обґрунтованих випадках хвильовий опір може бути менше 50 Ом. Значення вибирають з ряду: 6; 9,5; 12,5; 19; 25; 37,5 Ом.

Друге число означає:

– для коаксіальних кабелів – значення номінального *діаметра* зовнішньої ізоляції, округлене до найближчого меншого цілого числа для діаметрів більше 2 мм (за винятком діаметра 2,95 мм, який округлюють до 3;

– для кабелів зі спіральними внутрішніми провідниками – значення номінального *діаметра сердечника*;

– для симетричних кабелів з ізольованими жилами – значення найбільшого *розміру ізоляційного заповнення або скрутки*.

Третє дво- або тризначне число маркування складається з першої цифри, що означає групу ізоляції та категорію *теплостійкості* кабелю, а наступні – *порядковий номер*.

За *теплостійкістю* кабелі поділяють на три категорії:

– *звичайної* *теплостійкості* – для температур до 125°C разом з граничним значенням;

– *підвищеної* *теплостійкості* – для температур вище 125°C до 250°C разом з граничним значенням;

– *високої* *теплостійкості* – для температур більше 250°C.

Кожній групі ізоляції за *відповідної* *теплостійкості* кабелю надано певне цифрове позначення:

1 – кабелі *звичайної* *теплостійкості* з суцільною ізоляцією;

2 – кабелі *підвищеної* *теплостійкості* з суцільною ізоляцією;

3 – кабелі *звичайної* *теплостійкості* з напівповітряною ізоляцією;

4 – кабелі *підвищеної* *теплостійкості* з напівповітряною ізоляцією;

5 – кабелі *звичайної* *теплостійкості* з повітряною ізоляцією;

6 – кабелі *підвищеної* *теплостійкості* з повітряною ізоляцією;

7 – кабелі *високої* *теплостійкості*.

Крім того, до марки кабелів *підвищеної* *однорідності* або *підвищеної* *стабільності* параметрів в кінці через тире додають літеру С.

Наведемо приклад маркування кабелю: РК-50-4-11 – це радіочастотний кабель з хвильовим опором 50 Ом, діаметром зовнішньої оболонки близько 4 мм, *звичайної* *нагрівостійкості* (1), *порядковий номер* 1.

У міжнародній практиці застосовують дещо інше маркування. Схему такого маркування наведено на рис. 6.21.

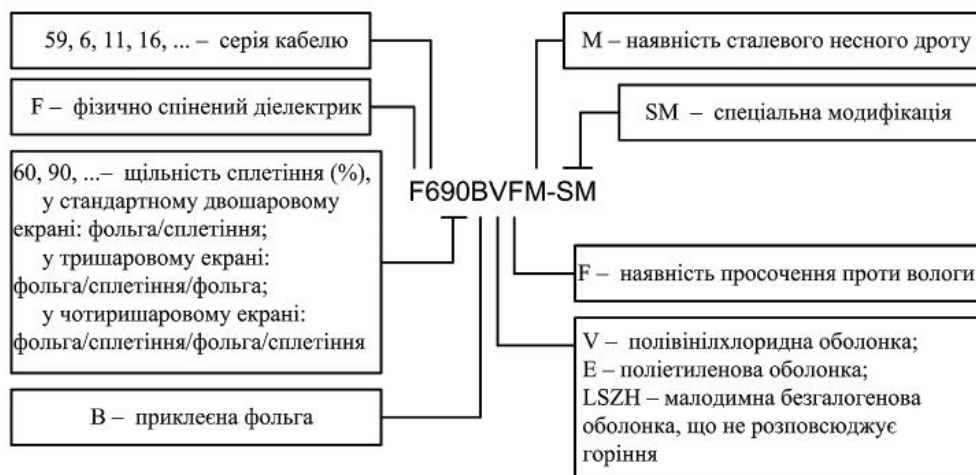


Рисунок 6. 21. Міжнародна схема маркування коаксіальних кабелів

6.6. Запитання для самоконтролю

1. Які типи електричних з'єднань застосовують в електронній апаратурі?
2. Від яких чинників залежать вимоги до ліній електричних з'єднань в електронній апаратурі?
3. Скільки провідників необхідно для здійснення електричного з'єднання? Які способи реалізації цих провідників?
4. Яким загальним вимогам мають задовольняти лінії електричних з'єднань?
5. Чим відрізняються сигнальні ЛЕЗ та лінії електроживлення?
6. Яку лінію називають електрично короткою? Яку модель застосовують для її аналізу?
7. Яку лінію називають електрично довгою? Яку модель застосовують для її аналізу?
8. Що таке хвильовий опір лінії електричного з'єднання, як його визначають?
9. Що таке первинні електричні параметри лінії електричних з'єднань?
10. Запишіть та поясніть співвідношення для визначення часу затримки розповсюдження сигналу лінією електричного з'єднання без навантаження.
11. Наведіть структуру смужкової лінії та поясніть які параметри визначають величину погонної ємності та індуктивності.
12. Що таке перехресна завада і які причини виникнення таких завад на друкованих платах?
13. За яких умов зростає величина ємнісної перехресної завади і за яких умов індуктивної?

14. У чому відмінність завад, що виникають у випадках зустрічного та узгодженого з'єднання сигнальних ліній?

15. Поясніть, що таке електромагнітна сумісність (ЕМС) технічних засобів?

16. Поясніть, що таке стійкість технічних засобів до впливу електромагнітних завад?

17. На які різновиди розподіляють джерела штучних електромагнітних завад?

18. Що таке індуктивна та кондуктивна завада, що є причиною виникнення таких завад?

19. Які відмінності між вузькосмуговими та широкосмуговими завадами? Наведіть приклади таких завад.

20. Які частотні межі визначено для низькочастотних та високочастотних завад? Наведіть приклади таких завад.

21. Які кондуктивні завади виділено стандартами з електромагнітної сумісності?

22. Які завади можуть виникнути у процесі функціонування мережі електроживлення?

23. Які функціональні вузли та компоненти є джерелами завад всередині електронної апаратури?

24. Для чого застосовують екранування електронної апаратури та окремих її функціональних вузлів?

25. Що таке ефективність екранування, як її визначають?

26. Що таке магнітостатичне екранування, якими способами його здійснюють і який фізичний механізм його реалізації?

27. Який матеріал має назву «пермалой», які його складові і які його особливості?

28. Від яких параметрів феромагнітного екрану залежить його ефективність екранування?

29. Поясніть особливості екранування високочастотних магнітних полів.

30. Що таке поверхневий ефект і внаслідок чого він виникає?

31. Як здійснюють електростатичне екранування, від чого залежить його ефективність?

32. Як здійснюють електромагнітне екранування, від чого залежить його ефективність?

33. Які вимоги слід виконати, щоб забезпечити надійні екранувальні властивості корпусів електронної апаратури?

34. Поясніть можливі варіанти екранування сигнальних ліній електричних з'єднань і особливості його реалізації.

35. Які бувають екрановані проводи, чим обумовлено особливості їх застосування?

36. Які способи боротьби з електромагнітними завадами застосовують для ліній електроживлення електронної апаратури?

37. Для чого і як застосовують феритові фільтри на лініях електричних з'єднань, який механізм дії цих фільтрів?

38. Які компоненти застосовують у протизавадних фільтрах ліній електроживлення, боротьбу з якими завадами вони забезпечують?
39. Яким чином слід враховувати особливості оброблюваних сигналів у процесі проектування друкованої плати?
40. Як треба організувати лінії зворотного зв'язку на друкованій платі для забезпечення надійної завадозахищеності функціональних вузлів?
41. Яких правил слід дотримуватись під час проектування друкованої плати для забезпечення ЕМС?
42. Що таке монтажні проводи? Проводи з якою площею перерізу використовують для монтажу електронної апаратури?
43. Поясніть принципи маркування монтажних проводів.
44. Що таке коаксіальний кабель? Яких діаметрів кабелі виготовляє сучасна промисловість і в якому діапазоні змінюється хвильовий опір коаксіальних кабелів?
45. Яких типів бувають коаксіальні кабелі? Поясніть їх конструкцію.
46. Що таке коефіцієнт екранування коаксіального кабелю, як його визначають?
47. На які групи поділяють коаксіальні кабелі за конструкцією ізоляції?
48. Поясніть принципи маркування коаксіальних кабелів.

Розділ 7. Уніфікація, допуски і посадки

Електронні пристрої і *апаратура реєстрації інформації* зокрема крім суто електронних компонентів мають певну *кількість механічних деталей*. Такими деталями є корпусні деталі, деталі оптико-механічних систем, деталі електронно-механічних систем, систем просторової орієнтації тощо. У завершеному пристрої усі механічні деталі мають цілком певне *взаємне розташування* щоб забезпечити *нормальне функціонування*. Важливою характеристикою деталей є *розмірна точність* їх виготовлення. На *точність виготовлення деталей* впливає ціла низка різних чинників, до яких можна віднести *зношування інструменту*, який використовують для виготовлення відповідної деталі, *температурне розширення* заготовок, *обмежену точність* взаємного переміщення заготовок та поверхонь інструментів у процесі виготовлення деталей.

У процесі серійного виробництва електронних приладів та пристроїв під час складальних операцій, а також під час ремонту цього обладнання, використовують деталі, що були виготовлені у різний час, із застосуванням різного обладнання і, можливо, різними виробниками. Зрозуміло, що усі однакові за призначенням деталі незалежно від часу їх виготовлення та конкретного виробника мають забезпечувати *можливість їх використання без додаткового оброблення*, а у складі кінцевого виробу – надійне його функціонування.

Можливість виготовляти однакові деталі та вузли, які використовують під час складання і ремонту однотипних пристроїв визначає таку їх властивість, яку називають «*взаємозамінність*». Для забезпечення взаємозамінності деталі необхідно виготовляти з *певною точністю*, яку у сучасному виробництві характеризують параметром, що має назву «*допуск*», а можливі способи узгодження взаємного просторового розташування деталей характеризують параметром «*посадка*». Крім того важливим параметром, що характеризує *якість робочих поверхонь* механічних деталей, є «*шорсткість поверхні*». У цьому розділі з'ясуємо особливості визначення та застосування усіх зазначених вище понять.

7.1. Поняття про взаємозамінність

Поняття *взаємозамінності* є доволі широким, в ньому закладена можливість взаємної *заміни однакових* механічних деталей та вузлів, а також можливість взаємної заміни функціональних вузлів, що можуть відрізнитись конструктивно, але виконують однакові функції і мають однакову конструкцію зовнішніх з'єднувальних елементів.

У широкому розумінні згідно ДСТУ 2500-94 «Основні норми взаємозамінності. Єдина система допусків та посадок. Терміни та визначення. Позначення і загальні норми»: *взаємозамінність* – це придатність одного виробу, процесу, послуги для використання замість іншого виробу, процесу, послуги із забезпеченням виконання тих самих функцій та вимог.

Стосовно механічних деталей *взаємозамінність* – це властивість незалежно виготовлених із заданою точністю деталей забезпечувати можливість використувати їх для складання відповідних вузлів, а вузлів – у завершений пристрій, *без додаткового припасовування*, й у разі ремонту використовувати зазначені деталі безпосередньо для заміни тих, що вийшли з ладу, зі збереженням усіх експлуатаційних характеристик виробу.

Взаємозамінними можуть бути деталі, окремі вузли або вироби в цілому. Вимоги щодо взаємозамінності деталей, вузлів і виробів різні. Для окремих деталей взаємозамінність забезпечують *заданою точністю* геометричних, механічних, фізичних й інших параметрів. Для вузлів найбільш характерною є взаємозамінність із *забезпеченням ідентичності* приєднувальних поверхонь і функціональних параметрів, що впливають на експлуатаційні показники виробу. Для виробів взаємозамінність визначають експлуатаційними показниками і габаритними розмірами.

Розрізняють такі *форми взаємозамінності*; повну, неповну, зовнішню, внутрішню і функціональну.

Повна взаємозамінність – це взаємозамінність за механічними, геометричними, електричними та іншими параметрами, якими можна охарактеризувати деталь або виріб. У разі повної взаємозамінності у процесі складання не повинно бути ніяких припасовувальних або регулювальних операцій. Для забезпечення цієї умови необхідно застосовувати малі допуски на розміри деталей, що дещо збільшує вартість їх виготовлення.

Повна взаємозамінність має такі позитивні характеристики:

- процес *складання спрощений* і полягає у безпосередньому з'єднанні деталей, що не вимагає від робітників високої кваліфікації;

- складальний процес можна *точно нормувати*, може бути організований ритмічно і його *можна автоматизувати*;

- може бути впроваджено *вузьку спеціалізацію* виробництва; це надає заводу-постачальнику можливість виготовляти обмежену номенклатуру уніфікованих виробів із застосуванням широкої автоматизації виробництва і, відповідно, зменшенням собівартості продукції;

- *спрощений ремонт* виробів.

З метою забезпечити повну взаємозамінність високоточних з'єднань потрібно використовувати *високоточне технологічне* обладнання, *високу кваліфікацію* праці, тому повну взаємозамінність економічно доцільно застосовувати для деталей з допусками, *не меншими 6-го квалітету* для виробів, що складаються з невеликої кількості деталей, наприклад, з двох, які утворюють з'єднання (з'єднання отвору з валом).

Тому, часто відмовляються від повної взаємозамінності і переходять до неповної (обмеженої, часткової) взаємозамінності.

Неповна взаємозамінність – це взаємозамінність, за якої передбачено *груповий підбір* деталей, припасовування та *додаткове оброблення* деталей за деякими геометричними параметрами, застосування компенсаторів (регулювальні болти, шайби, прокладки), регулювання.

Прикладом неповної взаємозамінності може бути складання радіальних кулькових підшипників, в яких одним з основних монтажних елементів є радіальний зазор 0,001...0,005 мм. Щоб забезпечити необхідну точність для повної взаємозамінності кульки і кільця необхідно їх виготовляти з точністю, яку важко і економічно недоцільно забезпечити за умов масового виробництва.

Забезпечити необхідну точність кінцевого виробу можна шляхом застосування селективного складання, за якого виготовлені кульки і кільця попередньо сортують на групи, а потім здійснюють складання з деталей, розміри яких дуже мало відрізняються. За такого способу виготовлення взаємозамінними будуть лише деталі з однойменних груп.

Неповна взаємозамінність дає змогу значно розширити допуски на розміри деталей і тим самим знизити вартість їх виготовлення.

Розрізняють також взаємозамінність за геометричними параметрами деталей і функціональну.

Взаємозамінність за геометричними параметрами передбачає взаємозамінність за розмірами, формою, взаємним розташуванням поверхонь і осей деталей та шорсткістю їх поверхонь.

Зовнішня взаємозамінність – це взаємозамінність вузлів виробів за розмірами і формою приєднувальних поверхонь.

Внутрішня взаємозамінність – це взаємозамінність окремих деталей, що є складовими вузла, або вузлів і механізмів, що входять у виріб. Наприклад, взаємозамінність кульок, що є складовими деталями конкретного підшипника.

Функціональна взаємозамінність – такий різновид взаємозамінності, за якого деталь або вузол, крім того, що їх може бути встановлено на відповідне місце в пристрої *без додаткових операцій* оброблення, припасування, добирання чи регулювання, ще й виконують *функції передбачені технічними вимогами*.

Функціональна взаємозамінність поширюється на конструювання, виготовлення, контроль і експлуатацію деталей і виробів. Відхилення допустимих експлуатаційних показників визначають шляхом аналітичного або експериментального дослідження і додатково визначають й обумовлюють можливі зміни цих параметрів в процесі тривалої експлуатації. На підставі зазначених досліджень визначають *термін служби виробу*.

Взаємозамінність за геометричними параметрами забезпечує з'єднуваність деталей та вузлів, тоді як функціональна взаємозамінність забезпечує економічно обгрунтоване функціонування вузлів згідно заданих технічних вимог.

Перш ніж досягти функціональної взаємозамінності, необхідно забезпечити взаємозамінність за геометричними параметрами.

Взаємозамінність за геометричними параметрами і функціональна є основними різновидами взаємозамінності. У подальшому з'ясуємо питання взаємозамінності лише за геометричними параметрами.

Питання взаємозамінності в машинобудуванні і приладобудуванні регламентовано системою стандартів «Основні норми взаємозамінності» (ОНВ) та

«Єдина система допусків і посадок» (ЄСДП). У разі створення національних стандартів спираються на стандарти, що розроблено Міжнародною організацією зі стандартизації ISO (*International Standard Organization*).

7.2. Основні положення Єдиної системи допусків і посадок

ЄСДП розповсюджено на гладкі елементи деталей, які призначено для сполучення з іншими деталями або не призначено для такого сполучення, з номінальними розмірами до 10000 мм.

Основні терміни і визначення регламентовано ДСТУ ISO 286-1-2002 «Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилень та посадок».

Розмір – числове значення лінійної або кутової величини (діаметр, довжина тощо) в обраних одиницях вимірювання.

Розміри можуть бути:

- такі, що визначають величину і форму деталі;
- координатні (положення осей щодо бази);
- складальні;
- монтажні;
- габаритні.

Дійсний розмір – розмір, встановлений вимірюванням із припустимою похибкою.

Номінальний розмір – розмір, який є початком відліку відхилення і, відносно якого визначаються граничні розміри. Його визначають розрахунком за результатами аналізу функціонального призначення деталі або складальної одиниці. Спільний номінальний розмір для отвору і вала, складових з'єднання, називають номінальним розміром з'єднання. Номінальні розміри вказують на кресленнях деталей і складальних одиниць.

Номінальний розмір отвору позначають латинською прописною літерою *D*, вала – латинською рядковою літерою *d*.

Граничні розміри – два гранично припустимих розміри, між якими має знаходитись або яким може дорівнювати дійсний розмір.

Найбільший граничний розмір – більший з двох граничних розмірів.

Найменший граничний розмір – менший з двох граничних розмірів.

Термін *отвір* застосовують для позначення внутрішніх (що охоплюють) елементів деталей (рис. 7.1), а термін *вал* – для зовнішніх (охоплюваних) елементів деталей (рис. 7.2).

Номінальні розміри, отримані розрахунком, округлюють так, щоб вони відповідали значенням рядів нормальних лінійних розмірів, зазначеним у ГОСТ 6636-69.

Схематичне зображення зазначених вище розмірів для валів та отворів наведено на рис. 7.3.

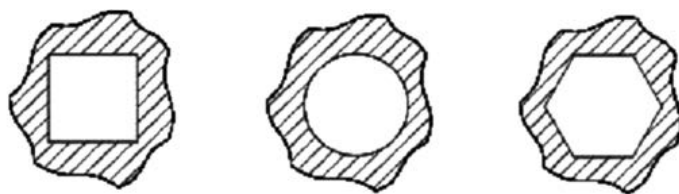


Рисунок 7.1. Приклади отворів різної форми

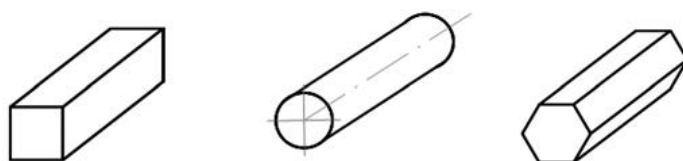


Рисунок 7.2. Приклади валів різної форми

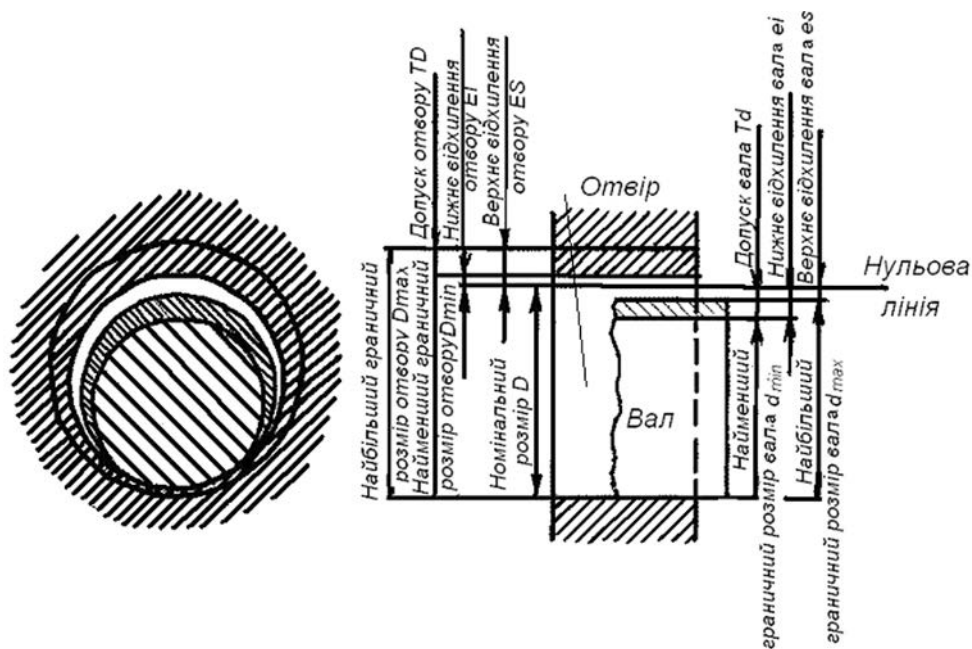


Рисунок 7.3. Схематичне зображення розмірів, що характеризують отвір та вал

Виготовлення деталей з абсолютно однаковими розмірами економічно не виправдане. У зв'язку з цим *передбачено гранично припустимі відхилення* дійсного розміру деталі від номінальної величини, за яких зберігаються експлуатаційні характеристики виробу.

Відхилення – числове значення розбіжності між певним розміром (дійсним, граничним і так далі) і відповідним номінальним розміром.

Усі можливі відхилення розміру від номінального значення утворюють поле допуску для даного розміру. Схематично поля допусків для валів та отворів наведено на рис. 7.4.

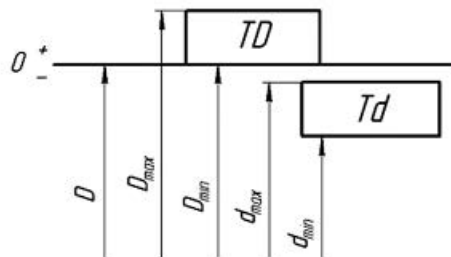


Рисунок 7.4. Поля допусків для валів (TD) та отворів (Td)

Поле допуску – поле, обмежене верхнім і нижнім відхиленнями.

Вважають, що деталь має *правильний розмір*, якщо її *дійсний розмір* більший від *найменшого граничного розміру* або дорівнює йому, але менший від *найбільшого граничного розміру* або дорівнює йому. Тобто, дійсний розмір розташований між двома припустимими граничними розмірами, *різниця* між якими визначає *поле допуску*. У міжнародній системі допусків, запропонованій міжнародною організацією зі стандартизації допуск позначають літерами *IT* (*International Tolerance*).

Вказувати на кресленнях граничні розміри безпосередньо не зручно оскільки це потребує додаткового місця і призводить до надмірного заповнення поля креслення символічною інформацією. Тому, для спрощення форми запису розмірів на кресленнях записують не граничні розміри деталей, а їх номінальні розміри з припустимими відхиленнями. На практиці застосовують кілька різновидів відхилень. Для визначення відхилення користуються поняттям «нульової лінії» (рис. 7.3).

Нульова лінія – лінія, що відповідає номінальному розміру, від якої відкладаються відхилення розмірів у разі графічного зображення полів допусків і посадок.

Граничні відхилення отвору або вала вказують зі знаком «+» («плюс»), якщо граничний розмір більший від номінального і «-» («мінус»), якщо граничний розмір менший від номінального.

Якщо нульову лінію на кресленні розташовано горизонтально, тоді позитивні відхилення відкладають вгору від неї, а негативні – вниз, рис. 7.4.

Граничне відхилення – алгебраїчна різниця між граничними і номінальним розмірами.

Верхнє відхилення – це алгебраїчна різниця між найбільшим граничним і номінальним розмірами.

Верхнє відхилення отвору, ES (*ecart superieur*):

$$ES = D_{\max} - D . \quad (7.1)$$

Верхнє відхилення вала, es :

$$es = d_{\max} - D . \quad (7.2)$$

Дійсне відхилення – алгебраїчна різниця між дійсним і номінальним розмірами.

Нижнє відхилення – алгебраїчна різниця між найменшим граничним і номінальним розмірами.

Нижнє відхилення отвору, EI (ecart interieur):

$$EI = D_{\min} - D . \quad (7.3)$$

Нижнє відхилення вала, ei :

$$ei = d_{\min} - D . \quad (7.4)$$

Допуск розміру (Tolerans) – різниця між найбільшим і найменшим граничними розмірами або абсолютна величина алгебраїчної різниці між верхнім і нижнім відхиленнями:

$$\text{– допуск отвору } IT = D_{\max} - D_{\min} , IT = ES - EI; \quad (7.5)$$

$$\text{– допуск вала } IT = d_{\max} - d_{\min} , IT = es - ei. \quad (7.6)$$

З урахуванням розглянутих вище понять можна визначити *найбільший* і *найменший* припустимий розмір деталі. Такі розміри називають *граничними*. Граничний розмір деталі дорівнює сумі номінального розміру і відповідного граничного відхилення взятого зі своїм знаком.

Найбільший граничний розмір отвору становить $D_{\max} = D + ES$,

а для вала – $d_{\max} = D + es$.

Найменший граничний розмір отвору становить $D_{\min} = D + EI$,

а для вала – $d_{\min} = D + ei$.

Лінійні розміри і граничні відхилення на кресленнях в приладобудуванні позначають в міліметрах без їх скороченого позначення, тобто одиниці вимірювання «мм» *не пишуть*.

Граничні відхилення записують безпосередньо після номінального розміру зі своїм знаком й верхнє відхилення розташовують над нижнім (рис. 7.5а), знак плюс біля відхилень записують. Граничні відхилення, які дорівнюють нулю, не записують, їх місце залишається вільним (рис. 7.5б). Розмір шрифту відхилень повинен бути меншим за розмір шрифту розмірного числа.

У разі симетричного розташування поля допуску відносно нульової лінії (номінального розміру) абсолютне значення відхилень зазначають один раз із знаками «±», висота цифр у відхиленнях має дорівнювати висоті цифр номінального розміру (рис. 7.5в).

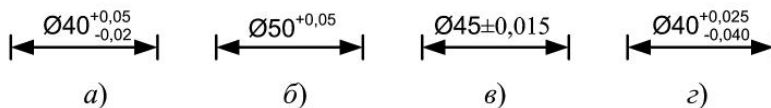


Рисунок 7.5. Позначення розмірів і граничних відхилень па кресленнях деталей

Якщо число значущих цифр у верхнього і нижнього відхилення різне, тоді дописують нуль з правого боку, тобто кількість цифр у верхньому і нижньому відхиленнях повинна бути однаковою (рис. 7.5г).

Граничні відхилення розмірів деталей на складальних кресленнях записують у вигляді дроби, в чисельнику якого слід записувати числові значення граничних відхилень отвору, а у знаменнику – числові значення граничних відхилень вала (рис. 7.6а).

