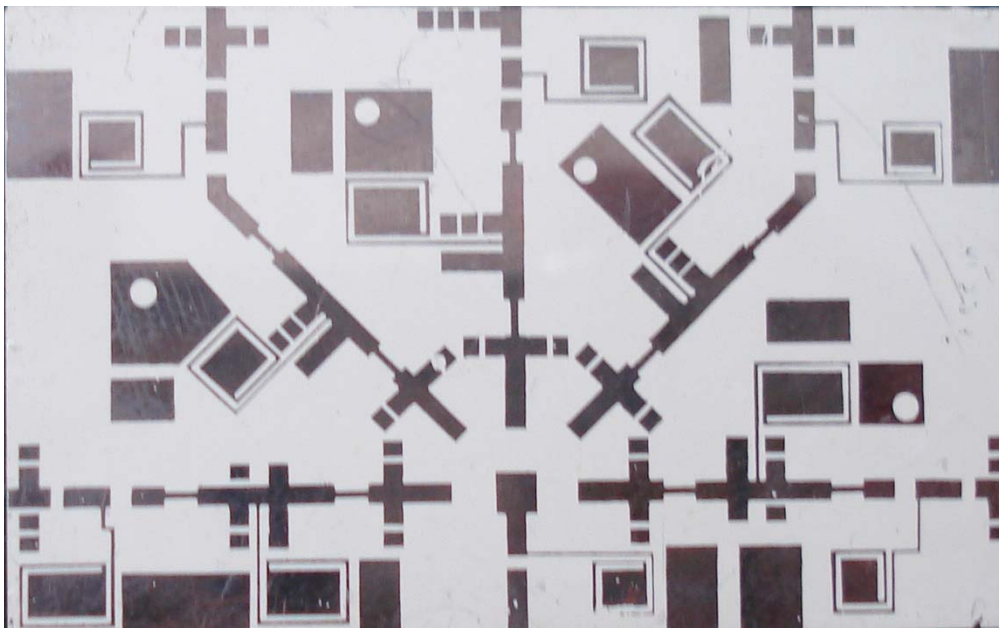


*М. А. ФІЛИНЮК, О. В. ВОЙЦЕХОВСЬКА*

**ТЕХНІЧНА  
ЕЛЕКТРОНІКА**  
*КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ*



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

М. А. ФЛИНЮК  
О. В. ВОЙЦЕХОВСЬКА

**ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОНІКА  
КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ**

Вінниця  
ВНТУ  
2011

УДК 621.382

БКК

Ф53

Рекомендовано до видання Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Рецензенти:

**В. П. Манойлов**, доктор технічних наук, професор

**В. М. Лисогор**, доктор технічних наук, професор

**С. М. Злепко**, доктор технічних наук, професор

**Філінюк, М. А.**

Ф53 Технічна електроніка. Курсове проектування : навчальний посібник. М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 90 с.

Навчальний посібник присвячений курсовому проектуванню з дисципліни “Технічна електроніка”. Розглянуто питання проектування гібридних інтегральних схем, наведено приклади необхідних при виконання курсового проекту розрахунків, а також приклади оформлення відповідної конструкторської документації.

Призначений для студентів напрямку підготовки “Телекомунікації”.

**УДК 621.382**

**БКК**

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 4  |
| 1 ОРГАНІЗАЦІЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ.....                                       | 5  |
| 1.1 Мета курсового проектування.....  | 5  |
| 1.2 Формування тем та етапи виконання курсового проекту.....                    | 5  |
| 1.3 Зміст курсового проекту.....  | 6  |
| 1.4 Захист курсових проектів.....   | 6  |
| 2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....   | 9  |
| 3 КОМПЛЕКТ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА ІНТЕГРАЛЬНУ МІКРОСХЕМУ.....         | 11 |
| 4 КОНСТРУЮВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ.....    | 18 |
| 4.1 Матеріали гібридних інтегральних схем.....                                  | 18 |
| 4.2 Конструкції та розрахунок тонкоплівкових елементів.....                     | 22 |
| 4.2.1 Конструкції та розрахунок плівкових резисторів.....                       | 22 |
| 4.2.2 Конструкції та розрахунок плівкових конденсаторів.....                    | 29 |
| 4.2.3 Розрахунок плівкових провідників та контактних площадок.....              | 35 |
| 4.2.4 Розрахунок плівкових контактних переходів.....                            | 38 |
| 4.3 Конструкції навісних компонентів.....                                       | 41 |
| 5 ПРОЕКТУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ.....                       | 42 |
| 5.1 Особливості топології і етапи розробки.....                                 | 42 |
| 5.2 Розрахунок площі гібридних інтегральних схем.....                           | 42 |
| 5.3 Проектування топології тонкоплівкових гібридних мікросхем..                 | 43 |
| 5.4 Розрахунок паразитних зв'язків у гібридних мікросхемах.....                 | 44 |
| 5.5 Розрахунок теплового режиму гібридної мікросхеми.....                       | 47 |
| 5.6 Розрахунок надійності гібридної мікросхеми.....                             | 52 |
| 5.7 Використання комп'ютерних програм при проектуванні гібридних мікросхем..... | 54 |
| ЛІТЕРАТУРА.....   | 58 |
| Глосарій.....   | 59 |
| Додатки.....  | 63 |

## ВСТУП

Виконання курсового проекту з дисципліни "Технічна електроніка" є важливим етапом вивчення цієї дисципліни, на якому студент повинен показати свою здатність застосовувати вивчений теоретичний матеріал на практиці.

Курсовий проект передбачає розробку гібридної інтегральної схеми пристрою за схемою електричною принциповою та переліком елементів до неї.

Студент вибирає технологію виготовлення мікросхеми та необхідні матеріали, з яких виконуються її елементи та компоненти. За вказаними параметрами проводить розрахунки плівкових елементів та навісних компонентів, що входять до складу пристрою, розробляє його топологію та виконує перевірку розрахунки для цієї топології.

Завершальним етапом курсового проекту є оформлення всієї необхідної конструкторської документації згідно з діючими стандартами.

В першому розділі посібника наведено питання, що стосуються організації курсового проектування, формування тем, змісту та захисту курсового проекту.

В другому розділі описано вимоги, що висуваються до розробки технічного завдання до курсового проекту.

Третій розділ присвячено оформленню комплекту конструкторської документації на інтегральну схему.

Четвертий розділ навчального посібника містить дані про матеріали, що використовуються при виготовленні гібридних схем, порядки розрахунків плівкових елементів та конструкції навісних компонентів.

В останньому розділі посібника наведено розрахунки паразитних зв'язків, що виникають в схемі, надійності гібридних інтегральних схем, методику оцінювання теплового режиму гібридної інтегральної схеми та опис комп'ютерних програм, що використовуються при проектуванні інтегральних схем.

Посібник містить приклади розрахунків, що необхідно проводити при виконанні курсового проекту, а також приклади креслень до проекту, розроблених студентами.

Посібник призначений для студентів другого курсу напряму підготовки "Телекомунікації",.

# 1 ОРГАНІЗАЦІЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ

## 1.1 Мета курсового проектування

Мета проектування: навчитись самостійно розробляти топологію *гібридних інтегральних схем (hybrid integrated microcircuits)* і мікрозбіроч; навчитись методики розрахунку складових елементів та використанню типових методик і довідкової літератури; навчитись правильному складанню конструкторської документації.

## 1.2 Формування тем та етапи виконання курсового проекту

Вихідними даними для курсового проекту є схема електрична принципова та перелік елементів, що пропонується викладачем кожному індивідуально. Дозволяється вибирати теми із технічної періодичної літератури, наприклад журнали „Радіо”, „Радіоаматор”, „Радіосвіт” та „Радіохоббі” самостійно з обов’язковим узгодженням з викладачем. Не допускається використання однакових тем. Темі курсових проектів затверджуються на засіданні кафедри.

Студент виконує курсовий проект під керівництвом викладача, який визначає дні та години консультацій. Під час роботи студент повинен показати здатність самостійно вирішувати поставлені задачі, працювати з нормативно-довідковою та технічною літературою.

Попередньо керівник видає індивідуальне завдання до проекту, яке повинно бути другою сторінкою після титульного листа та не вноситься до переліку змісту. Зразки титульного листа та індивідуального завдання до курсового проекту наведено далі в тексті.

Проектування складається із таких основних етапів:

**Етап 1** – розробка технічного завдання, аналіз схеми електричної принципової та елементної бази.

**Етап 2** – вибір технології виготовлення гібридної мікросхеми.

**Етап 3** – розрахунок елементів з урахуванням технологічних обмежень.

**Етап 4** – розробка топології і вибір корпусу. Вибір корпусу здійснюється із числа уніфікованих конструкцій за такими вихідними даними: розміром плати, кількістю виводів і умов експлуатації.

**Етап 5** – перевірка якості розробки топології і конструкції: розрахунок паразитних зв’язків та надійності.

**Етап 6** – коригування або переробка топології конструкції.

**Етап 7** – оформлення пояснювальної записки. Записка повинна бути виконана відповідно до ГОСТ 2.105-95.

**Етап 8** – Оформлення конструкторської документації. Креслення повинні бути виконані з урахуванням вимог ЄСКД ручним або автоматизованим методом.

**Етап 9** – підготовка до захисту проекту.

Після закінчення курсового проекту керівник перевіряє його і якщо він задовольняє всі вимоги, то студент допускається до захисту.

### **1.3 Зміст курсового проекту**

Пояснювальна записка на курсовий проект повинна містити розділи у такій послідовності:

- аналіз схеми електричної принципової та елементної бази;
- розрахунок плівкових елементів мікросхеми;
- розробка топології мікросхеми;
- вибір *корпуса (package)* мікросхеми;
- розрахунок паразитних зв'язків та надійності мікросхеми;
- висновки;
- література;
- додатки.

Графічна частина повинна містити: схему електричну принципову, перелік елементів, комутаційну схему, креслення топології плати – загальне та пошарові, специфікацію.

Розширене технічне завдання повинно містити всі необхідні вимоги до конструкції мікросхеми: найменування та застосування; вимоги до електричних параметрів; конструктивні обмеження; вимоги до експлуатації; вимоги до живлення; надійності і уніфікації, програму випуску.

В розділі «Аналіз схеми електричної принципової» студент повинен проаналізувати кожен складову на предмет її виготовлення за типовими технологічними методами, ті елементи, які неможливо виготовити в плівковому виконанні, необхідно замінити на навісні малогабаритні та проаналізувати їх за електричними, габаритними та експлуатаційними показниками.

### **1.4 Захист курсових проектів**

Порядок захисту курсового проекту визначається робочим графіком його виконання. Попередньо проводиться перевірка КП керівником. До захисту допускаються курсові проекти, що виконані в повному обсязі згідно із затвердженими індивідуальними завданнями, підписані керівником на титульному аркуші із зазначенням дати.

Захист проекту проводиться публічно та вміщує коротку доповідь (5-7хв.) студента за темою проекту перед комісією у складі не менше як двох викладачів, та відповіді на запитання.

Результати захисту оцінюють за прийнятою модульно-рейтинговою шкалою.

## Зразок індивідуального завдання до курсового проекту

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет  
Інститут радіотехніки, зв'язку та приладобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. каф. ПКТА, проф., д.т.н.  
М. А. Філінюк  
" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ  
на курсовий проект з дисципліни "Технічна електроніка"  
студенту Іванову І. І. факультету МБЕП групи ТКп-09

Розробити гібридну інтегральну схему *генератора сигналів*  
(назва пристрою)

Вихідні дані:

- схема електрична принципова;
- перелік елементів;
- споживана потужність – 100 мВт;
- напруга живлення – 5 В.

### ЗМІСТ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

1. Аналіз схеми електричної принципової та елементної бази.
2. Розрахунок плівкових елементів мікросхеми.
3. Розробка топології мікросхеми.
4. Вибір корпусу мікросхеми.
5. Розрахунок надійності мікросхеми.

### ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

1. Схема електрична принципова.
2. Перелік елементів.
3. Комутаційна схема.
4. Топологічне креслення.
5. Пошарові креслення.
6. Специфікація.

Дата видачі " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Керівник \_\_\_\_\_  
(підпис)

Завдання отримав \_\_\_\_\_  
(підпис студента)



## Зразок титульного аркуша до курсового проекту

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет  
Інститут радіотехніки, зв'язку та приладобудування

Кафедра ПКТА

### ГІБРИДНА ІНТЕГРАЛЬНА СХЕМА ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛІВ ЗАДАНОЇ ЧАСТОТИ

Пояснювальна записка  
з дисципліни "Технічна електроніка"  
до курсового проекту за напрямом підготовки  
6.050903 – Телекомунікації  
08–40.ТЕ.312.00.000 ПЗ

Керівник курсового проекту  
к.т.н., доц. Петров П. П.  
*(прізвище та ініціали)*

\_\_\_\_\_ (підпис)  
” ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Розробив студент гр. ТКп-09  
Іванов І. І.  
*(підпис, прізвище та ініціали)*  
” ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Вінниця ВНТУ 20\_\_

## 2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

*Технічне завдання (statement of work)* для дослідно-конструкторських робіт (ДКР) виконується згідно з ДСТУ 3974–2000 “Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення”. Воно повинно додаватися в першому з додатків та містити такі розділи.

**1. Назва дослідно-конструкторської роботи.** Тут зазначається повна назва, шифр ДКР, назва документа, який є підставою для виконання проекту, дата його затвердження, організація затвердження.

**2. Виконавці ДКР.** Записується назва установи, яка проводить ДКР.

**3. Виробник.** Зазначається установа, підприємство, на якому виготовлятиметься об’єкт розробки.

**4. Мета виконання ДКР та призначення продукції.**

**5. Склад продукції.**

**6. Технічні вимоги.**

**6.1 Призначення.** В цьому розділі зазначаються – технічні характеристики, які забезпечують виконання заданих функцій;

– порядок і спосіб взаємодій з об’єктами, які сполучаються з пристроями;

– імовірно-часові характеристики та показники (час готовності до виконання та час безперервної або циклічної роботи)

**6.2 Вимоги життєздатності та стійкості до зовнішніх факторів.** Вказуються кліматичні та механічні фактори.

**6.3 Вимоги надійності.** Містять – показники надійності; – критерії відмов і граничного стану продукції; – вимоги до конструктивних і експлуатаційних способів забезпечення надійності.

**6.4 Вимоги до конструкції:**

– габаритні та приєднувальні розміри;

– спосіб кріплення;

– засоби регулювання та органи настроювання;

– конструктивний вид виконання (блочний або моноблочний);

– обмеження щодо маси виробу;

– використання базових конструкцій.

**6.5 Вимоги технологічності:**

– вимоги до виробничої експлуатаційної та ремонтної технологічності (ГОСТ 14201–83);

– вимоги до використання професійних технологій і уніфікованого устаткування.

**6.6 Вимоги уніфікації та стандартизації.**

Наводять кількісні технологічні показники (наприклад, коефіцієнт застосовуваності, повторюваності, міжпроектної уніфікації).

**6.7 Вимоги метрологічного забезпечення виробництва і експлуатації:**

- вимоги до метрологічного вимірювання параметрів та контролю продукції;
- обґрунтування вимог проведення метрологічної експертизи;
- необхідності розробки метрологічних стендів.

**6.8 Вимоги дизайну, ергономіки та техн. естетики:**

- вимоги до дизайну, що визначають композиційну цілісність, художню виразність, раціональність форм та сучасний стиль (ДСТУ 3943–2000, ДСТУ 3944–2000);
- загальні ергономічні вимоги до робочих місць (ГОСТ 12.2.032–78, ГОСТ 12.2.033–78).

**6.9 Вимоги до експлуатації та зручності техн. обслуговування:**

- умови експлуатації;
- експлуатаційні та чергові режими;
- запобіжні засоби щодо несанкціонованого застосування;
- системи засобів експлуатаційного контролю;
- види періодичності обслуговування та ремонту (календарний, за ресурсом, за технічним станом);
- зручність складання та розбирання конструкцій.

**6.10 Вимоги до безпеки життя, здоров'я та охорони довкілля:**

Зазначають всі можливі шкідливі фактори за ДСТУ ISO 14001–2000, ДСТУ ISO 14004–2000

**6.11 Вимоги до сумісності.** Відповідають ДСТУ 2793–94.

- номенклатура параметрів електромагнітної сумісності;
- допустимі кількісні значення випадкових радіозавад.

**6.12 Вимоги взаємозамінності.** Тут наводять вимоги до забезпечення механічної, функціональної та інформаційної заміненості однойменних складових частин.

**6.13 Вимоги до транспортування і зберігання:**

- вид транспорту, яким дозволено транспортувати (повітряний, залізничний і т. п.);
- параметри транспортування;
- кліматичні умови під час транспортування;
- умови зберігання під час транспортування (терміни, температурний режим).

**6.14 Вимоги до якості і технічного рівня.** Наводять градацію, що має визначити, якому рівню відповідає продукція (відповідає світовому рівню, переважає світовий рівень).

**7. Техніко–економічні вимоги.** В цьому розділі наводять:

- вимоги до автоматизації проектування;

- орієнтовно-економічну ефективність;
- термін окупності;
- орієнтовно-ринкову ціну;
- річну потребу у виробі;
- економічні переваги у порівнянні з аналогом.

#### **8. Вимоги до сировини, матеріалів і комплектації**

- вимоги до покупних виробів, фарб і матеріалів;
- можливість застосування дефіцитних або високовартісних виробів;
- можливість використання виробів невітчизняного виробництва.

**9. Вимоги до консервації, пакування і маркування.** Наводять вимоги до консервації, пакування, маркування на упаковці.

#### **10. Спеціальні вимоги.**

**11. Вимоги до розроблювальної документації.** Наводять склад конструкторської документації (КД), яка має бути розроблена, а також стадії проектування.

#### **12. Стадії та етапи ДКР.**

#### **13. Порядок приймання ДКР.**

Технічне завдання має окрему нумерацію та окремий титульний аркуш, приклад оформлення якого наведено в додатку А.

## **3 КОМПЛЕКТ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА ІНТЕГРАЛЬНУ МІКРОСХЕМУ**

**Загальні положення.** Залежно від стадії розробки *інтегральної мікросхеми (integrated microcircuits)* на неї випускається сукупність конструкторських документів. В загальному випадку види та комплектність цих документів регламентуються стандартами *єдиної системи конструкторської документації ЄСКД (common system for design documentation)*. Зокрема ГОСТ 2.102-68 встановлює таку комплектність *конструкторських документів (design documents)*:

- основний конструкторський документ (для деталей – креслення деталей, для складальних одиниць – специфікація);
- основний комплект конструкторських документів, що включає конструкторські документи, складені на весь виріб в цілому;
- повний комплект конструкторських документів, що включає основний комплект конструкторських документів на даний виріб і основні комплекти конструкторських документів на всі складові частини даного виробу.