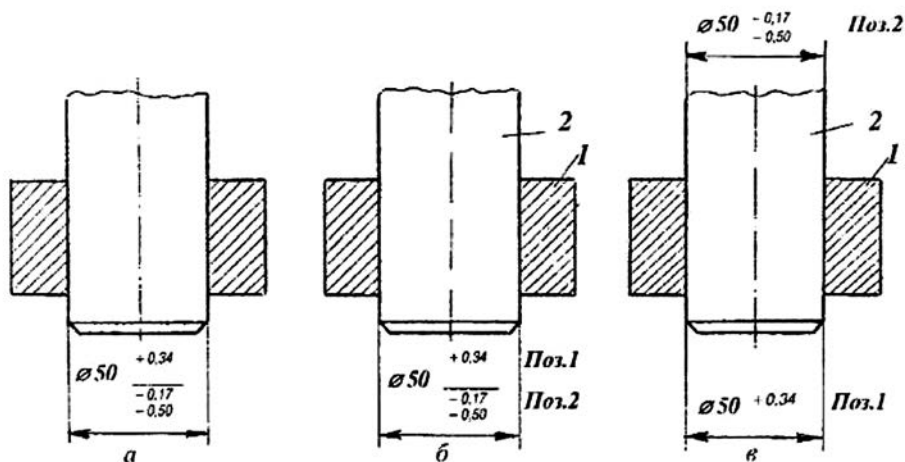


Рисунок 7.6. Приклади позначення граничних відхилень на складальних кресленнях

Для позначення числових значень розмірів і відхилень на складальних кресленнях можна використовувати написи, що пояснюють, якої з деталей стосується наведене відхилення (рис. 7.6б і рис. 7.6в) (скорочене позначення «поз.» означає позиція, деталь).

У процесі складання певного функціонального вузла або виробу в цілому, виготовлені з *наперед заданою точністю* деталі з'єднують між собою. З'єднання утворюють деталі, які частково або повністю входять одна в одну. У з'єднаному стані деталі характеризуються різною можливістю відносного переміщення у з'єднанні або різним ступенем опору їх взаємного зміщення, тобто, різним характером з'єднання.

Характер з'єднання двох деталей, який визначається значеннями зазорів і *натягів* у ньому називають *посадкою*.

Залежно від форми з'єднаних поверхонь розрізняють:

– *гладкі циліндричні та конічні з'єднання*, які складаються з охоплювальної і охоплюваної циліндричних або конічних поверхонь;

– *плоскі з'єднання*, які складаються з охоплювальної і охоплюваної плоских поверхонь;

– *різьбові та гвинтові з'єднання*, які складаються з охоплювальної і охоплюваної гвинтових поверхонь, що мають в нормальному перерізі трикутний, трапецієподібний або інший профіль;

– *зубчасті та черв'ячні з'єднання*, які складаються із зубців коліс або зубців черв'ячного колеса і гвинтових поверхонь черв'яка, які періодично дотикаються один до одного;

– *шліцьові з'єднання*, які складаються з охоплювальної (повздовжні пази) і охоплюваної поверхні, та інші з'єднання.

За характером контакту двох або декількох деталей з'єднання поділяються на:

– з'єднання з *поверхневим* контактом (гладкі циліндричні, конічні, різьбові, шліцьові);

– з'єднання з *лінійчатим* контактом (роликові підшипники, зубчасті з'єднання);

– з'єднання з *точковим* контактом (кулькові підшипники й інші сферичні з'єднання).

З'єднані поверхні деталей у свою чергу поділяються на охоплювальні і охоплювані.

Охоплювальна поверхня – поверхня деталі, яка охоплює поверхню іншої деталі.

Охоплювана поверхня – поверхня деталі, яку охоплює поверхня іншої деталі.

Згадаємо, що охоплювальну поверхню, незалежно від її форми, називають *отвором*, а охоплювану – *валом*.

З'єднання деталей, в якому одну деталь встановлено в іншу має спеціальну назву – *посадка*.

Посадка – це з'єднання деталей, установлених одна в одну.

Поверхні деталей, якими відбувається безпосереднє з'єднання називають сполученими. Решту поверхонь називають вільними. Допуск встановлюють на виготовлення як сполучених поверхонь, так і вільних, а посадку може бути передбачено лише для сполучених поверхонь. Розрізняють посадки із зазором, з натягом або перехідні.

Зазор (проміжок, шпарина) – різниця розмірів отвору і вала, якщо розмір отвору більше розміру вала (рис. 7.7а). Зазор позначають літерою *S*.

Натяг – різниця розмірів вала і отвору до складання, якщо розмір вала більше розміру отвору (рис. 7.7б). Натяг позначають літерою *N*. Натяг також можна визначити як різницю між розмірами отвору і вала, що має від'ємний знак.

Натяг у посадках з натягом, як і зазор у посадках з зазором може набувати різних значень, однак його обмежують двома крайніми граничними значеннями: найбільшим (N_{\max}) і найменшим (N_{\min}) значеннями.

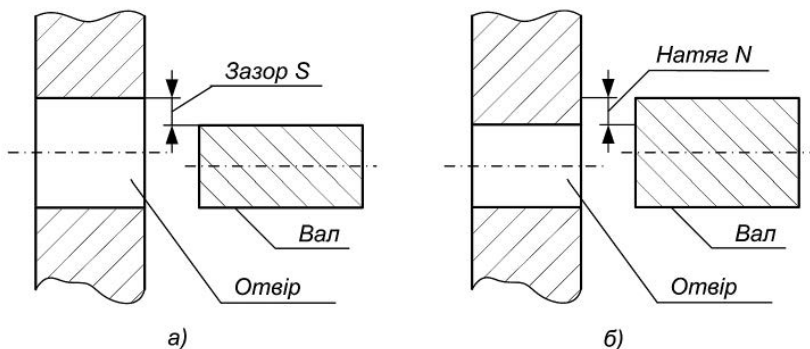


Рисунок 7.7. Схематичне зображення зазору та натягу

Посадка із зазором – посадка, за якої забезпечено зазор у з'єднанні, тобто, найменший граничний розмір отвору більший за найбільший граничний розмір вала або дорівнює йому. У разі графічного зображення поле допуску отвору розташовано над полем допуску вала. До цієї групи відносять також посадки, в яких нижня межа поля допуску отвору збігається з верхньою межею поля допуску вала. Для утворення посадок із зазорами використовують поля допусків $a...h$ ($A...H$) (рис. 7.10).

Найбільший зазор – різниця між найбільшим граничним розміром отвору і найменшим граничним розміром вала ($S_{\max} = D_{\max} - d_{\min}$) або алгебраїчна різниця між верхнім відхиленням отвору і нижнім відхиленням вала ($S_{\max} = ES - ei$).

Найменший зазор (S_{\min}) – різниця між найменшим граничним розміром отвору і найбільшим граничним розміром вала ($S_{\min} = D_{\min} - d_{\max}$) або алгебраїчна різниця між нижнім відхиленням отвору і верхнім відхиленням вала ($S_{\min} = EI - es$).

Посадка із зазором забезпечує деталям рухоме з'єднання і можливість взаємного переміщення. Її іще називають посадкою руху.

Допуск посадки – сума допусків отвору і вала, що складають з'єднання, тобто:

$$T = T_D + T_d. \quad (7.7)$$

Ця формула є справедливою для посадок із зазором та натягом, а також для перехідних посадок.

Крім того, допуск посадки із зазором можна визначити як різницю між найбільшим (S_{\max}) і найменшим (S_{\min}) граничними значеннями зазору, тобто:

$$T_s = S_{\max} - S_{\min} . \quad (7.8)$$

Найменший і найбільший зазори є величинами додатними. Якщо в результаті їх визначення одержано від'ємне число, тоді це означає, що у з'єднанні можливий не зазор, а натяг.

Посадка з натягом – посадка, за якої забезпечено натяг в з'єднанні, тобто, найбільший граничний розмір отвору менший за найменший граничний розмір вала або дорівнює йому. Для утворення таких посадок використовують поля допусків $p...zc$ ($P...ZC$).

Найбільший натяг – різниця між найбільшим граничним розміром вала і найменшим граничним розміром отвору ($N_{\max} = d_{\max} - D_{\min}$) або алгебраїчна різниця між верхнім відхиленням вала і нижнім відхиленням отвору ($N_{\max} = es - EI$).

Найменший натяг – різниця між найменшим граничним розміром вала і найбільшим граничним розміром отвору ($N_{\min} = d_{\min} - D_{\max}$) або алгебраїчна різниця між нижнім відхиленням вала і верхнім відхиленням отвору ($N_{\min} = ei - ES$).

Посадки з натягом забезпечують нерухоме з'єднання деталей, їх також називають пресовими.

Допуск натягу (посадки) – різниця між найбільшим і найменшим натягами ($T_N = N_{\max} - N_{\min}$) або сума допусків вала і отвору ($T_N = T_d + T_D$).

Перехідна посадка – посадка, за якої можливо отримати як зазор, так і натяг. Для таких посадок поля допусків отвору і вала перекриваються частково або повністю. Для утворення перехідних посадок зазвичай застосовують поля допусків $j...n$ ($J...N$).

Експлуатаційними показниками перехідної посадки є значення зазору і натягу.

Допуск перехідної посадки визначають співвідношенням

$$T_{\text{пер}} (TS, TN) = S_{\max} + N_{\max} .$$

7.3. Допуски і відхилення розмірів гладких елементів деталей

В Україні діє Єдина система допусків і посадок (ЄСДП). Систему побудовано з урахуванням основних принципів побудови системи допусків і посадок ISO, яку використовують в усіх промислово розвинутих країнах.

Стандарт призначено для гладких елементів деталей, циліндричних і обмежених паралельними площинами, а також для утворених ними з'єднань.

ДСТУ 2500 – 94 ЄСДП призначено для розмірів від 0 мм до 3150 мм, однак абсолютна більшість з'єднань у приладобудуванні й загальному машинобудуванні має розміри до 500 мм.

Розміри, на які поширюється ЄСДП, розподілено на *інтервали*. Для розмірів від 0 мм до 500 мм передбачено 13 основних і 22 проміжних інтервали розмірів

(діаметрів). Основні інтервали розподілено на два або три проміжні інтервали. Проміжні інтервали передбачено для розмірів понад 10 мм, табл. 7.1.

Системою допусків і посадок називають сукупність рядів допусків і посадок, закономірно побудованих на підґрунті досвіду, теоретичних і експериментальних досліджень оформлених у вигляді стандартів. Розрізняють *дві системи* утворення посадок: *систему отвору* і *систему вала*.

Системою отвору (СА) називають сукупність посадок, за яких для заданого номінального розміру розташування поля допуску отвору залишається незмінним, а характер з'єднання деталей змінюють за рахунок зміни розташування поля допуску вала, рис. 7.8.

Таблиця 7.1. Інтервали номінальних розмірів до 500 мм

Основні інтервали	Проміжні інтервали
Понад 0 до 3 *	
Понад 3 до 6 *	
Понад 6 до 10 *	
Понад 10 до 18 *	Понад 10 до 14 * Понад 14 до 18 *
Понад 18 до 30 *	Понад 18 до 24 * Понад 24 до 30 *
Понад 30 до 50 *	Понад 30 до 40 * Понад 40 до 50 *
Понад 50 до 80 *	Понад 50 до 65 * Понад 65 до 80 *
Понад 80 до 120 *	Понад 80 до 100 * Понад 100 до 120 *
Понад 120 до 180 *	Понад 120 до 140 * Понад 140 до 160 * Понад 160 до 180 *
Понад 180 до 250 *	Понад 180 до 200 * Понад 200 до 225 * Понад 225 до 250 *
Понад 250 до 315 *	Понад 250 до 280 * Понад 280 до 315 *
Понад 315 до 400 *	Понад 315 до 355 * Понад 355 до 400 *
Понад 400 до 500 *	Понад 400 до 450 * Понад 450 до 500 *

Примітка. * – разом з найбільшим значенням інтервалу

Посадки в системі отвору (CB) – посадки, в яких різні зазори і натяги отримують з'єднанням різних валів з основним отвором (рис. 7.9).

Вибір системи отвору або системи вала для заданого характеру з'єднання визначають на підставі конструктивної, технологічної та економічної доцільності.

Система отвору є переважною, оскільки номенклатура різальних та вимірювальних інструментів буде *меншою*, ніж у разі застосування *системи вала*.

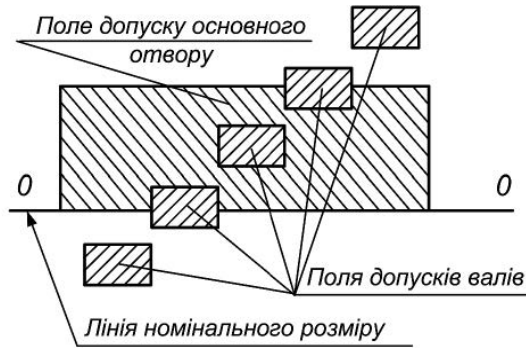


Рисунок 7.8. Схема розташування полів допусків за системою отвору

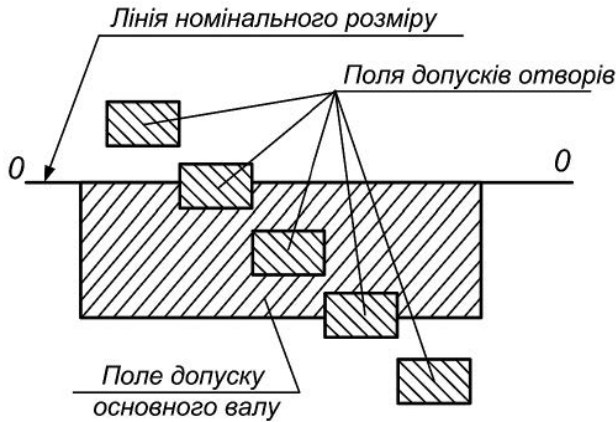


Рисунок 7.9. Схема розташування полів допусків за системою вала

Так, у серійному і масовому виробництвах для оброблення отворів використовують *свердла, зенкери, розгортки, протяжки* тощо. Кожен з названих інструментів може бути призначений для оброблення отворів лише *одного розміру*, тоді, як *різні за діаметром вали* можна обробляти *одним і тим же різцем* або *шліфувальним кругом*.

У разі вибору системи отвору можна зменшити номенклатуру інструменту. У зв'язку з цим використання *системи отвору* економічно *доцільніше* і їй слід надавати перевагу. Проте в деяких випадках на підставі конструктивних міркувань, використовують систему вала. Наприклад, у разі, коли деталі типу осей або валів виготовляють з *каліброваного круглого прокату* і не обробляють по зовнішньому діаметру. У з'єднанні з такими деталями доцільно використовувати *систему вала*.

Приєднувальні розміри деяких стандартних виробів, зокрема, зовнішній діаметр підшипника, зів гайкового ключа, вихідний вал електродвигуна і інше – роблять у системі вала.

7.3.1. Ряди основних відхилень і квалітет

Міжнародною системою допусків і посадок для кожного номінального розміру деталі передбачено *два граничні відхилення – верхнє і нижнє*. Розташування поля допуску щодо номінального розміру визначають за основним відхиленням, за яке беруть одне з двох граничних відхилень деталі, розташоване ближче до нульової лінії. Для умовного позначення основних відхилень отворів і валів використовують літери латинської абетки, прописні для отворів і рядкові для валів (рис. 7.10).

Для кожного інтервалу з окремим літерним позначенням абсолютну величину і знак основного відхилення визначають за спеціальними формулами.

Відхилення $A...H$ ($a...h$) призначені для утворення полів допусків у посадках із зазором, відхилення $JS...N$ ($js...n$) – у перехідних посадках, відхилення $P...ZC$ ($p...zc$) – у посадках з натягом.

Основні відхилення отворів побудовано так, щоб забезпечити посадки в системі вала аналогічно посадкам в системі отвору. Відповідні відхилення однакові за абсолютною величиною, протилежні за знаком і їх позначено відповідними літерами:

$EI = -es...$ для отворів від A до H

$ES = -ei...$ для отворів від J до ZC

Винятки для деяких основних відхилень отворів обумовлено стандартом ДСТУ ISO 286-1-2002.

Квалітет (ступінь точності) – це *сукупність допусків*, що відповідають однаковому рівню точності для різних номінальних розмірів. Квалітет позначають порядковим номером, що зростає зі збільшенням допуску (зменшенням вимог щодо точності реалізації розміру). Передбачено 20 квалітетів: 01; 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 17.

Для зручності оцінювання точності виготовлення деталі запропоновано використовувати спеціальну величину, яку назвали «*одиниця допуску*». Для визначення одиниці допуску запропоновано використовувати співвідношення, сформоване з урахуванням складності оброблення деталей із зростанням їх розмірів.

Значення одиниці допуску, залежить від інтервалів номінальних розмірів. Одиницю допуску для номінального розміру від 1 мм до 500 мм позначають літерою « i » та визначають за формулою:

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D_{cp}} + 0,001D_{cp}, \text{ мкм}, \quad (7.9)$$

де $D_{cp} = \sqrt{D_{\min} \cdot D_{\max}}$ – усереднене геометричне з крайніх значень кожного

інтервалу номінальних розмірів в мм.

Для діаметрів менше 1 мм $i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D_{cp}} + \frac{0,02}{D_{cp} + 0,1}$, мкм.

Для діаметрів більше 500 мм $i = 0,004 \cdot D_{cp} + 2,1$, мкм.

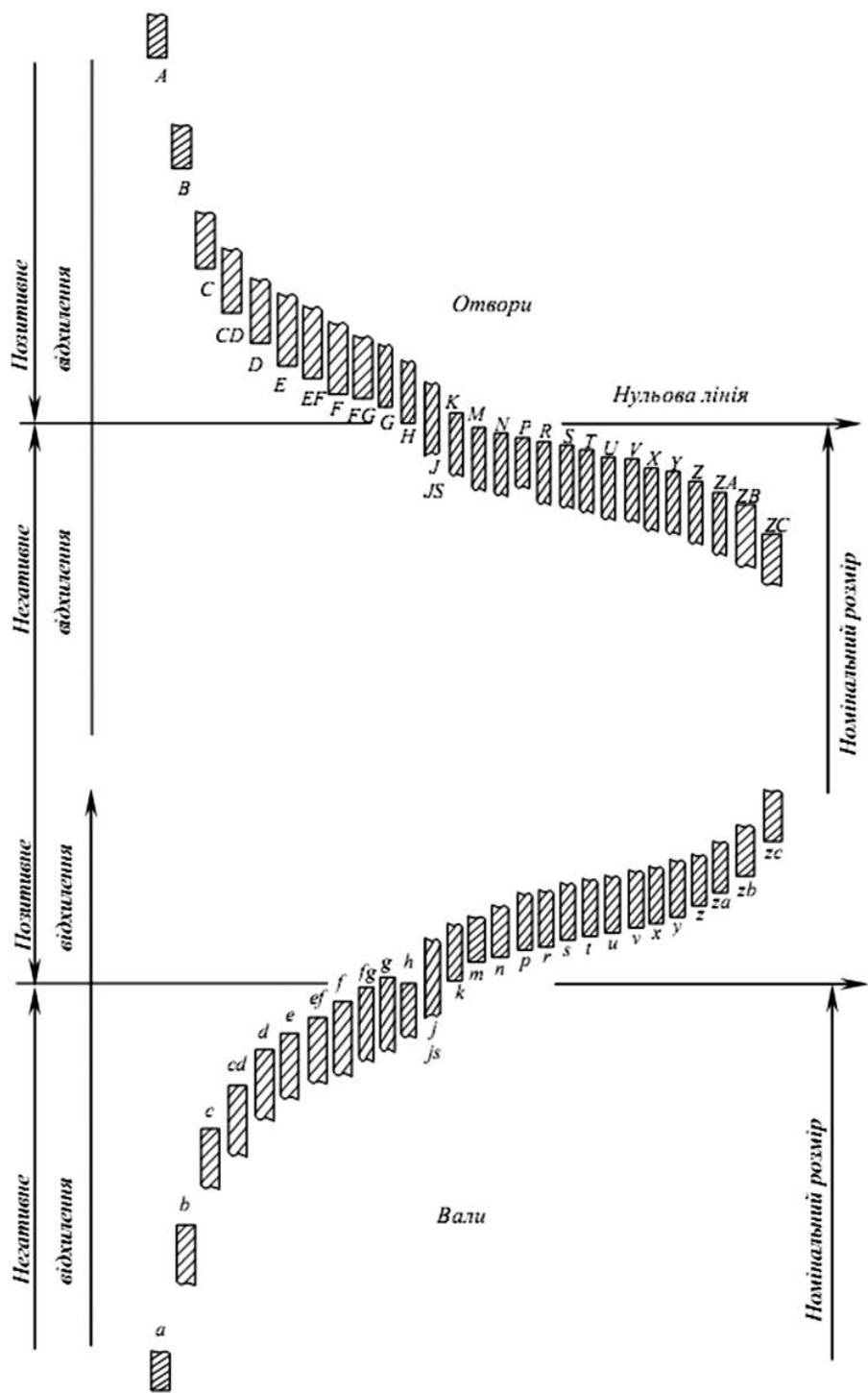


Рисунок 7.10. Схема розташування основних відхилень

Кожному квалітету відповідає певна кількість одиниць допуску (коефіцієнт точності), яку у формулах позначають літерою «а».

Отже, чисельне значення допуску на розмір деталі у міжнародному стандарті запропоновано визначати за формулою

$$IT = i \cdot a . \quad (7.10)$$

Допуски з урахуванням квалітетів позначають сполученням великих літер *IT* з порядковим номером квалітету, наприклад, *IT01*, *IT5*, *IT14* тощо.

Сполученням літер основного відхилення і порядкового номера квалітету позначається поле допуску, наприклад: *q6*, *d7*, *H8*, *H14*,... .

Позначення поля допуску вказують після номінального розміру елемента, наприклад: *40q6*, *50d7*, *35H7* (перше число в позначенні – розмір в міліметрах).

В обґрунтованих випадках можна позначати поле допуску з основним відхиленням «*H*» символом «*+IT*», з основним відхиленням «*h*» – символом «*-IT*», з відхиленням «*js*» або «*JS*» – символом «*+IT/2*», наприклад, *+IT14*, *-IT14*, *±IT14/2*.

Основним відхиленням для валів від «*a*» до «*h*» є верхнє відхилення, для валів від «*j*» до «*zc*» – нижнє відхилення.

Основним відхиленням для отворів від «*F*» до «*H*» є нижнє відхилення, для отворів від «*J*» до «*ZC*» – верхнє відхилення.

Для вала «*js*» (отвору «*JS*») основне відхилення не передбачено, а граничні відхилення – верхнє і нижнє є однаковими за значенням, протилежні за знаком і розташовуються симетрично відносно номінального розміру, тобто:

$es (ES) = +IT/2$; $ei (EI) = -IT/2$, де *IT* – допуск розміру відповідного квалітету.

За квалітетами *IT0*; *IT0*; *IT1* виготовляють кінцеві міри довжини. Допуски для цих квалітетів визначають за формулами, наведеними в табл. 7.2.

Таблиця 7.2. Формули для обчислення допусків квалітетів 01, 0 і 1.

Позначення допуску	<i>IT01</i>	<i>IT0</i>	<i>IT1</i>
Значення допуску	$0,3 + 0,008 \cdot D_{cp}$	$0,5 + 0,012 \cdot D_{cp}$	$0,8 + 0,020 \cdot D_{cp}$

За квалітетами *IT2*, *IT3* і *IT4* виготовляють калібри і вироби особливої точності, вимірювальний інструмент. Значення допусків для квалітетів 2, 3, 4 є приблизно членами геометричної прогресії, першим і останнім членами якої є значення допусків 1 і 5 квалітетів.

$$IT2 = \sqrt{IT1 \cdot IT3}; \quad IT3 = \sqrt{IT2 \cdot IT4}; \quad IT4 = \sqrt{IT3 \cdot IT5} . \quad (7.10a)$$

Квалітети 5...18 рекомендовано застосовувати у таких випадках:

5...13 – розміри сполучених деталей у машинобудуванні;

5 і 6 – посадки підшипників прецизійних верстатів, з'єднання контрольних і робочих засобів;

7 і 8 – відповідальні з’єднання в автомобілебудуванні, верстатобудуванні, у високоточних з’єднаннях у разі високих вимог до обмеження відмінностей розмірів зазорів або натягів, наприклад, у посадках кілець підшипників нормальної точності на валах і в корпусах, в підшипниках ковзання шатунно-кривошипного механізму двигунів внутрішнього згорання;

8 і 9 квалітети застосовують для посадок, що допускають великі зазори і великі межі їх відмінностей, а також для полегшення складання вузлів. Ці квалітети переважно використовують для порівняно точних з’єднань у механізмах тракторів і особливо відповідальних вузлів сільськогосподарських машин;

10-й квалітет застосовують для посадок з зазором у тих випадках, коли з метою здешевити оброблення деталей необхідно призначити більші допуски, а за умовами складання можливо застосувати дещо збільшені відмінності зазорів у з’єднанні;

11 і 12 квалітети застосовують в посадках, у яких необхідні великі зазори і можливі їхні значні відмінності (грубе складання), наприклад, у з’єднаннях сільськогосподарських машин, в штампованих деталях, деталях з пластмас, з’єднаннях, що не вимагають центрування;

13...18-й квалітети застосовують для обмеження допусків не з’єднаних (вільних) розмірів.

Співвідношення, за якими визначають значення допусків для квалітетів від 5 до 18, наведено в табл.7.3.

Таблиця 7.3. Формули для обчислення допусків квалітетів від 5 до 18

Позначення допуску IT5	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Формули допуску	$7\cdot i$	$10\cdot i$	$16\cdot i$	$25\cdot i$	$40\cdot i$	$64\cdot i$	$100\cdot i$	$160\cdot i$	$250\cdot i$	$400\cdot i$	$640\cdot i$	$1000\cdot i$	$1600\cdot i$	$2500\cdot i$

7.3.2. Вибір посадок і допусків

Посадку рекомендовано позначати дробом, у чисельнику якого вказують позначення поля допуску отвору, а в знаменнику – позначення поля допуску вала, наприклад: $\frac{H7}{g6}$ або $H7/g6$.

Позначення посадки вказують після номінального розміру з’єднання, наприклад: $40\frac{H7}{g6}$ або $40 H7/g6$.

В обґрунтованих випадках можна використовувати «позасистемні» (комбіновані) посадки – посадки, утворені сполученням полів допусків вала і отвору,

взятих з різних систем утворення посадок (системи отвору і системи вала), наприклад: $\emptyset 40 F7 / g6$.

Використовують також посадки, утворені сполученням полів допусків основного отвору і основного вала, наприклад, $\emptyset 20 H7 / h6$.

Ці посадки належать до групи посадок із зазором і їх може бути однаково віднесено як до системи отвору, так і до системи вала.

Найменший зазор у цих посадках $S_{\min} = 0$.

Посадки, утворені з переважних полів допусків, також є переважними і їх потрібно застосовувати в першу чергу.

На кресленнях деталей поля допусків можна позначати у різний спосіб:

– літерними позначеннями після номінального розміру елемента, наприклад:

$40g6$; $\emptyset 35r6$; $\emptyset 40H7$; $50JS6$;

– з безпосереднім наведенням числових значень відхилень, наприклад:

$40_{-0,025}^{-0,009}$; $\emptyset 35_{+0,034}^{+0,050}$; $\emptyset 40_{+0,025}^{+0,025}$; $50 \pm 0,008$;

– літерними і числовими позначеннями, наприклад:

$40g6_{(-0,025)}^{(-0,009)}$; $\emptyset 35r6_{(+0,034)}^{(+0,050)}$; $\emptyset 40H7_{(+0,025)}^{(+0,025)}$.