Найчастіше зустрічаються в різних комплектах такі види документів:

- креслення деталі – документ, що містить зображення деталі та інші дані, необхідні для її виготовлення і контролю;

- складальне креслення – документ, що містить зображення складальної одиниці та інші дані, необхідні для її збирання і контролю;
- габаритне креслення – документ, що містить контурне зображення виробу з габаритними, встановлювальними та приєднувальними роз'ємами;
- схема електрична принципова – документ, що визначає повний склад елементів виробу та електричні зв'язки між ними;
- специфікація – документ, що визначає склад складальної одиниці, комплексу або комплекту;
- технічні умови – документ, що містить вимоги до виробу, його виготовлення, контролю, приймання та постачання, які недоцільно вказувати в інших конструкторських документах;
- карта технічного рівня і якості виробу – документ, що містить дані, які визначають технічний рівень якості виробу та відповідність його технічних і економічних показників досягненням науки і техніки, а також потребам народного господарства;
- патентний формуляр – документ, який містить відомості про патентну чистоту об'єкта, а також про створені та використані при його розробці вітчизняні винаходи.

*Конструкторська документація (design documentation)*, яка випускається в процесі розробки мікросхем, повинна відповідати вимогам не тільки державних стандартів ЕСКД, але й галузевих нормативних документів. Правила виконання конструкторської документації на інтегральні мікросхеми значною мірою конкретизує ОСТ 11 0.000.028-73.

Залежно від стадії розробки конструкторські документи поділяються на проектні (технічна пропозиція, ескізний проект і технічний проект) та робочі (робоча документація). Комплектність конструкторської документації на мікросхему на стадії розробки робочої документації подана в табл. 3.1. При цьому на мікросхему, яка не підлягає поставці, допускається не складати габаритне креслення, технічні умови, довідковий лист, патентний формуляр і етикетку.

Найменування мікросхеми в конструкторській документації повинно складатися зі слова «Мікросхема» та її умовного позначення відповідно до ГОСТ 18682–73.

Порядок розробки конструкторських документів на мікросхему не збігається з тим порядком, в якому зазначені документи розташовуються у комплекті. В цьому посібнику конструкторські документи розглядаються в порядку їх розробки.

**Схема електрична принципова.** Процес конструювання мікросхеми починається з креслення схеми електричної принципової, яка є обов'язковим документом комплекту конструкторської документації. На електричній принциповій схемі повинні бути показані не тільки всі плівкові або

напівпровідникові елементи, але і навісні компоненти, якщо вони є, а також зв'язки між ними.

Таблиця 3.1 – Комплектність конструкторської документації на мікросхему

| Шифр документа | Найменування документа          | Відмітка про випуск |
|----------------|---------------------------------|---------------------|
| —              | Креслення деталі                | +                   |
| СК             | Складальне креслення            | +                   |
| ГК             | Габаритне креслення             | +                   |
| Е2             | Схема електрична функціональна  | —                   |
| Е3             | Схема електрична принципова     | +                   |
| Е5             | Схема електрична підключення    | —                   |
| Е7             | Схема електрична розташування   | —                   |
| —              | Специфікація                    | +                   |
| ВС             | Відомість специфікацій          | —                   |
| ВД             | Відомість документів            | —                   |
| ВП             | Відомість покупних виробів      | —                   |
| ДП             | Відомість власників оригіналів  | —                   |
| ТУ             | Технічні умови                  | +                   |
| КР             | Карта технічного рівня і якості | +                   |
| ТБ             | Таблиці                         | —                   |
| ДЛ             | Довідковий лист                 | +                   |
| ПФ             | Патентний формуляр              | +                   |
| ЕТ             | Етикетка                        | +                   |

Кожен елемент виробу на схемі подається у вигляді умовного графічного позначення, яке встановлюється відповідним стандартом ЕСКД, наприклад умовні позначення загального застосування регламентуються ГОСТ 2.721-74, умовні позначення резисторів і конденсаторів – ГОСТ 2.728-74, умовні позначення напівпровідникових приладів – ГОСТ 2.730-73, умовні позначення двійкових логічних елементів – ГОСТ 2.743-72 і т. д.

Кожен елемент, поданий на схемі електричній принциповій, повинен мати літерно-цифрове позиційне позначення. Таке позначення, як правило, складається з однієї або кількох букв та цифр, які проставляються після букв, причому цифри відповідають порядковому номеру елемента. Нумерація елементів схеми проводиться зверху вниз і зліва направо.

Всі елементи мікросхеми повинні бути занесені до переліку елементів. Перелік елементів оформлюється відповідно до вимог, встановлених ГОСТ 2.702-75, і розташовується переважно на полі креслення. Однак допускається перелік елементів виконувати й у вигляді окремого документа на аркушах формату А4.

Елементи до переліку записують групами в алфавітному порядку літерних позиційних позначень. Якщо на схемі застосовують позиційні позначення, складені з літер латинського та українського алфавітів, то в пере-

лік спочатку записують елементи з позиційними позначеннями, складеними з літер латинського алфавіту, а потім з українського. В межах кожної групи, що має однакові літерні позиційні позначення, елементи розташовують за зростанням їхніх порядкових номерів. Для полегшення внесення змін допускається залишати кілька незаповнених рядків між окремими групами елементів.

Відомості про плівкові елементи (*elements of the integrated microcircuit*) та навісні компоненти (*components of the integrated microcircuit*) до переліку записують в такому порядку. В графі «Поз. позначення» вказують позиційне позначення елемента (компонента). У графі «Найменування» для плівкового елемента вказують найменування, розрахунковий номінал і допуск, а також величину максимальної потужності розсіювання (для резистора) та максимальної робочої напруги (для конденсатора); для навісного компонента записують його найменування відповідно до документа, на підставі якого цей компонент застосовано, і позначення (номер) даного документа. В графі «Кількість» вказується кількість однотипних елементів (компонентів).

При виконанні креслення схеми електричної принципової на напівпровідникову інтегральну мікросхему перелік елементів не складається. При цьому параметри елементів, допуски на них, а також інші дані рекомендується вказувати поряд з умовними позначеннями елементів або на полі креслення.

На схемі електричній принциповій позначення зовнішніх виводів повинні відповідати нумерації виводів корпусу мікросхеми.

Приклад виконання креслення схеми електричної принципової та переліку елементів для гібридної інтегральної мікросхеми зображено в додатках Б та В, відповідно.

За схемою електричною принциповою складається креслення комутаційних з'єднань, приклад оформлення якого наведено в додатку Г.

**Топологічне креслення.** Це документ, що визначає орієнтацію та взаємне розташування всіх елементів і компонентів мікросхеми на підкладці. Він регламентує форму та розміри плівкових елементів і з'єднання між ними. Даний документ зумовлює оптимальне розміщення елементів на підкладці та забезпечує виготовлення мікросхеми із заданими технічними й електричними параметрами. Топологічне креслення є основним документом, за яким можна оцінити можливий характер і величину паразитних зв'язків у мікросхемі, розрахувати її теплові режими.

Оскільки топологічне креслення відноситься до креслень деталей, то на його оформлення повною мірою поширюються вимоги ГОСТ 2.109-73 (розділ «Креслення деталей»). Специфічні вимоги, що висуваються до топологічних креслень, регламентуються ОСТ 11 0.000.028-73.

Для достатньої наочності взаємного розташування елементів на підкладці топологічне креслення рекомендується виконувати в таких масшта-

бах для гібридних інтегральних мікросхем – 5:1, 10:1, 20:1 та в інших масштабах збільшення, кратних десяти.

Топологічне креслення, як правило, виконується на кількох аркушах, причому на першому аркуші завжди зображується підкладка з усіма нанесеними на неї шарами. Крім того, на цьому аркуші наводяться умовні позиційні позначення елементів відповідно до схеми електричної принципової, а також проставляються номери контактних площадок. Нумерація розташованих по контуру периферійних контактних площадок починається з одного з кутів плати (переважно з лівого нижнього) та ведеться в напрямку, протилежному напрямку руху годинникової стрілки. Характерно, що дана нумерація повинна відповідати нумерації аналогічних зовнішніх виводів схеми електричної принципової та складального креслення. Контактні площадки, розташовані всередині контуру, обмеженого периферійними контактними площадками, нумеруються наступними порядковими номерами. Обхід їх здійснюється в напрямку зверху вниз і зліва направо.

На наступних аркушах топологічного креслення розташовують пошарове зображення елементів окремо для кожного шару. В випадку двостороннього розташування елементів на підкладці вигляд на одну з її сторін розміщується на другому аркуші топологічного креслення.

Іноді для зручності викреслювання елементів мікросхеми на топологічному кресленні використовується координатна сітка, яка може мати крок 0,01; 0,05; 0,1 або 0,2 мм. При нанесенні координатної сітки вершини фігур елементів необхідно розташовувати в точках перетину ліній сітки.

Крім основного вигляду, на першому аркуші топологічного креслення наводять технічні вимоги та таблиці, в яких містяться дані про виготовлення окремих шарів і величини електричних параметрів елементів мікросхеми.

Технічні вимоги викладаються в певній послідовності, наведеній нижче, та включають такі пункти:

- вказівка про розміри для довідок;
- специфічні вимоги до виготовлення підкладки та вказівки про можливу заміну її матеріалу;
- вимоги до точності виготовлення плівкових елементів;
- вказівка про те, в якому масштабі задано координати елементів, якщо вони задані не в натуральну величину;
- вказівка про крок координатної сітки;
- дані про площу нанесених коштовних матеріалів;
- вимоги до зовнішнього вигляду підкладки з нанесеними на неї плівковими елементами;
- посилання на таблицю, в якій наведено характеристики та дані з виготовлення окремих шарів і елементів;
- посилання на таблицю, в якій містяться вказівки із перевірки величин електричних параметрів елементів мікросхеми;



– вимоги до класу точності приладів, якими здійснюється контроль параметрів;

– посилання на таблиці, в яких наведено координати вершин елементів, або посилання на документи, якщо таблиці координат виконано у вигляді самостійних документів (з шифром ТБ);

– вказівка про те, що координатна сітка, а також позначення контактних площадок та елементів є умовними.

Таблиця, в якій наводяться дані з виготовлення окремих шарів, містить, як правило, такі графи: «Умовне позначення шару», «Найменування шару», «Матеріал шару», «Електричні характеристики», «Метод нанесення шару» та ін. Кількість граф в даній таблиці та їх порядок нормативними документами не регламентуються.

Друга таблиця, яка наноситься на перший лист топологічного креслення, містить величини електричних параметрів плівкових елементів мікросхеми, одержуваних за даним кресленням. Обов'язковими графами в цій таблиці є: «Точки виміру» та «Перевірні величини й граничні відхилення». Допускається введення в таблицю й додаткових граф, наприклад: «Позиційне позначення», «Робоча напруга», «Коефіцієнт електричного навантаження» та ін, а також розбиття граф на частини. Штамп, наявний на топологічному кресленні, заповнюється відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 2.104-2006. При цьому в графі, в якій вказується найменування виробу, для гібридних інтегральних мікросхем записується найменування „Плата”.

На перших аркушах топологічних креслень гібридних ІМС елементи кожного шару штрихуються, причому вид штрихування розшифровують в таблиці, в якій наводяться дані з виготовлення цих шарів. Приклад виконання першого аркуша топологічного креслення гібридної ІМС наведено в додатку Д.

На наступних аркушах топологічного креслення наносять пошарове зображення елементів, причому над зображенням шару допускається розміщувати напис, що характеризує зображувані елементи, наприклад «Вид на шар провідників і контактних площадок». Приклад оформлення креслення шару наведено в додатку Е.

Істотний вплив на оформлення креслення шару має спосіб задання розмірів елементів. Для цього, в основному, використовується спосіб прямокутних координат. При способі задавання розмірів елементів їх вершини нумеруються арабськими цифрами. Контур кожного елемента, починаючи з лівого нижнього кута, обходять за годинниковою стрілкою. У разі високої щільності розміщення елементів на підкладці та в зв'язку з відсутністю місця для вказання номерів їх вершин дозволяється не проставляти окремі координати. Координати вершин елементів поміщаються в таблицю, яка, як правило, розташовується на кресленні шару. Однак таку таблицю допускається оформляти у вигляді окремого самостійного документа (з шифром ТБ), приклад оформлення якого наведено в додатку Ж.

**Складальне креслення.** Складальне креслення мікросхеми виконується відповідно до вимог, що висуваються до таких креслень ГОСТ 2.109-73 (розділ «Креслення складальні»), та вимог, викладених в ОСТ 110.000.028-73, а також в ОСТ 4 ГО.010.043.

На складальному кресленні мікросхеми вказується стільки виглядів, розрізів і перерізів, скільки необхідно для повного уявлення про розташування та взаємний зв'язку її складових частин. Крім того, на такому кресленні проставляються розміри та граничні відхилення, які повинні бути витримані або проконтрольовані за даним кресленням. Вказується також і характер з'єднання складових частин мікросхеми та способи його здійснення (зварювання, паяння, склеювання та ін.) При цьому всі складові частини, що входять в мікросхему, на складальному кресленні нумеруються відповідно до номерів позицій, зазначених в специфікації. Номери позицій наносять на полицях ліній-виносок, що проводяться від зображень складових частин. Крім графічного зображення конструкції мікросхеми, на складальному кресленні наводяться технічні вимоги, в яких повинні бути вказані варіанти установа безкорпусних компонентів, допустимі відхилення розташування підкладки відносно корпусу, вимоги технологічного порядку, вказівки про спосіб герметизації мікросхеми та ін.

Складальне креслення мікросхеми, як правило, повинно містити зображення встановленої в корпус плати з плівковими елементами та навісними компонентами. На основному вигляді складального креслення допускається зображати мікросхему зі знятою кришкою. Це робиться для того, щоб показати розміщення навісних компонентів на платі, а також з'єднання периферійних контактних площадок з виводами корпусу. Захисний шар на цьому вигляді дозволяється показувати непрозорим.

Штамп на складальному кресленні заповнюється відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 2.104-2006. В основному написі штампа записують «Мікросхема... Складальне креслення»

Після слова «Мікросхема» вказують її умовне позначення відповідно до ГОСТ 18682-73. Децимальний номер, що присвоюється складальному кресленню, має вигляд 08-40.КП.3ХХ.00.000 СК.

**Специфікація.** На кожну мікросхему складають специфікацію, в яку вносять її складові частини, а також конструкторські документи, які стосуються цієї мікросхеми. Специфікацію оформляють на спеціальних бланках відповідно до вимог ГОСТ 2.108-68. В загальному випадку специфікація складається з розділів, які розташовуються у викладеній нижче послідовності: документація, складальні одиниці, деталі, стандартні вироби, інші вироби, матеріали та комплекти.

ГОСТ 2.108-68 регламентує порядок заповнення кожного з перерахованих розділів. Так, у розділ «Документація» записують спочатку документи на специфікований виріб, а потім документи на неспецифіковані складові частини. Документи в кожній частині записують в алфавітному

порядку поєднання початкових знаків (букв) індексів організацій-розробників і далі в порядку зростання цифр, що входять у позначення. Приклад оформлення специфікації на гібридну інтегральну мікросхему наведено в додатку И.

Складальні одиниці і деталі, що безпосередньо входять в моновириб, вносять відповідно до розділів «Складальні одиниці», «Деталі». При цьому запис зазначених виробів ведуть в алфавітному порядку поєднання початкових знаків індексів підприємств-розробників.

В розділі «Стандартні вироби» спочатку записують вироби, застосовувані за державними, далі за галузевими стандартами. В кінці розділу записують вироби, які відповідають стандартам підприємств. У межах кожної категорії стандартів вироби записують по групах, об'єднаних за функціональною ознакою, в межах кожної групи – в алфавітному порядку найменувань виробів, в межах кожного найменування – в порядку зростання позначень стандартів, а в межах кожного позначення стандарту – в порядку зростання основних параметрів виробу.

В розділ "Інші вироби" вносять вироби, які застосовуються за технічними умовами, каталогами, прейскурантами і т. п.

В розділі «Матеріали» спочатку записують чорні та кольорові метали, потім кабелі, проводи й шнури, далі пластмаси, паперові та текстильні матеріали. Далі записують лісоматеріали, гуму та шкіру, керамічні та скляні матеріали, лаки, фарби, хімікати. Матеріали, необхідна кількість яких не може бути визначена конструктором, в специфікацію не вносяться. До таких матеріалів відносяться: лаки, фарби, клеї та ін. Вказівку про застосування таких матеріалів дають в технічних вимогах на полі креслення.

В розділ «Комплекти» вносять відомість експлуатаційних документів, комплект монтажних, змінних та запасних частин, комплект інструменту й приладдя, комплект укладок, комплект тари та інші комплекти.

Решта не розглянутих в цьому розділі видів конструкторських документів, які складаються на мікросхему на етапі розробки робочої документації, оформляють з дотриманням вимог відповідних державних та галузевих стандартів. Наприклад, габаритне креслення оформляють, виходячи з вимог ГОСТ 2.109-73 (розділ «Креслення габаритні»), технічні умови – за ГОСТ 2.114-95, карту технічного рівня й якості продукції – за ГОСТ 2.116-84 і т. д.

## **4 КОНСТРУЮВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ**

### **4.1 Матеріали гібридних інтегральних схем**

**Матеріали для підкладок.** Підкладка (*substrate*) в конструкції гібридної інтегральної схеми (ГІС) є основою, на якій розташовуються плів-

кові елементи і навісні компоненти. Від її властивостей багато в чому залежить якість всієї конструкції.

Підкладки, використовувані при виготовленні гібридних інтегральних мікросхем, повинні відповідати таким вимогам: мати значну механічну міцність при невеликих товщинах; мати високий питомий електричний опір і малі втрати  $\operatorname{tg} \delta$  на високих частотах і при високій температурі; бути хімічно інертними до осаджуваних речовин; не мати газовиділень у вакуумі; зберігати фізичну й хімічну стійкість при нагріванні до 400–500 °С; мати температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), близький до ТКЛР осаджуваних плівок; сприяти забезпеченню високої адгезії цих плівок; мати гладку поверхню ( $R_z \leq 0,1$  мкм на довжині 0,08 мм); мати високу електричну міцність; мати низьку вартість.

Основні електрофізичні й механічні властивості матеріалів, використовуваних для виготовлення підкладок гібридних ІМС, наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Електрофізичні та механічні параметри підкладок ГІС

| Параметр  | Скло С48-3   | Ситал СТ-50-1 | Кераміка 22 ХС | Глазур Г-900-1 | Сапфір        |
|---|--------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| Діелектрична проникність $\epsilon$ при $T = 20^\circ\text{C}$ та $f = 1\text{МГц}$                         | 7,1          | 8,3–8,5       | 10,3           | 13–16          | 8,6–11        |
| Тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ при $T = 20^\circ\text{C}$ та $f = 1\text{МГц}$ | 12–15<br>10  | 12–20<br>10   | Менше<br>8–10  | 17–19<br>10    | 1–10          |
| Температурний коефіцієнт лінійного розширення $\times 10^{-8}, ^\circ\text{C}^{-1}$                         | 4,8–10       | 5,0–10        | 7,5+0,5        | 7,3–7,8<br>10  | 6,6–9,0<br>10 |
| Теплопровідність, Вт/(м·°С)   | 0,7–1,5      | 1,4–4         | 12–13          | 0,7            | 25–40         |
| Питомий об'ємний опір, Ом·см  | 1 10         | 1 10          | 3 10           | 1 10           | 1 10          |
| Електрична міцність, кВ/мм  | Більше<br>40 | Більше<br>40  | Більше 50      | Більше<br>50   |               |
| Клас чистоти поверхні   | 14           | 13–14         | 11             | 14             | 14            |
| Температура розм'якшення, °С  | 750          | 1150          | 1400           | 420–460        | –             |
| Пористість, %   | –            | 0             | 5–10           | –              | 0             |

Найбільш широке застосування при створенні тонкоплівкових гібридних ІМС (*thin-film microcircuit*) знаходять підкладки із ситалу СТ 50-1, скла С 48–3, «Полікора» та берилієвої кераміки. Як базові переважно використовуються підкладки розміром 100×100 і 50×50 мм із скла та 48×60 мм – із ситалу й кераміки. Інші типорозміри підкладок отримують розділенням сторін базової підкладки на частини. Наприклад, для підкладок з ситалу як дільник найчастіше використовують цифри 2 і 3 або кратні їм. За товщиною найбільшого поширення набули підкладки розміром 0,6; 1

і 1,6 мм. В технічно обґрунтованих випадках застосовують і більш тонкі підкладки до 0,2 мм.

**Матеріали для резисторів.** Параметри *тонкоплівкових резисторів (thin-film resistor)* в першу чергу визначаються властивостями застосовуваних для їх виготовлення матеріалів. Такі матеріали повинні забезпечувати: досить високий питомий опір формованих на їх основі плівок; високу стабільність опору тонкоплівкових резисторів в часі і в широкому інтервалі температур; високу антикорозійну стійкість напilenня плівок в умовах підвищеної вологості; високу адгезію резистивних плівок до підкладки або до раніше напilenних плівок; такий же ТКЛР плівок, як і ТКЛР матеріалу підкладки; стабільні властивості при напilenні на них плівок з інших матеріалів.

Електрофізичні характеристики матеріалів, застосовуваних для виготовлення тонкоплівкових резисторів гібридних мікросхем, наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри матеріалів плівкових резисторів

| Матеріал резистора | Матеріал контактних площадок | Питомий поверхневий опір $\rho_0$ , Ом/□ | Температурний коефіцієнт опору ТКО $\times 10^{-4}$ , °C <sup>-1</sup> при $T = -60 \div 125^\circ\text{C}$ | Допустима питома потужність розсіювання $P_0$ , Вт/см <sup>2</sup> | Діапазон номінальних значень опорів, Ом |
|--------------------|------------------------------|--|---|--|---|
| Хром               | Золото                       | 10–500                                   | 0,6   | 1  | 50–30 000                               |
| Ніхром             | Мідь                         | 300                                      | ±1  | 2  | 50–30 000                               |
| Сплав МЛТ-3М       | Мідь з ніхромом              | 500                                      | ±2  | 2  | 50–50 000                               |
| Тантал             | Алюміній з ванадієм          | 20–100                                   | -2  | 3  | 100–10 000                              |
|                    | Тантал                       | 10                                       | -2  |  | 10–15 000                               |
| Сплав РС-3001      | Золото з хромом              | 1000                                     | -0,2  | 2  | 100–50 000                              |
|                    |                              | 2000                                     |   |  | 200–100 000                             |
| Сплав РС-3710      | Те ж                         | 3000                                     | -3  | 2  | 1000–20 0000                            |
| Кермет К-50С       | Те ж                         | 3000                                     | +3  | 2  | 1000–10 000                             |
|                    |                              | 5000                                     | -4  |  | 500–200 000                             |
|                    |                              | 10000                                    | -5  |  | 10 000–10 000 000                       |

**Матеріали для плівкових провідників і контактних площадок.** Провідники й контактні площадки в гібридних ІМС найчастіше виконують багатошаровими. При цьому для виготовлення провідного шару зазвичай використовують такі матеріали: алюміній А 99; тантал ТВЧ; мідь вакуумної плавки МВ; золото Зл 999,9.

Для покращення адгезії струмопровідних матеріалів до підкладки напильють підшар. Як матеріал підшару використовують: хром ЕРХ; ніхром (дріт) Х20Н80; ванадій ТУ 48-4-373-76.

Для захисту провідників і контактних площадок від зовнішніх впливів застосовують: ванадій; нікель; хром ЕРХ; олововмісні сплави.

В технічно обґрунтованих випадках для захисту використовують золото Зл 3 або золото Зл 999,9 ГОСТ 6835-72.

Електрофізичні характеристики деяких багатошарових систем, що застосовуються для виготовлення плівкових провідників і контактних площадок, наведено в табл. 4.3.

**Матеріали для плівкових конденсаторів.** Характеристики тонкоплівкових конденсаторів (*thin-film capacitor*) залежать як від матеріалу діелектричного шару, так і від матеріалу обкладинок.

Матеріал обкладинок конденсатора повинен задовольняти такі вимоги: мати низький електричний опір (для високочастотних конденсаторів); мати низьку рухливість атомів; мати ТКЛР, рівний ТКЛР підкладки та діелектричного шару; мати хорошу адгезію як до підкладки, так і до раніше напильених плівок; мати високу антикорозійну стійкість в умовах агресивного середовища.

Таблиця 4.3 – Характеристики провідних матеріалів

| Матеріал підшару, шару та покриття  | Товщина шару, нм | Питомий опір, Ом/□ |
|-------------------------------------|------------------|--------------------|
| Підшар – ніхром Х20Н80              | 10–30            | –                  |
| Шар – золото Зл. 999,9              | 600–800          | 0,03–0,05          |
| Підшар – ніхром Х20Н80              | 10–30            | –                  |
| Шар – мідь вакуумної плавки МВ      | 600–800          | –                  |
| Захисне покриття – нікель           | 80–120           | 0,02–0,04          |
| Підшар – ніхром Х20Н80              | 10–30            | –                  |
| Шар – мідь вакуумної плавки МВ      | 400–1000         | –                  |
| Захисне покриття – срібло Ср.999,9  | 80–100           | 0,02–0,04          |
| Підшар – ніхром Х20Н80              | 10–30            | –                  |
| Шар – мідь вакуумної плавки МВ      | 600–800          | –                  |
| Захисне покриття – золото Зл. 999,9 | 50–60            | 0,02–0,04          |
| Підшар – ніхром Х20Н80              | 10–30            | –                  |
| Шар – алюміній А97                  | 300–500          | 0,06–0,10          |

Для виготовлення обкладинок конденсаторів найчастіше застосовуються такі матеріали: алюміній А99 ГОСТ 11069-74; тантал ТВЧ ТУ 95.311-75; титан ВТ 1-0 ТУ 1-5-111-73.

Матеріали, застосовувані для виготовлення діелектричних шарів, повинні відповідати таким вимогам: мати високе значення діелектричної проникності; мінімальний температурний коефіцієнт ємності (ТКС); міні-

мальні втрати енергії на високій частоті  $\operatorname{tg} \delta$ ; мати високу волого- і теплостійкість; забезпечувати напилення щільних і однорідних плівок; мати хорошу адгезію як до підкладки, так і до матеріалів обкладинок; мати високу електричну міцність.

Електрофізичні характеристики матеріалів, застосовуваних для виготовлення діелектричних шарів, наведено в табл. 4.4.

## 4.2 Конструкції та розрахунок тонкоплівкових елементів

### 4.2.1 Конструкції та розрахунок плівкових резисторів

На початковому етапі конструювання тонкоплівкових резисторів вибирають їх форму і проводять розрахунок геометричних розмірів.

Форма резистора визначається його номіналом  $R$ ; опором квадрата резистивної плівки  $\rho_{кв}$ ; точністю  $\gamma_R$ , пропонованою до виготовлення; площею на платі, відведеною під резистор; технологічним процесом виготовлення.

На практиці широке застосування знаходять резистори прямокутної форми. Це обумовлено в першу чергу простотою їх конструкції, а також тим, що в подібних резисторах потенціальне поле однорідне, відсутні локальні перевантаження, компенсуються похибки суміщення масок або фотошаблонів. Якщо розрахункова довжина резистора перевищує довжину відведеної під нього області, то резистор компонують у вигляді окремих резистивних плівок, з'єднаних провідними перемичками, або згинають. Резистори типу «меандр» істотно поступаються змієподібним щодо розсіюваної потужності.

На рис. 4.1 зображено найбільш розповсюджені конфігурації таких резисторів: прямокутна (рис.4.1, а) (використовується для резисторів з малим опором); типу меандр (рис. 4.1, б) та послідовне з'єднання резистивних плівкових смужок (рис. 4.1, в), які використовуються для резисторів великого опору. В усіх цих конфігураціях відсутні похилі та криві лінії різних радіусів, тому виготовлення фотошаблонів (або масок) резистивних шарів гібридних мікросхем значно спрощується.

Для визначення геометричних розмірів резисторів необхідно мати такі вихідні дані: номінальне значення опору  $R$  (Ом); опір квадрата резистивної плівки  $\rho_{кв}$  (Ом /  $\square$ ); відносну похибку опору резистора  $\gamma_R$  (%); розсіювану резистором потужність  $P$  (Вт); максимальну питому потужність розсіювання резистивної плівки  $P_0$  (Вт /  $\text{см}^2$ ).

Таблиця 4.4 – Параметри матеріалів плівкових конденсаторів

| Матеріал діелектрика       | Матеріал обкладінок | Діелектрична проникність $\epsilon$ при $f=1$ кГц | Питома ємність $C_0$ , пФ/см <sup>2</sup> | Тангенс кута діелектричних втрат при $f=1$ кГц, $\text{tg } \delta$ | Температурний коефіцієнт ємності ТКЄ $\times 10^{-4}$ , $^\circ\text{C}^{-1}$ | Електрична міцність $E \times 10^6$ , В/см | Максимальна робоча частота $f$ , МГц | Робоча напруга $U_{\text{роб}}$ , В |
|----------------------------|---------------------|---|---|---|---|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Монооксид кремнію          | Алюміній А99        | 5–6   | 5 000–10 000                              | 0,01–0,02   | 2   | 2–3  | 500                                  | 60<br>30                            |
| Монооксид германію         | Те ж                | 11–12   | 5000<br>10000<br>15000                    | 0,001<br>0,005  | 3   | С  | 300                                  | 10<br>7<br>5                        |
| Боросилікатне скло         | Те ж                | 4   | 2500<br>5000<br>10000                     | 0,001–0,0015  | 0,35  | 3–4  | 300                                  | 24<br>15<br>10                      |
| Скло електровакуумне С41-1 | Те ж                | 5,2   | 15000<br>20000<br>30000<br>400000         | 0,002–0,003   | 0,5–1,8   | 3–4  | 300                                  | 12,6<br>10–12,6<br>6,3–10<br>6,3    |
| П'ятиоксид танталу         | Тантал              | 23  | 60 000                                    | 0,02  | 4   | 2  | 0,1                                  | 15                                  |
|                            | Алюміній А99        |   | 100 000                                   |   |   |  |                                      | 10                                  |
|                            |                     |   | 200 000                                   |   |   |  |                                      | 3                                   |

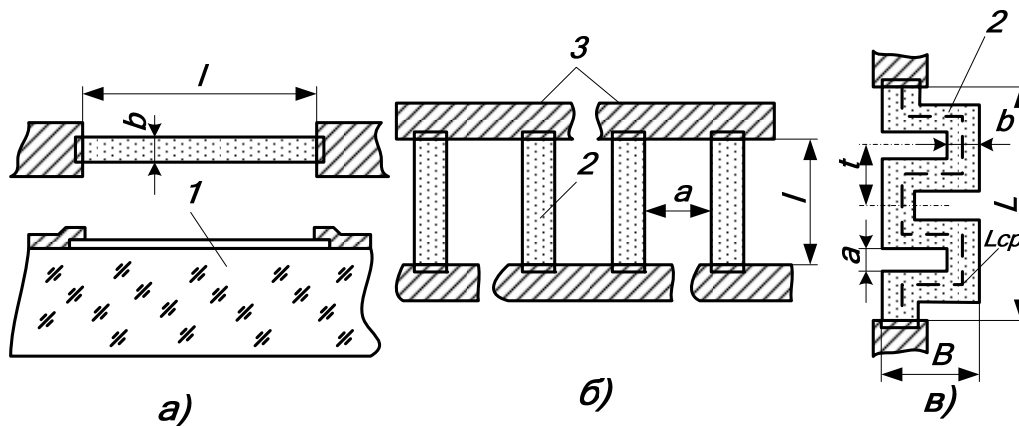


Рисунок 4.1 – Конфігурація плівкових резисторів: а) прямокутна; б) типу меандр; в) послідовне з'єднання смужок; 1 – підкладка; 2 – резистивна плівка; 3 – провідна плівка;  $l, b$  – довжина, ширина резистивної плівки, відповідно;  $L, B$  – довжина та ширина меандра;  $a$  – розмір між резистивними смужками;  $t$  – крок однієї ланки меандра

При виборі матеріалу для резисторів необхідно прагнути, щоб усі резистори, розміщені на одній підкладці, мали однаковий питомий опір  $\rho_0$ , який визначається з формули:



$$\rho_{opt} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n R_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}} \quad (4.1)$$

де  $n$  – кількість резисторів;

$R_i$  – номінальне значення  $i$ -го резистора.

Конструктивний розрахунок плівкових резисторів полягає у встановленні форми, геометричних розмірів та найменшої площі, яку займають резистори на підкладці. При цьому необхідно, щоб резистори забезпечували розсіювання заданої потужності при заданій точності  $\gamma_R$ .

Розрахунок плівкових резисторів починають з вибору матеріалу (див. табл. 4.2). Критеріями вибору матеріалу є: оптимальне значення опору квадрата резистивної плівки  $\rho_0$ , максимальне значення питомої потужності розсіювання резистивної плівки  $P_0$  та мінімальне значення ТКО. Далі проводять перевірку правильності вибору матеріалу з точки зору забезпечення точності виготовлення резисторів.

Загальна відносна похибка опору резистора визначається сумою похибок при виготовленні та конструюванні, а також похибок, зумовлених впливом умов використання:

$$\gamma_R = \Delta R/R = \gamma_{K_\phi} + \gamma_{\rho_0} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{cm}} + \gamma_{R_\kappa}, \quad (4.2)$$

де  $\gamma_{K_\phi}$  – похибка коефіцієнта форми;

$\gamma_{\rho_0}$  – відносна похибка відтворення  $\rho_0$  резистивної плівки,

$\gamma_{R_t}$  – температурна похибка;

$\gamma_{R_{cm}}$  – похибка опору, зумовлена старінням плівки;

$\gamma_{R_\kappa}$  – похибка перехідних опорів контактів.

Похибка коефіцієнта форми  $\gamma_{K_\phi}$  залежить від похибки геометричних розмірів резистора – довжини  $l$  та ширини  $b$ :

$$\gamma_{K_\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}, \quad (4.3)$$

де  $\Delta l$ ,  $\Delta b$  – абсолютні похибки відтворення довжини та ширини резистора.

Похибка відтворення питомого поверхневого опору  $\gamma_{\rho_0} = \Delta\rho_0/\rho_0$ , залежить від матеріалу, способу та умов нанесення резистивної плівки. В умовах серійного виробництва її значення не перевищує 5 %.

Температурна похибка залежить від ТКО матеріалу плівки та діапазонів робочих температур:

$$\gamma_{R_t} = \alpha_R \cdot (T_{\text{макс}} - 20^\circ \text{C}), \quad (4.4)$$

де  $\alpha_R$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу плівки,  $1/^\circ\text{C}$ .

Похибка  $\gamma_{R_{cm}}$  зумовлена старінням плівки, викликана повільною зміною структури плівки з часом, а також її окисненням. Вона залежить від матеріалу плівки та ефективності захисту, а також її умов зберігання та експлуатації. Вона не перевищує 3 %.

Похибка перехідних опорів контактів  $\gamma_{R_k}$  залежить від технологічних вимог напилення плівок, питомого опору резистивної плівки та геометричних розмірів контактного переходу; величини перекриття контактуючих плівок, ширини резистора. У більшості випадків  $\gamma_{R_{cm}} = 1 - 2$  %.

Допустима похибка коефіцієнта форми визначається з (4.2)

$$\gamma_{K_{\phi \text{ доп}}} = \gamma_R - \gamma_{\rho_0} - \gamma_{R_t} - \gamma_{R_{cm}} - \gamma_{R_k}. \quad (4.5)$$

Якщо значення  $\gamma_{K_{\phi \text{ доп}}}$  від'ємне або дорівнює 0, то це означає, що виготовлення резистора заданої точності з вибраного матеріалу неможливе. В цьому випадку необхідно вибрати інший матеріал з меншими значеннями  $\alpha_R$ ,  $\gamma_{R_{cm}}$  та  $\gamma_{\rho_0}$  або здійснювати пригонку резистора.

Конструкцію резисторів визначають за значенням коефіцієнта форми. Номінал резистора є функцією  $\rho_0$  та геометричних розмірів:

$$R = \rho_0 \cdot l/b = \rho_0 \cdot K_{\phi}, \quad (4.6)$$

де  $K_{\phi} = l/b$  – коефіцієнт форми резистора.

Коефіцієнт форми  $K_{\phi}$  при відомому опорі для вибраного матеріалу визначається за формулою:

$$K_{\phi} = R/\rho_0. \quad (4.7)$$

При  $1 \leq K_\phi \leq 10$  рекомендується конструювати резистор прямокутної форми, при  $0,1 \leq K_\phi \leq 1$  – резистор прямокутної форми, у якого довжина менша ширини, при  $10 < K_\phi \leq 50$  – меандр, смуговий або типу змійки. Якщо  $K_\phi > 50$ , то площа резистора дуже велика, тому в цьому випадку рекомендується використовувати дискретні резистори, сумісні з мікрозбіркою. Конструювати резистори з  $K_\phi < 0,1$  не рекомендується, тому що вони будуть мати великі контактні площадки та займати велике місце на підкладці. Порядок подальшого розрахунку залежить від форми резистора.

*Розрахунок резистора прямокутної форми.* Для резисторів з  $1 \leq K_\phi \leq 10$  спочатку розраховують ширину резистора з умови:

$$b_{розр} \geq \max \{ b_{техн}; b_{точн}; b_p \}, \quad (4.8)$$

де  $b_{техн}$  – мінімальна ширина резистора, яка визначається можливостями технологічного процесу та наведена в додатку К;

$b_{точн}$  – мінімальна ширина резистора, зумовлена точністю відтворення:

$$b_{точн} = \frac{\Delta b + \Delta l / K_\phi}{\gamma_{K_\phi \delta_{оп}}}, \quad (4.9)$$

$b_p$  – мінімальна ширина резистора, при якій забезпечується розсіювання заданої потужності резистора:

$$b_p = \sqrt{\frac{P \rho_0}{P_0 R}} = \sqrt{\frac{P}{K_\phi P_0}}. \quad (4.10)$$

За ширину резистора  $b$  приймають найближче більше до  $b_{розр}$  значення, кратне крокові координатної сітки, прийнятому для рисунка топології з врахуванням масштабу. Для гібридних мікросхем крок координатної сітки часто складає 1 чи 0,5 мм. Наприклад, якщо крок координатної сітки 0,5 мм, масштаб 10:1, то округлення проводять до величини, кратної 0,05 мм. Коефіцієнт навантаження за потужністю розсіювання визначається зі співвідношення:

$$K = b_p^2 / b^2 \quad (4.11)$$

і не повинен перевищувати одиниці. Якщо виявилось, що  $K > 1$ , то розрахунок необхідно відкоригувати.