На робочих кресленнях рекомендовано застосовувати другий і третій способи позначення граничних відхилень.

Граничні відхилення можуть бути додатними, від'ємними і дорівнювати нулю, тому відхилення потрібно записувати з їх знаком. Відхилення, що дорівнює нулю, окремим числом (нулем) не вказують.

У довідниках, як правило, відхилення наводять у мікрометрах, а на кресленнях їх потрібно проставляти в міліметрах без позначення одиниць вимірювання.

Посадки для з'єднань призначають не довільно. Їх визначають з урахуванням попереднього досвіду, з використанням таблиць допусків і посадок, а також може бути застосовано метод аналогії (подібності) і розрахунковий метод.

У разі вибору посадок із застосуванням таблиць допусків і посадок достатньо знати номінальний діаметр з'єднання та граничні значення розрахункових зазорів або натягів і за їх значеннями визначити необхідну посадку. У процесі вибору посадок перевагу слід надавати посадкам у системі отвору.

У разі застосування методу аналогії (подібності) використовують рекомендації щодо застосування різних посадок, сформовані внаслідок узагальнення досвіду проектування та експлуатації механічних вузлів з такими посадками за подібних умов. У разі застосування цього методу не може бути гарантовано правильність вибору посадок, оскільки може бути не враховано усі фактори, що впливають на їх вибір, тому для посадок, вибраних методом аналогії, необхідно робити експериментальні перевірки.

Із застосуванням розрахункового методу можна отримати більш обґрунтовані результати параметрів посадок. Для визначення параметрів посадок розрахунковим методом необхідно знати низку початкових даних, які можна отримати за результатами попередніх розрахунків або узагальнення відомого

досвіду. Для розрахунку необхідно знати: номінальний діаметр з'єднання d , мм; систему посадки; граничні значення розрахункових зазорів S_{\max}^P і S_{\min}^P (верхній індекс у позначенні означає що величина розрахункова) – для посадок з зазором; граничні значення розрахункових натягів N_{\max}^P і N_{\min}^P – для посадок з натягом; розрахункові значення максимального зазору S_{\max}^P і максимального натягу N_{\max}^P – для перехідних посадок.

У стандартах ЄСДП в інтервалі розмірів від 1 мм до 500 мм передбачено 69 посадок загального призначення в системі отвору і 61 посадка в системі вала. Серед посадок загального призначення виділено переважні (17 посадок в системі отвору і 10 – у системі вала). Переважні посадки, утворені із переважних полів допусків, тобто таких, яким слід надавати перевагу під час проектування конструктивних елементів приладів і пристроїв.

Основною характеристикою посадок із зазором є мінімальний (гарантований) зазор S_{\min} і його допуск T_S який визначає максимальне значення зазору $S_{\max} = S_{\min} + T_S$.

Посадки із зазором утворюються внаслідок з'єднання отворів з основними відхиленнями A, \dots, H і валів з основними відхиленнями a, \dots, h обумовлені квалітетами 4, ..., 12.

Посадки H/h реалізують з квалітетами 4, ..., 12. Ці посадки утворюють ковзне з'єднання і їх називають «ковзні посадки». Найменший зазор у цих посадках дорівнює нулю ($S_{\min} = 0$). Їх використовують для забезпечення високої точності центрування і в системах з поступальним переміщенням деталей. Наприклад, для з'єднання циліндричних поверхонь варіооб'єктива телевізійної камери.

Посадки H/g реалізують з квалітетами 4, ..., 6 – для валів, і 5, ..., 7 – для отворів. Ці посадки характеризуються мінімальними гарантованими зазорами і їх використовують для забезпечення точного і повільного поступального руху.

Посадки H/f реалізують з квалітетами 6, ..., 9, що застосовують найчастіше. Мінімальні зазори цих посадок достатні для вільного обертання в підшипниках ковзання за умови легкого і середньо навантаженого режиму роботи.

Посадки H/e, H/d реалізують з квалітетами 7, ..., 11. Для цих посадок характерним є збільшене значення гарантованого зазору, що забезпечує вільний обертотвий рух у режимах роботи з підвищеним навантаженням, і, який здатний компенсувати значні відхилення форми і взаємного розташування з'єднуваних поверхонь і їх температурні деформації.

Посадки H/a, H/b і H/c реалізують з квалітетами 11, ..., 12. Для цих посадок характерними є великі гарантовані зазори. Такі посадки використовують у конструкціях малої точності, де великі зазори необхідні для компенсації відхилень форми і розташування поверхонь з'єднуваних деталей. Їх також застосовують для з'єднань необроблених каліброваних матеріалів, а також у з'єднаннях, робоча температура яких значно відрізняється від температури навколишнього середовища.

Перехідні посадки утворюються у результаті з'єднання отворів з основними відхиленнями JS, \dots, N і валів js, \dots, n , згідно квалітетів 4, ..., 7 для валів

і квалітетів 5, ..., 8 для отворів. Для отворів у перехідних посадках квалітет вибирають на одиницю більшим, ніж для валів. Основний ряд перехідних посадок утворюється валами 6-го і отворами 7-го квалітетів.

Перехідні посадки характеризуються невеликими зазорами і невеликими натягами. Їх застосовують у тих випадках, коли потрібно забезпечити точне центрування деталей у з'єднанні та часте розбирання у процесі експлуатації. Для передавання обертових моментів деталі цих з'єднань необхідно фіксувати додатковим кріпленням (шпонками, штифтами, гвинтами тощо).

Посадки H/js. Для таких посадок більш ймовірним є виникнення зазору у з'єднанні, але можливі і невеликі натяги. Такі посадки застосовують у разі невеликих статичних навантажень на з'єднання, а також у разі необхідності частих розбирань та ускладненого складання.

Посадки H/k – це посадки з однаково ймовірним виникненням зазорів і натягів.

Посадки з натягом утворюються у результаті з'єднання отворів з основними відхиленнями P , ..., ZC з валами, що характеризуються основними відхиленнями p , ..., zc валів. Їх призначено для нерухомих нерозбірних з'єднань деталей або таких, які розбирають лише в окремих випадках під час ремонту. У більшості випадків деталі з'єднують такою посадкою без додаткового кріплення гвинтами, штифтами, шпонками.

За значенням гарантованого мінімального натягу ці посадки поділяють на три групи:

- а) посадки з мінімальним гарантованим натягом;
- б) посадки з середнім гарантованим натягом ($H7/r6$, $H7/s6$) є переважними в цьому ряді посадок;
- в) посадки з великим гарантованим натягом ($H7/u7$, $H8/u8$, $H8/x8$, $H8/z8$).

7.4. Допуски форми і розташування поверхонь

7.4.1. Класифікація відхилень і допусків форми та розташування поверхонь

Точність геометричних параметрів деталей визначає не тільки точність найбільших, найменших та критичних розмірів їх елементів, але й точність форми і взаємного розташування поверхонь. Відхилення форми і розташування поверхонь виникають у процесі оброблення деталей через неточність розміщення деталі в робочій зоні верстата, деформацію оброблюваного виробу, нерівномірності припуску на обробку, неоднорідності матеріалу тощо.

Відхилення форми і розташування поверхонь погіршують технологічні й експлуатаційні показники виробу. Для забезпечення необхідної точності параметрів, його працездатності і довговічності в робочих кресленнях деталей необхідно вказувати не тільки граничні відхилення розмірів, але у певних випадках – допуски форми і розташування поверхонь.

Призначення допусків форми і розташування поверхонь слід здійснювати за правилами рекомендованими державними стандартами.

Відхилення форми і розміщення поділяють на три групи:

- відхилення та допуски *форми*;
- відхилення та допуски *розташування*;
- *сумарні* відхилення форми та розташування.

Для кожного виду допуску форми або розташування встановлено 16 ступенів точності (з 1-го до 16-го). *Найбільш точним є 1-й ступінь*, а найбільш грубим – 16-й ступінь. У межах одного ступеня точності у стандарті передбачено *три рівні* відносної точності: А, В і С, що визначають співвідношення допусків форми і розміру, за яких допуски форми складають відповідно 60, 40 і 25% допуску розміру.

Для нормування і кількісного оцінювання відхилень форми та розташування поверхонь уведено кілька основних понять, що характеризують форму деталі. Ці поняття наведено нижче.

Номінальна форма – ідеальна форма, характеристики якої визначено кресленнями або іншими конструкторськими документами.

Номінальна поверхня – ідеальна поверхня, розміри якої дорівнюють заданим номінальним розмірам, а форма співпадає з номінальною формою.

Реальна (дійсна) поверхня – поверхня, що обмежує тіло деталі та відокремлює його від навколишнього середовища.

Базова поверхня – поверхня, що має форму номінальної поверхні і є основою для оцінювання відхилень форми реальної поверхні або реального профілю. Для кількісного оцінювання відхилень форми за базу призначають прилеглу поверхню або лінію, відносно якої визначають відхилення (рис. 7.11).

Прилегла поверхня – поверхня, що має форму номінальної поверхні, охоплює реальну поверхню і знаходиться ззовні деталі так, щоби відхилення від неї найбільш віддаленої точки реальної поверхні в межах нормованої ділянки було мінімальним.

Нормованою ділянкою називають ділянку поверхні або профілю, відносно якої призначено допуск і відносно якої визначають відхилення форми або розташування поверхонь.

Окрім зазначених вище понять використовують також поняття *номінальний* і *реальний профіль* (рис. 7.12) *номінальне* і *реальне розташування поверхонь*, які визначають контурами обрисів деталей і позначають лінійними та кутовими розмірами відносно деякої бази або відносно взаємозалежних поверхонь.

Точність відтворення форми реальної деталі порівняно з проектною визначають відхиленнями її геометричних параметрів від номінальних.

Відхиленням форми поверхні або *профілю* називають відхилення форми реальної поверхні (реального профілю) від номінальної поверхні (номінального профілю). Під час визначення відхилення форми враховують хвилястість поверхні, а шорсткість не враховують. Відхилення форми поверхонь визначають від точок реальної поверхні до прилеглих поверхонь.

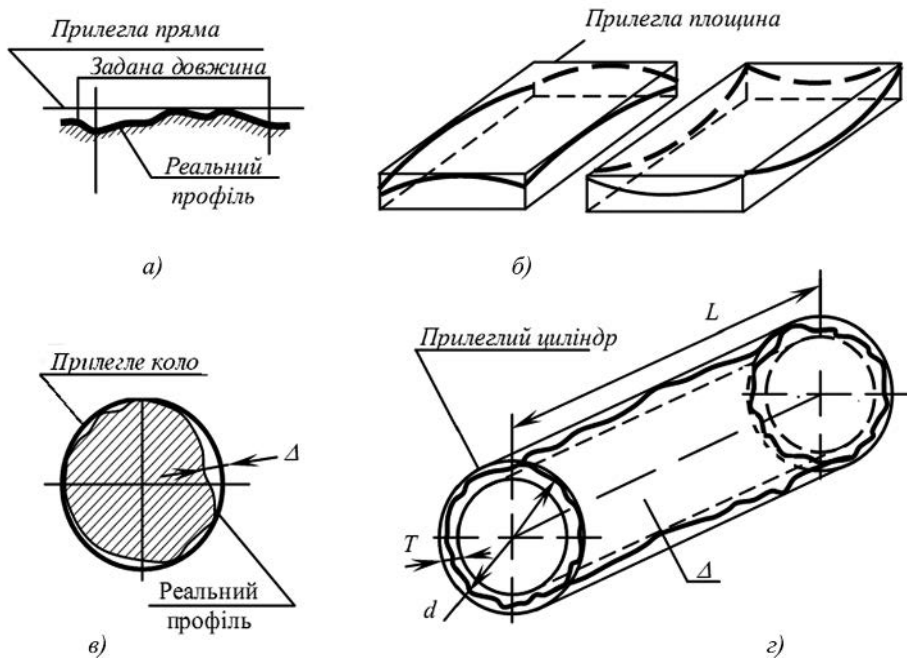


Рисунок 7.11. Ідеальні (прилеглі) обриси для визначення відхилень форми:
a – плоскої частини поверхні, *б* – випуклої або увігнутої поверхні,
в – кола, *г* – циліндричної поверхні

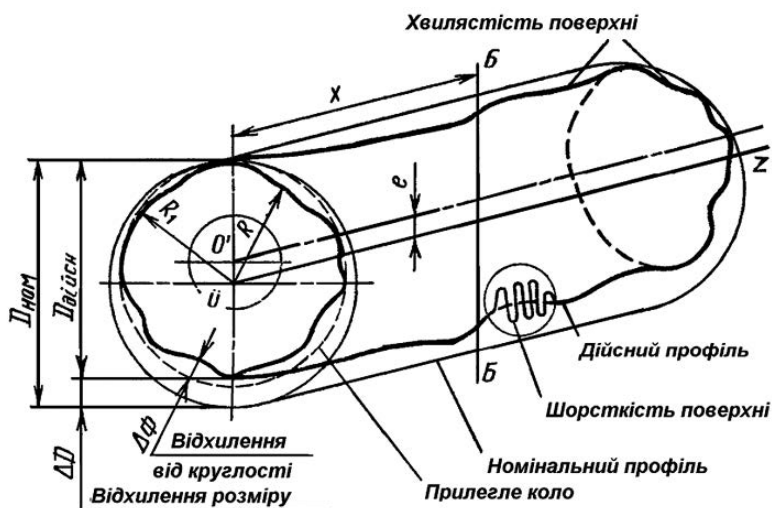


Рисунок 7.12. Характеристики форми деталі

Відхилення геометричних параметрів – це найбільша відстань між дійсними поверхнями (контурами) і номінальними. Різновиди відхилень форми та розташування поверхонь наведено в табл. 7.4

Допуском форми називають найбільше припустиме значення відхилення форми.

Допуск площинності (TFE) – найбільше припустиме значення відхилення від площинності.

Допуск прямолінійності (TFK) – найбільше припустиме значення відхилення від прямолінійності.

Усі можливі відхилення форми деталі зосереджено в межах певного простору, що називають *полем допуску форми*.

Поле допуску форми – це ділянка у просторі або на площині, всередині якої знаходяться всі можливі точки реальної поверхні або реального профілю і яку обмежено відповідним допуском. Значення допусків обирають за стандартом залежно від виду відхилення і ступеня точності.

Відхилення форми оцінюють для плоских та циліндричних деталей, рис. 7.11. Плоскі поверхні деталей характеризуються відхиленнями від прямолінійності та площинності.

Відхилення форми плоских поверхонь визначають комплексними і окремими показниками.

Відхилення від прямолінійності (EFL) – найбільша відстань від точок реального профілю до прилеглої прямої в межах нормованої ділянки поверхні.

Відхилення від площинності є комплексним показником відхилень форми плоских поверхонь (EFE) – найбільша відстань від точок реальної поверхні до прилеглої площини в межах нормованої ділянки.

Частковими видами відхилень від площини є *ввігнутість* і *випуклість*.

Ввігнутість – таке відхилення, за якого віддалення точок дійсної поверхні від прилеглої площини збільшується від країв до середини.

Випуклість – таке відхилення, за якого віддалення точок дійсної поверхні від прилеглої площини зменшується від країв до середини.

Відхилення форми оцінюють найбільшим відхиленням Δ . Можливе відхилення визначають із застосуванням умови:

$$\Delta \leq T, \quad (7.11)$$

де T – допуск форми.

Поле допуску форми є частиною тривимірного простору або частиною плоскої поверхні, усередині можуть знаходитись усі точки реальної поверхні.

Допуски круглості, циліндричності і площинності – найбільше припустиме значення відхилень від круглості, циліндричності і площинності відповідно.

На робочих кресленнях застосовують комплексні умовні позначення, що характеризують показники відхилень форми циліндричних і плоских поверхонь, табл. 7.4. Для диференційованих видів відхилень спеціальних умовних позначень не застосовують, а в разі необхідності вид і значення відхилень вказують текстом у технічних умовах.

Відхилення форми циліндричних поверхонь визначають у поперечному та в поздовжньому перерізах.

Таблиця 7.4. Класифікація відхилень і допусків форми та розташування поверхонь

Група відхилень та допусків	Допуск	Умовний знак
Відхилення та допуски форми поверхонь	прямолінійності	
	плоскостності	
	круглості	
	циліндричності	
	профілю поздовжнього перерізу	
Відхилення та допуск розташування поверхонь	паралельності	
	перпендикулярності	
	нахилу	
	співвідносності	
	симетричності	
	позиційний	
	перетину осей	
Сумарні відхилення та допуски форми і розташування поверхонь	радіального та торцевого биття в заданому напрямку	
	повного радіального та торцевого биття	
	форми заданого профілю	
	форми заданої поверхні	

Комплексним показником відхилення форми циліндричної поверхні в поперечному перерізі є відхилення від круглості E_{FK} .

Кількісно цей показник дорівнює найбільшій відстані Δ від точок реально го профілю (поверхні) до прилеглого кола.

Окремими різновидами відхилення форми циліндричної поверхні у поперечному перерізі є овальність і огранювання.

Овальність – відхилення від круглості, за якого реальний профіль є овалоподібною фігурою, найбільший та найменший діаметри якої мають взаємно перпендикулярні напрямки.

Огранювання – це таке відхилення від округлості, за якого реальний профіль є багатогранною фігурою.

Кількісно овальність і огранювання оцінюють так само, як і відхилення від округлості.

Комплексним показником відхилення форми циліндричної поверхні у поздовжньому перерізі є *відхилення від циліндричності* EFZ. Відхилення визначають як найбільшу відстань Δ від точок реальної поверхні до прилеглого циліндра в межах нормованої ділянки.

Окремими видами відхилень форми циліндричної поверхні у поздовжньому перерізі є бочкоподібність, сідлоподібність, конусоподібність і відхилення від прямолінійності осі, які оцінюють так само, як відхилення профілю поздовжнього перерізу. Величину зазначених відхилень визначають як половину різниці між найбільшим і найменшим значеннями діаметрів в межах нормованої ділянки

$$\Delta = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} . \quad (7.12)$$

Відхилення профілю поздовжнього перерізу EFP – найбільша відстань Δ від точок твірних реальної поверхні, що лежать в площині, яка проходить через її вісь до відповідної сторони прилеглого профілю в межах нормованої ділянки.

Допуск профілю повздовжнього перерізу TER – найбільше припустиме значення відхилення профілю повздовжнього перерізу.

Інколи призначення допусків округлості або циліндричності циліндричних поверхонь, як і для плоских поверхонь, роблять узгоджено з допусками діаметрів цих поверхонь.

Допуски форми $T(T_p)$ циліндричних поверхонь, які віднесено до рівнів *A*, *B* і *C* відносної геометричної точності становлять приблизно 30, 20 і 12% від допуску розміру, оскільки допуск форми обмежує відхилення радіуса, а допуск розміру – відхилення діаметра поверхні.

Допуски форми поверхонь слід призначати тільки в тих випадках, якщо вони мають бути меншими за допуск розміру, що визначає розташування цих поверхонь. В інших випадках допуски форми не нормують і на кресленнях не позначають, однак вони не повинні перевищувати допуску основного розміру.

7.4.2. Відхилення і допуски розташування поверхонь

У процесі оброблення деталей виникають відхилення не тільки розмірів і форми, але й відхилення розташування поверхонь щодо їх номінального розташування.

Відхилення розташування – відхилення реального розташування певного елемента деталі від його номінального розташування.

Номинальне розташування – розташування елемента (поверхні або профілю), обумовлене номінальними лінійними та кутовими розмірами деталей, що забезпечують наперед задані відстані між цими деталями і базами або між певними елементами, якщо бази не задано.

Реальне розташування – розташування елемента (поверхні чи профілю) відносно бази або відносно іншого елемента, що визначається дійсними лінійними та кутовими розмірами деталі.

Для оцінювання точності розташування поверхонь, як правило, призначають бази. У разі, якщо базовою є поверхня обертання, базою призначають її вісь.

База – елемент деталі або комбінація елементів, відносно яких призначають допуск розташування або сумарний допуск форми і розташування, а також визначають відповідне відхилення певного елемента (рис. 7.13).

Допуском розташування називають найбільше припустиме значення відхилення розташування поверхонь.

Вважають, що точність розташування забезпечено, якщо дійсне відхилення не перевищує допуску, що встановлено для даного виду відхилення, тобто $\Delta \leq T$.

Розглянемо види відхилень, що їх наведено на рис. 7.13.

Позиційне відхилення – це умовна назва відхилення, що характеризує зміщення осі або площини відносно номінального розташування (рис. 7.13а).

Визначають таке відхилення найбільшою відстанню Δ між реальним розташуванням елемента (його центру, осі або площини симетрії) і його розташуванням у межах нормованої ділянки.

Відхилення від симетричності – це найбільша відстань між площиною симетрії (віссю) даного елемента і базою (площиною симетрії базового елемента) в межах нормованої ділянки (рис. 7.13б, рис. 7.13д).

Відхилення від точки перетину осей – найменша відстань між осями реальних елементів, осі яких за ідеальних умов мали б перетинатись, рис. 7.13в.

Відхилення від співвісності відносно спільної осі – це найбільша відстань Δ_1 (Δ_2) між віссю даної поверхні обертання і спільною (базовою) віссю на довжині нормованої ділянки L_1 (L_2) (рис. 7.13г).

Розглянемо іще два види відхилень, що часто мають місце на практиці, це відхилення від паралельності та відхилення від перпендикулярності.

Відхилення від паралельності площин – різниця між найбільшою та найменшою відстанями між площинами, що за ідеальних умов мають бути паралельними, в межах нормованої ділянки (рис. 7.14).

Відхилення від перпендикулярності – це відхилення кута між площинами від прямого кута (90°) на довжині нормованої ділянки, яке подають у лінійних одиницях (рис. 7.15).

7.4.3. Сумарні відхилення (допуск) форми та розташування

Сумарне відхилення форми та розташування – відхилення, в якому одночасно враховано відхилення форми і відхилення розташування розглянутої

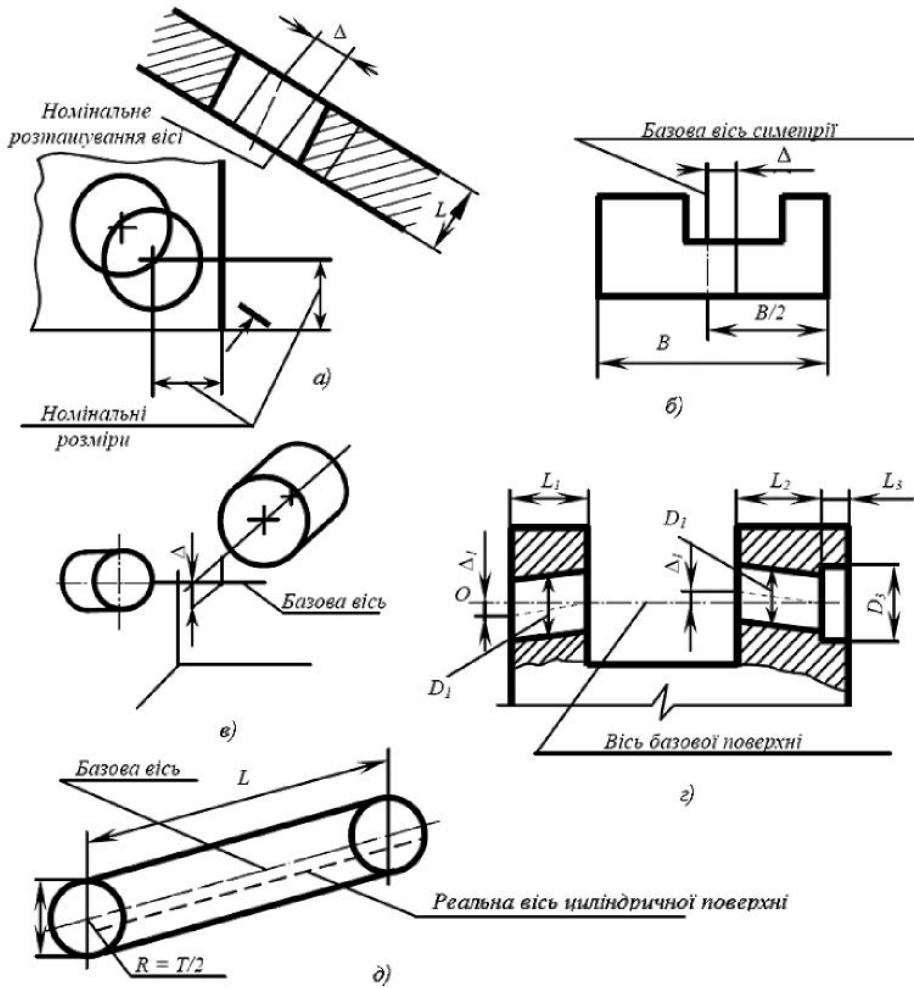


Рисунок 7.13. Різновиди відхилень від базових елементів

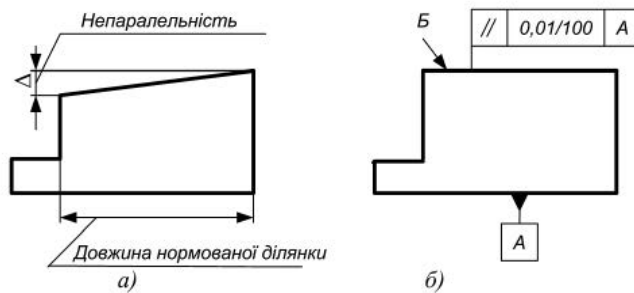


Рисунок 7.14. Схема відхилення від паралельності (а) і приклад його позначення на кресленні (б) для випадку, коли допуск паралельності поверхні Б відносно поверхні А становить 0,01 мм на нормованій довжині 100 мм

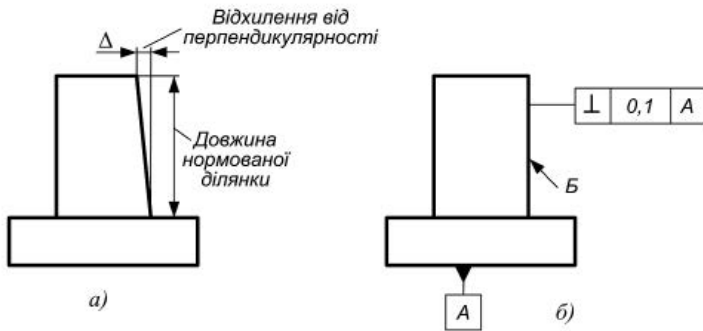


Рисунок 7.15. Схема виникнення відхилення від перпендикулярності (а) і приклад його позначення на кресленні (б) для випадку, коли допуск перпендикулярності поверхні *Б* відносно основи *А* становить 0,1 мм

реальної поверхні (профілю) відносно наперед визначених баз. Сумарні відхилення застосовують, зокрема, для оцінювання радіального і торцевого биття.

Радіальне биття відносно базової осі виникає в результаті відхилення від круглості та/або співвісності із зазначеною віссю контрольованого профілю перерізу. Позначення радіального биття на кресленнях наведено на рис. 7.16.

Повне радіальне биття циліндричної поверхні виникає у результаті відхилення форми контрольованої поверхні від циліндричності і співвісності з базовою віссю.