Далі визначають розрахункову довжину резистора

$$l_{розр} = b \cdot K_{\phi} \quad (4.12)$$

Слід відзначити, що за довжину резистора  $l$  приймають найближче більше до  $l_{розр}$  значення, кратне кроку координатної сітки, прийнятому для креслення топології.

Далі знаходять повну довжину резистора з урахуванням перекриття контактних площадок:

$$l_{заг} = l + 2 \cdot e, \quad (4.13)$$

де  $e$  – розмір перекриття резистора та контактних площадок (додаток К).

Площу, яку займає резистор на підкладці, розраховують за формулою:

$$S = l_{заг} \cdot b. \quad (4.14)$$

Для резисторів, які мають  $K_{\phi} < 1$ , спочатку визначають довжину, а потім ширину резистора.

Розрахункова довжина резистора  $l_{розр}$  повинна бути не меншою найбільшого значення однієї з трьох величин:

$$l_{розр} \geq \max \{ l_{техн}; l_{точн}; l_p \}. \quad (4.15)$$

Величини, які входять у праву частину нерівності  $l_{техн}$ ,  $l_{точн}$ ,  $l_p$ , визначаються аналогічно  $b_{техн}$ ,  $b_{точн}$ ,  $b_p$ , причому

$$l_{точн} = \frac{\Delta l + \Delta b \cdot K_{\phi}}{\gamma_{K_{\phi} доп}}. \quad (4.16)$$

$$l_p = \sqrt{P \cdot K_{\phi} / P_0}. \quad (4.17)$$

За довжину резистора  $l$  приймають найближче до  $l_{розр}$  ціле значення, кратне кроку координатної сітки. Повну довжину резистора з урахуванням перекриття контактних площадок розраховують за формулою (4.13).

Розрахункове значення ширини резистора

$$b_{розр} = l / K_{\phi} . \quad (4.18)$$

За ширину  $b$  резистора беруть найближче більше до  $b_{розр}$  значення кратне кроку координатної сітки. Площу резистора розраховують за формулою (4.14).

Виконують перевірку проведених розрахунків. Резистор спроектовано правильно, якщо:

а) питома потужність розсіювання  $P'_0$  не перевищує допустимого значення  $P_0$ :

$$P'_0 = P / S \leq P_0 ;$$

б) похибка коефіцієнта форми  $\gamma'_{K_{\phi}}$  не перевищує допустимого значення  $\gamma_{K_{\phi\ доп}}$

$$\gamma'_{K_{\phi}} = \frac{\Delta l}{l_{заг}} + \frac{\Delta b}{b} \leq \gamma_{K_{\phi\ доп}} ;$$

в) сумарна похибка  $\gamma'_R$  не перевищує допуску  $\gamma_R$

$$\gamma'_R = \gamma'_{K_{\phi}} + \gamma_{\rho_0} + \gamma_{R_l} + \gamma_{R_{cm}} + \gamma_{R_x} \leq \gamma_R .$$

*Розрахунок резистора типу меандр.* Резистори типу меандр розраховують з умови найменшої площі, яку займає резистор. Розрахунок меандра розпочинають з розрахунку ширини  $b$  з формул (4.8)–(4.10). Далі знаходять довжину середньої лінії меандра

$$l_{серед.} = b \cdot K_{\phi} . \quad (4.19)$$

Після цього задаються відстанню  $a$  між резистивними смугами, виходячи з технологічних обмежень та знаходять крок однієї ланки меандра:

$$t = a + b . \quad (4.20)$$

Далі визначають оптимальну кількість ланок меандра  $n_{opt}$ . Якщо відношення  $l_{серед.} / b > 10$ , то оптимальна кількість ланок меандра може бути розрахована за наближеною формулою:

$$n_{omn} \approx \sqrt{(l_{серед} / t) \cdot (B/L)}. \quad (4.21)$$

При  $L = B$  (меандр квадратної форми) та  $a = b$  вираз (4.21) спрощується:

$$n_{omn} = \sqrt{K_{\phi} / 2} \quad (4.22)$$

Значення  $n_{omn}$  заокруглюється до найближчого більшого цілого. Габаритні розміри меандра визначаються із співвідношень:

$$L = n \cdot (a + b); \quad (4.23)$$

$$B = (l_{серед} - a \cdot n) / n, \quad (4.24)$$

де  $n$  – отримана кількість ланок меандра.

Площа, яку займає резистор типу меандр визначається як:

$$S_m = L \cdot B. \quad (4.25)$$

Приклади розрахунків плівкових резисторів наведено в додатках.

#### 4.2.2 Конструкції та розрахунок плівкових конденсаторів

Поряд з плівковими резисторами конденсатори відносяться до числа найбільш розповсюджених елементів гібридних мікросхем. За конструкцією плівковий конденсатор у більшості випадків являє собою тришарову структуру (рис. 4.2). Він складається з нижньої обкладинки 1, діелектричної плівки 2 та верхньої обкладинки 3. Вся конструкція наноситься на підкладку 4. Площа нижньої обкладинки конденсатора, що дорівнює добутку  $b_1 \cdot l_1$ , перевищує площу верхньої обкладинки, що дорівнює добутку  $b_2 \cdot l_2$ , а площа діелектричної плівки більша за площу нижньої обкладинки. Це запобігає можливості замикання обкладинок та виключає похибку від їх зміщення.

До матеріалу обкладинок плівкового конденсатора висуваються такі вимоги: висока електропровідність, яка забезпечує малі втрати енергії, добра адгезія, мала міграційна рухливість атомів. Остання з цих вимог не дозволяє використовувати як матеріал обкладинок золото або мідь, оскільки для них характерна висока рухливість атомів. Завдяки їх дифузії у діелектрик, можливі короткі замикання обкладинок. Для виконання обкладинок не використовуються також матеріали з високою температурою випаровування, наприклад нікель або хром. Це пов'язано з тим, що атоми таких ме-

талів мають високу енергію при температурі випаровування, пронизують діелектричний шар та викликають короткі замикання обкладинок.

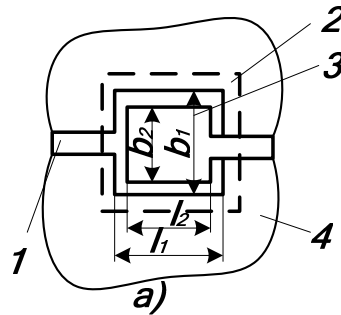


Рисунок 4.2 – Конструкція плівкового конденсатора: 1 – нижня обкладка, 2 – діелектрична плівка, 3 – верхня обкладка, 4 – підкладка

Найкращим матеріалом для виготовлення обкладинок тонкоплівкового конденсатора є алюміній. Він має порівняно невелику температуру випаровування, а це означає, що його атоми мають низьку енергію у процесі наплення. В ряді електропровідності алюміній займає третє місце після золота та срібла, тобто електричний опір обкладинок з алюмінію достатньо малий, що забезпечує високу добротність виготовлених конденсаторів. Конденсатори з алюмінієвими обкладинками надійні, оскільки атоми алюмінію мають низьку міграційну рухливість. Це обумовлюється тим, що на його поверхні утворюється оксидний шар  $Al_2O_3$  який заважає дифузії атомів алюмінію у діелектрик. Для покращення адгезії алюмінію використовують підшар титану чи хрому.

Конструкція плівкового конденсатора, зображена на рис. 4.2, використовується тоді, коли площа верхньої обкладинки  $S$  складає не менше як  $5 \text{ мм}^2$ . При  $S = 1\text{--}5 \text{ мм}^2$  рекомендується конструювати плівковий конденсатор у вигляді двох плівкових провідників 1 і 3, що перетинаються під прямим кутом, розділених діелектричним шаром 2, як зображено на рис. 4.3, а. При активній площі плівкового конденсатора, меншій  $1 \text{ мм}^2$ , його потрібно виконувати у вигляді двох послідовно з'єднаних конденсаторів, як подано на рис. 4.3, б, або в вигляді двосторонньої конструкції (рис. 4.3, в), в якій як діелектричний шар 2 використано матеріал підкладки.

При  $S = 1 \text{ мм}^2$  рекомендується конструювати гребінчастий плівковий конденсатор. Ємність такого конденсатора на 90% складається з паразитної ємності, зумовленої крайовим ефектом, Точно розрахувати її неможливо, оскільки складно врахувати ступінь проникнення електричного поля в підкладку та в повітря або захисне покриття мікросхем. Ємність гребінчастого плівкового конденсатора вимірюється у пікофарадах і визначається з емпіричної формули  $C = \beta \cdot \epsilon_p \cdot l$ , де  $\beta$  – коефіцієнт, що залежить від ширини плівкових провідників та відстані між ними;  $l$  – довжина спільної границі провідників, см;  $\epsilon_p$  – розрахункове значення відносної діелектричної проникності.

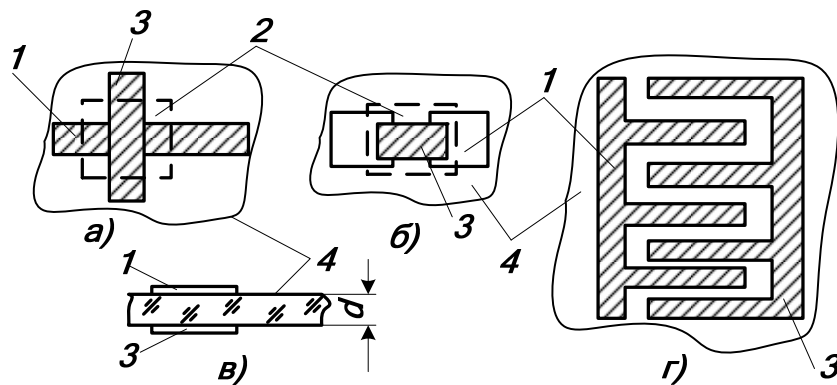


Рисунок 4.3 – Плівкові конденсатори малої ємності: а) з перехрещеними плівковими провідниками; б) послідовне з’єднання двох конденсаторів; в) з підкладкою як діелектричний шар; г) гребінчаста конструкція; 1, 3 – плівкові провідники; 2 – діелектричне покриття; 4 – підкладка

Для конденсатора, який не має захисного покриття, розрахункове значення відносної діелектричної проникності  $\epsilon_p = (1 + \epsilon_{II})/2$ . Для конденсатора, покритого захисним шаром,  $\epsilon_p = (\epsilon_D + \epsilon_{II})/2$ . Тут  $\epsilon_{II}$  – відносна діелектрична проникність матеріалу обкладинки;  $\epsilon_D$  – відносна діелектрична проникність шару покриття.

Конденсатори, конструкцію яких виконано як показано на рис. 2.7, а, характеризуються більш високою точністю отримання заданого номіналу ємності порівняно зі звичайними конденсаторами того ж самого номіналу.

Вихідними даними для визначення геометричних розмірів конденсаторів є:

- схемотехнічні дані (з принципової електричної схеми) – номінал конденсатора  $C$ , пФ; допуск на номінал  $\gamma_c$ , %; робоча напруга  $U_p$ , В; тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta$  або добротність  $Q$  ( $Q = 1/tg\delta$ ); технологічні дані та обмеження (додаток К);

- експлуатаційні дані – діапазон робочих температур, робоча частота  $f_p$  та інші.

Розрахунок плівкових конденсаторів починають з вибору матеріалу обкладинок та матеріалу діелектрика з максимальною діелектричною проникністю  $\epsilon$ , з високою електричною міцністю  $E$ , а також з малими значеннями ТКЄ та  $tg\delta$ . Для забезпечення високої добротності необхідно, щоб матеріал обкладинки мав малий питомий поверхневий опір.

Питома ємність конденсатора визначається з умови електричної міцності:



$$C_{0U} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon / d, \quad (4.27)$$

де  $\varepsilon_0 = 0,0885$  пФ/см – відносна діелектрична проникність;

$\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу діелектрика;  $d$  – товщина діелектрика.

Товщину діелектрика визначають з умови:

$$d > U_p \cdot K_3 / E, \quad (4.28)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу за напругою ( $K_3 = 2-3$ ).

Якщо необхідно забезпечити задану похибку ємності, тоді питома ємність конденсатора визначається з співвідношення

$$C_{0точн} = C \left( \frac{\gamma_s}{\Delta L} \right)^2 \cdot \frac{K_\phi}{(1 + K_\phi)^2}, \quad (4.29)$$

де  $\gamma_s$  – відносна похибка площі конденсатора;

$\Delta L = \Delta B$  – відносні похибки розмірів обкладинки конденсатора (додаток К);

$K_\phi = L/B$  – коефіцієнт форми конденсатора.

Максимально допустима похибка активної площі конденсатора

$$\gamma_{s\text{дон}} = \gamma_C - \gamma_{C0} - \gamma_{cm} - \gamma_{ct}, \quad (4.30)$$

де  $\gamma_{C0}$  – відносна похибка питомої ємності, яка характеризує відтворюваність питомої ємності в умовах даного виробництва (залежить від матеріалу та похибки товщини діелектрика та складає 3–5 %);

$\gamma_{cm}$  – відносна похибка, зумовлена старінням плівок конденсатора і залежить від матеріалу та способу захисту (не перевищує 2–3 %);

$\gamma_{ct}$  – відносна температурна похибка, яка визначається з рівняння

$$\gamma_{ct} = \alpha_C \cdot (T_{\text{макс}} - 20^\circ\text{C}), \quad (4.31)$$

де  $\alpha_C$  – температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ).

Після розрахунку питомої ємності конденсатора з (4.27) та (4.29) вибирають найменше з двох отриманих значень:

$$C_0 < \min\{C_{0U}, C_{0точн}\}. \quad (4.32)$$

Далі розраховують площу верхньої обкладинки конденсатора:

$$S_B = C/C_0. \quad (4.33)$$

Розміри верхньої обкладинки визначаються зі співвідношень:

$$L_B = \sqrt{S_B \cdot K_\phi}; \quad (4.34)$$

$$B_B = L_B / K_\phi. \quad (4.35)$$

Розміри нижньої обкладки:

$$L_n = L_B + 2 \cdot q; \quad (4.36)$$

$$B_n = B_B + 2 \cdot q. \quad (4.37)$$

де  $q$  – розмір перекриття нижньої та верхньої обкладинки конденсатора ( $q = 0,2$  мм – з додатка К). Розміри діелектричного шару:

$$L_d = L_n + 2 \cdot f; \quad (4.38)$$

$$B_d = B_n + 2 \cdot f, \quad (4.39)$$

де  $f$  – розмір перекриття нижньої обкладинки та діелектрика ( $f = 0,1$  мм – з додатка К).

Далі розраховують площу, яку займає конденсатор:

$$S_d = L_d \cdot B_d. \quad (4.40)$$

При розрахунку конденсаторів малої площі ( $S = 1-5$  мм<sup>2</sup>) необхідно враховувати збільшення ємності конденсатора, яке обумовлено впливом крайового ефекту (збільшенням напруги електричного поля на краях обкладинок). Площа верхньої обкладинки конденсатора повинна бути змінена:

$$S_e = (C/C_0) \cdot K \quad (4.41)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує крайовий ефект:

$$K = 1,3 - 0,06 \cdot C/C_0. \quad (4.42)$$

Виконують перевірку проведених розрахунків.

1. Конденсатор спроектовано правильно, якщо робочий тангенс кута втрат не перевищує заданого:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{роб}} \leq \operatorname{tg} \delta. \quad (4.43)$$

Втрати у конденсаторі складаються з втрат у діелектрику та на обкладинках:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_{\text{роб}} &= \operatorname{tg} \delta_{\text{діел}} + \operatorname{tg} \delta_{\text{обк}} \\ \operatorname{tg} \delta_{\text{обк}} &= 2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot R_{\text{обк}} \cdot C, \end{aligned} \quad (4.44)$$

де  $R_{\text{обк}}$  – опір обкладинок конденсатора, Ом;  $C$  – ємність конденсатора, Ф;

$f_p$  – робоча частота, Гц.

Повний опір обох обкладинок розраховується за формулою

$$R_{\text{обк}} = (2/3) \cdot \rho_{0\text{обк}} \cdot K_\phi, \quad (4.45)$$

де  $\rho_{0\text{обк}}$  – питомий поверхневий опір матеріалу обкладинок (встановлюють з табл. 4.4).

2. Проводимо оцінювання забезпечення електричного режиму: робоча напруженість електричного поля не перевищує  $E$  матеріалу діелектрика

$$E_{\text{роб}} \leq E, \quad (4.46)$$

де

$$E_{\text{роб}} = U_p / d', \quad (4.47)$$

$$d' = 0,0885 \cdot \varepsilon / C_0, \text{ см.} \quad (4.48)$$

3. Виконуємо перевірку точності конденсатора в заданих умовах експлуатації: похибка активної площі конденсатора не перевищує задану

$$\gamma_{\text{Сроб}} \leq \gamma_S, \quad (4.49)$$

$$\gamma_{\text{Сроб}} = \Delta L \frac{1 + K_{\phi}}{\sqrt{K_{\phi} S}}. \quad (4.50)$$

Якщо будь-яка з нерівностей (4.43), (4.46) або (4.49) не виконується, то необхідно вибрати інший матеріал діелектрика або змінити конструкцію конденсатора.

Якщо у схемі є декілька конденсаторів, то для їх виготовлення в єдиному технологічному циклі доцільно вибирати для всіх конденсаторів однаковий діелектрик з однаковою товщиною та, відповідно, однаковою питомою ємністю  $C_0$ .

Для декількох конденсаторів на одній підкладці розрахунок починають з конденсатора, який має найменший номінал ємності. Після вибору номіналу та розрахунків за формулами (4.27)–(4.31) визначають значення питомої ємності, при якій конденсатор буде займати мінімальну площу на підкладці:

$$C_{0\min} = C_{\min} / S_{\min}. \quad (4.51)$$

Остаточний вибір  $C_0$  виконують з формули

$$C_0 \leq \min \{ C_{0U}, C_{0\text{точн}}, C_{0\min} \}. \quad (4.52)$$

Розраховують товщину діелектрика, що відповідає питомій ємності з (4.47). Якщо товщина діелектрика не виходить за межі можливостей тонкоплівкових технологій (0,1–1мкм), то продовжують подальший розрахунок, в протилежному випадку вибирають інший матеріал.

Приклади розрахунків плівкових конденсаторів наведено в додатках.

### 4.2.3 Розрахунок плівкових провідників та контактних площадок

До плівкових елементів комутації відносяться контактні площадки (КП) та комутаційні доріжки (КД). *Контактні площадки (contact pads)* – це невеликі ділянки провідника, за допомогою яких в мікросхемі включаються навісні елементи або монтажні провідники, що з'єднують входи та виходи мікросхеми з зовнішніми виводами.

*Комутаційні доріжки (switching tracks)* – це вузькі смужки плівкового провідника, якими виконується міжелементний зв'язок в мікросхемі.

Навісні елементи і монтажні провідники приєднуються до КП склеюванням, паянням або зварюванням. Цим і визначаються вимоги, що висуваються до КП, які зводяться до того, що оскільки електричний зв'язок між елементами мікросхеми здійснюється через КП, то:

- вони повинні мати високу провідність та утворювати із з'єднаними з ними провідниками невикривлений контакт;
- провідність плівки не повинна змінюватися з часом;
- бажано щоб матеріал КП мав здатність до безфлюсового паяння і зварювання. Цим усувається можливість забруднення мікросхеми флюсами і необхідністю очищення від нього;
- матеріал повинен бути стійким до корозії.

Оскільки під час експлуатації, і особливо в процесі паяння або зварювання, КП піддаються великому термічному і механічному навантаженню, то вони повинні мати хорошу адгезію з підкладкою (вважається, що сила зчеплення контактної площадки з керамічною підкладкою повинна становити близько  $7 \times 10^6 \text{ Н/м}^2$ ).

Вимоги, що висуваються до КП, крім тих з них, які пов'язані з паянням або зварюванням, рівною мірою відносяться і до комутаційних доріжок.

Кращими провідниками, які одержали поширення в мікросхемах, є: мідь, срібло, золото і алюміній. Проте жоден з них не задовольняє повністю всі вимоги. Мідь окислюється при підвищених температурах і утворює викривлений контакт. Алюміній, маючи на своїй поверхні окисну плівку, важко піддається паянню. Срібло, хоча і не окислюється і добре спаюється майже не застосовується через підвищену його міграцію по підкладці, яка призводить до збільшення витоків струму і навіть короткого замикання. Найбільшу кількість вимог задовольняє золото. Однак, крім того, що це коштовний матеріал, воно має низьку адгезію до підкладки. Через це, як правило, перераховані метали не застосовуються самостійно, а в поєднанні з іншими, усуваючи їх недоліки. Так, для поліпшення адгезії вони наносяться не безпосередньо на підкладку, а на попередньо нанесений підшар, що добре зчіплюється з підкладкою металів. До них відносяться: хром і ніхром, марганець і титан. У випадках, коли процес приєднання до КП протікає при високих температурах і досить тривалий час, тоді хром замінюють молібденом або вольфрамом, тому що в цих умовах він добре дифундує в золото, збільшуючи опір плівки [4].

Мідь має хорошу провідність та є дешевим матеріалом, тому вона найчастіше використовується, але щоб уникнути її корозії вона покривається зверху золотом, сріблом або нікелем.

Для комутаційних елементів застосовуються такі поєднання металів, розташованих на підкладці в порядку: підшар – провідний шар – захисний шар: хром – золото, хром – золото – нікель, хром – срібло – нікель, хром – мідь – золото, хром – алюміній – золото, хром – марганець – золото, ніхром – золото, ніхром – мідь – срібло, ніхром – мідь – нікель, титан – золото, титан – мідь – срібло, титан – мідь – нікель, титан – алюміній – нікель, тантал – хром – алюміній, марганець – мідь – золото, марганець – мідь – паладій.

Товщина КП, до яких припаюються та приварюються виводи навсичних елементів і перемичок товщиною до 50 мкм, знаходиться в межах 0,3 – 1 мкм, іноді доходячи до 5 мкм.

Необхідно враховувати сумісність матеріалів комутації та елементів, з якими вони будуть знаходитися в контакті. Під дією температури, атмосфери і електричного струму в місці контакту можуть утворитися такі сполуки, які збільшують опір, змінюють об'єм і механічне напруження у плівках. Це в свою чергу збільшить шумові властивості схеми, зменшить добротність контурів, змінить температурні коефіцієнти елементів або порушить контакт між ними.

Ширина комутаційних доріжок знаходиться в межах 0,2–0,75 мм; площа КП для під'єднання зовнішніх виводів - в межах 0,7–1,5 мм<sup>2</sup>, а для внутрішньо-схемних сполук – близько 0,25 мм<sup>2</sup>. Мінімальні розміри КП повинні бути більші за розмір зварюваного або припаяного контакту на величину точності зміщення інструменту та приєднуваної деталі.

Враховуючи, що опір КП включається послідовно з елементами схеми, основна вимога до них – мати мінімальний опір. Тому їх  $\rho_s$  повинно бути менше 0,05 Ом/кВ [4].

Цим обумовлено всі вимоги, що висуваються до плівкових провідників і контактних площадок. Вони повинні з мінімальними втратами проводити напругу живлення до функціональних компонентів мікросхеми, з мінімальними спотвореннями передавати сигнали, забезпечувати надійний, найчастіше невидпрямний і малощумний, контакт з елементами мікросхеми.

При розрахунках плівкових провідників необхідно враховувати вимоги, що висуваються до характеристик мікросхеми. Ці вимоги можна сформулювати у вигляді таких критеріїв [4]:

1) спад напруги на провіднику не повинен перевищувати деякого максимального значення  $U_{\max}$ ;

2) опір провідника не повинен перевищувати деякого максимального значення  $R_{\max}$ ;

3) щільність струму, що протікає через провідник, не повинна перевищувати значення, яке визначається співвідношенням  $I_{\max}/S_{\min}$ , де  $S_{\min}$  – площа перерізу провідника;

4) власна ємність провідника не повинна бути більша деякого максимального значення  $C_{\max}$ ;

5) власна індуктивність провідника не повинна бути більша деякого максимального значення  $L_{\max}$ .

Визначаємо мінімальну ширину друкованого провідника залежно від величини струму в колі за формулою:

$$b_{\min} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{дон}} \cdot t},$$

де  $I_{\max}$  – максимальний постійний струм;

$j_{\text{дон}}$  – допустима густина струму, її вибираємо відповідно для хімічного методу виготовлення одношарової друкованої плати;

$$j_{\text{дон}} = 20 \text{ (А/мм}^2\text{)};$$

$t$  – товщина провідника;

$$t = 0,001 \text{ (мкм)}.$$

Розрахунок провідників за значенням допустимого спаду напруги  $U_{\text{пров.дон}}$  необхідний при проектуванні схем з малою завадостійкістю при малих рівнях сигналів і зводиться до перевірки такої умови:

$$U_{\text{дон}} = I \cdot R_{\text{пр}} \leq U_{\text{пров.дон}}$$

де  $I$  – струм, що протікає через провідник;

$U_{\text{пров.дон}}$  – допустимий спад напруги, який не перевищує 5% від напруги живлення мікросхеми;

$R_{\text{пр}}$  – опір провідника, що визначається за формулою:

$$R_{\text{пр}} = \frac{l}{b},$$

де  $\rho$  – питомий опір;

$l$  – довжина провідника;

$b$  – ширина провідника.

Крім того, повинні враховуватися взаємна ємність та індуктивність провідників.

Паразитні параметри плівкових провідників можуть бути визначені з таких співвідношень:

а) власна ємність, пФ, плівкового провідника прямокутної форми розраховується за формулою:

$$C = 0,024 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{l}{\ln \frac{4 \cdot l}{b_{\text{мін}}}},$$

де  $\varepsilon'$  – середнє арифметичне значення діелектричної проникності, що визначається відповідними проникностями повітря й підкладки (діелектрична проникність для ситалу 8, для повітря 1,0006).

б) власна індуктивність, мкГн, плівкового провідника прямокутної форми при  $b \ll l$  визначається за формулою:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot l \left( \ln \frac{2 \cdot l}{b} + 0,22 \cdot \frac{b}{l} + 0,5 \right).$$

#### 4.2.4 Розрахунок плівкових контактних переходів

Елементи плівкової гібридної інтегральної мікросхеми об'єднуються в єдину схему за допомогою системи плівкових комутаційних провідників, які в місцях з'єднання з іншими плівковими елементами утворюють контактні пари (контактні переходи).

У плівкових гібридних ІМС використовують два типи контактних переходів. Перший являє собою контактну пару з резистивної та низькоомної плівок, другий – контактну пару з двох низькоомних плівок.

Контактний перехід будь-якого типу має скінчений опір. Еквівалентний опір контактного переходу, утворений резистивною 1 та низькоомною 2 плівками (рис. 4.4), залежить від геометричних розмірів контакту, провідності плівок, що контактують, та питомого перехідного опору  $\rho_K$ , під яким розуміють опір одиниці площі контактної пари 3 струму, що протікає по нормалі до шарів контакту. Повний опір контактної пари без урахування шунтувального впливу плівок контактної пари:

$$R_K = \frac{\rho_K}{S},$$

де  $S = b \cdot e$  – площа контакту.

При розрахунку резисторів з урахуванням похибок задаються відносною похибкою  $\gamma_{R_K}$ , яка обумовлена контактним опором (вибирається порядку 1–3%).

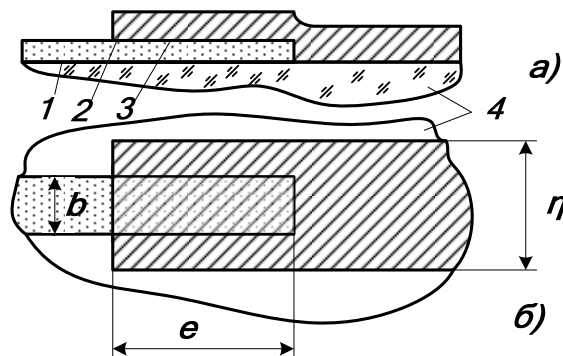


Рисунок 4.4 – Контактний перехід плівкового резистора : а) – поперечний переріз; б) – топологія; 1 – резистивний шар; 2 – провідниковий шар; 3 – контактний шар; 4 – підкладка

Допустимий опір контактної пари:

$$R_{\text{пер. доп.}} = \frac{\gamma_{R_K} R}{2}.$$

Розрахунок полягає у визначенні мінімального перехідного опору плівкового контакту. Опір перехідного контакту:

$$R_{\text{пер}} = \frac{r_1^2 + r_2^2}{(r_1 + r_2) \cdot \alpha \cdot \text{th}(\alpha e)} + \frac{2r_1 r_2}{(r_1 + r_2) \cdot \alpha \cdot \text{sh}(\alpha e)} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} e,$$

де  $\alpha = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{r_K}}$ ,  $r_{1,2} = \frac{\rho}{b} = \frac{R}{e}$ ,  $r_K$  – опір одиниці довжини контактної пари струму, направлено перпендикулярно до шарів контакту:

$$r_K = \frac{\rho_K}{b} = R_K e.$$



*Конструктивний розрахунок контактної переходи двох провідних плівок.* Цей випадок передбачає малі значення  $r_1, r_2, r_k$  ( $\alpha e < 0,2$ ).

Знаходимо опір контактної переходи:

$$R_{nep} = \frac{R}{2} + R_K$$

або з урахуванням геометричних розмірів:

$$R_{nep} = \rho \frac{e}{b} + \frac{\rho_H}{eb}.$$

Звідки визначимо оптимальну довжину контакту:

$$e = 1,41 \sqrt{\frac{\rho_K}{\rho}}.$$

Ширина контактної переходи визначається шириною резистора.

*Конструктивний розрахунок контактної переходи утвореного провідною та резистивними плівками.* Це випадок коли  $r_1 \square r_2$  ( $\alpha e > 5$ ). Визначаємо опір контактної переходи:

$$R_{nep} = \frac{\sqrt{r_2 r_k}}{th(\alpha e)}$$

або з урахуванням геометричних розмірів:

$$R_{nep} = \frac{\sqrt{\rho \rho_K}}{b \cdot th(\alpha e)}.$$

Мінімальне значення  $R_{nep}$  буде при  $th(\alpha e) = 1$ :  $R_{nep.min} = \frac{\sqrt{\rho \rho_K}}{b}$ .

Отримане значення повинно задовольняти умову

$$R_{nep.min} < R_{nep.don}.$$

Якщо  $R_{nep.min}$  при розрахунку виявилось більше  $R_{nep.don}$ , то звести  $R_{nep.min}$  до допустимого значення можна, збільшивши ширину резистора. Якщо збільшення незначне (20–50%), то воно приймається і відбувається збільшення довжини резистора. Якщо збільшення в 2–3 рази, то необхідно перейти до гантелеподібного резистора. При цьому щоб уникнути появи похибки за рахунок нерівномірної щільності струму в розширеній області відношення  $b^*/b$  не повинно бути більше 3,5, де  $b^*/b$  – ширина збільшеної частини резистора.

Визначаємо мінімальну довжину контактної переходи:

$$l_{nep.min} = 1,5 \sqrt{\frac{\rho_K}{\rho}}.$$

Повна довжина перекриття визначається за формулою:

$$l_{max} = l_{nep.min} + 2(\Delta l + \eta),$$

де  $\eta$  – абсолютна похибка базування (зазвичай  $\eta=0,05$ ).

*Приклад розрахунку контактного переходу.* Визначити розміри контактного переходу плівкового резистора за такими даними:  $R = 2\text{кОм}$ ;  $\rho = 500\text{ Ом}/\square$ ;  $\rho_k = 0,25\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$ ; ширина  $b = 0,2\text{ мм}$ ;  $\gamma_{R_k} = 4\%$ .

*Розрахунок.* Допустимий опір контактного переходу:

$$R_{\text{пер.дон}} = \frac{0,04 \cdot 2000}{2} = 0,04\text{ кОм}.$$

$$\text{Мінімальне значення } R_{\text{пер.мін}} = \frac{\sqrt{500 \cdot 0,25}}{0,2} = 56\text{ Ом}.$$

Умова  $R_{\text{пер.мін}} < R_{\text{пер.дон}}$  не виконується, тому збільшуємо ширину резистора  $b$  до  $0,3\text{ мм}$ . Тоді

$$R_{\text{пер.мін}} = \frac{\sqrt{500 \cdot 0,25}}{0,3} = 37\text{ Ом}.$$

В цьому випадку умова  $R_{\text{пер.мін}} < R_{\text{пер.дон}}$  виконується.

Мінімальна довжина контактного переходу

$$l_{\text{пер.мін}} = 1,5 \sqrt{\frac{0,25}{500}} = 0,034\text{ мм}.$$

Повна довжина:  $l_{\text{макс.}} = 0,033 + 2(0,02 + 0,05) = 0,174\text{ мм}$ . Отже, беремо  $l=0,2\text{ мм}$ .

### 4.3 Конструкції навісних компонентів

Як навісні елементи в гібридних мікросхемах використовують безкорпусні діоди та діодні матриці, транзистори та транзисторні матриці, тиристори, МОН-структури, напівпровідникові мікросхеми, а також корпусні напівпровідникові прилади в мініатюрному виконанні. Безкорпусні напівпровідникові прилади мають малі габаритні розміри та масу.

*Безкорпусні (unpackaged)* прилади виготовляються за планарною технологією. Ці прилади можуть бути негерметичними та монтуватися в герметичному корпусі гібридної мікросхеми або в модулі, що складається з декількох гібридних мікросхем. Для тимчасового захисту від впливу вологи та забруднень, що містяться в навколишньому середовищі, кристали в цих приборах покриваються тонкими захисними плівками лаку, емалі, смоли, скла, компаунда.

Безкорпусні напівпровідникові прилади за способом їх монтажу у мікросхему поділяються на дві групи: прилади з гнучкими виводами та прилади з жорсткими об'ємними виводами. В додатку Л подано конструкції безкорпусних мініатюрних діодів та транзисторів.

## 5 ПРОЕКТУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

### 5.1 Особливості топології і етапи розробки

Початковими даними для проектування є:

– технічне завдання для розробки мікросхеми або серії мікросхем. Технічне завдання включає в себе технічні вимоги (функцію, технічні характеристики, електричні характеристики, параметри мікросхеми, які розробляють напругу живлення та ін.); експлуатаційні вимоги (з кліматичних та механічних вимог); вимоги до надійності (час безвідмовної роботи, середній термін роботи та ін.); вимоги до зберігання (у складських умовах, у польових умовах); конструктивні вимоги (тип та розмір корпусу, маса, вимоги до виводів та ін.);

– принципова електрична схема, що розроблена на основі технічного завдання та відпрацьована з урахуванням її реалізації у вигляді плівкової гібридної мікросхеми;

– технологічні можливості та обмеження, дані про технологічні процеси та обладнання, які можуть використовуватися для виготовлення гібридних мікросхем.

Проектування гібридних мікросхем виконується в такій послідовності:

- аналіз технічного завдання;
- розрахунок плівкових пасивних елементів з урахуванням схематичних вимог та технологічних можливостей;
- розробка комутаційної схеми та визначення площі підкладки;
- розробка ескізу *топології (topological drawing of the microcircuit)*;
- контрольні-перевіркові розрахунки;
- розробка кінцевого варіанта топології;
- розробка пошарових креслень;
- оформлення та випуск технічної документації.

### 5.2 Розрахунок площі гібридних інтегральних схем

Орієнтовну площу плати визначають за формулою:

$$S = K \left( \sum_{i=1}^n S_{Ri} + \sum_{i=1}^m S_{Ci} + \sum_{i=1}^k S_{Li} + \sum_{i=1}^l S_{Hi} + N \cdot S_K \right),$$

де  $K$  – коефіцієнт запасу площі плати, що враховує зазор між елементами та площу, необхідну для розміщення міжз'єднань (для орієнтовних розрахунків його значення приймається рівним 2 або 3);

$S_{Ri}$  – площа  $i$ -го резистивного елемента;

$S_{Ci}$  – площа  $i$ -го ємнісного елемента;

$S_{Li}$  – площа  $i$ -го індуктивного елемента;

$S_{Hi}$  – площа  $i$ -го навісного компонента;

$S_K$  – площа контактної площадки;

$N$  – кількість контактних площадок;

$n, m, k, l$  – кількість плівкових резисторів, конденсаторів, котушок індуктивностей та навісних компонентів, відповідно.

За орієнтовно розрахованою площею підкладки вибирають її типорозмір з ряду рекомендованих (табл. 5.1), метод захисту та типорозмір корпусу (при корпусному виконанні).

Таблиця 5.1 – Типорозміри плат ГС (розміри, мм)

| Номер типорозміру | Ширина | Довжина | Номер типорозміру | Ширина | Довжина | Номер типорозміру | Ширина | Довжина |
|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|
| 1                 | 96     | 120     | 8                 | 12     | 16      | 15                | 8      | 15      |
| 2                 | 60     | 96      | 9                 | 10     | 16      | 16                | 8      | 10      |
| 3                 | 48     | 60      | 10                | 10     | 12      | 17                | 24     | 60      |
| 4                 | 30     | 48      | 11                | 5      | 6       | 18                | 15     | 48      |
| 5                 | 24     | 30      | 12                | 2,5    | 4       | 19                | 20     | 45      |
| 6                 | 20     | 24      | 13                | 16     | 60      |                   |        |         |
| 7                 | 16     | 20      | 14                | 32     | 60      |                   |        |         |

### 5.3 Проектування топології тонкоплівкових гібридних мікросхем

Початковими даними для розробки топології мікросхем є: комутаційна схема; розмір плати та тип корпусу; геометричні розміри та форма плівкових елементів; геометричні розміри компонентів; конструктивні та технологічні обмеження (додаток К), які залежать від технологічного методу розробки плівкових елементів: маскового (М), фотолітографічного (Ф), комбінованого маскового та фотолітографічного (МФ), електронно-іонного (ЕІ), танталового (ТА).

Початковий етап розробки топології полягає у виготовленні ескізу, який виконується в масштабі 10:1 або 20:1. Розробку ескізу топології рекомендується виконувати в два етапи. Спочатку вирішується задача оптимального розміщення елементів та компонентів на підкладці з урахуванням мінімізації та рівномірного використання площі плати.