Торцеве биття – це різниця найбільшої і найменшої відстаней від точок реального профілю торцевої поверхні до площини, що перпендикулярна до базової осі обертання. Торцеве биття може бути визначено для усієї торцевої поверхні або для її частини, що обмежена колом меншого діаметра порівняно з повним діаметральним розміром торцевої поверхні.

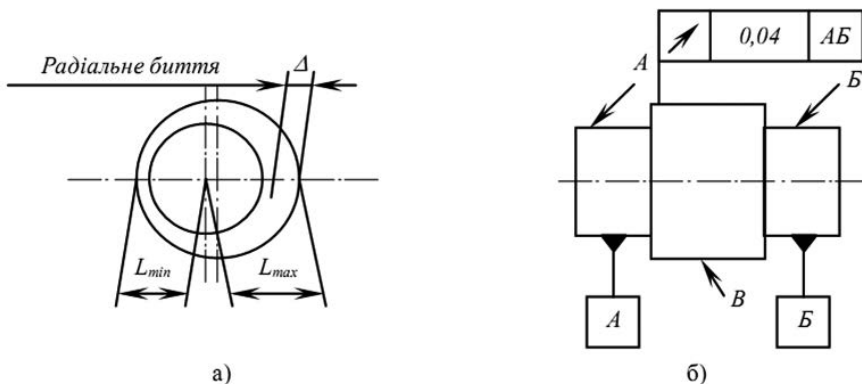


Рисунок 7.16. Схема виникнення радіального биття (а) і приклад його позначення на кресленні (б)

Повне припустиме торцеве биття сумарно обмежує відхилення від площинності і перпендикулярності одночасно. Схему утворення торцевого биття та його позначення на кресленні наведено на рис. 7.17.

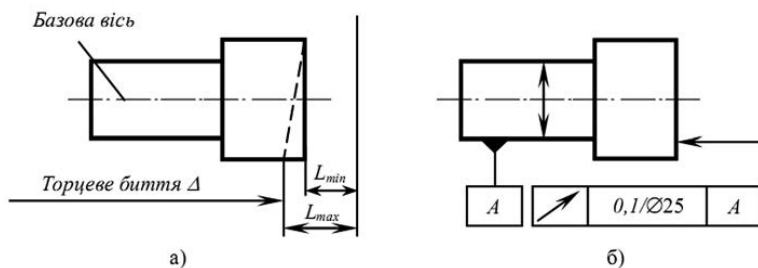


Рисунок 7.17. Схема виникнення радіального биття (а) і приклад його позначення на кресленні (б)

Порядок наведення на кресленнях вимог щодо допустимих відхилень форми й розташування поверхонь і осей, а також умовні символічні позначення відхилень регламентовано ДСТУ 2498-94 «Основні норми взаємозамінності. Допуски форми та розташування поверхонь. Терміни та визначення».

Припустимі відхилення форми вказують на кресленні поряд із відповідним символічним позначенням.

Символічні позначення і припустимі величини відхилень форми й розташування наводять у прямокутних рамках, які з'єднують виносною лінією зі стрілкою з контурною лінією поверхні, або розмірною лінією параметра, або з віссю симетрії, як це наведено, наприклад, на рис. 7.17. Прямокутні рамки поділяють на дві або три частини: у першій наводять *символічне позначення* відхилення, у другій *граничне* відхилення. Третю частину позначення використовують тоді, коли є літерне позначення базової або іншої поверхні, відносно якої наведено відхилення або інше необхідне позначення.

Залежний допуск позначають літерою М і проставляють у кутку в прямокутній рамці поряд із величиною допустимого відхилення.

Залежними називають допуски розташування поверхонь, величина яких залежить не тільки від заданого граничного відхилення розташування, але й від дійсних відхилень з'єднаних деталей. Залежні допуски призначають для деталей, які з'єднують двома або трьома поверхнями одночасно і, для яких вимогу взаємозамінності призначено для забезпечення складання механічного вузла. Величину відхилень слід призначати для найбільш несприятливого варіанту поєднання сполучених розмірів, тобто, для випадку найменших граничних розмірів охоплювальних поверхонь і найбільших граничних розмірів охоплюваних.

Допуски співвісності, симетричності, перетину осей і позиційні можна задавати на кресленнях стосовно радіуса або діаметра. Відмінність позначень за-

безпечують уведенням додаткового знаку R або \emptyset перед числовим значенням. Перевагу у позначеннях слід надавати відхиленням відносно діаметра.

Для вказівки бази граничного відхилення або іншого елемента, з яким пов'язаний допуск, застосовують третю клітинку. У випадку, коли жодна з поверхонь не є базовою, від рамки проводять два покажчик, що закінчуються стрілками (рис. 7.16). Якщо одна з поверхонь є базою, то покажчик має закінчуватись біля вершини темного рівнобедреного трикутника, основа якого прилягає до поверхні.

7.5. Шорсткість поверхонь

7.5.1. Загальна характеристика та параметри шорсткості

Шорсткістю поверхні згідно ДСТУ 2413-94 називають сукупність мікронерівностей з відносно малими кроками, що утворюють рельєф поверхні. У державному стандарті на шорсткість поверхні встановлено єдиний підхід до визначення величини шорсткості, основою якого є профіль шорсткості і його параметри, рис. 7.18.

Числові значення параметрів шорсткості поверхні визначають від певної основної лінії (бази). За базу беруть середню лінію, що має форму номінального профілю та ділить реальний профіль так, щоб у межах нормованої довжини середньоквадратичне відхилення профілю було мінімальним.

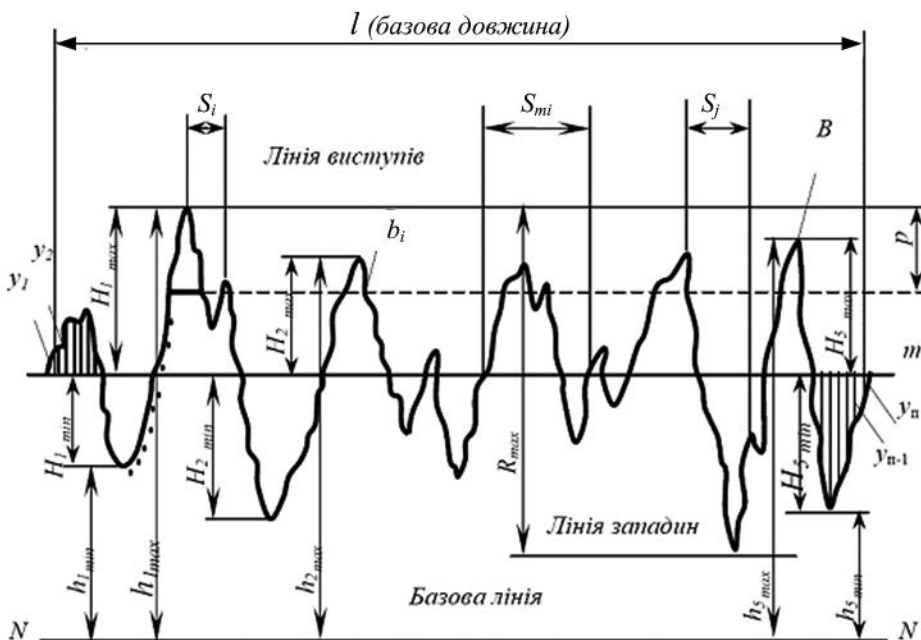


Рисунок 7.18. Схематичне зображення фрагменту профілю поверхні деталі

Базова довжина l – довжина базової лінії, яку використано для оцінювання величини нерівностей, що характеризують шорсткість поверхні.

Шорсткість поверхонь незалежно від матеріалу і способу отримання поверхні можна оцінювати кількісно одним або кількома параметрами, що характеризують величину виступів та западин відносно базової лінії контуру, а також щільність їх розташування. На практиці використовують висотні, поздовжні та висотно-поздовжні параметри.

Висотні параметри шорсткості:

– *середнє арифметичне відхилення профілю Ra* (тобто середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини l)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \text{ або } Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (7.13)$$

де n – кількість вибраних точок профілю на базовій довжині; y – відхилення профілю від базової лінії контуру;

– *висота нерівностей профілю за десятьма точками Rz* (середньоарифметичне відхилення визначене за п'ятьма найбільшими виступами та п'ятьма найбільшими западинами в межах базової довжини l)

$$Rz = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right], \quad (7.14)$$

де y_{pi} – висота i -го найбільшого виступу профілю; y_{vi} – глибина i -ї найбільшої западини профілю;

– *найбільша висота нерівностей профілю R_{\max}* (відстань між лінією виступів профілю і лінією западин профілю в межах базової довжини).

Одиницею вимірювання параметрів Ra , Rz , R_{\max} є мікрометр (мкм).

Поздовжні параметри шорсткості:

– *середній крок нерівностей профілю S_m* вздовж середньої лінії профілю (середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю в межах базової довжини)

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}, \quad (7.15)$$

де n – кількість кроків у межах нормованої довжини; S_{mi} – крок нерівностей профілю, що дорівнює довжині відрізка середньої лінії між сусідніми фрагментами реального профілю поверхні спрямованими від западини до виступу або навпаки;

– *середній крок місцевих виступів профілю S* (середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю між вершинами в межах базової довжини)

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (7.16)$$

де n – кількість кроків нерівностей між вершинами у межах базової довжини; S_i – крок нерівностей профілю між вершинами.

Висотно-поздовжні параметри:

η_p – опорна довжина профілю (сума довжин відрізків b_i , що утворились внаслідок перетину профілів виступів лінією, яка проходить на відстані p від лінії виступів у межах базової довжини, рис. 7.18)

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i; \quad (7.17)$$

t_p – відносна опорна довжина профілю (p – відносне значення рівня перетину профілю у відсотках від R_{\max}), – відношення опорної довжини профілю h_p до базової довжини:

$$t_p = \frac{h_p}{l} = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_n}{l}. \quad (7.18)$$

Величини t_p , p і l вибирають залежно від необхідної точності оброблення деталей і вони можуть набувати таких значень:

t_p – 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%;

p – 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90% від R_{\max} ;

l – 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8,25 мм.

Відносну опорну довжину профілю визначають у тому випадку, коли необхідно задовольнити підвищеним вимогам до опорної поверхні. Наприклад, зносостійкість, контактна жорсткість, міцність посадок з натягом і інші експлуатаційні властивості сполучених поверхонь деталей, що залежать від фактичної площі контакту.

Під час вибору значень t_p слід враховувати, що з його збільшенням значно зростає трудомісткість виготовлення деталей.

У процесі вибору параметрів шорсткості доцільно користуватись такими рекомендаціями:

– величину параметрів шорсткості поверхонь слід визначати на підставі експлуатаційного призначення деталей, тобто, більш жорсткі параметри слід призначати для деталей відповідальних з'єднань. Для невідповідальних поверхонь шорсткість має бути обумовлено вимогами технічної естетики, корозійної стійкості та технологією виготовлення;

– шорсткість поверхонь залежить від технології виготовлення, яку обирають залежно від заданої точності реальних розмірів деталі. Наприклад, точність за 6 квалітетом можна отримати алмазним точінням, чистовим шліфуванням, протягуванням. Із застосуванням таких технологій шорсткість характеризується $Ra \approx 2,5-0,32$ мкм;

– для визначення величини Rz можна користуватись співвідношенням, що встановлює взаємозв'язок між висотою мікронерівностей і допуском розміру T : для квалітетів з 5 до 10 слід дотримуватись співвідношення $Rz \leq 0,25T$, а для квалітетів більше 10 – $Rz \leq 0,125T$.

На підставі накопиченого досвіду експлуатації різноманітних виробів, можна рекомендувати застосовувати такі комплекси параметрів шорсткості:

- для поверхонь, що під час функціонування зазнають тертя, ковзання, кочення і схильні до зносу, – Ra , Rz або t_p ;
- для поверхонь, що зазнають контактної напруги, – Ra , Rz і t_p ;
- за необхідності забезпечити відносну нерухомість сполучених деталей – Ra або Rz ;
- для деталей, що зазнають змінних навантажень, – R_{max} , S_m або S .

Під час вибору параметрів Ra і Rz перевагу слід надавати Ra , оскільки цей параметр дає повнішу оцінку шорсткості.

Приклади параметрів шорсткості для деяких поширених видів оброблення поверхонь наведено в табл. 7.5.

Таблиця 7.5. Значення параметрів шорсткості після оброблення деякими поширеними методами




Вид оброблення	Параметри шорсткості, мкм
Стругання обдирне	Rz 80 – 20
Стругання чистове	Rz 20 – Ra 0,63
Свердління	Rz 40 – Ra 1,25
Фрезерування обдирне	Rz 80 – 20
Фрезерування чистове	Rz 20 – Ra 0,63
Шліфування напівчистове	Rz 20 – Ra 0,63
Шліфування чистове	Ra 1,25 – 0,16
Притирання чистове	Ra 1,25 – 0,16
Притирання тонке	Ra 0,32 – Rz 0,025

7.5.2. Позначення параметрів шорсткості

Шорсткість поверхонь позначають відповідно до ГОСТ 2.309-73 з урахуванням змін, що набули чинності у 2005 році.

Залежно від способу оброблення поверхні для позначення шорсткості застосовують один із трьох знаків, наведених в табл. 7.6.

Таблиця 7.6. Умовні знаки для позначення шорсткості

Умовний знак	Умови застосування
	Цей знак застосовують, якщо вид обробки поверхні конструктором не установлено
	Знак вказує, що шорсткість поверхні утворюється зняттям шару матеріалу (точіння, фрезерування, свердління тощо)
	Знак вказує, що шорсткість поверхні утворюється без зняття поверхневого шару матеріалу, наприклад литтям, штампуванням, прокатом тощо

Умовні позначення структури та напрямків розташування нерівностей та їх схематичне зображення наведено в табл. 7.7.

Таблиця 7.7. Умовні знаки для позначення нерівності

Тип напрямку нерівностей	Схематичне зображення	Умовне позначення
Паралельне		
Перпендикулярне		
Перехрещувані		
Довільне		
Кругоподібне		
Радіальне		
Точкове		

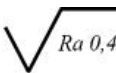
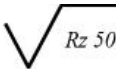
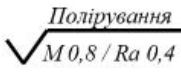
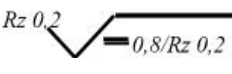
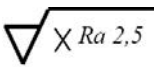
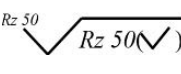

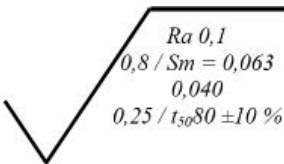
Базову довжину у позначенні шорсткості поверхні не вказують, якщо значення параметрів Ra і Rz має бути визначено в межах базової довжини, величину якої передбачено стандартом.

Позначення шорсткості, яка є однаковою для частини поверхонь виробу, може бути зроблено в правому верхньому куті креслення разом із умовним позначенням (\surd). Це означає, що для всіх поверхонь, на зображення яких не нанесено позначення шорсткості або знак \surd , передбачено шорсткість, указану перед умовним позначенням.

Розміри знаку, взятого в дужки, мають дорівнювати розмірам знаків, нанесених на зображенні.

Приклади позначень шорсткості наведено в табл. 7.8.

Таблиця 7.8. Приклади позначень шорсткості поверхонь

Позначення шорсткості	Значення позначення
	Значення параметра Ra має не перевищувати 0,4 мкм, вид оброблення та напрям нерівностей не встановлено
	Значення параметра Rz має не перевищувати 50 мкм, вид оброблення та напрям нерівностей не встановлено
	Значення параметра Ra має не перевищувати 0,4 мкм на базовій довжині 0,8 мм; напрямок нерівностей поверхні – довільний (знак M), вид оброблення поверхні – полірування
	Значення параметра Rz має не перевищувати 0,2 мкм на базовій довжині 0,8 мм; напрямок нерівностей – паралельний, вид оброблення не встановлено
	Значення параметра Ra має не перевищувати 2,5 мкм; поверхню сформувати зняттям шару матеріалу; напрямок нерівностей поверхні – перехресний
	Значення параметра шорсткості Rz для всіх поверхонь, на які нанесено позначення шорсткості, має не перевищувати 50 мкм
	Усі поверхні, на зображення яких не нанесено позначення шорсткості або знак \checkmark , повинні мати шорсткість, указану перед умовним позначенням; поверхня повинна бути утворена без видалення шару матеріалу
	Значення декількох параметрів шорсткості поверхні наведено зверху вниз у такій послідовності: параметр Ra – до 0,1 мкм; параметр кроку нерівностей профілю S_m – від 0,063 до 0,040 мм; на базовій довжині – 0,8 мм; відносна опорна довжина профілю складає $t_{50}80 \pm 10\%$ довжині 0,25 мм

Структуру позначення шорсткості поверхні наведено на рис. 7.19

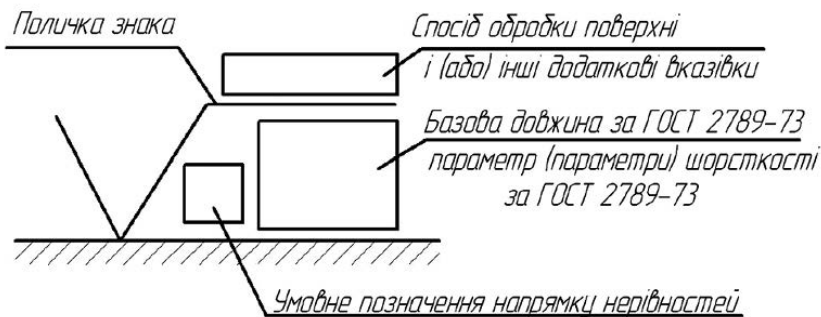


Рисунок 7.19. Розташування складових умовного позначення шорсткості

Позначення шорсткості на кресленнях деталей можна робити на лініях контуру деталі, виносних лініях, на полічках ліній-виносок, а якщо не ви-

стачає місця можна розташовувати позначення на розмірних лініях або на їх продовженнях. Способи розміщення умовних знаків на кресленні наведено на рис. 7.20.

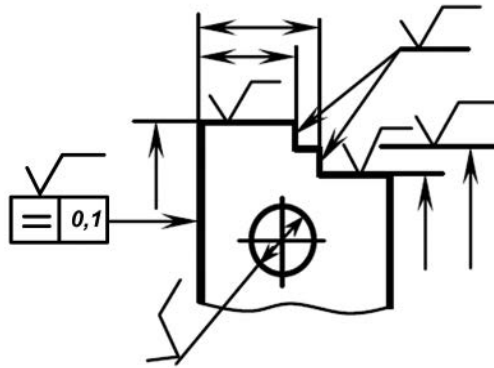


Рисунок 7.20. Способи розміщення знаків шорсткості на кресленні деталі

7.6. Запитання для самоконтролю

1. Чим обумовлено необхідність забезпечувати уніфікацію та взаємозамінність деталей та вузлів?
2. Поясніть сутність поняття взаємозамінності.
3. Якими параметрами визначають точність виготовлення деталей?
4. Що таке «повна взаємозамінність», які переваги вона надає у процесі виробництва пристроїв?
5. Що таке «повна неповна взаємозамінність», як вона впливає на процес виробництва пристроїв.
6. Поясніть, що таке зовнішня та внутрішня взаємозамінність.
7. Поясніть, що таке функціональна взаємозамінність.
8. Якими документами регламентовано питання взаємозамінності в машинобудуванні і приладобудуванні?
9. Що таке розмір? Які види розмірів застосовують у приладобудуванні?
10. Поясніть сутність поняття номінальний розмір.
11. Поясніть сутність понять отвір та вал, як елементів конструкції.
12. Що таке відхилення, коли мова іде про розміри деталей.
13. Які різновиди відхилень розмірів застосовують під час виготовлення пристроїв?
14. Що таке допуск і поле допуску?
15. Яким чином позначають граничні відхилення на кресленнях?
16. Які форми з'єднаних поверхонь розрізняють в конструюванні? Що вони собою являють?

17. Які бувають з'єднання за характером контакту двох або декількох деталей?
18. Що таке посадка? Які бувають види посадок?
19. Поясніть, що таке посадка із зазором.
20. Поясніть, що таке посадка з натягом.
21. Яка посадка забезпечує рухоме з'єднання і чому?
22. Яка посадка забезпечує нерухоме з'єднання і чому?
23. Поясніть, що таке система допусків і посадок.
24. У чому сутність системи отвору для формування посадок і чому їй надають перевагу у практичному застосуванні?
25. У чому сутність системи вала для формування посадок і в яких випадках цій системі надають перевагу?
26. Поясніть, що таке квалітет. Скільки квалітетів передбачено?
27. Поясніть, як пов'язані величина допуску і квалітет.
28. Поясніть, що таке система основних відхилень і яким чином їх позначають.
29. Поясніть, як визначають чисельне значення допуску на розмір деталі у міжнародному стандарті і що означають складові розрахункового співвідношення?
30. Для яких виробів застосовують квалітети *IT0*; *IT0*; *IT1*?
31. Які квалітети застосовують для відповідальних з'єднань в автомобілебудуванні, верстатобудуванні та у високоточних з'єднаннях?
32. Як позначають посадки в конструкторській документації?
33. На які групи розподілено відхилення форми і розміщення деталей у конструювання?
34. Поясніть що таке номінальна форма і номінальна поверхня.
35. Поясніть що таке базова поверхня та базовий профіль.
36. Поясніть що таке прилегла поверхня та прилеглий профіль.
37. Поясніть, що таке відхиленням форми поверхні або профілю.
38. Які характеристики форми деталей застосовують в конструюванні?
39. Поясніть, що таке відхилення від площинності і які бувають часткові види відхилення від площинності?
40. Поясніть, які види відхилень форми циліндричних поверхонь розглядають під час конструювання.
41. Поясніть, що таке поле допуску форми.
42. Наведіть, яким умовними знаками позначають позиційне відхилення та допуск розташування.
43. Наведіть, яким умовним знаком позначають відхилення та допуск форми циліндричності.
44. Поясніть, що таке допуск розташування і позиційне відхилення.
45. Поясніть, як позначають відхилення від паралельності на кресленні деталі.
46. До якої категорії відхилень віднесено радіальне биття і як його позначають на кресленні деталі.

47. Поясніть, поясніть що таке шорсткість поверхні деталі і чим її обумовлено.
48. Які висотні параметри шорсткості використовують на практиці і що вони характеризують?
49. Які поздовжні параметри шорсткості використовують на практиці і що вони характеризують?
50. Які висотно-поздовжні параметри шорсткості використовують на практиці і що вони характеризують?
51. Чому під час вибору параметру Ra чи Rz для характеристики шорсткості перевагу слід надавати Ra ?
52. Які умовні знаки застосовують для позначення шорсткості і що вони означають?
53. Наведіть три приклади умовного позначення структури та напрямків розташування нерівностей та їх схематичне зображення.
54. Де на кресленні можна робити позначення шорсткості деталі?

Розділ 8. Особливості конструювання рушійних механізмів апаратури реєстрації інформації

Рушійні механізми апаратури реєстрації інформації є важливою частиною апаратури і мають *найбільшу конструктивну складність*, найвищу *кінематичну точність*, значну *матеріаломісткість* (метал, пластмаса, тощо) і вимагають застосування майже всіх видів *технологічних процесів* (токарних, розточувальних, фрезерувальних, шліфувальних, штампувальних, пресувальних, намотувальних, лакофарбувальних, гальванічних, слюсарних, зварювальних тощо).

В рушійних механізмах АРІ *передавання руху* від головної ланки на інші ланки найчастіше відбувається з перетворенням виду руху. Головною ланкою є *джерело рушійної сили* сполучене з механізмом передавання або перетворення руху. Усі частини рушійного механізму монтують в єдине ціле в корпусі пристрою металевому або пластмасовому.

Під час *проекткування* механізмів апаратури реєстрації інформації необхідно здійснювати аналіз існуючих конструкцій, *вибирати метод* розроблення кінематичної схеми, робити геометричні та динамічні *розрахунки*. Процес проектування вимагає ґрунтовних знань механізмів відповідного призначення, їх основних вузлів, а також знань щодо вибору допусків і посадок для деталей і вузлів, які необхідно сполучити.

В АРІ механічні системи забезпечують *взаємодію носіїв* інформації з елементами запису-відтворення цієї інформації.

Як відомо, АРІ охоплюють такі види запису:

- магнітний – на магнітній стрічці або дроті, а також на магнітних дисках;
- оптичний – на кіно і фотоплівку, а також на оптичних дисках (CD, DVD);
- електростатичний – на аркушах або рулонах паперу;
- термопластичний – на термопластичній стрічці;
- механічний – на грамплатівках, на папері за допомогою друкарських машинок.

В апаратурі *магнітного запису* механізми забезпечують *взаємодію магнітної стрічки* з нерухожими (звукозапис), або обертовими магнітними головками (відеозапис), або обертовими магнітними дисками (жорсткими або гнучкими) й магнітними голівками, розташованими над їх поверхнею.

В апаратурі оптичного запису механізми забезпечують взаємодію *кіно-фотоплівки з оптичними системами* або жорстких оптичних дисків (CD-ROM, CD, DVD тощо) з *лазерною оптичною* головкою.

Джерелом рушійної *енергії* в механізмах апаратури реєстрації інформації можуть бути *електродвигун, електромагніт* або *пружинний* (для ручних кінознімальних апаратів) *двигун*. Без цього джерела будь-який механізм недієздатний. Аналіз конструкції будь-якого магнітофона, відеоманітофона, дискового механізму комп'ютера, кінопроектора, електропрогравача, сканера, ксерокса тощо, свідчить, що вони містять один або кілька електродвигунів,

що є джерелом обертального руху, що в подальшому перетворюється у *поступальний рух* магнітної стрічки або кіноплівки, в *обертальні рухи дисків* тощо.

Оскільки в АРІ застосовують приблизно 10 видів механічних систем оброблення інформації, опис конструкцій та особливостей конструювання кожної з них є доволі складним та містким, тому надамо опис лише загальних положень для цих систем, а саме – опис конструкції електродвигунів і основ побудови головних вузлів механізмів, таких як спрямовано-обертальних ланок, ланок поступального та комбінованого рухів тощо.

8.1. Електродвигун – основне джерело руху в механізмах

У механізмах АРІ як основне джерело рушійних сил широко застосовують різні електродвигуни (ЕД) потужністю від часток вата ультразвукові (п'єзоелектричні) двигуни (для електроприводів фокусування та діафрагмування фото та відеокамер), кількох ват (електропривод магнітних і оптичних дисків) до 600-800 Вт (привід механізмів стаціонарних кінопроекторів), а також до кількох десятків кіловат для електроприводу механізмів типографських друкарських машин (механіко-відтискова реєстрація зображень) тощо.

Головними складовими частинами будь-якого електродвигуна є стаціонарний (нерухомий) елемент конструкції – *статор*, та обертальний елемент – *ротор* (рис. 8.1).