Далі виконуються міжелементні та міжкомпонентні з'єднання або трасування провідників на платі, при якому дотримуються встановлених вимог. Головні з них – це мінімізація довжини провідників, кількості їх перетинів та монтажної ємності. Вказані вимоги значною мірою протилежні. Для їх забезпечення при проектуванні ГС необхідно дотримуватися ряду

правил. Наприклад, плівкові провідники повинні мати мінімальну довжину і не дотикатися один до одного, високочастотні вхідні та вихідні провідники повинні бути максимально рознесені один від одного.

Оскільки трасування провідників виконується після розміщення елементів і компонентів на підкладці, то в кожному конкретному випадку схема трасування достатньо жорстко прив'язана до їх розміщення. Якщо всі практично можливі варіанти трасування визнано незадовільними, то змінюють розміщення елементів на платі. Ця операція повторюється до тих пір, доки не буде вирішена задача трасування. При розробці ескізу топології необхідно враховувати, що дозволяється установа навісних компонентів на плівкові провідники та резистори, захищені плівкою діелектрика, але не дозволяється встановлювати їх на плівкові конденсатори та перехрестя плівкових провідників. Навісні компоненти потрібно розміщувати рядами, вздовж сторін плати.

Розроблена топологія повинна: відповідати схемі електричній принциповій; задовольняти всі конструктивні, технологічні та електричні вимоги; забезпечувати можливість вимірювання електричних параметрів плівкових елементів, заданий тепловий режим; мати необхідний рівень надійності.

Перевірка правильності розробленої топології гібридної мікросхеми виконується в такій послідовності. Спочатку перевіряють відповідність топології принциповій електричній схемі, зовнішніх контактних площин – виводам корпусу, конструктивно технологічним вимогам та обмеженням (додаток К), розрахованим розмірам плівкових елементів. Далі перевіряють наявність в схемі перетинів плівкових провідників та захист їх діелектриком, можливість контролю елементів та забезпечення нормальної роботи мікросхем при заданих умовах експлуатації. За необхідності, проводять оцінювання ємнісних та індуктивних зв'язків.

Перевірка ескізу топології супроводжується уточнюванням та коригуванням, в результаті чого розроблюють кінцевий варіант топології.

#### **5.4 Паразитні зв'язки в гібридних мікросхемах**

В мікросхемах відстань між окремими елементами набагато менша, ніж в вузлах РЕА, а самі елементи розміщено на підкладці, провідність та діелектрична проникність якої набагато більші параметрів повітря. Тому зв'язки між елементами гібридних мікросхем, в тому числі паразитні, що перешкоджають їх правильному функціонуванню, виконуються дуже міцними. Паразитні зв'язки у вигляді окремих провідностей або паразитних елементів необхідно враховувати при синтезі схеми електричної принципової, а також при оптимізації конструкції гібридної мікросхеми.

Всі види зв'язку та взаємозв'язку можна класифікувати таким чином:

1. Зв'язки електромагнітної природи, які поділяються на гальванічні,

ємнісні та індуктивні. Еквівалентні провідності, що відображають вказані типи зв'язку, є пасивними.

2. Зв'язки, зумовлені тепловими процесами, які породжують зв'язки, що виникають за рахунок термоелектричних ефектів, зміни провідності при зміні температури, теплової інжекції носіїв та інші.

3. Зв'язки, зумовлені магнітоелектричними ефектами. Елементи гібридної мікросхеми можуть бути пов'язані між собою одним із вказаних видів зв'язку або їх сукупністю. При розрахунках такі зв'язки зручно подавати у вигляді провідності  $Y_{ij}$ , яка в загальному випадку є комплексною величиною та визначається конструкцією гібридної мікросхеми, режимом її роботи, використовуваними фізичними явищами та ефектами, параметрами вихідних матеріалів.

*Розрахунок паразитних ємнісних зв'язків.* Оцінка значень паразитних ємнісних зв'язків є достатньо складною задачею. З відомими припущеннями значення паразитних ємнісних зв'язків, які виникають між провідними та резистивними плівками різних конфігурацій, можна оцінити для паралельних провідників, які розташовано навколо інших паралельних провідників (рис. 5.1), а також між зігнутими під прямим кутом плоскими провідниками (рис. 5.2).

Ємність між паралельними провідниками підкладки, які розташовані навколо інших паралельних провідників,

$$C_{\text{пар } ij} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot C_{ij} \cdot l \cdot (\epsilon_n + \epsilon_c), \quad (5.1)$$

де  $\epsilon_n$ ,  $\epsilon_c$  – відносні діелектричні проникності підкладки та оточуючого середовища;

$l$  – довжина провідника, мм;

$C_{ij}$  – ємнісний коефіцієнт провідників  $i$  та  $j$ , пФ.

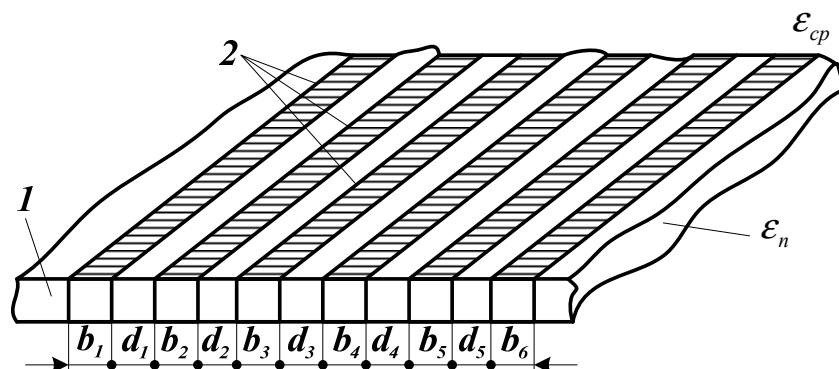


Рисунок 5.1 – Система паралельно розташованих плівкових провідників на підкладці: 1 – підкладка; 2 – плівкові провідники

З точністю не нижче 25% ємнісний коефіцієнт системи з двох провідників

$$C_{12} = 1,56 + 0,41 \cdot \lg \frac{b_1 b_2}{d_1^2};$$

ємнісні коефіцієнти для системи з трьох паралельних провідників;

$$C_{12} = 1,18 + 0,31 \cdot \lg \frac{b_1 b_2}{d_1^2};$$

$$C_{13} = 0,58 + 0,27 \cdot \lg \frac{b_1^{13/12} \cdot b_3^{13/12}}{d_1^{1/3} \cdot b_2^{3/2} \cdot d_2^{1/3}},$$

де  $b_1, b_2, b_3$  – ширина плівкових провідників;  
 $d_1, d_2$  – відстань між плівковими провідниками.

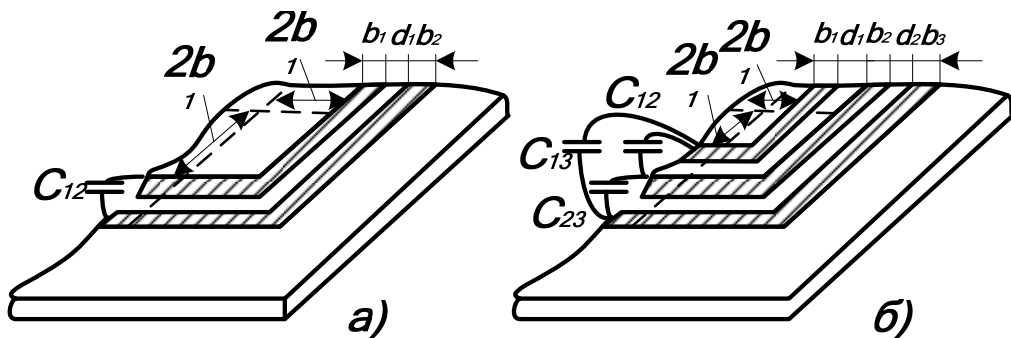


Рисунок 5.2 – Система зігнутих під прямим кутом плівкових провідників на підкладці, яка складається: а) з двох провідників; б) з трьох провідників

Ємнісні коефіцієнти  $C_{n+1-i, n+1-j}$  розраховуються з допомогою тих же співвідношень шляхом заміни  $b_k$  на  $b_{n+1-k}$ , а  $d_n$  на  $d_{n-k}$ , ( $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – кількість провідників розглянутої системи).

При розрахунках ємностей в системі зігнутих під прямим кутом плоских провідників розглянуту систему розбивають на кут, який вирізається із системи на відстані  $2 \cdot b_1$  від згину першого провідника, та дві системи паралельних провідників. Розрахунок ємностей для кожної із цих систем виконується окремо. Так, при оцінці ємності кута в розрахункові співвідношення підставляють еквівалентну довжину кута  $l_{екв}$ . Для системи з двох провідників еквівалентна довжина  $l_{екв} = 6 \cdot b_1 + 0,5 \cdot b_2 + d_1$ . Якщо система складається з трьох провідників, тоді значення  $l_{12екв}$ ,  $l_{23екв}$ ,  $l_{13екв}$ , що використовуються при оцінюванні ємнісних коефіцієнтів  $C_{12}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{13}$ , відповідно дорівнюють  $20,25 \cdot b_1$ ;  $26,23 \cdot b_1$ ;  $23,19 \cdot b_1$ .

Ємнісні коефіцієнти розраховують за такими ж формулами, як і для системи з паралельно розташованими провідниками, причому похибка при визначенні ємності провідника не перевищує 10%.

*Розрахунок паразитних індуктивних зв'язків.* Індуктивність провідників круглого перерізу, які можна використовувати як з'єднувальні (для з'єднання контактних площадок підкладки з виводами корпусу гібридної мікросхеми), дорівнює

$$L = 0,2 \cdot l \cdot [\ln(2 \cdot l/r) - 0,75],$$

де  $l$  – довжина провідника;

$r$  – радіус перерізу.

Індуктивність провідників прямокутного перерізу

$$L = 0,2 \cdot l \cdot (\ln(l/b + c) + 1,19 + b/3 \cdot l),$$

де  $b$  – ширина перерізу провідника;

$c$  – товщина перерізу провідника.

Взаємоіндукція двох провідників, якщо відстань  $h$  між їх осями набагато більша розмірів поперечного перерізу,

$$M = 0,2 \cdot \left[ \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + h^2}}{h} - \frac{\sqrt{l^2 + h^2}}{l} - \frac{h}{l} \right].$$

Індуктивність поряд розташованих та взаємодіючих провідників  $L' = 2L + 2M$ .

Індуктивності провідників гібридних мікросхем, як правило, невеликі. Омичний опір провідників у діапазоні частот в декілька мегагерц значно перевищує індуктивний опір. Часто індуктивності плівкових провідників в діапазоні частот до 10 МГц можна не враховувати. Однак взаємоіндукція між суміжними провідниками може досягати таких значень, які необхідно враховувати.

### **5.5 Розрахунок теплового режиму гібридної мікросхеми**

Для якісної роботи мікросхема повинна бути виконана так, щоб потужності, розсіювані на її елементах, не викликали її розігріву до температури вище допустимої. В гібридній мікросхемі основним джерелом тепла є резистори, активні елементи та компоненти. Потужності, розсіювані конденсаторами та індуктивностями, порівняно невеликі, а елементи комутації завдяки малому електричному опору та високій теплопровідності металевих плівок сприяють відведенню теплоти та зменшенню температури.



Оскільки температурному впливу підлягають не тільки самі джерела тепла, але й усі елементи мікросхеми, задача теплового розрахунку зводиться до визначення розподілення температур по всій поверхні підкладки. Для вирішення таких задач необхідно розглянути деякі основні фізичні явища.

Визначають три механізми теплопередачі: теплопровідність, конвекція та випромінювання.

**Теплопровідність або кондукція (*conduction*)** – передача тепла шляхом безпосереднього контакту між молекулами без значного їх переміщення. Теплопередача здійснюється в межах будь-якого певного середовища: газу, рідини, твердого тіла. Це єдиний можливий механізм в непрозорих твердих тілах. Конвекція є основним видом теплопередачі між поверхнею теплового тіла та навколишнім газоподібним середовищем.

**Конвекція (*convection*)** визначає сукупну дію явищ теплопровідності газу, акумулювання енергії в ньому та перемішування.

**Теплове випромінювання (*heat radiation*)** – передача теплової енергії з допомогою електромагнітного випромінювання в діапазоні хвиль 0,1–100 мкм. Це єдиний можливий спосіб теплопередачі між тілами, які розділені вакуумом.

В кожному реальному випадку діє, меншою мірою, два вказаних механізми теплопередачі. Як правило, при даній різниці температур теплопровідністю можна передати більшу кількість тепла, ніж якимось іншим механізмом теплопередачі. Тому при розробці засобів конструювання та самих конструкцій, які повинні бути найефективнішими з точки зору відведення тепла, як правило, як основний спосіб відведення тепла вважають теплопровідність. Для кожного виду теплопередачі при будь-якій різниці температур швидкість передачі тепла залежить від певних властивостей матеріалу та конфігурації деталей, при цьому визначальне значення має коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

При розгляді задачі про теплопередачу часто використовують електричну аналогію. При цьому електричний потенціал відповідає температурі, а струм – швидкості теплових потоків. За цією ж аналогією, відношення температури до швидкості теплового потоку називають тепловим опором. Як правило, при аналізі використовують зосереджений опір, що є результатом дії усіх послідовних та паралельних кіл теплопередачі.

Основними етапами розрахунку теплового режиму гібридної мікросхеми є: оцінювання теплового режиму мікросхеми на етапі ескізного проектування топології; визначення вимог до розробки топології, виконання яких дозволяє забезпечити заданий тепловий режим; розрахунок перегріву елементів мікросхеми (різниця температур елементів та корпусу мікросхеми).

При оцінюванні теплового режиму вводять такі спрощення: передача тепла відбувається тільки теплопровідністю; температура корпусу мікрос-

хеми більша за температуру навколишнього середовища; коефіцієнт теплопровідності не залежить від температури.

*Оцінювання теплового режиму мікросхеми.* Вхідними даними для оцінювання теплового режиму мікросхеми є:

- тип конструкції мікросхеми (згідно з рис. 5.3);
- товщина плати  $\delta_n$ , м;
- коефіцієнт теплопровідності плати  $\lambda_n$ , Вт/(м·°C);
- товщина шару клею (компаунду) між платою та основою корпуса мікросхеми  $\delta_k$ , м;
- температура корпуса (основи) мікросхеми  $T_k$ , °C;
- коефіцієнти теплопровідності клею або компаунду  $\lambda_k$ , Вт/(м·°C);
- максимально допустима температура плівкових резисторів  $T_{R_{\max \text{ доп}}}$ ;
- максимально допустима температура плівкових конденсаторів  $T_{C_{\max \text{ доп}}}$ ;
- максимально допустима температура навісних елементів  $T_{H_{\max \text{ доп}}}$ ;
- внутрішній тепловий опір навісних елементів  $R_{T_{\text{вн}}}$ , °C/Вт;
- потужність, розсіювана навісними елементами мікросхеми  $P_{\text{ні}}$ , Вт;
- ширина навісного елемента  $b_{\text{ні}}$ , м;
- довжина навісного елемента  $l_{\text{ні}}$ , м;
- сумарна питома потужність, що розсіюється в мікросхемі  $P_0$ , Вт/м<sup>2</sup>.

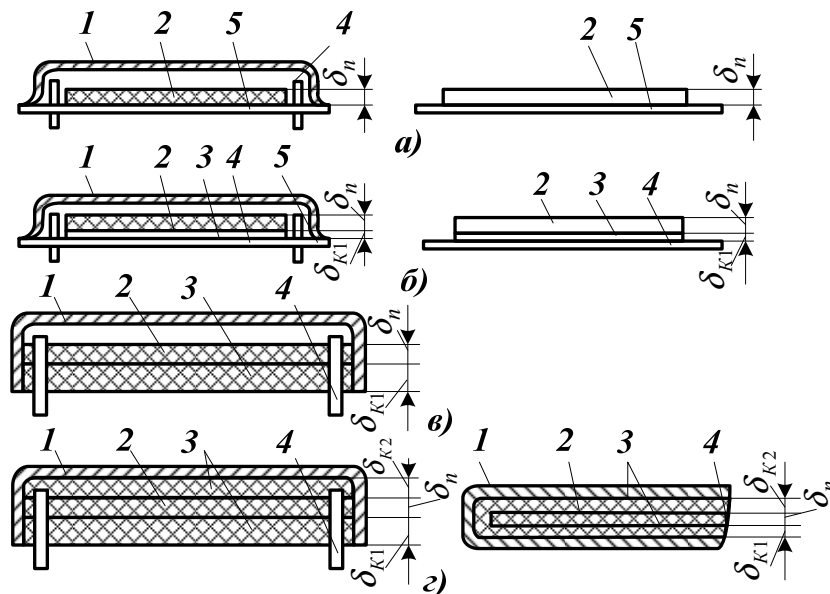


Рисунок 5.3 – Типи конструкцій мікросхем а) кріплення плати до корпуса методом склоспаювання або паяння; б) приклеювання плати до корпусу; в) металополімерна; г) металополімерна, залита компаундом; 1 – кришка корпуса; 2 – плата; 3 – клей (компаунд); 4 – виводи мікросхеми; 5 – основа корпуса

I. Розрахунок починається з визначення теплового опору мікросхеми  $r_T$  та її ефективної товщини  $\delta$ , які будуть відрізнятися для різних конструкцій мікросхем.

1. Для конструкцій мікросхем, у яких плата закріплена до корпусу методом склоспаювання або паяння (рис. 5.3, а)

$$r_T = \frac{\delta_n}{\lambda_n}; \quad \delta = \delta_n.$$

2. Для конструкцій мікросхем, у яких плата приклеюється до корпусу, (рис. 5.3, б)

$$r_T = \frac{\delta_n}{\lambda_n}; \quad \delta = \delta_n + \frac{\delta_{\kappa 1} \lambda_n}{\lambda_{\kappa}}.$$

3. Для металополімерних конструкцій мікросхем (рис. 5.3, в)

$$r_T = \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{\kappa 1}}{\lambda_{\kappa}}; \quad \delta = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{\kappa}^2 + \delta_n \cdot \delta_{\kappa 1} \cdot \left( \frac{\lambda_n}{\lambda_{\kappa}} + \frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda_n} \right)}.$$

4. Для металополімерних залитих конструкцій мікросхем (рис. 5.3, г)

$$r_T = \frac{r_{T1} \cdot r_{T2}}{r_{T1} + r_{T2}}; \quad \delta = \max(\delta_1, \delta_2),$$

$$\text{де } r_{T1} = \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{\kappa 1}}{\lambda_{\kappa}}; \quad r_{T2} = \frac{\delta_{\kappa 2}}{\lambda_{\kappa}};$$

$$\delta_1 = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{\kappa 1}^2 + \delta_n \cdot \delta_{\kappa 1} \cdot \left( \frac{\lambda_n}{\lambda_{\kappa}} + \frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda_n} \right)}; \quad \delta_2 = \delta_{\kappa 2}.$$

II. Максимально допустиму потужність розсіювання плівкових резисторів при вільному розміщенні елементів мікросхеми на платі оцінюють, виходячи з співвідношення

$$P_0 = (T_{\text{нмаксдоп}} - T_{\kappa} - \Theta_{\text{нмакс}}) / r_m.$$

Параметр  $\Theta_{\text{нмакс}}$ , що входить до чисельника цього співвідношення, називається максимально можливим перегрівом навісного елемента:

$$\Theta_{\text{нмакс}} = \max \left\{ P_{\text{ні}} \cdot \left( R_{\text{тзовні}} + \frac{r_m}{b_{\text{ні}} \cdot l_{\text{ні}}} \right) \right\}.$$

III. Максимально допустиму питому потужність розсіювання плівкових резисторів оцінюють за формулою

$$P'_0 = \frac{(T_{R_{\text{максдоп}}} - T_{\text{н}})}{r_m}.$$

Значення максимальної потужності розсіювання плівкових резисторів  $P_0$  визначають з умови  $P_0 \leq P'_0$ .