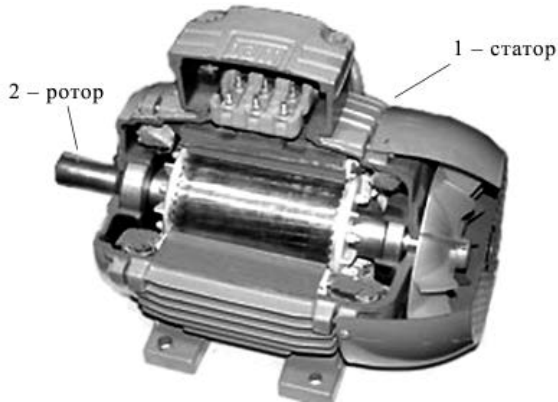


Рисунок 8.1. Зовнішній вигляд електродвигуна (1 – статор, 2 – ротор)

Усі електродвигуни механізмів АРІ розподіляють на окремі групи за типом *напруги* (струму) електроживлення – на двигуни *постійного* і *змінного* струму, які додатково поділяють на *синхронні* та *асинхронні*; за способом підведенням напруги живлення – *колекторні* та *безколекторні*; за конструкцією корпусу – *циліндричні* і *дискові* (пласкі); за способом розміщення статора і ротора – на двигуни з *внутрішнім* і *зовнішнім ротором*, а також за конструктивним виконанням – на *відокремлені* і *вбудовані* у вузли механізмів, наприклад, у *пакет*

жорстких магнітних дисків або всередину співвісно-розташованих котушок з магнітною стрічкою бортових магнітних самописців тощо.

Важливою характеристикою електродвигунів є механічна (навантажувальна) характеристика – залежність швидкості обертання ротора n (об/хв.) від механічного моменту M (Нм).

Приклади механічних характеристик деяких ЕД наведено на рис. 8.2.

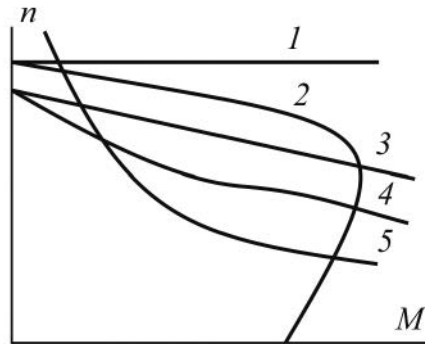


Рисунок 8.2. Механічні характеристики електродвигунів:

- 1 – синхронного двигуна; 2 – асинхронного двигуна; 3 – двигуна постійного струму з паралельним збудженням; 4 – двигуна постійного струму зі змішаним збудженням; 5 – двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Важливим експлуатаційним параметром ЕД є жорсткість механічної характеристики – залежність характеру зміни швидкості обертання (у літературі з електроприводу її називають також частота обертання) від моменту. Для асинхронних двигунів застосовують аналогічний параметр, який має назву «ковзання».

Прикладом жорсткої механічної характеристики є крива 1 на рис. 8.2.

Спочатку стисло розглянемо конструкції електродвигунів змінного струму для стаціонарної АРІ.

8.1.1. Електродвигуни змінного струму

Електродвигуни змінного струму широко застосовують у велико- і середньогобаритній АРІ, а саме в:

- стаціонарних і напівстаціонарних кінопроекторах (250...350 Вт);
- павільйонній кінознімальній техніці (200...250 Вт);
- студійних магнітофонах і відеомагнітофонах (150...200 Вт);
- обчислювальних машинах (250...350 Вт);
- стаціонарній та іншій спецтехніці (150...300 Вт);
- побутових магнітофонах стаціонарного виконання (30...60 Вт);
- стендах метрологічного призначення (150...300 Вт);
- устаткуванні для виробництва магнітних і кінострічок (200...300 Вт).

Електродвигуни забезпечують обертання приводних вузлів, що транспортують носій з незмінною лінійною або кутовою швидкістю, а також забезпечують натяг і прискорене перемотування носія, наприклад, з однієї касети на іншу або з однієї позиції в іншу. Залежно від виконуваних функцій до електродвигунів висувають різні вимоги: зберігати незмінну швидкість обертання у разі зміни навантаження в певних межах, або плавно змінювати обертальний момент у разі зміни навантаження або *швидкості* обертання тощо.

В апаратах *відеозвукозапису* (АВЗЗ) в основному застосовують *асинхронні* і *синхронні* електродвигуни змінного струму, що функціонують у діапазоні швидкостей 500...3000 об/хв., та інколи – у переносній і спеціальній апаратурі – колекторні постійного струму, які працюють у діапазоні швидкостей 2000...6000 об/хв.

Електродвигуни АВЗЗ є типовими пристроями, які зазвичай використовують без додаткового доопрацювання. Електродвигуни АВЗЗ мають свої специфічні особливості конструкції і до них висувають такі основні вимоги:

– *нестабільність миттєвої швидкості* обертання ротора не повинна перевищувати 10^{-3} - 10^{-4} ;

– *величина та характер* зміни обертального моменту мають бути відповідними заданим величинам або певній функціональній залежності;

– функціонування в *робочому режимі* протягом тривалого часу в межах заданих коливань температури навколишнього середовища, напруги і частоти мережі електроживлення;

– *безшумність* роботи на підшипниках ковзання (шум, спричинений шарикопідшипниками, не повинен перевищувати рівня, допустимого для конкретного типу АВЗЗ).

Для окремих двигунів можуть бути додаткові вимоги залежно від умов їх експлуатації.

Конструкції електродвигунів

Як зазначено вище в АВЗЗ переважно застосовують *асинхронні конденсаторні* і *синхронні реактивні* та *гістерезисні* двигуни. За особливістю конструкції розрізняють двигуни з внутрішнім і зовнішнім ротором. Зважаючи на порівняно невеликі габарити, для поліпшення механічних і робочих характеристик проміжок між статором і ротором в двигунах АВЗЗ витримують у межах 0,1...0,3 мм.

Двигун з *внутрішнім ротором* має статор у корпусі (рис. 8.3а), на торцях якого кріплять підшипникові щити (кришки з підшипниками ковзання або ковчення). Ротор обертається в підшипниках і має виліт валу (продовження валу за межі корпусу) в один або в обидва боки від підшипникових щитів. На нижній кришці розташовано розшивочну колодку, до пелюсток якої припаяні виводи обмотки статора. Таку конструкцію мають двигуни типу А-01 й А-02. У деяких

конструкціях корпус двигуна відсутній і підшипникові щити стягують шпильками (наприклад, двигуни типів ДВС-У1, ДВА-У1, ДВА-У3 тощо).

Двигун із *зовнішнім ротором* має статор (рис. 8.3б), усередині якого запресовано втулку з підшипниками кочення. Цією втулкою двигун кріплять до панелі стрічко-протяжного механізму (СПМ). Ротор має чашкоподібну форму, верхній кінець його валу висунутий назовні. На бічній поверхні втулки укріплено розшивочну колодку. Такий принцип конструкції реалізовано у двигунах типу ДМ-2. У деяких конструкціях втулку кріплять до чашкоподібного корпусу, на якому розташовано гальмівну систему стрічки і стійки для кріплення на панелі СПМ. На зовнішній частині валу ротора (виліт валу) розташовано фіксувальну шпонку, а торцева частина (днище) є одночасно і підкасетником. Таку конструкцію мають двигуни типів ДПН-1, ДПН-2 і ДПН-3.

Статор двигуна з внутрішнім або зовнішнім ротором (рис. 8.3) складено з осердя й укладеної в його пазах обмотки. Осердя статора виготовлено з набору штампованих кілець електротехнічної сталі завтовшки 0,35-0,5 мм. Кільця статора мають рівномірно розташовані відкриті пази вздовж периметра робочої поверхні. Для зменшення вихрових струмів, кільця статора ізолюють тонкою лаковою плівкою або шаром окалини, яку утворено у процесі відпалювання.

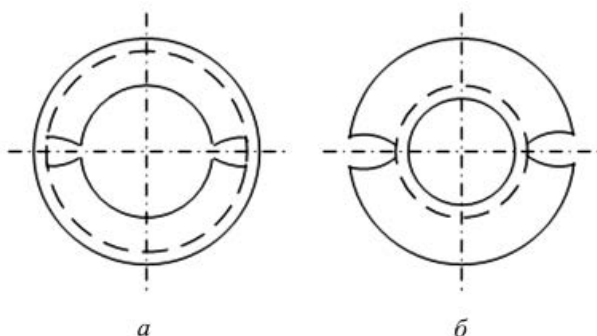


Рисунок 8.3. Структура осердя статора двигунів:
а – з внутрішнім ротором, б – з зовнішнім ротором

Для підвищення рівномірності ходу статори двигунів для АВЗЗ часто збирають «віялоподібними». Кожне кільце зміщують відносно сусіднього на одну пазову поділку, що сприяє більш рівномірному розподілу магнітної індукції навколо осердя, оскільки магнітні властивості листів сталі вздовж і поперек напряму прокату неоднакові. З цією ж метою іноді застосовують електродвигуни з косим пазом, коли початок паза на одному торці осердя зміщено щодо його кінця на іншому торці на одну зубцеву поділку. Така конструкція сприяє поліпшенню пускової характеристики і зменшенню магнітних шумів двигуна. Статор закріплено в корпусі, який виготовляють з алюмінієвого сплаву.

Ротор асинхронного або синхронного двигуна складено з осердя із запресованим у нього валом. Осердя ротора асинхронного двигуна з внутрішнім

ротором складено з набору штампованих кілець електротехнічної сталі завтовшки 0,35...0,5 мм. Кільця мають рівномірно розташовані вздовж периметра закриті або відкриті пази, їх ізолюють такими ж способами, як і кільця статора. За формою та конструкцією пази осердя ротора і статора аналогічні. У пазах осердя розташовано мідні стрижні, ізольовані від осердя пресшпаном. *Пресшпан* (нім. *pressspan, preßspan*) – тонкий ушільнений картон з лощеною поверхнею, який має колір природного волокна. Стрижні замкнено накоротко на торцях мідними кільцями. Ці стрижні з кільцями утворюють короткозамкнену обмотку (типу «біляче колесо»). Короткозамкнену обмотку іноді виготовляють шляхом заливки пазів алюмінієвими сплавами під тиском. Осердя ротора асинхронного двигуна із зовнішнім ротором виготовляють як чаші з суцільними стінками завтовшки від 1 мм до 8 мм. Для підвищення пускового моменту внутрішню поверхню чаші ротору покривають шаром міді гальванічним способом.

Осердя ротора *синхронних гістерезисних* двигунів виготовляють одним із трьох способів. *Перший спосіб*: активний магнітний шар напресовано на явно-або неявно полюсну втулку з магнітотвердого матеріалу (рис. 8.4а). *Другий спосіб*: той же порожнистий циліндр напресовано на немагнітну втулку з алюмінієвих або бронзових сплавів (рис. 8.4б). *Третій спосіб*: втулка відсутня, активний шар напресовано безпосередньо на вал (рис. 8.4в). В усіх варіантах активний шар може бути зроблено суцільним або шихтованим. Магнітотвердим матеріалом активного шару часто є вікалой. *Вікалой* – магнітно-тверді сплави системи залізо-кобальт-ванадій.

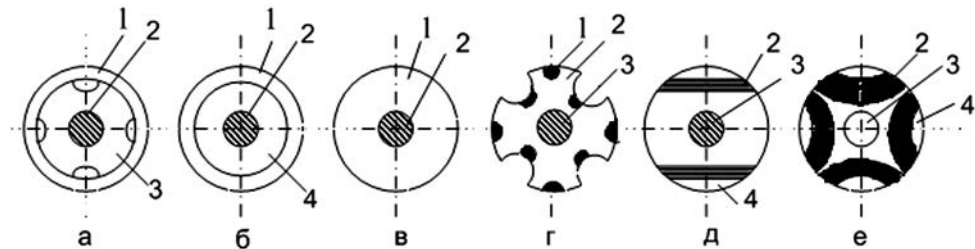


Рисунок 8.4. Конструкції роторів синхронних двигунів:

- а, б, в – гістерезисні: 1 – активний шар; 2 – вид ротора; 3 – магнітотверда втулка; 4 – немагнітна втулка; г, д, е – синхронні реактивні: 1 – короткозамкнена клітка; 2 – пластина осердя; 3 – вал ротора; 4 – алюміній

У двигунів різних типів характер змінення швидкості обертання ротора різний залежно від умов навантаження (механічна характеристика). Міру цієї залежності називають ступенем жорсткості механічної характеристики, яка показує, наскільки змінюється швидкість обертання у разі змінення моменту навантаження на значення $1,9,8 \cdot 10^{-3}$ Нм (1г).

Абсолютно жорсткою називають характеристику, для якої у разі змінення навантаження на валу *швидкість* залишається *незмінною* (рис. 8.2, графік 1); *жорстка характеристика* – це така, коли у разі змінення навантаження на валу *швидкість* змінюється в *невеликих межах*; *м'яка характеристика* – це така, коли у разі невеликого змінення навантаження на валу *швидкість* *обертання суттєво змінюється*.

Асинхронні двигуни з короткозамкнутою обмоткою ротора мають *жорстку механічну характеристику*. Швидкість асинхронного двигуна у разі збільшення навантаження від нуля до найбільшого значення після досягнення максимального обертового моменту дещо знижується. Ця частина механічної характеристики є *стійкою*. Момент (обертальний момент), під час пуску двигуна, коли частота обертання $n = 0$, а ковзання $s = 1$ називають *пусковим* або *початковим моментом*.

Режим двигуна в момент пуску називають *режимом короткого замикання*.

Частина характеристики від максимального моменту до початкового (пускового) моменту, коли швидкість наближається до нуля, є *нестійкою* (рис. 8.2, графік 2).

У стійкій частині характеристики обертальний момент зростає залежно від збільшення ковзання, в нестійкій – зменшується. Максимальний обертальний момент є межею між стійким і нестійким режимами роботи двигуна і його називають іноді *перекидним моментом*. Момент, відповідний номінальному навантаженню, називають *номінальним*. Відношення максимального моменту до номінального називають *перевантажувальною здатністю* двигуна, значення якої для асинхронних двигунів становить 1,5...2,5. Обертальний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги електроживлення, тому у разі зменшення напруги мережі електроживлення *момент навантаження* може стати більше максимального обертового моменту двигуна, двигун зупиниться, настає режим короткого замикання. У разі зменшення перевантажувальної здатності менше одиниці, двигун не зможе працювати на номінальне навантаження.

М'які механічні характеристики (рис. 8.2, графіки 4 та 5) мають двигуни з суцільним ротором з чавуну або сталі або з ротором типу «біляче колесо» з великим активним опором. Двигуни з м'якими характеристиками встановлено у підмотувальних вузлах магнітофонів. У разі функціонування у режимі обертання в прямому напрямку (функція підмотки) такі двигуни мають великий пусковий момент. У разі збільшення швидкості обертання момент двигуна зменшується і навпаки, що сприяє підтриманню певного натягнення стрічки під час змінення радіусу рулону.

Відомо, що у разі сталого значення лінійної швидкості руху носія радіус бобіни намотування змінюється за гіперболічним законом, тому і обертальний момент двигуна також має змінюватись за таким законом.

У разі роботи двигуна в режимі *противвімкнення* (функція гальмування) гальмівний момент на цій ділянці механічної характеристики також має змінюватись за гіперболічним законом.

Противвімкнення – це гальмівний режим, під час якого ротор двигуна внаслідок зовнішніх сил обертається у бік, *протилежний* напрямку обертання

двигуна в рушійному режимі. Для обмеження струму вводять великий додатковий опір в якрне коло двигуна.

У стрічко-протяжних механізмах магнітофонів двигуни бічних вузлів зв'язані між собою носієм (магнітною стрічкою) намотаною на касети.

У механізмах кінематографії, таких як стаціонарні кінопроектори, синхронні кінознімальні камери, кінопроявна і кінокопіювальна техніка, застосовують *асинхронні короткозамкнені* електродвигуни змінного струму з внутрішнім ротором (зазвичай трифазного живлення), що споживають потужність від 50 Вт до 400 Вт (кінопроявни до 1 кВт і вище).

Промисловість виробляє асинхронні електродвигуни різних серій на частоту 50 Гц в діапазоні потужностей від 1 Вт до 1000 Вт.

Асинхронні двигуни «наскрізної» конструкції (рис. 8.5) з'явилися порівняно недавно та набули значного поширення. Особливістю їх конструкції є те, що діаметр розточування під підшипники (у підшипникових щитах) дорівнює внутрішньому діаметру розточування статора. Це дозволяє остаточно обробляти (шліфувати) внутрішню поверхню статора і отворів для підшипників після складання підшипникових щитів. З метою кращого електричного захисту обмотку часто заливають (до шліфування) разом з пакетом статора епоксидною смолою.

Розглянута конструкція двигуна дозволяє зменшити величину повітряного проміжку між статором і ротором до 0,03...0,05 мм. Зменшення зазору сприяє зниженню сили струму намагнічування, зменшенню втрат в обмотці статора, а отже, поліпшенню таких параметрів як $\cos\phi$, ККД, коефіцієнти використання двигуна.

З метою зменшити активний опір ротора, щоб забезпечити потрібне значення ковзання, у цих двигунів часто застосовують відкриті (прямокутні) пази на роторі, що забезпечують зменшення магнітного потоку розсіяння від його обмотки.

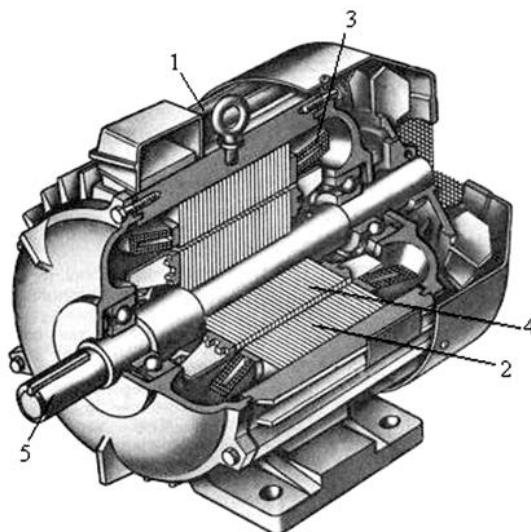


Рисунок 8.5. Асинхронний двигун «наскрізної» конструкції: 1 – корпус ЕД, 2 – пластини осердя статора, 3 – обмотка статора, 4 – пластини осердя ротора, 5 – вал

Позитивними властивостями двигунів «наскрізної» конструкції є:

- більші значення $\cos\varphi$, ККД;
- підвищена надійність у разі механічних і кліматичних впливів (у порівнянні з двигунами з порожнистим немагнітним ротором);
- менші маса і габарити в певних діапазонах номінальних потужностей.

Недоліками двигунів із звичайним короткозамкненим ротором є:

- порівняно великий момент інерції ротора, що для ряду двигунів призводить до збільшення електромеханічної сталої часу;
- порівняно велике значення пускового моменту, що зумовлене масою ротора, наявністю радіальних сил одностороннього магнітного тяжіння, які діють на ротор відносно статора унаслідок того, що ротор феромагнітний;
- наявність вищих гармонік поля унаслідок зубчастої конструкції та відкритих пазів ротора.

8.1.2. Електродвигуни постійного струму колекторні

Електродвигуни постійного струму широко застосовують у малогабаритній, бортовій, репортажній і спеціальній АРІ.

Електродвигуни *постійного струму* розподіляють на *колекторні*, *безколекторні* і *безконтактні*. До безколекторних відносять ЕД з комутаторами на магнітокерованих контактах.

Для *колекторних* ЕД характерними є: економічність, великий пусковий момент, мала електромеханічна стала часу, можливість отримати кілька стабілізованих частот обертання порівняно простими способами, а також невеликі маса і габаритні розміри, що дає можливість використовувати ЕД цього типу як в репортерських, так і у високоякісних побутових і професійних АВЗЗ. Основний *недолік колекторних* ЕД – наявність *ковзного контакту* в щітково-колекторному вузлі, який є джерелом *акустичного шуму* і *радіозавад*. Утворений унаслідок зносу щіток вугільний пил проникає в підшипники і порушує їх нормальну роботу, що призводить до зниження надійності та терміну служби.

Колекторні ЕД зі збудженням від *постійних магнітів* застосовують в одно- і двомоторних стрічко-протяжних механізмах касетних магнітофонів різного класу, в тримоторних стрічко-протяжних механізмах для приводу приводного валу, як підмотувальні у касетних магнітофонах, а також в репортерських відеомагнітофонах для приводу блоку оберткових головок. Електродвигуни з послідовним збудженням використовують переважно в професійній апаратурі для приводу рулонних накопичувачів.

Малопотужні колекторні ЕД унаслідок відносно великого опору обмотки якоря можна безпосередньо підключати до джерела електроживлення (зазвичай, 6...27 В). Розсіювана в якорі потужність під час пуску невелика оскільки час розгону не перевищує 0,1...2 с, кратність пускового струму сягає 3...10. Механічна характеристика $n = f(M)$ для ЕД із збудженням від постійних магнітів за відсутності насичення має вигляд прямої лінії. Струм якоря цих ЕД в

усталеному режимі залежить тільки від моменту на валу, що часто використовують для вимірювання моментів опору різних вузлів СПМ. Частоту обертання ЕД з *постійними магнітами* регулюють змінною напругою живлення або додатковим опором в електричному колі ротора.

Конструкція колекторних ЕД може бути звичайного виконання з *гладким* або *немагнітним* ротором. Електродвигуни звичайної конструкції складають з ротора та індуктора у вигляді зовнішнього кільцевого постійного магніту, намагніченого по діаметру, який кріплять у корпусі з алюмінієвого сплаву. Магнітотверді ферити часто, особливо в закордонних ЕД для касетних магнітофонів, кріплять у сталевому корпусі. Виконання корпусу у формі чашки сприяє кращому центруванню якоря під час складання.

Осердя якоря у разі обертання в магнітному полі безперервно перемагнічується, тому для зниження втрат від вихрових струмів його набирають зі штампованих пластин електротехнічної сталі завтовшки 0,35...0,5 мм. Обмотка проста, у вигляді петлі.

У ЕД з трьома зубцями кожна секція намотана на зубець. Колектори в таких ЕД роблять з міді з присадкою кадмію, з нейзильберу, а в закордонних ЕД – із золота і його сплавів. Щітки цих ЕД роблять з благородних металів і їх сплавів.

Щітковий контакт типу метал-метал з благородних сплавів дозволяє отримати відносно стабільність перехідного опору щітка-колектор, що є вирішальним чинником для стабілізації швидкості ЕД за допомогою параметричних схем, які застосовують в касетних батарейних магнітофонах. З метою зниження акустичного шуму в ЕД цього класу застосовують підшипники ковзання з пористих матеріалів, просочених мастилом. Підшипники виготовляють методами порошкової металургії. Точний отвір для валу формують під час виготовлення підшипника і надалі, після установа, оброблення не здійснюють, щоб не закрити мікропори.

8.1.3. Безколекторні електродвигуни постійного струму

Розглянуті вище колекторні малогабаритні електродвигуни, що широко застосовують у механізмах АРІ мають високий ККД, великий пусковий момент, хороші регульовальні характеристики. Проте мають також істотні недоліки: низька надійність, високий рівень радіозавад, щітковий пил тощо, які обумовлені, в основному, наявністю *щітково-колекторного вузла* в конструкції двигунів.

В останні десятиліття успіхи мікроелектроніки забезпечили розроблення та широке впровадження двигунів нового покоління – *безколекторних електродвигунів постійного струму*, без яких вже неможливі механізми побутових і професійних магнітофонів і відеоманітофонів, приймально-передавальні стрічко-протяжні вузли, блоки обертових головок, рушійні механізми дисків для персональних комп'ютерів, CD та DVD пристрої запису-відтворення (привід обертання жорстких, гнучких і оптичних дисків CD та DVD) тощо.

Широке застосування безколекторних електродвигунів обумовлено тим, що в них усунуто недоліки, властиві щітковим конструкціям. Безколекторний двигун постійного струму (БДПС) містить три *функціональні елементи*. Перший елемент – *виконавчий*, у вигляді багатофазного синхронного двигуна з дисковим або кільцевим постійним магнітом (ЕД), другий – *керований комутатор*, реалізований на друкованій платі з безконтактними перемикальними приладами (транзистори, тиристори тощо), третій – *датчик положення ротора* двигуна відносно фаз обмоток статора, який визначає момент і послідовність комутації обмоток.

Конструкція безколекторного двигуна постійного струму (рис. 8.6) містить такі складальні одиниці: ротор *1*, статор *2* з друкованою платою керованого комутатора *3* і підшипниковий вузол *4* з валом приводу, наприклад, дискового носія інформації (диска).

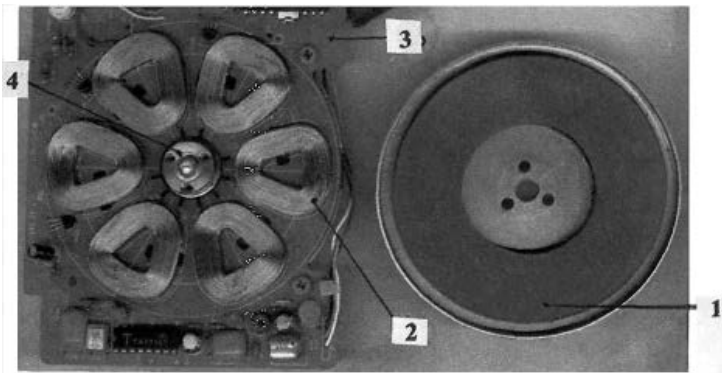


Рисунок 8.6. Конструкція БДПС, вбудованого в дисковий механізм АРІ

Кінематична схема двигуна містить ротор, наприклад, у вигляді кільця з фериту барію з багатьма полюсами (4...8 полюсів N-S), який жорстко сполучений з привідним валом. Ротор може бути *явно полюсним* (полюси механічно відокремлені) або *неявно полюсний* (диск конструктивно оформлено як суцільне кільце), що є найбільш поширеним. Кільце постійного магніту (ротор) розміщують в магнітопроводі чашкоподібної форми. Магнітопровід жорстко з'єднує приводний вал з ротором. Вище магнітного ротора з невеликим торцевим зазором близько 0,3...0,5 мм розміщують секторні обмотки статора (зазвичай, їх кількість дорівнює кількості полюсів ротора). Секторні обмотки розпаюють на друкованій платі, де також розташовують всі мікросхеми, транзистори, резистори, конденсатори та інші елементи керованого комутатора. Плату комутатора жорстко кріплять на листовому магнітопроводі, який електрично від неї ізолювано. На магнітопроводі також жорстко кріплять підшипниковий вузол привідного валу. Таким чином, ми розглянули просторове розташування двох вищезазваних функціональних елементів один відносно іншого. Датчики положення ротора, зазвичай, датчики Хола (потокочутливі магнітні головки), які

в кількості трьох штук розташовують у вікнах секторних обмоток статора, а елементами, що з ними взаємодіють, є полюси постійних магнітів (N-S) ротора.

У деяких двигунах, наприклад, циліндричних, датчиком положення ротора є пара торцевих магнітних кілець (багатополюсні), розміщених концентрично як циліндричний магніт, і друкована обмотка індуктивності, розміщена на торці статора.

З'ясуємо принцип функціонування *безколекторних двигунів постійного струму*. Відомо, що різнополярні полюси постійних магнітів притягуються (північний N до південного S), а однополярні (N щодо N або S щодо S) – відштовхуються. Якщо в попарно-протилежні секторні обмотки статора подати від керованого комутатора постійну напругу такого напрямку струму, що магнітний потік спрямований до торця ротора буде протилежним за напрямком до магнітного поля постійних магнітів (однойменні полюси), тоді рухомий ротор обов'язково обернеться на одну поділку секторної обмотки.

Конструктивно БДПС може бути виготовлено функціонально закінченим електромеханічним блоком або вбудованим у будь-який механізм АРІ, наприклад, у блок обертових головок, приводний вузол, приймально-подавальний стрічковий вузол, привід дискових носіїв тощо.

Найбільшого поширення в механізмах АРІ набули конструкції вбудованих БДПС, зважаючи на значне спрощення в такому разі усієї конструкції і її масо-габаритних показників.

Основним магнітотвердим матеріалом для постійних магнітів електродвигунів, від яких в основному залежить обертальний момент двигуна, є:

– *рідкоземельні магніти* (РЗМ) на основі *самарій-кобальту* SmCo_3 (точка Кюрі 724°C), $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (точка Кюрі 917°C);

– *магніти постійні*, спечені з *металевих порошків* (Fe, Al, Co, Ni), наприклад, ЮНДК 35 Т5ВА;

– *задовільно пресовані і спечені з порошків барієві ферити* ($\text{BaO}_6 \text{Fe}_2\text{O}_3$).

У рідкоземельних постійних магнітів магнітна енергія (основний показник магнітів) в 2...3 рази перевищує значення цього показника для спечених постійних магнітів і в 7...8 разів – для пресованих барієвих магнітів. Приблизно в такому ж співвідношенні й їхня ціна.

Конструкції електродвигунів з *радіальним розташуванням ротора* відрізняються від наведених вище тим, що активну частину статора з його обертовим магнітним полем орієнтовано уздовж радіуса кола статора і перпендикулярно геометричній осі обертання валу ротора. Ротор розміщено ззовні статора, що забезпечує збільшення обертового моменту двигуна у кілька разів порівняно з конструкціями з внутрішнім ротором.

Електродвигуни з радіальним розташуванням ротора мають дещо менший зовнішній діаметр, але більшу висоту вздовж валу і значно складнішу технологію виготовлення обмоток статора, ніж у двигунів торцевого типу.

Параметри механічних характеристик (початковий пусковий момент, максимальний обертовий момент та їх відношення до номінального) обов'язково

регламентовано у стандартах або технічних умовах на конкретні види або типи двигунів.

Номінальний обертальний момент, $M_{\text{ном}}$, визначають за формулою

$$M_{\text{ном}} = \frac{30P_{\text{ном}}}{\pi n_{\text{ном}}}, \quad (8.1)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт;

$n_{\text{ном}}$ – номінальна частота обертання, хв^{-1} .

Статор безколекторних двигунів постійного струму може мати радіально розташовані обмотки, які розміщують на радіальних перемичках з листової електротехнічної магнітом'якої сталі (товщина 0,35...0,5 мм). Електромагнітний потік між секторами полюсів, спрямований радіально і перпендикулярно до осі двигуна (двигун називають радіальним) і циліндричної внутрішньої поверхні ротора. Намотування обмоток статора в цих електродвигунах є вкрай нетехнологічним, а двигун належить до класичної «залізної» (з металевими компонентами) конструкції. Кількість полюсів може сягати 18.

Статор *торцевих* двигунів має секторні пласкі і технологічні обмотки, які закріплюють паянням на друкованій платі електронного комутатора. Електромагнітний потік полюсів статора має осьовий (торцевий) напрям відносно площини обмоток і паралельний осі електродвигуна. Такі двигуни називають торцевими, кількість полюсів у них набагато менша, ніж у радіальних (6...8 шт.). Крім того, статор не має металу, тому двигун відносять до «беззалізного» типу.

Для АРІ, де необхідна максимальна простота і технологічність, зазвичай, віддають перевагу торцевим «беззалізним» електродвигунам.

Для багатодискових (пакетних) накопичувачів 3...8 шт. доцільно застосовувати електродвигуни *радіальні*, зовнішня циліндрична поверхня ротора є центрувальною для магнітних жорстких дисків. Вона має торцевий майданчик для установки пакету дисків, які зверху притискають пласкою кришкою з гвинтами. Вбудований в пакет дисків ротор обертається на прецизійних шарикопідшипниках, які розміщено внутрішніми кільцями на нерухомій осі, де також встановлено залізний шихтований статор. Вісь запресовано в алюмінієвий фланець з кріпильними гвинтами. Електронний комутатор розміщено частково на кільці усередині ротора. Магнітотверду феритову чашку розміщено усередині магнітом'якого ротора.

8.2. Види рухів в механізмах і опори рухомих елементів

Загальні питання конструювання механізмів АРІ охоплюють вибір тіл руху і опор їх переміщення, вибір допусків і посадок для деталей і вузлів, вибір конструктивних і технологічних баз, вибір раціональних матеріалів (металевих, пластмасових), а також вибір покриттів (гальванічних, лакофарбних тощо), що

забезпечує надійну роботу механізмів у заданих умовах експлуатації, потребують знання основних принципів взаємозамінності.

Головний принцип конструювання механізмів полягає в тому, щоб на підґрунті відомого, творчо створювати принципово нове і прогресивне.

Тіла руху і опори їх переміщення

Підкреслимо, що всі механізми і різні системи передавання руху містять обов'язково деяке *тіло циліндричної, конічної, прямокутної* або іншої форми (важіль), *що обертається* або *прямолінійно переміщується* в своїх опорах. Рухоме тіло з опорою складає елементарну *кінематичну пару*. Третім елементом, що доповнює кінематичну пару обов'язково є *нерухома деталь* у вигляді *стійки* (корпус), відносно якої відбувається взаємодія перших двох елементів. Наприклад, приводний циліндричний вал, що обертається в своїх опорах (підшипниках ковзання або кочення), розміщених у корпусі, транспортує магнітну стрічку з постійною лінійною швидкістю v , м/с. У цьому прикладі наявне циліндричне тіло, його опори (дві) і *нерухомий несний корпус*. Рух основного елементу механізму циліндричного валу – *обертальний*. Другий приклад: вакуумна камера прямокутної форми з радіусною поверхнею переміщується у призматичних напрямних прямолінійно і підводить відеострічку до обертових відеоголовок (чотирьох) й створює необхідний механічний контакт рухомої стрічки і відеоголовки. Опорами призматичної напрямної є чотири кульки від шарикопідшипника, тобто напрямну систему зроблено на опорах кочення. Рух камери – *прямолінійний зворотно-поступальний*. Кульки також взаємодіють з нерухомим Ш-подібним корпусом, тобто наявні ті ж три елементи механізму.

Крім того є так звані комбіновані механізми, в яких органічно поєднано в тому або іншому співвідношенні *два види руху* одночасно: *обертальний рух*, наприклад, ходового гвинта і *поступальний рух* рухомої губки, наприклад, фрезерних лещат. Станина і нерухома губка є корпусом механізму лещат. Ходовий гвинт має свою опору обертання у вигляді втулок і спеціальної різьбової гайки, а рухома губка має свою – напрямний призматичний елемент прямолінійного руху, зроблений як виступ корпусу. До подібних механізмів відносять мікрометри тощо.

У багатьох дискових механізмах для електромагнітної і лазерно-оптичної реєстрації також застосовують комбіновані види рухів: *обертальний* від приводного електродвигуна ходового гвинта з великим кроком стрічкової різьби і *поступальний рух* магнітних або лазерно-оптичної головок.

За описаною вище кінематичною схемою виготовляють усі пристрої транспортування стрічкових носіїв інформації (магнітної стрічки, кінострічки, телеграфної паперової стрічки).

Приводний вал має одну або більше (до 10 значень) стандартні високостабільні кутові швидкості обертання зумовлені електродвигуном *безпосередньо* (прямий привод) або через механічну передачу (фрикційну, роликову або гнуч-

ким ременем) – *опосередкований* привод. Внаслідок фрикційного зв'язку з притисним обгумованим роликком (роликама) вал транспортує магнітну стрічку (МС) з високостабільними лінійними швидкостями v , м/с.

8.2.1. Тіла обертання та їх опори

Широке розповсюдження в АРІ мають механізми, які використовують тіла обертання.

До них відносять: *приводні вали* для транспортування стрічкового носія інформації, блоки обертальних головок (вузлів), для відеомагнітофонів похило і поперечно-рядкового запису, всі *електродвигуни* приводу вузлів стрічко-протяжного механізму і рушійних механізмів дисків, *осі роликів*, що направляють стрічку, вали приймально-подавальних вузлів АВЗЗ, *осі всіляких важелів*, *осі притискових обгумованих роликів*, *осі важелів* позиціонування рухомих магнітних або оптичних головок дискових механізмів тощо.

Треба чітко розрізнити, що *вал* – це елемент циліндричної або іншої форми, який передає обов'язково *обертальний момент*, а *вісь*, навіть такої ж форми хоч і обертається, але *не передає обертального моменту*. Вісь може бути *нерухомою* або *обертатись*, але завжди є пасивним елементом механізму, тобто, не має обертального моменту. Вісь може бути також і *корпусним елементом* несного механізму. Вал завжди обертається (безперервно або переривчасто, кроково тощо) і завжди або сам має обертальний момент (вал електродвигунів, пружинних двигунів), або передає його від інших елементів обертання. Вали або осі розрізняють за *формою* – *циліндричні суцільні і порожнисті, чашоподібні, конусні, колінчаті, зубчасті, гладкі* або з *накаткою, різьбові*, а також за *технологією виготовлення* – *цілісні або складені* (запресовані).

Суцільні приводні вали виготовляють, зазвичай, з однієї металевої заготовки (прутка) порівняно невеликого діаметру (діаметр робочих поверхонь до 30 мм), порожнисті – з двох заготовок: великого (насадка на приводний вал) і малого (приводний вал) діаметрів (діаметр робочих поверхонь від 30 мм до 150 мм).

Суцільні приводні вали за *формою* можуть бути *гладкими або східчастими*, за *робочою поверхнею* – *металевими* або *обгумованими*, з *насадками* малого діаметру і *без них*.

У разі поверхневого контакту стрічки з приводним валом для збільшення зчеплення робочу поверхню покривають поліуретановою сумішшю, силіконовою гумою і іншими матеріалами з *великим коефіцієнтом тертя*.

Для *дуже прецизійних приводних валів* поля допусків розбивають на шість груп відповідно до полів допусків на внутрішні і зовнішні кільця шарикопідшипників і внутрішні отвори корпусів. Зазор у з'єднаннях вал – шарикопідшипник і підшипник – корпус не повинен перевищувати 1...4 мкм для всіх шести груп. Шорсткість поверхонь валу: циліндричних – не більше 0,125...0,160 мкм, торцевих буртиків – не більше 0,40...0,50 мкм. *Буртик* – невеликий виступ спеціального призначення вздовж або поперек робочої поверхні.

Операція *механічного полірування* робочих поверхонь валів є *неприпустимою*, оскільки може призвести до спотворення геометричної форми.

Для транспортування магнітної перфорованої стрічки застосовують *зубчасті барабани*, які залежно від характеру зчеплення функціонально бувають такими, що протягують, стримують або – комбінованими. Протягувальні барабани – зубчасті. Напрямок обертання таких барабанів протилежний напрямку зусилля, прикладеного стрічкою до зубів барабана в робочій зоні. Затримувальні – барабани, у яких зазначені напрямки співпадають. У протягувальних барабанів зубці входять в контакт з передніми краями перфорації, тобто з краями, спрямованими у бік руху стрічки.

У затримувальних барабанів – навпаки, зубці входять в контакт із задніми краями перфорації, тобто, з краями, спрямованими у протилежний відносно руху стрічки бік. Комбіновані барабани – це такі, у яких частина зубців (3...4 зубці) працює як у протягувальних, а частина діаметрально протилежних зубців – як у затримувальних. Барабани виготовляють для магнітної стрічки шириною 16 мм і 35 мм.

У деяких приводних вузлах для поліпшення зчеплення стрічки з валом його робочу поверхню, що контактує зі стрічкою, роблять шорсткою методом ультразвукового або електроіскрового оброблення. За такого оброблення розміри валу залишаються незмінними, тому здійснюють його в останню чергу.

Схеми встановлення опор обертальних валів (осей)

Під час розроблення механізмів АРІ важливим є розміщення опор обертання валів або осей і електроприводу вузлів обертання. Розрізняють схеми механізмів залежно від наявності електродвигуна: *активні* (схема механізму, що має власний електродвигун) і *пасивні* (схема механізму, що не має власного електродвигуна).

Спочатку опишемо і пояснимо схему розміщення опор відносно валів для пасивних механізмів, де їх різноманітність найбільша, далі – для механізмів активних. У приводних вузлах СПМ АВ33 застосовують опори типу *двоопорної балки*. Розміщують опори валів по-різному відносно маховика – у вигляді прямої та зворотної консолі (рис. 8.7).

У разі наявності поверхневого контакту стрічки з робочим вильотом валу зусилля $R = (0,1...0,3) Q_1$, тому цю силу можна не враховувати. Під час виникнення максимального моменту вигину прогин двоопорної балки пропорційний третьому степеню відстані (прольоту) між опорами L (рис. 8.7а). Отже, зближення опор є ефективним засобом підвищення жорсткості, хоча і дещо знижує точність фіксації валу відносно посадочної базової поверхні 4 корпусу приводного несного вузла. Наведені схеми навантаження застосовують в СПМ побутових АВ33. Іноді з конструктивних міркувань не можна зменшити проліт між опорами, а прогин може досягати значної величини. Тоді жорсткість системи збільшують введенням третьої проміжної опори (рис. 8.7в). Виготовлення та-

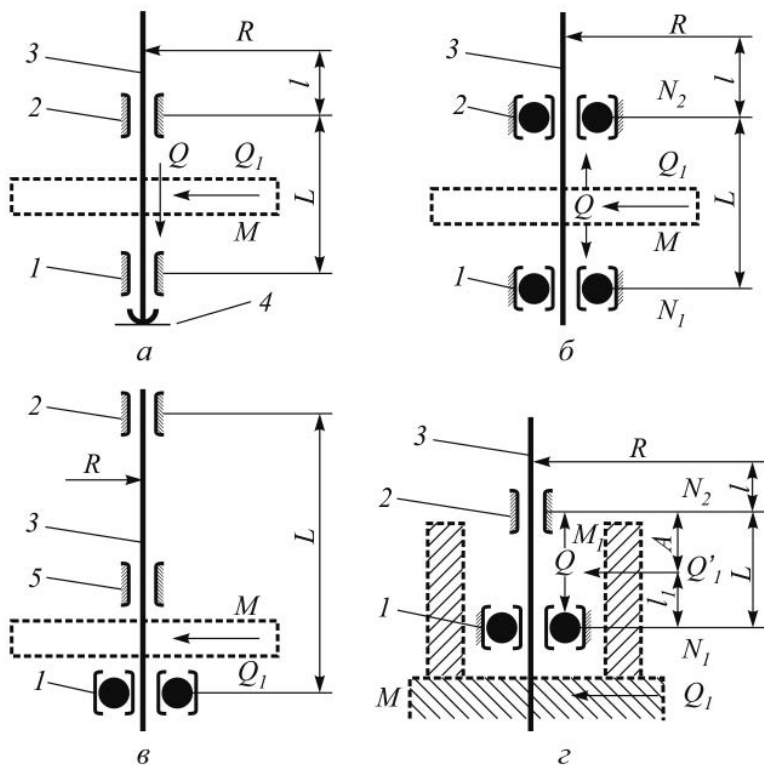


Рисунок 8.7. Схеми установки опор обертання приводних валів: а, б – двоопорна балка, в – триопорна балка, з – з консольним розташуванням опор (1, 2, 5 – опори, 3 – вал, 4 – посадочна базова поверхня корпусу)

ких конструкцій значно складніше, оскільки необхідне точне оброблення трьох опорних поверхонь з високою точністю.

У разі консольного розташування опор конструкції прості і компактні. Опори приводного валу розташовані в одній корпусній деталі, тому посадочні отвори під опори можна точно обробити з дуже високою точністю. Для такої конструкції $L > (2...3) l$ (рис. 8.7з). У разі більшого значення відношення L / l можна забезпечити точнішу радіальну фіксацію приводного валу (менше відхилення) відносно посадочної базової поверхні несного корпусу приводного вузла.

У схемі двоопорної балки реакції N_1 і N_2 на навантаження Q на обидві опори 1 і 2 (рис. 8.7б) розподілені приблизно рівномірно і дорівнюють $0,5 Q_1$. У схемі прямої консолі з дисковим маховиком M (рис. 8.7в) в разі $L / l > 2$ навантаження (реакції) N_1 і N_2 на опори 1 і 2 практично набувають постійного значення, причому N_1 наближається за величиною до ваги маховика Q_1 , а N_2 – до зусилля R .

У приводних вузлах застосовують схему розміщення опор у вигляді зворотної консолі (рис. 8.7з), коли маховику надають чашоподібну форму. Навантаження Q обумовлене масою маховика в цьому випадку діє в прольоті між

опорами 1 і 2. Навантаження L і N на опору 1 і 2 мають мінімальне значення $0,5Q$; в разі $L/l = 0,5$, тобто, коли дія сили зосереджена посередині прольоту між опорами. Вказані навантаження на опори 1 і 2 в схемі зі зворотною консоллю мають максимальне значення, що дорівнює Q_1 , якщо $L/l = 1$, тобто дія сили знаходиться над серединою опори 1. Дію сили R на робочий виліт приводного валу 3 необхідно враховувати, якщо застосовується лінійний контакт стрічки з валом, тобто, коли вона може скласти $0,3...1,5 Q_i$. У такому разі перші дві схеми відносно сили R визначають як консольні, а відносно Q – як схему з двоопорною балкою. Крім того, у всіх схемах розміщення опор необхідно враховувати дію сили *натягнення приводного пасу* або обгумованого ролика, яка залежно від напрямку збільшує або зменшує сумарну дію на опори.

Опори обертових валів і осей

Напрямні опори обертального руху встановлюють під час складання, і надалі їх положення зберігається у процесі експлуатації обертового вузла. Часто напрямні елементи обертального руху називають *опорами* або *підшипниками*.

Точність напрямних елементів обертального руху визначає точність положення осі деталі (вузла), що обертається, відносно заданих баз. Точністю обертання визначається також радіальним та осьовим биттям деталі.

У напрямних системах обертального руху *охоплювану* деталь, зазвичай, називають *цапфою*, а ту, що *охоплює* – *підшипником* або *втулкою*.

Опори обертових валів і осей класифікують за *принципом роботи* на підшипники *ковзання* і *кочення*, за *формою поверхні* – на *циліндричні*, *конічні*, *сферичні*, за *типом навантаження* – на *радіальні*, *упорні* (осьові) і *радіально-упорні*, за *конструктивними* особливостями – на *стандартні* і *спеціальні*.

Відмінності опор обертання впливають з принципу їх функціонування, тому визначимо ці особливості.

Опори ковзання валів і осей функціонують за наявності обертових цапф (опорних поверхонь валу) з нерухомими поверхнями опор – підшипників ковзання. Взаємодія цапфи, наприклад, циліндричної форми, відбувається внаслідок ковзання її поверхні по такій же внутрішній циліндричній поверхні підшипника (втулки) за наявності між ними невеликого проміжку (зазору) $2...4$ мкм, тобто, цим опорам *властиве тертя і ковзання*.

Розглянемо різні варіанти виготовлення опор ковзання, що застосовують в механізмах АРІ, а також наведемо властиві їм переваги та недоліки.

Найбільш поширеними опорами ковзання для обертального руху є *циліндричні*, *конічні* та *опори на кернах*. Ці опори можуть сприймати радіальну, осьову або радіально-осьову сили навантаження.

У порівнянні з іншими видами опор ковзання циліндричні опори можуть функціонувати зі швидкостями обертання, що змінюються у великому діапазоні швидкостей, а також з навантаженнями, що змінюються у широкому діапазоні, як в режимі *рідинного тертя*, так і в режимі *тертя без мастила*.

Особливості циліндричних опор, навантажених осьовими силами

Форма і розміри підшипників залежать від навантаження, швидкості відносного ковзання і моменту допустимого тертя.

Суцільна *пласка п'ята* сприймає значні осьові навантаження Q і функціонує за малих швидкостей ковзання. *Упорна п'ята* – елемент конструкції деталі або вузла, що упирається в стінку корпусу і унеможливорює переміщення деталі (валу) в напрямку опорної поверхні. Основним недоліком суцільної п'яти є нерівномірний знос її торця через великий перепад швидкостей на його поверхні, що призводить до збільшення тиску в середній зоні. Тому, у разі значних швидкостей ковзання використовують *кільцеву п'яту*, знос робочої поверхні якої більш рівномірний.

У багатьох приладах з невеликими осьовими силами навантаження для зменшення тертя застосовують *підп'ятник*, у якого робоча поверхня цапфи є частиною сфери.

Опори обертових валів мають забезпечувати *точність і плавність обертання й мінімальний момент тертя*. Тому, під час їх конструювання та реалізації необхідно забезпечити мінімальні *зазори в сполученні вал – підшипник, стійкість до зношеності поверхні тертя, мінімальні акустичні шуми і вібрації у процесі експлуатації*. Опори ковзання, які натепер застосовують в приводних вузлах, можуть бути нероз'ємними (не самовстановлюваними) і роз'ємними (самовстановлюваними).

Конструктивно нероз'ємні циліндричні підшипники формують, зазвичай, або під час виготовлення несного корпусу, або запресовують в корпус окремо.

У першому випадку досягають меншої неспівосності двох циліндричних опор, велику жорсткість конструкції, спрощення технології виготовлення, але в цьому випадку не можливо здійснити заміну однієї із зношених опор. Підшипники мають остаточно оброблену посадочну поверхню і заздалегідь оброблений (з припуском) отвір B . Після запресовування або заформовки литтям підшипників в несний корпус остаточно обробляють отвори під цапфи валу. Неспівосність отворів може складати не більше 0,003 мм.

У другому випадку неспівосність двох підшипників дещо більша, але за такої конструкції можлива заміна будь-якої зі зношених опор. Для цього під час виготовлення підшипників ковзання задають радіальне биття встановлювальної поверхні щодо номінального отвору $\Delta < 0,003$ мм. Крім того, необхідно враховувати зменшення діаметру отвору на величину натягу під час запресування підшипника в несний корпус.

Конструктивно підшипники можуть мати наскрізний внутрішній отвір або закритий отвір, коли в торці розміщують осьову опору типу сталеві кульки з встановлювальним гвинтом.

Роз'ємні (самовстановлювані) підшипники мають зовнішню посадочну поверхню у вигляді сфери або напівсфери. Їх застосовують в СПМ побутових магнітофонів. Оскільки сполучення сферичної поверхні підшипника з такою

ж поверхнею гнізда технологічно виконувати складно, то сферичну поверхню гнізда замінюють конічною. Сполучення підшипника і цапфи валу здійснюють з посадкою (див. розділ 7), що забезпечує гарантійний зазор 5...20 мкм для валів діаметром від 6 мм до 10 мм. У деяких вузлах застосовують сполучення з посадкою руху, гарантійним зазором 5...30 мкм для валів діаметром від 6 мм до 10 мм. Гарантійний зазор для особливо точних вузлів привідного валу в сполученні підшипника і цапфи роблять 3...6 мкм із застосуванням відповідних посадок.

Опори кочення (підшипники кочення)

Підшипники кочення – це опори, що використовують елементи кочення (кульки або ролики). Під час функціонування таких опор протидія руху виникає внаслідок тертя кочення. Підшипник кочення складено з внутрішнього кільця, зовнішнього кільця, тіл кочення (кульок або роликів) і сепаратора, розподільного і напрямного тіла кочення. Підшипникові кільця і тіла кочення виготовляють з хромистих сталей марок ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15Гс і хромо-нікелевих сталей марок 12ХНЗА, 12Х2Н4А тощо. Виготовлені деталі термічно обробляють до твердості HRC 62...65, потім шліфують й ретельно полірують. Сепаратори виготовляють з листової сталі (штамповані сепаратори), бронзи Бр. АЖМц 10-3-1Д, алюмінієвих сплавів (литі сепаратори), текстоліту.

Твердість сталей визначають за методикою запропонованою Стенлі П. Роквелом (1886-1940).

Випробування на твердість *за Роквелом* — це метод оцінювання твердості матеріалів, що базується на вимірюванні глибини проникнення твердого наконечника (індентора) під дією заданого навантаження у досліджуваній матеріал. Твердість потрібно вимірювати не менш ніж у трьох точках. Для обчислення беруть усереднене значення результатів другого і третього вимірювань.

Існує декілька альтернативних шкал, з яких найчастіше використовують шкали В і С. Для позначення твердості, визначеної за методом Роквела, використовують символ HR, до якого додають літеру, що вказує на шкалу за якою зроблено випробування (HRA, HRB, HRC тощо). Шкали жорсткості наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1. Шкали жорсткості за методом Роквела

Назва	Шкали	Сила	Індентор	Використання
A	HRA	60 кгс	120° алмазний конус	Інструментальні сталі
B	HRB	100 кгс	1,58 мм сталева кулька	Алюмінієві сплави, бронза, м'які сталі
C	HRC	150 кгс	120° алмазний конус	Загартовані сталі
D	HRD	100 кгс	120° алмазний конус	Загартовані сталі
E	HRE	100 кгс	3,16 мм сталева кулька	Антифрикційні металеві сплави
F	HRF	60 кгс	1,58 мм сталева кулька	Сплави кольорових металів
G	HRG	150 кгс	1,58 мм сталева кулька сталева	Фосфористі бронзи
H	HRN	60 кгс	1,58 мм сталева кулька	М'які метали низької однорідності, ливарні сплави
K	HRT	150 кгс	1,58 мм сталева кулька	М'які метали низької однорідності, ливарні сплави

Для визначення твердості у тонких шарах (плівках) використовують шкали N (алмазний конус), T (сталева кулька 1,58 мм) й W (сталева кулька 3,16 мм) з навантаженнями 15, 30 і 45 кгс кожна.

Підшипники кочення стандартизовано, їх виготовляють централізовано у масовому виробництві. Вони є основними видами опор в різних машинах. Вітчизняна підшипникова промисловість випускає підшипники розміром від 3,5 мм до 2,6 м за зовнішнім діаметром і масою від 0,5 г до 3,5 т.

Переваги підшипників кочення порівняно з підшипниками ковзання: малі втрати на тертя в пускові періоди; підвищена надійність і пожежна безпека; знижена витрата змащувальних матеріалів; відносно низька ціна підшипників масових стандартних типів; простота обслуговування.

Основними *недоліками* є: велика жорсткість унаслідок малої площі контакту робочих елементів; обмежений термін служби, особливо у разі великих сил навантаження і значних швидкостей руху; значна розбіжність термінів служби підшипників однієї партії, що функціонують за однакових режимних параметрів; непридатність для монтажу, наприклад, на шатунових і проміжних корінних шийках колінчастих валів, оскільки кільця підшипників кочення нероз'ємні.

Недоліками є також підвищений акустичний шум і широкий спектр високочастотних складових детонації («плавання» звуку внаслідок коливання швидкості носія).