IV. Максимально можливі температури елементів мікросхеми, для плівкових резисторів:

$$T_{R_{\max}} = T_k + r_T (P_0 + P_{n_{\max}});$$

для плівкових конденсаторів:

$$T_{C_{\max}} = T_k + 0,5r_T (P_0 + P_{n_{\max}});$$

для навісних елементів:

$$T_{n_{\max}} = T_k + r_T \cdot P_0 + \Theta_{n_{\max}},$$

$$\text{де } P_{n_{\max}} = \max \{ P_{ni} / l_{ni} \cdot b_{ni} \}.$$

Якщо виконується умова  $P_0 \leq P'_0$ , то подальший тепловий розрахунок не виконується.

Визначення вимог до розробки топології для забезпечення заданого теплового режиму. Вихідними даними при визначенні вимог до розробки топології мікросхеми, дотримання яких забезпечує отримання заданого теплового режиму мікросхеми, є ті ж, що і при оцінюванні теплового режиму. Крім того, необхідно враховувати питому потужність розсіювання плівкових резисторів  $P_0$ .

При  $P_0 > P'_0$  для забезпечення заданого теплового режиму мікросхеми необхідно відділити навісні елементи від інших тепловидільних елементів зонами захисту (рис. 5.4), тобто вільними від джерел тепла частинами поверхні плати, що оточують один або декілька навісних елементів, та призначеними для послаблення теплового виділення на них решти елементів мікросхеми.

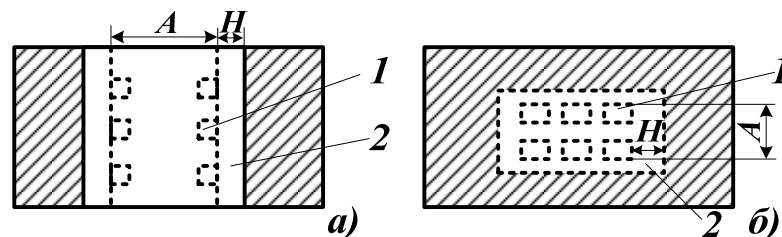


Рисунок 5.4 – Рекомендоване розташування декількох навісних елементів мікросхеми в зоні теплового захисту: а) при двосторонньому захисті; б) при захисті по периметру; 1 – навісний елемент, 2 – зона теплового захисту

Вибір типу захисту визначається схемотехнічними вимогами, що висуваються до розробки топології.

Розрахунок зони захисту здійснюється в такій послідовності:

1. Визначають значення коефіцієнтів:

$$\alpha = A / \delta; \quad \beta_T = (T_{\text{нмаксдоп}} - T_K - \Theta_{\text{нт}}) / r_T \cdot P_0,$$

де  $A$  – ширина зони, що захищається (рис. 5.4).

Параметр  $\Theta_{\text{нт}}$ , що виражається в градусах:

$$\Theta_{\text{нт}} = P_{\text{нт}} \cdot (R_{\text{твн}} + r_T / l_{\text{ні}} \cdot b_{\text{ні}}),$$

де  $P_{\text{нт}}$  – потужність, розсіювана в найбільш навантаженому елементі групи.

2. Розраховують мінімально допустиму ширину зони захисту

$$H = h \cdot \delta_n,$$

де  $h$  – параметр, що визначається з рис. 5.5, а для двостороннього захисту та з рис. 5.5, б – для захисту по периметру.

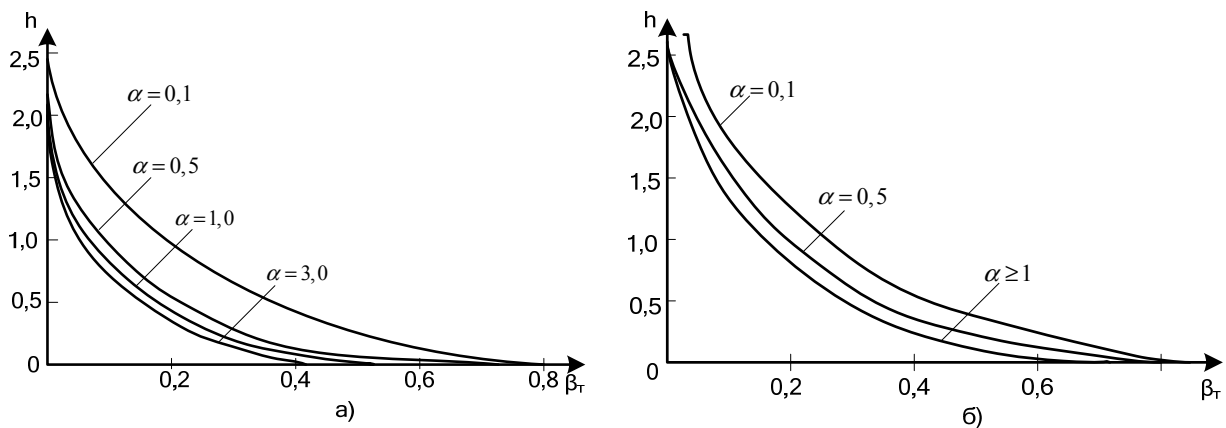


Рисунок 5.5 – Графіки для розрахунку зон захисту : а) двосторонній захист; б) захист по периметру

Якщо при проектуванні топології забезпечується необхідна ширина зони захисту, то подальший тепловий розрахунок не проводять.

Якщо при проектуванні топології не забезпечено необхідну ширину зон захисту для деяких груп навісних елементів, то необхідно провести розрахунок теплового режиму (перегріву) цих елементів.

## 5.6 Розрахунок надійності гібридної мікросхеми

*Надійність (reliability)* визначається часом напрацювання на відмову, який обчислюється за формулою:

$$T = \frac{1}{\sum \lambda_{\Sigma}},$$

де  $\lambda_{\Sigma}$  – сумарна інтенсивність відмов компонентів та елементів мікросхеми.

Сумарна інтенсивність відмов обраховується за формулою:

$$\lambda_{\Sigma} = [N_{имс} \cdot \lambda_{0имс} \cdot \alpha_{имс} + N_T \cdot \lambda_{0T} \cdot \alpha_T + N_D \cdot \lambda_{0D} \cdot \alpha_D + N_R \cdot \lambda_{0R} \cdot \alpha_R + \\ + N_C \cdot \lambda_{0C} \cdot \alpha_C + N_{ДП} \cdot \lambda_{0ДП} + N_{КП} \cdot \lambda_{0КП} + N_H \cdot \lambda_{0H} \cdot \alpha_H + \\ + (\sum_{i=1}^k N_{вывимс} + 3N_T + 2N_D + 2N_H + 2N_{БК}) \cdot \lambda_{0з'едн} + \\ + \lambda_{0П} + \lambda_{0К}] \cdot K_i,$$

де  $N_{имс}$  – кількість кристалів інтегральної мікросхеми;

$N_T$  – кількість кристалів транзистора;

$N_D$  – кількість діодів,

$N_R$  – кількість плівкових резисторів,

$N_C$  – кількість плівкових конденсаторів,

$N_{ДП}$  – кількість друкованих провідників,

$N_{КП}$  – кількість контактних площадок,

$N_H$  – кількість навісних компонентів,

$N_{вывимс}$  – кількість виводів інтегральної мікросхеми,

$N_{БК}$  – кількість виводів корпуса,

$\alpha$  – поправковий коефіцієнт навантаження елемента або компонента;

$\lambda_0$  – інтенсивність відмов елемента або компонента;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує вплив навколишнього середовища:

$$K_i = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3,$$

де  $K_1$  – враховує дію механічних факторів (табл. 5.2);

$K_2$  – враховує дію вологості (табл. 5.3);

$K_3$  – враховує атмосферний тиск (табл. 5.4).

Таблиця 5.2 – Поправкові коефіцієнти  $K_I$  для інтенсивностей відмов

| Умови експлуатації<br>ЕОА | $K_I$        |                           |                  |
|---------------------------|--------------|---------------------------|------------------|
|                           | при вібрації | при ударних навантаженнях | при сумарній дії |
| Лабораторні               | 1,00         | 1,00                      | 1,00             |
| Стаціонарні               | 1,04         | 1,03                      | 1,07             |
| Автофургонні              | 1,35         | 1,08                      | 1,46             |
| Залізничні                | 1,40         | 1,10                      | 1,54             |
| Корабельні                | 1,30         | 1,05                      | 1,37             |
| Літакові                  | 1,46         | 1,13                      | 1,65             |

Таблиця 5.3 – Поправкові коефіцієнти  $K_2$  для інтенсивностей відмов

| Вологість, % | Температура, °C | $K_2$ |
|--------------|-----------------|-------|
| 60-70        | 20-40           | 1,0   |
| 90-98        | 20-25           | 2,0   |
| 90-98        | 30-40           | 2,5   |

Таблиця 5.4 – Поправкові коефіцієнти  $K_3$  для інтенсивностей відмов

| Висота, км | $K_3$ | Висота, км | $K_3$ |
|------------|-------|------------|-------|
| 0-1        | 1,00  | 8-10       | 1,25  |
| 1-2        | 1,05  | 10-15      | 1,30  |
| 2-3        | 1,10  | 15-20      | 1,35  |
| 3-5        | 1,14  | 20-25      | 1,38  |
| 5-6        | 1,16  | 25-30      | 1,40  |
| 6-8        | 1,20  | 30-40      | 1,45  |

Інтенсивність відмов елемента або компонента:

- для навісних транзисторів  $\lambda_{0T} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ ;
- для плівкових резисторів  $\lambda_{0R} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$ ;
- для плівкових конденсаторів  $\lambda_{0C} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$ ;
- для друкованих провідників  $\lambda_{0ДП} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$ ;
- для контактних площадок  $\lambda_{0КП} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$ ;
- для навісних компонентів  $\lambda_{0Н} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$ ;
- для з'єднання пайкою  $\lambda_{0з'єдн} = 0,1 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ ;
- для підкладки  $\lambda_{0П} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$ ;
- для корпусу  $\lambda_{0К} = 1 \text{ год}^{-1}$ .

## 5.7 Використання комп'ютерних програм при проектуванні гібридних мікросхем

Розробка будь-якого радіоелектронного пристрою супроводжується, як правило, фізичним або математичним моделюванням. Фізичне моделювання потребує багато часу та великих матеріальних затрат. Тому часто застосовують математичне моделювання, використовуючи засоби та методи обчислювальної техніки. Розвиток обчислювальної техніки зробив можливим широке використання персональних комп'ютерів для математичного моделювання електронних пристроїв.

Однією з комп'ютерних програм є електронна система моделювання **Electronics Workbench (EWB)**, яка характеризується простим інтерфейсом

користувача. Вона імітує реальне робоче місце дослідника – лабораторію, яка оснащена вимірювальними приладами, що працюють в реальному масштабі часу.

Ще одним з популярних програмних продуктів, використовуваних для проектування радіочастотних пристроїв та пристроїв НВЧ є **AWR Design Environment (AWRDE)** компанії Applied Wave Research. Він включає три інструментальні засоби: Microwave Office (MWO), Visual System Simulator (VSS) та Analog Office (ANO). Ці засоби інтегровані в єдине середовище проектування та можуть використовуватися разом, не виходячи з цього середовища. Розглянемо тут тільки Microwave Office.

Середовище проектування AWR використовує єдину об'єктно-орієнтовану модель даних, що синхронізує роботу над проектом без використання проміжних трансляторів. Це забезпечує доступ до всіх необхідних даних незалежно від виконуваної дії (креслення схеми, проведення її аналізу або формування топології).

Microwave Office дозволяє створювати схеми, що складаються з елементів схем (зосереджених і розподілених) та електромагнітних структур. Схеми можуть мати складну ієрархічну структуру, що включає безліч підсхем на різних рівнях ієрархії. Як підсхеми можуть використовуватися раніше створені схеми або електромагнітні структури, а також списки кіл, файли даних або елементи з бібліотек сторонніх користувачів. Для створення схем є бібліотека вбудованих схемних елементів.

Для моделювання можна використовувати один з методів: лінійне моделювання, одночастотний та багаточастотний гармонічний баланс, ряди Вольтера, електромагнітне моделювання та ін. Результати можуть виводитися в різних графічних формах або у вигляді таблиці залежно від мети аналізу, що проводиться.

**Advanced Design System (ADS)** – потужна платформа автоматизації розробки електронних пристроїв. Вона пропонує повну інтеграцію розробки для розробників таких пристроїв, як мобільні та портативні телефони, безпроводові мережі, радары і супутникові комунікаційні системи. Зараз ADS забезпечує потреби розробників швидкодіючих цифрових пристроїв з технологією моделювання достовірності сигналу. Систему ADS можна налаштувати для відповідних додатків і проектування потоків даних від високочастотних (ВЧ) мікросхем і плат до надвисокочастотних (НВЧ) схем і елементів прямої /цифрової обробки сигналів. Всі програмні пакети проектування спільно використовують загальну базу даних, інтерфейс користувача і відображення даних. Гнучка структура системи ADS дозволяє починати з попередньо сконфігурованих програмних пакетів і додавати потрібні можливості. Ця платформа містить такі компоненти.

*Microwave Circuit Designer (розробник НВЧ схем)*. Закінчене рішення для розробки високочастотних проектів, включаючи монолітні і гібридні НВЧ інтегральні схеми, з оптимізацією характеристик і виготовленням



придатних виробів. Об'єднує високочастотне моделювання та оптимізацію з точними моделями, бібліотеками і засобами розробки конструкції.

*MMIC Designer (розробник надвисокочастотних інтегральних мікросхем (НВЧ ІС)).* Можливість повністю зворотного проектування НВЧ ІС в єдиному інтегрованому потоці проектування. Пропонує рішення для зворотного проектування зі синхронізованими схемою/топологією, відображенням даних, методом гармонічного балансу, лінійним і електромагнітним моделюванням, транслятором файлів GDSII.

*System-In-Package (SiP) Designer (розробник системи).* Оптимальна комбінація засобів проектування і моделювання для спільної розробки багатьох різних високочастотних компонент, таких як вбудовані пасивні структури, інтегральні схеми, корпуси, між'єднання, підкладки та перехідники, що зустрічаються в сучасних мініатюризованих форм-факторах. Цей високочастотний SiP модуль вирішує три ключові завдання для успішного проектування: 1– спільне проектування системного рівня для оптимізації архітектури системи, 2 – точне моделювання всіх активних, пасивних компонентів і їх режимів роботи; і 3 – точний прогноз загальної продуктивності системи та спільної поведінки декількох технологій.

*Physical Designer (розробник фізичної конструкції).* Пакети програм Physical Designer є закінченими і розширюваними пакетами високочастотного фізичного проектування, які об'єднують стандартні і розширені особливості редагування топології з ключовими технологіями, що прискорюють фізичне проектування і перевірку топологій монолітних і гібридних НВЧ ІС, друкованих плат.

*Momentum Circuit Designer (розробник схем Momentum).* Розробник схем Momentum є основним пакетом високочастотного фізичного проектування, який об'єднує стандартні і розширені особливості редагування топології з технологією електромагнітного (ЕМ) моделювання Momentum та моделювання лінійних схем (S параметри), щоб прискорити фізичне проектування інтегральних мікросхем.

**IC-CAP (Integrated Circuit Characterization and Analysis Program)** – пропонує розробникам пристроїв і схем найсучасніше моделююче програмне забезпечення, яке виконує безліч функцій зі створення моделей, включаючи управління приладом, збір даних, графічний аналіз, моделювання, оптимізацію і статистичний аналіз. Всі ці процеси об'єднані в гнучкому і інтуїтивно зрозумілому середовищі програмного забезпечення в Windows-стилі для ефективного та точного отримання параметрів активного пристрою і схемної моделі. IC-CAP також надає можливість для побудови бібліотек моделей для ADS Agilent EEsof та інших засобів моделювання.

Успішне створення моделі пристрою потребує повного розуміння складної інтеграції між вимірювальним обладнанням і програмним забез-

печенням створення моделі. IC-CAP надає повний набір засобів повністю інтегрованого рішення для інженерів, що створюють моделі пристроїв.

Програмне забезпечення IC-CAP надає потужні можливості моделюючих вимірювань, включаючи вимірювання на постійному струмі, вимірювання індуктивностей, ємностей, опорів, імпедансів, вимірювання залежності ємності від напруги, ВЧ вимірювання та вимірювання шумів типу  $1/f$ . Щоб повністю автоматизувати середовище вимірювання, ці системи для повного рішення можна легко пов'язати з установленням зондового контролю напівпровідникових пластин.

**RF Design Environment (RFDE)/GoldenGate** – призначений для моделювання високочастотних інтегральних схем, являє собою потужний аналіз для повного контролю інтегральних схем та проектування виходу якісних виробів. Розроблений для специфічних вимог розробників високочастотних інтегральних схем, повністю інтегровано в середовище Cadence Analog Design Environment. RF Design Environment (RFDE) – інтегрує провідні технології високочастотного моделювання Agilent в середовище Cadence, яке є промисловим стандартом середовищ розробки схем з аналоговими/змішаними сигналами для проектування великих високочастотних/змішаних інтегральних схем.

GoldenGate и RFDE надають структуру для проектувальників, щоб швидко моделювати схеми, перевіряти технічні характеристики і обґрунтовувати потенціал виходу придатних виробів. Розробники можуть впевнено моделювати блоки, комбінації блоків і канали прийому/передачі в цілому, щоб зрозуміти негативний вплив шуму, спотворень, паразитних і безлічі інших ефектів, що зустрічаються при проектуванні ВЧ інтегральної схеми. Крім того, можна аналізувати технологічність схем за допомогою перевірених у виробництві методів, таких як аналіз Монте Карло та метод кутових меж. Розробники можуть безперешкодно переходити через етапи введення опису схеми, налаштування випробувального стенда, моделювання та аналізу для досягнення вражаючого розуміння характеристик проекту і технологічності перед випуском виробу, уникаючи при цьому дорогих помилок і нових проектних розробок.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Філінюк М. А. Конструювання та розрахунок гібридних мікросхем / Філінюк М. А. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 98 с.
2. Філінюк М. А. Конструювання і розрахунок напівпровідникових мікросхем / Філінюк М. А. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 138 с.
3. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем и микросборок / Коледов Л. А. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
4. Дубов Є. В. Проектування мікрозбірок та гібридних інтегральних схем / Дубов Є. В., Лободзінська Р. Ф., Мізерний В. М. – Вінниця : ВДТУ, 2000. – 137 с.
5. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : учеб. пособие для вузов / Коледов Л. А. – СПб. : Лань, 2008. – 399 с.
6. Бушминский И. П. Технологическое проектирование микросхем СВЧ: Учеб. пособие / И. П. Бушминский, Г. В. Морозов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 354 с.
7. Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання. ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. — К. : Держспоживстандарт України, 2006.
8. Лисенко Г. Л. Методичні вказівки до оформлення курсових проєктів (робіт) у Вінницькому національному технічному університеті / Лисенко Г. Л., Буда А. Г., Обертюх Р. Р. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 60 с.