Застосування підшипників кочення як напрямних елементів обертального руху рухомих систем приладів забезпечує: зменшення моменту тертя в порівнянні з опорами ковзання в 5...100 разів; сприйняття значних навантажень як радіальних, так і осьових; можливість функціонувати з більшою частотою обертання; високу точність центрування; високу вібраційну міцність; підвищену зносостійкість і можливість зручної заміни вузлів підшипника в разі ремонту механізмів; можливість функціонувати в широкому діапазоні температур (від -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$), можливість функціонувати за будь-якої орієнтації осі обертання в просторі, відсутність потреби заміни мастила протягом всього терміну експлуатації.

Підшипники кочення можна класифікувати за такими основними ознаками: за характером навантаження (радіальні, радіально-упорні й упорні); за формою тіл кочення (кулькові, роликові та голкові, які є різновидом роликових); та за конструктивними особливостями.

Для зменшення габаритних розмірів вузла підшипника в приладобудуванні часто застосовують малогабаритні підшипники без внутрішнього, а іноді і без зовнішнього кільця. У такому разі роль внутрішнього кільця виконує цапфа, а зовнішнього – гніздо в плиті приладу. На відміну від підшипників кочення, в яких необхідно забезпечити певне розташування тіл кочення (зазвичай забезпечують сепаратором), в окремих приладах можуть застосовувати насипні (безсепараторні) підшипники.

Радіальні кулькові підшипники разом з радіальною силою можуть сприймати і осьові сили навантаження, величина яких, як правило, не перевищує 70% невикористаного допустимого радіального навантаження.

У разі комбінованих навантажень застосовують радіально-упорні кулькові підшипники, навантажувальна здатність яких залежить від кута θ між лінією тиску кульок і перпендикуляром до осі обертання. Значення θ для стандартних підшипників може набувати значень в межах від 12° до 36° .

Упорні одинарні кулькові підшипники застосовують у разі дії лише осьових сил постійного напрямку. Якщо напрямок осьової сили під час роботи механізму змінюється, тоді використовують упорні подвійні підшипники. Оскільки упорні підшипники сприймають тільки осьові сили, їх, зазвичай, застосовують у парі з радіальними підшипниками кочення або ковзання.

За значенням зведеної (узагальненої) статичної сили навантаження можна підібрати підшипник для допустимої статичної сили навантаження. Значення допустимої статичної сили навантаження наводять в каталогах на підшипники або визначають для кулькових радіальних або радіально-упорних підшипників за формулою:

$$C_0 = 12,5 \cdot i \cdot z \cdot d_m^2 \cdot \cos \beta, \quad (8.2)$$

де C_0 – допустиме статичне навантаження, H ; i, z – кількість рядів і кульок в кожному ряду; d_m – діаметр кульки, мм; β – номінальний кут контакту.

Зазвичай, зведене статичне навантаження має бути менше допустимої статичної сили навантаження.

Насипні кулькові підшипники через відсутність сепаратора, внутрішнього і зовнішнього кілець мають менші габарити (кількість кульок в таких опорах коливається від 3 до 13), але їх вантажопідйомність і швидкохідність невеликі.

Кульки і цапфи виготовляють з хромистих шарикопідшипникових сталей марок ШХ9, ШХ13 і піддають гартуванню з твердістю HRC = 62...65 – для кульок і 56...60 – для цапф.

Наявність зазору (проміжок між кулькою і корпусними кільцями підшипника) в кулькових підшипниках *порушує точність обертання валиків*, спричиняє радіальну і осьову *вібрації* валу і створює *шум*, який може посилюватися резонансом корпусу або опор. Тому кулькові підшипники встановлюють у приладах з попереднім осьовим натягом, який *вибирає зазори* у підшипниках і спричиняє деяку встановлювальну пружну деформацію робочих поверхонь кулькового підшипника. Попередній натяг застосовують як для радіальних, так і для радіально-упорних кулькових підшипників.

Для невеликих сил навантаження на підшипники величину осьового натягу в кресленнях механізмів, зазвичай, не наводять, оскільки за надмірного натягу не може бути досягнуто зазначеного у кінематичних схемах допустимого моменту обертання механізму. В окремих випадках у разі дії значних сил навантаження на підшипники або за великої частоти обертів валу величину натягу визначають методами, прийнятими в загальному машинобудуванні або дослідним шляхом і зазначають на кресленнях.

Попередній натяг кулькових підшипників здійснюють зміщенням уздовж осі їх внутрішніх або зовнішніх кілець. *Фіксацію* уздовж осі забезпечують штифтовими деталями (встановлювальними кільцями, повідцями, зубчастими колесами тощо). З наведеного вище пояснення можна зробити висновок, що усунення зазорів у кулькових підшипниках цілком залежить від досвідченості механіка-складальника і надалі (після встановлення підшипників у відповідний пристрій) зазори не регулюють. Тому для фіксації положення підшипника доцільно застосовувати великі гайки (сумірні з розмірами зовнішнього кільця підшипника) з малим кроком різьби, хоча наявність різьби дещо ускладнює оброблення вала або корпусу.

Якщо усунення проміжків (зазорів) в кулькових підшипниках є неодмінною умовою правильної роботи вузла (наприклад, в гіроскопах та інших високошвидкісних пристроях), то для створення постійного осьового натягу застосовують пружини або використовують пружність тонких стінок корпусу (або кришок), які функціонують в таких конструкціях як пружні мембрани.

У тих випадках, коли відносні температурні подовження вала і корпусу можуть спричинити деформацію вузла і затискання підшипників, останні фіксують в гніздах в осьовому напрямку лише з одного кінця вала, інший кінець (не закріплений) може вільно пересуватись уздовж осі. Рухомий підшипник, зазвичай, закріплюють на валу, а отвір для посадки зовнішнього кільця цього підшипника роблять із застосуванням калібру *C*. У тих випадках, коли точність обертання вала не має особливого значення, його фіксацію в осьовому напрямку можна здійснювати тільки одним кульковим підшипником.

В окремих випадках, коли треба забезпечити високий рівень певних параметрів, на нерухомий (уздовж осі) кінець валика встановлюють два підшипники, щоб попереднім натягом вибрати зазори в підшипниках. Конічні зубчасті колеса або колеса черв'ячних передач встановлюють на валику поблизу його нерухомого кінця.

Найбільші радіальні сили навантаження на валики також краще зосереджувати поблизу нерухомих опор.

Кульки

Сталеві кульки, що виготовляють для стандартних кулькових підшипників, застосовують у приладобудуванні для спеціальних кулькових підшипників, а також як самостійні деталі.

За значеннями *припустимих відхилень* від номінальних діаметрів кульки розділено на *чотири групи*: У (високого класу); П (підвищеного класу); Н (нормального класу); Р (різного призначення).

Точність кульок характеризують *відхиленнями від сферичності* та різним розміром кульок у відсортованій групі. *Розміром* зазначають *розбіжність* між найбільшим і найменшим зі всіх розмірів діаметрів в одній відсортованій групі кульок, отриманих за результатами вимірювання у будь-яких діаметральних перерізах.

Матеріал для кульок – сталь шарико- і роликотішипників має бути термічно обробленим: діаметром до 45 мм до твердості HRC 62...66, діаметром понад 45 мм – до твердості HRC 60...66.

Кульки діаметром від 3 мм до 45 мм необхідно випробовувати на руйнівне навантаження.

Позначення розмірів і точності кульок

Повне позначення кульок певного розміру і ступеня точності утворюють з групи допустимих відхилень, від номінального діаметру, ступеня точності і номера стандарту. Правила позначення шариків регламентовано стандартом ГОСТ 3722-81.

Номінальні діаметри кульок в позначенні вказують в міліметрах або дюймах, а групу граничних відхилень позначають літерою.

Ступінь точності проставляють після номінального значення діаметру.

Приклад позначення: кулька 7,144-20. У даному позначенні кулька номінальним діаметром 7,144 мм має ступінь точності «20».

Повне позначення кульок, що поставляють без сортування на групи, доповнюють буквою Б і проставляють перед номінальним значенням. Усі літерні позначення відокремлюють від інших пробілом.

Приклад позначення: кулька Б 9,525-100.

Якщо кульки виготовлені не зі звичайних підшипникових сталей типу ШХ-15, а інших матеріалів в позначенні шарика застосовують літеру, що є кодом матеріалу. Значення коду наведено у стандарті ГОСТ 3722-81.

Приклади позначення: кулька 5,963-20 Ю (усі деталі або частину деталей виготовлено з нержавіючої сталі); кулька 4,763-60 Б (сепаратор виготовлено з бронзи).

Конструкції несних елементів для опор обертання механізмів АРІ

Як зазначено вище, несні елементи основних механізмів обертання є третьою обов'язковою ланкою, що використовується з кінематичною парою вал-опора. Від вибору несної конструкції залежать точність, стабільність у часі та надійність роботи вузла в цілому.

Несні деталі робочих зон (корпус, кронштейн, плити і стійки) призначено для розміщення на них і в них частини або всіх деталей приводних вузлів, притискних роликів, приводних двигунів, напрямних роликів і стійок, магнітних головок, відеоблоків тощо. Їх розрізняють за формою (циліндричні корпуси і стійки, прямокутні порожнисті коробки і плоскі плити) і за технологією виготовлення (цілісні і роз'ємні, литі, точені та фрезеровані).

Несні деталі мають забезпечувати високу жорсткість конструкції за мінімальної маси і точність взаємного розташування базових поверхонь (опорних і встановлювальних), мінімально можливі деформації базових поверхонь, простоту виготовлення. Конструкцію несної деталі визначають як за обраним

типом приводного вузла, так і за компоновкою блоку робочої зони і СПМ. Найбільш просту форму мають деталі несних вузлів приводного валу.

Для вузлів приводного валу застосовують циліндричні не рознімні корпуси (рис. 8.8) з циліндричними базовими поверхнями 3 і 8 під опори приводного валу і торцеву встановлювальну поверхню 5 для кріплення на плиту блоку робочої зони або СПМ. Ці поверхні виготовляють з високою точністю, відхилення від перпендикулярності їх взаємного розташування має не перевищувати 0,003 мм – для *прецизійної спеціальної і професійної АВЗЗ*, і 0,02 мм – для побутових магнітофонів.

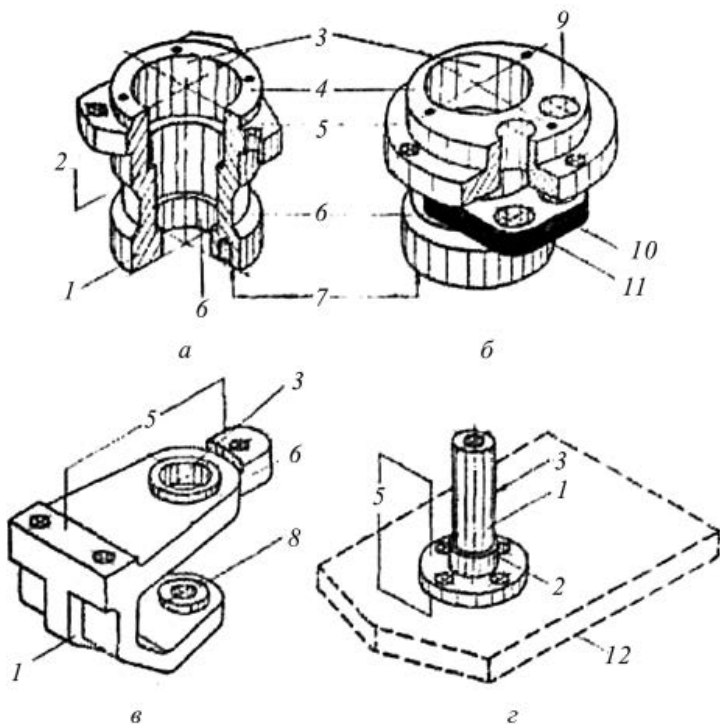


Рисунок 8.8. Конструкції простих несних елементів вузлів приводного валу:
а – опори кулькових підшипників на корпусі; *б* – фланець з встановлювальною поверхнею;
в – напіввідкритий швелероподібний кронштейн; *г* – циліндрична стійка.

У разі використання для опор кулькових підшипників на корпусі формують торцеві поверхні 4 і 7 під кришки з паралельністю не гірше 0,003 мм і торцевий упорний буртик 2 під зовнішнє кільце кулькового підшипника (рис. 8.8*а*). Але перпендикулярність його має бути не гірше 0,001 мм.

В опорному тригранному фланці встановлювальної базової поверхні 5 є три або більше отвори для кріплення на плиту СПМ, а в поверхнях 4 і 7 – різьбові отвори (позначені затемненими еліпсами) для кріплення кришок. Фланець (рис. 8.8*б*) з встановлювальною поверхнею 5 зроблений з ексцентричним отво-

ром 3, а також має отвори 9 і 11, які разом з приливом 10 призначено для опор важелів притискних роликів. Відзначимо, що вимоги до точності висувають тільки щодо поверхонь 3 і 5.

У розглянутих несних конструкціях забезпечено вільний доступ з усіх боків до маховика вузла привідного валу. Напіввідкриті швелероподібні несні кронштейни 1 (рис. 8.8в) у МТС побутових магнітофонів часто застосовують там, де встановлювальні пластинки 5 приливів 6 зроблено точно перпендикулярно до циліндричних опорних поверхонь 3 і 8 підшипників ковзання. Ці підшипники формують перед відливанням, після чого їх розточують з однієї установки спільно з поверхнею 5. Для забезпечення достатньої жорсткості на кронштейні зроблено ребра жорсткості. У даній конструкції напівзакритого типу нема доступу до маховика вузла приводного валу з усіх боків.

Найбільш просту конструкцію і технологію виготовлення має циліндрична несна стійка 1 (рис. 8.8г) вузла приводного валу. Циліндрична поверхня 3 є базою для опор і має упорний буртик 2, а торцева поверхня 5 фланця стійки є встановлювальною для кріплення на плиті СПМ 12. Залежно від загальної компоновки встановлювальна поверхня може бути з будь-якого боку від фланця стійки 1.

Такі несні конструкції мають прості форми і невеликі габаритні розміри. В цих конструкціях необхідну жорсткість забезпечують однаковою міцністю застосованих матеріалів та достатньою товщиною деталей.

У більш складних за формою і конструкцією несних деталях приводних вузлів і у разі значних габаритних розмірів *проблема жорсткості* є однією з головних. *Недостатня жорсткість* несних деталей *погіршує взаємодію* розташованих в них елементів механізму, *спричиняє збільшення тертя та нагрів, зношуваність опор* і приводних валів, *знижує точність* обертання і його *рівномірність*. Вплив лінійних розмірів несної деталі на жорсткість та стиснення-розтягування незначний (обернено пропорційний до значення довжини в першому степені) і дуже значний на вигин (обернено пропорційно до значення довжини в третьому степені).

Для збільшення жорсткості несних деталей привідних вузлів необхідно:

– *усувати можливість виникнення вигину* й передбачати замість нього виникнення під час функціонування стиснення або розтягування, розосереджувати опорні точки базової встановлювальної поверхні;

– *замінювати* не бажані щодо впливу на жорсткість конструкції навантаження *опори*, наприклад, пряму консоль – на зворотну;

– *раціонально, без зростання маси, збільшувати і підсилювати ділянки переходу* від одного розміру перерізу деталі до іншого;

– *застосовувати коробчасті і чарункові форми замість таврових*, а також склепінчасті і сферичні форми для коробчастих корпусів,

– *раціонально розташовувати ребра жорсткості* в площині сил, що призводять до вигину;

– *зменшувати довжину ділянок*, що зазнають вигину, а також зменшувати консольні вильоти.

8.2.2. Поступальний рух в механізмах. Опори тіл поступального руху

Тіла (елементи конструкції), що *рухаються поступально* на відміну від тіл обертання передають прямолінійно спрямовані зусилля, наприклад, зусилля затискання деталей між губками лещат, і здійснюють прямолінійні переміщення, наприклад, оптичних головок в механізмах дисків оптичного запису стандарту CD-ROM.

Елементи і конструкції напрямних систем *поступального руху* на відміну від напрямних систем обертального руху, тобто опор, *не стандартизовані* і вони відрізняються *великою різноманітністю*.

Залежно від виду *тертя* розрізняють напрямні системи з *тертям ковзання, газовим і рідинним* тертям, *тертям кочення* і *тертям пружності*.

Конструктивно напрямні системи поступального руху роблять відкритими і закритими.

У *відкритих* напрямних системах контакт елементів кінематичної пари забезпечують за допомогою додаткових притискних зусиль: маси рухомої деталі, повзуна або зусиль пружин. У *закритих* напрямних системах постійний дотик ланок кінематичної пари забезпечується відповідною конструкцією пари. Відкриті напрямні системи застосовують тільки в стаціонарних пристроях.

Напрявні системи з *тертям пружності* застосовують у разі дуже малих переміщень (0,1...3 мм) рухомої системи. Такі напрямні складають з двох пласких пружин, до яких прикріплюють рухому частину. Переміщення відбувається за рахунок пружної деформації, прогину пружин. Втрати на тертя в цих напрямних практично дорівнюють нулю, відсутні зазори і мертвий хід. Тому такі напрямні використовують у точних вимірювальних приладах, наприклад, у приладах для вимірювання мікротвердості, у вібродатчиках тощо.

Системи поступального руху в механізмах АРІ застосовують менше, ніж системи обертального руху, але є випадки, де лише вони здатні забезпечити виконання необхідних функцій (переміщення координатних столів мікроскопів, позиціонування оптичних головок DVD, CD тощо).

Поступальний рух з напрямною системою ковзання

У напрямних системах ковзання має бути передбачено *поверхні ковзання*, що забезпечують просторову орієнтацію рухомої деталі. Площини напрямної системи в цих випадках можуть бути *опорними* та *підтримувальними*.

Напрявні системи з *тертям ковзання* залежно від форми поперечного перерізу бувають *циліндричні* і *призматичні*.

У напрямних системах поступального руху рухому деталь, зазвичай, називають повзуном, а нерухому деталь, якою переміщують повзун, – *напрявною деталлю* або – просто *напрявною*.

Циліндричні напрямні системи прості у виготовленні, можуть бути виготовлені з високою точністю, за габаритними розмірами вони менше напрямних з *тертям кочення*. Їх недоліками є великі втрати на тертя, неможливість

усунути зазор у процесі зношування тертьових поверхонь, чутливість до змін температури. Конструкція циліндричних напрямних систем може допускати обертання повзуна або запобігати його обертанню: за допомогою лиски на напрямній і планки на повзуні або за допомогою двох циліндричних напрямних.

Призматичні напрямні можуть мати прямокутний, трапецієподібний або трикутний переріз. Прямокутні напрямні простіше виготовляти, але через складність регулювання зазорів їх застосовують у випадку звичайних вимог до точності переміщень.

Трикутні напрямні забезпечують підвищену точність переміщень шляхом саморегулювання зазорів, що виникають у результаті зносу, але такі системи більш трудомісткі, через необхідність забезпечити високу точність під час виготовлення.

Трапецеїдальні напрямні, які ще називають «ластівчин хвіст», технологічні, допускають регулювання зазору між ланками за допомогою регулювальних планок або клинових накладок і забезпечують високу точність переміщення; їх недолік – великі втрати на тертя.

У конструкціях напрямних систем не можна допускати виникнення значних реакцій (N), які залежать від їх довжини L , плеча l -ї величини прикладеної сили F . Для призматичних напрямних систем звичайного типу залежність L і l подають співвідношенням: $l/L < 2$; для призматичних напрямних типу «ластівчин хвіст» $l/(L \sin \alpha) < 2$, де $\alpha = 30^\circ$.

Направні системи ковзання з циліндричними та плоскими поверхнями є вельми відповідальними деталями. Тому до них висувають підвищені вимоги щодо *точності, легкості і плавності ходу*.

Задля виконання цих вимог, у конструкції необхідно враховувати *температурний вплив*, що спричинює лінійні зміни розмірів у сполучених деталях. Для зменшення температурного впливу рекомендують застосовувати такі матеріали, які за *змінення температури змінюються однаково*, або такі, що *мало відрізняються за коефіцієнтом лінійного розширення*. Під час перевірки правильності вибору посадок і класів точності сполучених деталей, необхідно робити перевірочний розрахунок напрямних систем для мінімальної і максимальної температури за формулою:

$$\Delta = D[l \pm \alpha(t - t_0)] - D_1[l \pm \alpha_1(t - t_0)], \quad (8.3)$$

де:

Δ – мінімальний зазор за даної температури;

D – найменший за даного допуску діаметр або лінійний розмір для охоплюваної деталі;

D_1 – найбільший діаметр або лінійний розмір для охоплюваної деталі;

α, α_1 – коефіцієнти лінійного розширення матеріалів сполучених деталей.

Для циліндричних напрямних систем у точних пристроях рекомендують застосовувати *посадку ходу*.

Для радіопристроїв, що функціонують за кімнатних умов без температурних коливань, можна застосовувати ковзну посадку 2-го класу точності, а в деяких випадках (шліфування і притирання поверхонь) навіть щільну посадку.

Під час конструювання необхідно передбачити, щоб рух у заданому напрямку було забезпечено тільки двома основними напрямними площинами (у пласких напрямних) або однією циліндричною поверхнею (у циліндричних напрямних). Решта площин або поверхонь мають бути такими, що *закривають* рухому деталь.

Якщо конструкція напрямних така, що може відбуватись мінімальний поворот навколо осі, застосовують *додаткову підтримувальну напрямну*. Для зменшення кутів повороту повзуна додаткову напрямну доцільно розташовувати далі від основної напрямної, оскільки сумарний кут повороту α дорівнює:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{(b_1 - b_2)}{L}, \quad (8.4)$$

де:

b_1 – зазор між повзуном і основною напрямною, мм;

b_2 – зазор між повзуном і додатковою напрямною, мм;

L – відстань між напрямними, мм.

До *позитивних характеристик опор ковзання, що застосовуються* в АРІ, можна віднести: порівнянню простоту, найвищу точність переміщення і фіксації, *довговічність роботи* із збереженням усіх параметрів.

До *недоліків – підвищені втрати* на тертя, необхідність *постійно застосовувати мастила* у процесі функціонування за нормальних умов експлуатації.

Силове заклинювання

Можливість виникнення *силового заклинювання* залежить від співвідношення довжини напрямних L , плеча дії сили, кута під яким прикладено силу a , і коефіцієнта тертя μ .

За відсутності дії зовнішніх сил, опір руху повзуна в напрямній характеризується силою тертя Q , що виникає під дією маси повзуна S_1 і наявного на ньому вантажу S_2 . Щоб повзун рухався, необхідно прикласти зовнішню силу R , яка має бути більше сили тертя Q .

Можливі дві схеми дії зовнішньої сили R . В одному випадку (рис. 8.9а) точка прикладання сили розташована в середній площині напрямної під деяким кутом α до напрямної площини. В іншому випадку (рис. 8.9б) точка прикладання сили знаходиться у паралельній до напрямної площині, віддаленій від середньої лінії повзуна на відстань l .

У випадку, коли зовнішня сила R не здатна забезпечити рух повзуна, кажуть, що має місце *силове заклинювання*. Слід розрізняти також *температурне заклинювання*, яке виникає за умов великих перепадів температур, через неправильний вибір матеріалів деталей та виду *посадки* сполучених поверхонь.

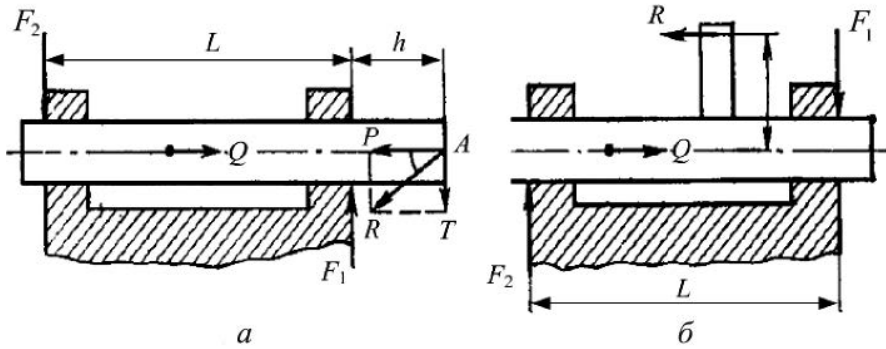


Рисунок 8.9. Схеми дії зовнішньої сили на напрямну систему поступального руху

Якщо точка A прикладеної сили R знаходиться на осі напрямних і складає з нею кут α (рис. 8.9а), тоді в точках контакту повзуна з напрямними виникнуть реакції F_1 і F_2 . Розкладемо силу R на дві складові: P – спрямовану уздовж осі напрямних, і T – перпендикулярну їй. Сила P рухає повзун, а сила T притискає повзун до напрямних, що призводить, внаслідок тертя в опорах, до виникнення додаткового опору руху.

Складемо рівняння рівноваги повзуна:

$$Q = (F_1 + F_2) \mu . \quad (8.5)$$

Запишемо співвідношення між силами, що діють на вузол поступального руху з урахуванням конструктивних параметрів (рис. 8.9а):

$$F_2 = R \cdot h \cdot \sin(\alpha) / L, \quad F_1 = F_2 + R \sin(\alpha) = R \cdot (h + L) \cdot \sin(\alpha) / L . \quad (8.6)$$

Умовою відсутності силового заклинювання є співвідношення $R \cdot \cos \alpha > Q$. Для першої схеми прикладання зовнішньої сили умову відсутності силового заклинювання можна подати через конструктивні параметри:

$$\frac{L}{h} > \frac{2\mu \operatorname{tg} \alpha}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} . \quad (8.7)$$

З наведеної формули випливає, що наявність або відсутність заклинювання не залежить від сили R , а визначається тільки конструктивними параметрами – базою L , плечем h і кутом дії сили α .

У разі прикладання зовнішньої сили так, як це наведено на другій схемі, сила R створює перекидальний момент $M = Rl$, врівноважений моментом пари сил реакції в опорах ($F_1 = F_2 = F$), тобто $Rl = FL$. Реакція опор створює силу тертя в напрямних, що визначається співвідношенням:

$$Q = 2F \mu = \frac{2Rl}{b} \mu . \quad (8.8)$$

Силове заклинювання відсутнє, якщо складова зовнішньої сили спрямована в напрямку руху, більше сили тертя ($R > Q$).

Цю умову можна подати через конструктивні параметри:

$$\frac{b}{h} > \frac{2\mu tg\alpha}{1 - \mu tg\alpha}. \quad (8.9)$$

Матеріали для напрямних систем поступального руху

З метою зменшити зношування робочих поверхонь, доцільно вибирати матеріали з найменшими коефіцієнтами тертя. Під час конструювання приладів, що працюють у широкому інтервалі температур (наприклад $\pm 65^\circ\text{C}$), бажано використовувати матеріали однакові або такі, коефіцієнти лінійного розширення яких мало відрізняються. За використання різних матеріалів охоплювальні деталі слід виготовляти з матеріалу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення, оскільки перепад температури під час охолодження зазвичай більший, ніж під час нагрівання.

Для підвищення зносостійкості деталей напрямної системи їх виготовляють зі сталей марок 40, 50, У8, а повзуни – з бронзи БрОЦС6-6-3, БрОС10-2, текстоліту, фторопласту. Якщо тиск на поверхнях дотику невеликий, наприклад, в приладобудуванні, розрахунок на міцність напрямних можна не робити.

Напрявні для прямолінійного руху з тертям кочення

Напрявні для прямолінійного руху з тертям кочення застосовують, якщо необхідно *зменшити тертя, знос, забезпечити легкість ходу*, наприклад, у разі великої кількості кінематичних ланок у механізмі, у разі значних навантажень тощо. З цією метою застосовують *кулькові і роликові* напрямні системи, які забезпечують дуже малі зазори і не чутливі до коливань температури. Деталі напрямних систем, у разі значних сил навантаження, мають бути загартовані, а робочі поверхні – хромовані.

До недоліків напрямних з тертям кочення слід віднести деяке збільшення габаритних розмірів і вартості виготовлення.

Слід також відзначити, що негативно впливають на точність роботи напрямних похибки виготовлення тіл обертання (кульок, роликів), тому точність роботи напрямних з тертям кочення зазвичай нижче, ніж напрямних з тертям ковзання.

Залежно від форми тіл кочення, розрізняють *кулькові і роликові* напрямні.

За формою напрямних поверхонь напрямні системи поділяють на циліндричні та призматичні, а за типом з'єднання їх розподіляють на відкриті і закриті.

Рухому частину напрямних, зазвичай, називають *кареткою*, а нерухому – *основою*. Якщо під час переміщення каретки осі роликів або кульок залишаються нерухомими відносно каретки або основи, то такі напрямні називають напрямними з роликами (кульками), закріпленими на осях. Часто в таких напрямних замість роликів використовують стандартні підшипники кочення.

Вільні сепаратори слід застосовувати тільки у горизонтальних напрямних, оскільки у разі їх використання в напрямних, які функціонують у вертикальному або нахиленому положенні, (під дією сили тяжіння кульок і сепаратора або внаслідок вібрацій) може відбутись переміщення кульок з сепаратором в одне з крайніх положень. У такому разі рух каретки стає неможливим, оскільки обмежувальні штифти не дозволять сепаратору і кулькам вільно переміщатись уздовж напрямних. Сепаратори з примусовим рухом забезпечують не тільки взаємне розташування кульок, але і їх положення відносно каретки.

Способи регулювання зазорів. Одним з чинників, що негативно впливає на точність роботи напрямних, є зазори між сполученими робочими поверхнями каретки і основи. У відкритих напрямних системах зазори ліквідуються автоматично, внаслідок дії сили зімкнення.

У напрямних закритого типу передбачають спеціальні регулювальні пристрої. У таких напрямних регулювання зазору здійснюють двома планками. Одна з планок нерухомо закріплена на основі. Зазори між гвинтами і отворами в другій планці дозволяють переміщувати її і тим самим регулювати зазор в напрямних. Після закінчення регулювання планку закріплюють гвинтами і шліфують.

У такій конструкції каретка встановлена на чотирьох кульках. Кульки (по дві) сполучено вільними сепараторами.

Якщо під час переміщень каретки осі кульок або роликів переміщуються відносно каретки і відносно основи, тоді такі напрямні називають напрямними з роликами (кульками), не закріпленими на осях. У таких напрямних кульки перекочуються вздовж каретки і основи на величину $a / 2$, де a – хід каретки. Ця обставина вимагає робити напрямну більш довгою.

Бажано, щоб на кінцях каретки було розміщено по одній або по дві кульки. У разі значних сил навантаження і великих відстаней між кульками, може бути встановлено по три кульки. Більша кількість кульок небажана, оскільки це може призвести до того, що через похибки виготовлення деталей напрямних, крайні кульки не працюватимуть.

8.2.3. Газові опори в механізмах АРІ

Газові опори – це проміжок між ланками механізму, наприклад, валом (ротором) електродвигуна і його опорами обертання (втулками-підшипниками ковзання) або елементом запису-відтворення інформації (магнітною головкою або лазерно-оптичною головкою) і носієм інформації (магнітним диском або оптичним), в якому повітряний прошарок завтовшки приблизно 1,5 мкм виконує функції газового мастила.

Це газове мастило може створювати спеціальний компресор (перевищення атмосферного тиску 0,25...3 аті.) – мастило аеростатичне (опори двигунів)

або утворюватися внаслідок аеродинаміки поверхні, що обертається з великою швидкістю (1000...7000 об/хв.) – мастило аеродинамічне за ефектом Бернуллі.

Газові аеростатичні опори

Газові аеростатичні опори застосовують у напрямних стійках магнітної стрічки, де між циліндричною поверхнею стійки і відеострічкою через отвори малого діаметру (100...150 мкм) надходить очищене повітря з надлишковим тиском 0,25 аті. від спеціального компресора. Повітряний зазор між стрічкою і циліндричною поверхнею стійки сягає значення 4...6 мкм й забезпечує досить високий ступінь жорсткості опори.

Якщо момент тертя в опорах необхідно знизити з огляду на значну масу рухомої системи приладу (наприклад, у гіроскопічних приладах), то застосовують так звані опори на *рідинних подушках*. У таких опорах момент тертя становить кілька міліграмсантиметрів.

У деяких морських і авіаційних приладах, у зразкових електричних лічильниках застосовують *повітряні опори*, в яких тертя практично відсутнє. Повітряна опора являє собою *дві півсфери*, у простір між якими безперервно подають повітря під тиском.

Поверхня півсфер має бути 12 чи 13-го класу чистоти, а повітря, що нагнітають у повітряний підшипник, необхідно фільтрувати. Відомі конструкції повітряних опор для швидкостей обертання рухомих деталей до 80000 об/хв. з тривалістю робочого сеансу 4 год. Повітряні опори дають можливість зробити пристрої зі швидкістю обертання до 500000 об/хв. Коефіцієнт тертя в повітряних опорах дорівнює приблизно 10^{-5} . Повітряні підшипники застосовують у високочутливих гальванометрах з ціною поділки до 10^{-10} А.

Сканувальний двигун

Сканувальний двигун у чотириголішковому апараті магнітного запису має забезпечити швидкість обертання 15000 об/хв., оскільки диск з відеоголовками розміщено на його осі. У апаратах з похило-рядковим записом зі швидкістю диска 1500 об/хв. або 3000 об/хв. зв'язок з двигуном може бути здійснено через пасову передачу. Двигун, на осі якого розміщено диск відеоголовок, має забезпечувати високу рівномірність і стабільність обертання. Це вимагає прецизійного виготовлення і спеціальних підшипників. Тому в апаратах сучасних розробок застосовують двигун на підшипниках ковзання з газовим мастилом, так званих повітряних, або аеродинамічних. У підшипникових втулках такого двигуна є радіальні отвори, в які подають очищене повітря під тиском приблизно 300 кПа. Ротор двигуна «спливає» на *повітряній подушці*, для фіксації його положення уздовж осі використовують повітряні подушки, які утворено між статором і дисками, закріпленими на торцях валу. Радіальне биття диска не перевищує 0,5 мкм, термін служби двигуна практично необмежений.

У конструкціях різних виробників застосовують двигуни різних типів: *асинхронні, синхронні з постійним магнітом* на роторі тощо. У трифазному гістерезисному двигуні постійний магніт на роторі перемагнічують під час кожного пуску. Для цього ротор роблять зі спеціального магнітного сплаву – *вікалою*. Цей двигун має невеликий кут коливань і не потребує підвищеної напруги для розгону і уведення в синхронізм. Для двигунів з однією парою полюсів, у разі частоти обертання ротора 15000 об/хв. застосовують частоту напруги електроживлення двигуна 250 Гц, а для двигунів з двома парами полюсів – частоту напруги електроживлення 500 Гц.

Газові аеродинамічні опори

Газові аеродинамічні опори застосовують у механізмах підвісу магнітних головок дискових накопичувачів. У сучасних конструкціях накопичувачів опора ковзання рухомої магнітної головки (РМГ) і магнітний диск (МД) утворюють *аеродинамічний підшипник* таким чином, що тиск, який виникає у змащувальному шарі підшипника і обумовлений тангенціальним потоком повітря, врівноважує прикладену до опори зовнішню силу навантаження. Щоб забезпечити задану величину проміжку між магнітним диском і головкою, необхідно точно розрахувати залежність сили навантаження на опору від величини проміжку, а також точку розташування рівнодійної сили реакції змащувального шару. Якщо опору підвішено на шарнірі, тоді, окрім рівноваги прикладених до опори сил, необхідно забезпечити, щоб сума їх моментів дорівнювала нулю.

Принцип роботи РМГ полягає в тому, що за певного кута атаки опори, точка додаткової сили реакції змащувального шару має співпадати з точкою, в яку прикладено силу дії шарніра. У разі збільшення кута атаки опори, точку прикладання сили реакції зміщено до задньої кромки РМГ, і момент, що виникає, зменшує кут атаки. У разі зменшення кута атаки, точка прикладання рівнодійної сили зсунеться до передньої кромки, і кут атаки навпаки збільшиться.

Проявом *стискання мастила* є залежність місця розташування точки прикладання рівнодійної сили реакції змащувального шару не лише від кута атаки, але і від величини проміжку. Із збільшенням сили навантаження кут атаки РМГ зменшується і, навпаки, із зменшенням сили навантаження – збільшується. *Крива навантаження* РМГ (залежність сили навантаження від величини проміжку) має явно виражений максимум і за певних мінімальних величин неконтакту існує область нестійкості, в якій несна здатність опори РМГ зменшується до нуля. Із збільшенням швидкості обертання МД вплив рівня стиснення мастила зростає. Мінімізацію величини проміжку (неконтакту) між МД і РМГ не можна вирішити простим збільшенням сили навантаження, необхідно здійснювати оптимізацію геометричних параметрів РМГ *для конкретної величини неконтакту і швидкості обертання МД*.

Особливістю газів як мастила в опорах РМГ є властивість зберігати достатньо велику жорсткість, навіть за умови зменшення несної здатності зма-

щувального шару. У процесі вдосконалення конструкції РМГ зазнали значних змін. Раніше опори ковзання РМГ робили з неіржавіючої сталі, потім почали застосовувати керамічні матеріали, що мають високі антифрикційні властивості. Осердя РМГ кріпили до опор ковзання органічним клеєм. Із зменшенням величини неконтакту виникає термічна деформація клеїв і зміщення елементів конструкції РМГ, внаслідок повзучості клеєного шару.

У процесі удосконалення РМГ зменшено вагу елементів підвісу РМГ, що беруть участь в коливальному русі, тобто зменшено зведену масу РМГ. Стабілізаційна опора з величиною неконтакту до 10 мкм зміщується відносно поверхні МД і зменшує коливання величини неконтакту між МД і РМГ до *одиноць* мікрометра. У разі переміщення МГ в отвір стабілізаційної опори, навантаження на РМГ обумовлено деформацією пружини. Вимоги до точності установа МГ відносно стабілізаційної опори залежать від пружності пружини, поздовжньої і поперечної стійкості МГ.

Мінімізація величини неконтакту між МД і МГ і забезпечення відповідної шорсткості сполучених поверхонь МД і РМГ є взаємопов'язаними процесами. У разі зменшення величини неконтакту може відбутись *злипання* РМГ з поверхнею МД, унаслідок вологості навколишнього середовища. За відсутності механізму відведення РМГ у момент зупинки і пуску диска може відбутись *зчеплення* РМГ з МД. У разі різкого зниження тиску в змащувальному шарі на поверхні кінематичної пари може утворитись роса.

На поверхні опор ковзання МГ неприпустимою є наявність тріщин, оскільки в них можуть потрапити мікрочастинки, що призведе до утворення задирок на поверхнях МД і РМГ. Потрапляння мікрочастинок у змащувальний шар є принципово неприпустимим, тому очищенню повітря у робочій камері накопичувача МД необхідно приділяти особливу увагу. Пристрої фільтрування мають забезпечувати відсутність мікрочастинок, розміри яких перевищують 2/3 товщини змащувального шару.

Підвіс для контактної магнітної головки (МЗ) (рис. 8.10) містить три рознесені опори ковзання 1, встановлені на одній плиті 2, однією з опор є *магнітна головка* (МГ), розташована в лівій крайній частині підвісу. Шарнір 3 передає на

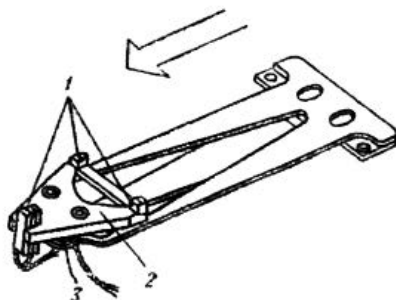


Рисунок 8.10. Конструкція підвісу магнітної головки контактної запису:
1 – опори ковзання, 2 – плата. 3 – шарнір

плату 2 силу навантаження близько 0,05 Н. Опори розташовано трикутником для забезпечення поздовжньої і поперечної стійкості МГ, що особливо важливо для контактного запису, зважаючи на наявність сил тертя між МГ і МД. Наявність контакту і неконтакту між МГ і МД має *стохастичний* характер. У разі усталеного значення сили навантаження, стан «контакт – неконтакт» значною мірою визначається *швидкістю руху носія*. Магнітну головку під час зупинки і пуску механізму не відводять від МД. Якщо шорсткість поверхні МД не перевищує 0,175 мкм, контакт зникає за відносної лінійної швидкості 20 м/с, і величина створеного неконтакту становить 0,25 мкм. Тривалість одиничного контакту дорівнює приблизно 10^{-4} с.

8.3. Особливості конструкції вузлів механізмів АРІ

Розглянемо особливості конструкції вузлів з *прямолінійним, обертальним і комбінованим* рухом, що застосовують у механізмах апаратури поздовжнього магнітного запису, відеомагнітофонах, кінотехніці, дискових накопичувачах і метрологічній апаратурі.

Тракт стрічки і робочі зони СПМ може бути сконструйовано по-різному: як окремі функціональні блоки або *вбудовані* в загальну конструкцію механізму. Самостійні функціональні блоки робочих зон роблять на несній плиті, на якій з двох сторін розміщують усі вузли і окремі деталі.

Розрізняють *два різновиди конструкцій* блоків робочих зон.

В одній із конструкцій блок змонтовано на *пласкій шліфованій несній плиті*, яку в загальній конструкції СПМ встановлюють на несну плиту всього механізму, так само, як блоки накопичувачів стрічки і інші вузли.

В іншій конструкції блок робочої зони містить несну плиту, що має форму *об'ємного литого або фрезерованого прямокутника* зі сполучними кромками. У загальній конструкції СПМ несну плиту блоку робочої зони безпосередньо з'єднують з подібними несними плитами блоків накопичувачів без додаткової плити. Таку конструкцію блоку робочої зони називають *модульною*.

Конструкції окремих блоків робочих зон застосовують в СПМ професійної і спеціальної АВЗЗ та іноді – високоякісних побутових магнітофонах.

У разі реалізації конструкції з вбудованими блоками робочої зони, їх розміщують на загальній несній плиті СПМ, як окремі вузли і деталі. Іноді частину функціональних вузлів складають на окремих платах (пластинах) і розміщують на загальній плиті СПМ із застосуванням монтажних стійок, наприклад, блок головок з напрямними стійками, притискними роликками тощо. Вбудовані блоки робочих зон застосовують в СПМ побутових магнітофонів, що дозволяє зменшити габаритні розміри всього механізму, проте ускладнює складання, регулювання, налаштування і ремонт. Уніфікувати можна лише окремі вузли або деталі, наприклад, приводний вал, притискний ролик, блоки магнітних головок.

Для реалізації *функціональних блоків робочих зон* СПМ модульного типу запропоновано кілька варіантів. Згідно з *першим варіантом*, литий несний

корпус зроблено у вигляді *жорсткого прямокутника з ребрами* і декількома сполучними кромками. На точно сплановані невеликі площинки встановлюють знімні вузли блоків головок, приводного валу, приводу приводного валу, напрямних і обвідних роликів. Згідно з *другим варіантом*, несний корпус зроблено як *цілісний брусок* прямокутного перерізу з отворами для підшипників вузла приводного валу, обвідних роликів, систем контактного з'єднання. Ці вузли складають безпосередньо в несному корпусі.

8.5. Запитання для самоконтролю

1. Наведіть стислу характеристику рушійних механізмів АРІ.
2. Які види запису визначають конструкцію АРІ?
3. Наведіть характеристики двигунів, що застосовують у механізмах АРІ.
4. На які види розподіляють електродвигуни за особливостями конструкції?
5. В яких вузлах апаратури реєстрації інформації застосовують електродвигуни змінного струму?
6. Які специфічні конструктивні особливості мають двигуни АВЗЗ?
7. Стисло опишіть особливості двигуна з внутрішнім ротором.
8. Стисло опишіть особливості двигуна з зовнішнім ротором.
9. На які види розподіляють ЕД постійного струму?
10. Які конструктивні властивості характерні для колекторних ЕД?
11. З яких матеріалів виготовляють та на які види поділяють суцільні приводні вали?
12. Стисло опишіть схеми установа опору відносно валів.
13. Охарактеризуйте особливості основних типів підшипників.
14. Які особливості підшипників ковзання?
15. Які особливості підшипників кочення?
16. Наведіть стислу характеристику поступального руху з тертям ковзання.
17. опишіть принцип роботи рухомої магнітної головки (РМГ).

Список термінів та скорочень

АМЗ – апаратура магнітного запису;
АРІ – апаратура реєстрації інформації;

БОГ – блок обертових головок;
БШДП – багатошарова друкована плата;

ГОСТ (ДСТУ) – государственный отраслевой стандарт (рос.), чинний в Україні за міжнародними угодами стандарт;

ДБДП – двобічна друкована плата;
ДКР – дослідно-конструкторська робота;
ДП – друкована плата;
ДСТУ – Державний стандарт України;

ЕА – електронна апаратура;
ЕРЕ – електрорадіоелементи;
ЕЗ – електронні засоби;
ЕМС – електромагнітна сумісність;
ЕРК – електрорадіокомпоненти;

ЄСДП – Єдина система допусків і посадок;
ЄСКД – Єдина система конструкторської документації;

ІС – інтегральна мікросхема;

КД – конструкторська документація;
КМОН – технологія виготовлення мікросхем із застосуванням комплементарних (взаємодоповнювальних) транзисторів зі структурою метал-окисел-напівпровідник;

ЛЕЗ – лінія електричних з'єднань;

МГ – магнітна головка;
МТС – механізм транспортування стрічки;

НВЧ – надвисокі частоти;
НДР – науково-дослідна робота;

ОБДП – одnobічна друкована плата;

ПЕК – пасивні електронні компоненти;

РЕП – радіоелектронний пристрій;

РЕА – радіоелектронна апаратура;

САПР – система автоматизованого проектування;

ТЗ – технічне завдання;

ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка (технологія виготовлення мікросхем із застосуванням біполярних транзисторів);

ФУ – функціональний вузол;

АТХ – (англ. Advanced Technology Extended) форм-фактор переважної більшості сучасних стаціонарних персональних комп'ютерів;

HDD – (англ. hard (magnetic) disk drive) привід жорсткого диску;

ІЕС – (англ. International Electrotechnical Commission) Міжнародна електротехнічна комісія – міжнародна організація зі стандартизації у сфері електричних, електронних і суміжних технологій;

ІРС – (англ. Institute of Printed Circuits – Інститут друкованих плат, нова назва – Association Connecting Electronics Industries, скорочену назву залишили без змін – IPC) міжнародна професійна асоціація, спрямована на посилення конкурентоспроможності та фінансового успіху її членів – учасників електронної промисловості;

ІРхх – (англ. Ingress Protection rating) система класифікації ступенів захисту оболонки електричного обладнання від проникнення всередину твердих предметів і води унормована міжнародним стандартом ІЕС 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254-96);

ІТ – (англ. International tolerance) допуск відхилення розміру від номінального значення;

РСВ – (англ. printed circuit board) друкована плата;

SE – (англ. shielding effectiveness) ефективність екранування від впливу електричних та магнітних полів.

Література

1. ДСТУ 3974-2000 «Система розроблення та поставлення продукції на виробництво».
2. ДСТУ ISO 286-1-2002 «Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилень та посадок».
3. ДСТУ 2500-94 «Основні норми взаємозамінності. Єдина система допусків та посадок. Терміни та визначення. Позначення і загальні норми».
4. ДСТУ 2498-94 «Основні норми взаємозамінності. Допуски форми та розташування поверхонь. Терміни та визначення».
5. ДСТУ 2646-94 «Плати друковані. Терміни та визначення».
6. ДСТУ EN 61000-3-3:2004 «Електромагнітна сумісність. Частина 3-3. Норми. Нормування флуктуацій напруги і флікера в низьковольтних системах електропостачання для обладнання з номінальним струмом силою не більше 16 А».
7. ДСТУ ІЕС 61000-2-4:2002 «Електромагнітна сумісність. Частина 2-4. Рівні сумісності для промислового обладнання щодо низькочастотних кондуктивних завад».
8. ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 Електромагнітна сумісність. Частина 4-6. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до кондуктивних завад, індукованих радіочастотними полями (ІЕС 61000-4-6:2006, IDT).
9. ГОСТ 6636-69 Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные линейные размеры.
10. ГОСТ 16962-71 Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний.
11. ГОСТ 2.701-84 ЕСКД. СХЕМЫ. Виды и типы. Общие требования к выполнению.
12. ГОСТ 23751-86 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Основные параметры конструкции.
13. ГОСТ Р53429-2009 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Основные параметры конструкции.
14. ГОСТ 2.309-73 ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей.
15. ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. Термины и определения.
16. Метрологія, стандартизація та управління якістю / Л. П. Клименко, Л. В. Пізінцалі, Н. І. Александровська, В. Д. Євдокимов. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – 244 с.
17. Взаємозамінність, стандартизація та метрологічне забезпечення технічних вимірювань: навч. посібник для вищих навчальних закладів /Л. Й. Івченко, В. В. Петрикін, С. І. Дядя, Б. М. Левченко; під заг. ред. Л. Й. Івченка. – Запоріжжя, Вид. комплекс ВАТ «Мотор Січ», 2010. – 451 с.

18. Будник А. Ф. Тепломасоперенос у процессах і матеріалах дизайну матеріалів: Навчальний посібник / А. Ф. Будник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 158 с.

19. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др. Под общ. ред. В. А. Шахнова. – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.: ил. – (Сер. Информатика в техническом университете).

20. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. Для радиотехнических спец. вузов / А. П. Ненашев. – М: Высш. Школа, 1990. – 432 с.

21. Савельев А. Я. Конструирование ЭВМ и систем: Учеб. для вузов по спец. «Выч., маш., компл., системы и сети» / А. Я. Савельев, В. А. Овчинников. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.

22. Пахнин А. Современные высокотемпературные материалы для производства высоконадежных многослойных печатных плат / А. Пахнин, П. Казаков // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2011. – №4. – С. 24-27.

23. Медведев А. Конструирование гибких и гибко-жестких печатных плат / А. Медведев, Г. Мылов, П. Семенов [и др.] // Компоненты и технологии. – 2008. – №6. – С. 147-160.

24. Медведев А. Печатные платы. Требования для поверхностного монтажа / А. Медведев, Г. Мылов // Компоненты и технологии. – 2007. – №10. – С. 164-168.

25. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской промышленной и бытовой техники / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2008. – №6. – С. 130-137.

26. Беломытцев В. Экранирующие корпуса для электронных устройств / В. Беломытцев // Современные технологии автоматизации. – 2003. – №2. – С. 66-71.

27. Печатные платы. Монтаж печатных плат. Контроль качества печатных плат и электронных блоков. Сложные печатные платы (рос.). Режим доступа: http://www.rcmgroup.ru/fileadmin/rcm/buklets/Buklet_No_1-5.compressed.pdf. – (RCM Group).

28. Маркировка SMD конденсаторов (для поверхностного монтажа) (рос.). Режим доступа: <http://www.radiant.su/rus/articles/?action=show&id=333>.

29. Конструируем систему охлаждения компьютера. Режим доступа: <http://www.ixbt.com/cpu/pc-cooling-construction.shtml#General>.

30. Электромагнитная совместимость и ограничения при конструировании печатных плат / Перевод В. Семенова // Современная электроника. – 2005. – №2. – С. 58-60. Режим доступа: <http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.soel.ru%2Fcms%2F%2F%2F311587.pdf&ei=B8ObVNTjJMGsPfvmgZgM&usg=AFQjCNHqFXF1cf60kIU0uxFpqij1uJjSEg&bvm=bv.82001339,d.ZWU>.

Навчальне видання

**КОНСТРУЮВАННЯ
ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА
ТЕХНІКИ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ**

Навчальний посібник
у трьох книгах

ТРАВНІКОВ Євгеній Миколайович
ЛАЗЕБНИЙ Володимир Семенович
ВЛАСЮК Ганна Григорівна
ПЛІНСЬКИЙ Володимир Володимирович
СПІВАК Віктор Михайлович
ШВАЙЧЕНКО Володимир Борисович

За загальною редакцією В. С. Лазебного

Книга 2

ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ

Комп'ютерна верстка і дизайн – В. А. Демура

Підп. до друку 28. 01.2015
Формат 70x100/16. Папір офсетний
Ум.-друк. арк. ??,??. Тираж 500 пр.

Видавництво «КАФЕДРА»

04136, м. Київ, вул. Маршала Гречка, 13, оф.117
e-mail: kafedra.druk@gmail.com
www.kafedra.in.ua

тел./факс (044) 501-18-30, (067) 442-98-78

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції.

Серія ДК № 4175 від 20.10.2011 р.

Друкарня «Гордон»

03179, м. Київ, вул. Котельнікова, 95
Тел./факс (044) 501-35-69

Свідоцтво про державну реєстрацію

ДК № 1422 від 08.07.2003

**ТРАВНИКОВ Євген Миколайович**

народився у 1939 р. Закінчив Київський політехнічний інститут. Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «КПІ». Автор понад 250 наукових та навчально-методичних праць. Почесний працівник промисловості засобів зв'язку СРСР. Заслужений винахідник УРСР. Фахівець у галузі конструювання і технології виробництва радіоапаратури.

**ЛАЗЕБНИЙ Володимир Семенович**

народився у 1954 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «КПІ». Автор понад 100 наукових та навчально-методичних праць. Лауреат премії Ленінського комсомолу у галузі науки і техніки за 1985 р. Фахівець в галузі електронних засобів реєстрації інформації та телекомунікаційних систем.

**ВЛАСЮК Ганна Григорівна**

народилася у 1955 р. Закінчила Київський політехнічний інститут. Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «КПІ». Автор понад 140 наукових та навчально-методичних праць. Фахівець у галузі телекомунікаційних і інформаційних технологій та електронних систем.

**ПЛІНСЬКИЙ Володимир Володимирович**

народився у 1941 р. Закінчив Київський політехнічний інститут. Кандидат технічних наук, професор, професор кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «КПІ». Автор понад 360 наукових та навчально-методичних праць. Фахівець у галузях електроживлення та електромагнітної сумісності електронних та телекомунікаційних систем.

**СПІВАК Віктор Михайлович**

народився у 1945 р. Закінчив Київський політехнічний інститут. Кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «КПІ». Автор понад 300 наукових та навчально-методичних праць. Лауреат премій НТУУ «КПІ» за кращу монографію і кращий підручник. Фахівець у галузі променевих технологій та пристроїв, електронних кіл, процесів та систем.

**ШВАЙЧЕНКО Володимир Борисович**

народився у 1955 р. Закінчив Київський політехнічний інститут. Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «КПІ». Автор понад 190 наукових та навчально-методичних праць. Фахівець у галузі техніки реєстрації інформації та електромагнітної сумісності звукотехнічних систем.