## ГЛОСАРІЙ

**Аналогові мікросхеми (analog microcircuits)** – інтегральні мікросхеми, які призначені для перетворення та обробки сигналів, що змінюються за законом неперервної функції.

**Безкорпусна інтегральна мікросхема (unpackaged integrated microcircuit)** – мікросхема, не захищена корпусом та призначена для використання в гібридних інтегральних мікросхемах, мікрозборках, герметизованих блоках та апаратурі.

**Великі інтегральні схеми ВІС – (big integrated circuits)** – схеми 3–4-го ступеня інтеграції, що містять від декілька сотень до 10000 елементів, до складу яких входить один або декілька функціональних пристроїв (наприклад, арифметико-логічний пристрій, оперативний запам'ятовуючий пристрій, запам'ятовуючий пристрій з можливістю перепрограмування).

**Вивід інтегральної мікросхеми (pin of the integrated microcircuit)** – дріт, з'єднаний з контактною площадкою кристалу мікросхеми, який використовується для електричного з'єднання та механічного кріплення інтегральної мікросхеми при її з'єднанні із зовнішніми електричними колами. Виводи можуть бути *жорсткими* (кулькові, стовпцеві, балкові) та *гнучкими* (пелюсткові, дровові). Гнучкі виводи для механічного кріплення не використовуються.

**Гібридна інтегральна мікросхема (hybrid integrated microcircuits)** – мікросхема, до складу якої, крім елементів, входять компоненти та кристали.

**Елемент інтегральної мікросхеми (element of the integrated microcircuits)** – частина інтегральної мікросхеми, що реалізовує функцію будь-якого електрорадіоелемента, яка виконана спільно з кристалом або підкладкою та не може бути виділена як самостійний виріб з точки зору вимог до випробувань, прийому, поставки та експлуатації. Під електрорадіоелементом мають на увазі транзистор, діод, конденсатор, резистор та ін.

**Єдина система конструкторської документації ЄСКД (common system for design documentation)** — комплекс державних стандартів, що встановлюють взаємопов'язані правила, вимоги і норми із розробки, оформлення і обігу конструкторської документації, що розробляється і застосовується на усіх стадіях життєвого циклу виробу (при проектуванні, розробці, виготовленні, контролі, прийманні, експлуатації, ремонті, утилізації).

**Інтегральна мікросхема або мікросхема (integrated microcircuits)** – мікроелектронний виріб, що виконує встановлену функцію перетворення та обробки сигналу та має високу щільність пакування електрично з'єднаних елементів (або елементів та компонентів) та кристалів, який з

точки зору вимог до випробувань, прийому, поставки та експлуатації розглядається як єдине ціле.

**Компонент інтегральної мікросхеми (component of the integrated microcircuit)** – частина інтегральної мікросхеми, що виконує функції будь-якого електрорадіоелемента, яка може бути виділена як самостійний виріб з точки зору вимог до випробувань, прийому, поставки та експлуатації.

**Конструкторська документація (design documentation)** – сукупність конструкторських документів, що містять дані, необхідні в загальному випадку для розробки, виготовлення, контролю, приймання, постачання та експлуатації виробу, включаючи ремонт.

**Конструкторські документи (design documents)** – документи, які окремо або в сукупності визначають склад і будову пристрою та містять всі необхідні дані для його розробки, виготовлення, контролю, прийняття, експлуатації та ремонту.

**Контактна площадка інтегральної мікросхеми (contact pad of the integrated microcircuit)** – металізоване місце на поверхні плати або кристалу, яке слугує для приєднання виводів компонентів та інтегральних мікросхем, перемичок, а також для контролю електричних параметрів та режимів.

**Комутаційні доріжки (switching tracks)** – це вузькі смужки плівкового провідника, якими виконується міжелементний зв'язок в мікросхемі.

**Корпус інтегральної мікросхеми (package of the integrated microcircuit)** – частина конструкції інтегральної мікросхеми, необхідна для захисту мікросхеми від сторонніх впливів та для з'єднання з іншими зовнішніми електричними колами.

**Конвекція (convection)** – визначає сукупну дію явищ теплопровідності газу, акумулювання енергії у ньому та перемішування.

**Малі інтегральні схеми МІС (small integrated circuits)** – схеми 1–2-го ступеня інтеграції, що містять від декількох до сотні елементів та компонентів, до складу яких входить один або декілька видів функціональних аналогових або логічних елементів.

**Мікроблок (microblock)** – мікроелектронний виріб, який окрім мікрозбірок може містити інтегральні мікросхеми та (або) компоненти.

**Мікроелектроніка (microelectronics)** – це напрямок електроніки, що охоплює проблеми дослідження, конструювання, виготовлення та застосування електронних пристроїв з високим ступенем інтеграції.

**Мікробірка** – мікроелектронний виріб, який виконує певну функцію та виконаний з елементів, компонентів та інтегральних мікросхем (корпусних або безкорпусних) або інших електрорадіоелементів, що знаходяться в

різних поєднаннях, який проектується та виготовляється розробником конкретної радіоелектронної апаратури для покращення показників її мініатюризації.

**Надвеликі інтегральні схеми НВІС (*biggest integrated circuits*)** – схеми 5–7-го ступеня інтеграції, що являють собою завершений виріб, який може виконувати функції апаратури (наприклад ЕОМ).

**Надійність (*reliability*)** – це властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

**Напівпровідникова інтегральна мікросхема (*semiconductor integrated microcircuits*)** – мікросхема, всі елементи та міжелементні з'єднання якої виконані в об'ємі та на поверхні напівпровідника.

**Напівпровідникова пластина (*semiconductor plate*)** – заготівка з напівпровідникового матеріалу, яка використовується для виготовлення напівпровідникових інтегральних мікросхем.

**Підкладка інтегральної мікросхеми (*substrate of the integrated microcircuit*)** – заготовка, призначена для нанесення на неї елементів гібридних та плівкових інтегральних мікросхем, міжелементних та (або) міжкомпонентних з'єднань та контактних площадок.

**Плата інтегральної мікросхеми (*charge of the integrated microcircuit*)** – частина підкладки гібридної (плівкової) мікросхеми, на поверхню якої нанесені плівкові елементи мікросхеми, міжелементні та міжкомпонентні з'єднання та контактні площадки.

**Плівкова інтегральна мікросхема (*film integrated microcircuits*)** – мікросхема, всі елементи та міжелементні з'єднання якої виконані у вигляді плівок.

**Плівкова котушка індуктивності (*film-inductance*)** – котушка індуктивності, виконана за плівковою технологією.

**Середні інтегральні схеми СІС (*middle integrated circuits*)** – схеми 2–3-го ступеня інтеграції, що містять від декілька десятків до 1000 елементів та компонентів, до складу яких входить один або декілька функціональних вузлів електронних пристроїв.

**Серія інтегральних мікросхем (*series of the integrated microcircuits*)** – сукупність мікросхем, які можуть виконувати різні функції, мають єдине конструктивно-технологічне виконання і призначені для спільного використання.

**Ступінь інтеграції мікросхем (integration degree of microcircuits)** – показник складності мікросхеми, який характеризується кількістю елементів та компонентів, що входять до її складу.

**Теплове випромінювання (heat radiation)** – передача енергії за допомогою електромагнітного випромінювання

**Теплопровідність (conduction)** – передача тепла шляхом безпосереднього контакту між молекулами без значного їх переміщення.

**Технічне завдання (statement of work)** – вихідний документ для розробки виробу та технічної документації на нього, що встановлює основне призначення і показники якості виробу, техніко-економічні та спеціальні вимоги, що висувуються до розроблюваного виробу, обсяг, стадії розробки та склад конструкторської документації.

**Товстоплівкова мікросхема (thick-film microcircuit)** – мікросхема з товщиною плівок 10 – 70 мкм, елементи якої виготовляються методами трафаретного друку (сіткографії).

**Тонкоплівкова мікросхема (thin-film microcircuit)** – мікросхема з товщиною плівок до 1 мкм, елементи якої виготовляються переважно методами вакуумного розпилення та осадження.

**Тонкоплівковий конденсатор (thin-film capacitor)** – конденсатор, виготовлений з допомогою тонкоплівкової технології.

**Тонкоплівковий резистор (thin-film resistor)** – резистор, що конструктивно складається з резистивної плівки, яка має задану конфігурацію контактних площадок.

**Топологічне креслення мікросхеми (topological drawing of the microcircuit)** – це конструкторський документ, що встановлює оптимальне розміщення елементів та компонентів мікросхеми на підкладці, який забезпечує виготовлення мікросхеми із заданими технічними та електричними параметрами.

**Цифрові мікросхеми (digital microcircuits)** – інтегральні мікросхеми, які призначені для перетворення та обробки сигналів, що змінюються за законом дискретних функцій.

**Щільність пакування інтегральної мікросхеми (density of the packing of the integrated microcircuit)** – відношення кількості елементів та компонентів інтегральної мікросхем до її об'єму (об'єм виводів не враховується).

Додаток А

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет  
Інститут радіотехніки, зв'язку та приладобудування  
Факультет медико-біологічного та електронного приладобудування  
Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ПКТА  
д.т.н., проф. М. А. Філінюк  
" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ СХЕМИ ГЕНЕРАТОРА  
СИГНАЛІВ ЗАДАНОЇ ЧАСТОТИ

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
до курсового проекту з дисципліни "Технічна електроніка"  
за напрямом підготовки 6.050903 — Телекомунікації  
08–40.ТЕ.312.00.000 ТЗ

Керівник курсового проекту  
к.т.н., доц. Петров П. П.  
*(прізвище та ініціали)*

\_\_\_\_\_  
*(підпис)*  
" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

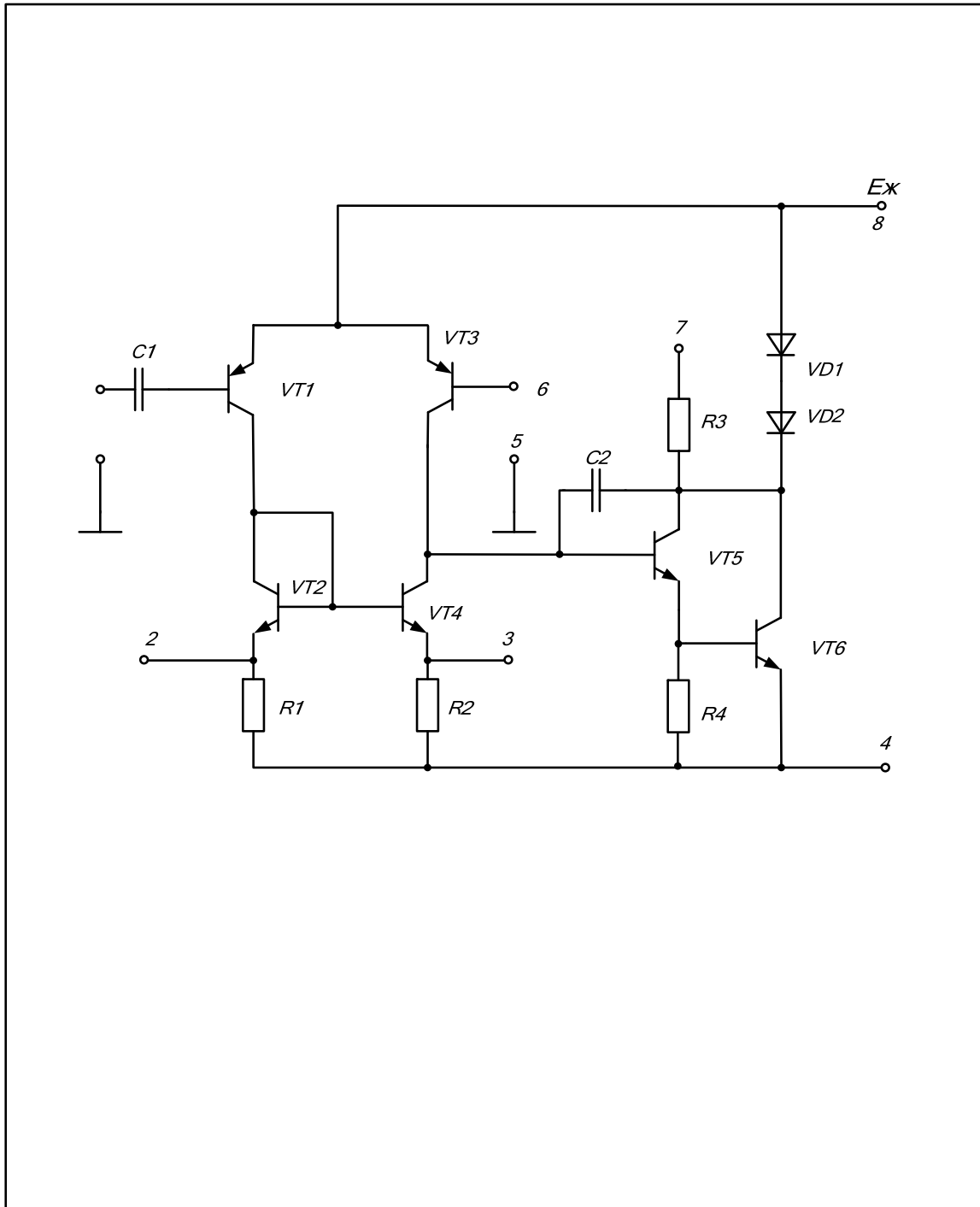
Розробив студент гр. ТКп-09  
Іванов І. І.  
*(підпис, прізвище та ініціали)*

" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Вінниця ВНТУ 20\_\_



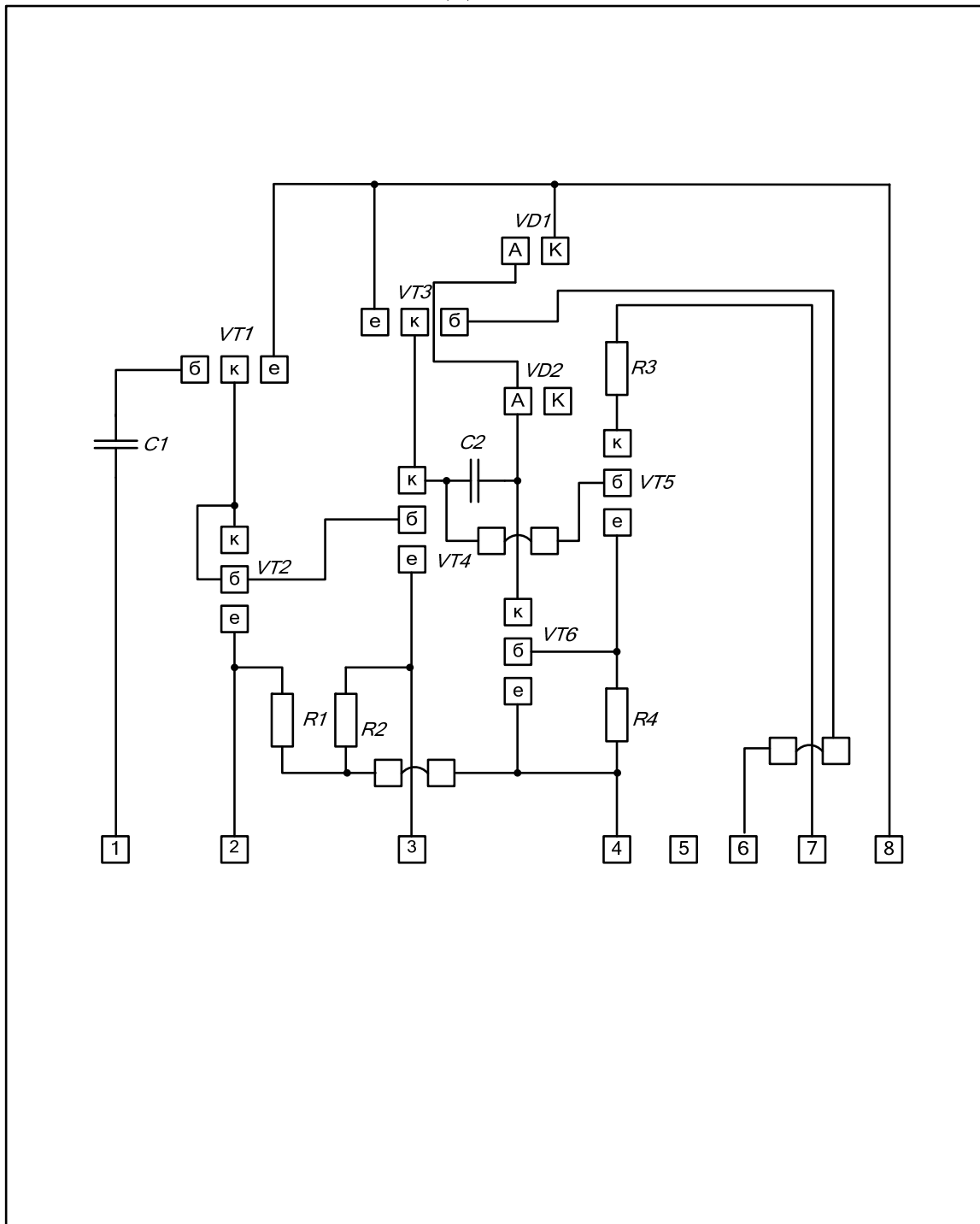
Додаток Б



|                  |             |                     |               |             |  |                |                  |               |
|------------------|-------------|---------------------|---------------|-------------|--|----------------|------------------|---------------|
|                  |             |                     |               |             | <b>08-40.ТЕ.312.00.000 ЕЗ</b>  |                |                  |               |
|                  |             |                     |               |             | <b>Інтегральний операційний<br/>підсилювач<br/>Схема електрична<br/>принципова</b> | <i>Літер.</i>  | <i>Маса</i>      | <i>Масшт.</i> |
| <i>Зм</i>        | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>     | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |  |                |                  |               |
| <i>Розробив</i>  |             | <i>Іванов І. І.</i> |               |             |  |                |                  |               |
| <i>Перевірив</i> |             | <i>Петров П. П.</i> |               |             |  |                |                  |               |
| <i>Т. контр</i>  |             | <i>Петров П. П.</i> |               |             |  | <i>Аркуш 1</i> | <i>Аркушів 1</i> |               |
| <i>Н. контр</i>  |             | <i>Петров П. П.</i> |               |             | <b>ВНТУ, гр. ТКп-09</b>  |                |                  |               |
| <i>Затвердив</i> |             |                     |               |             |  |                |                  |               |



Додаток Г



|                  |                     |                 |               |             |  |                  |                |
|------------------|---------------------|-----------------|---------------|-------------|--|------------------|----------------|
|                  |                     |                 |               |             | <b>08-40.ТЕ.312.00.000 Е4</b>              |                  |                |
|                  |                     |                 |               |             | <i>Інтегральний операційний підсилювач</i> |                  |                |
|                  |                     |                 |               |             | <i>Схема комутаційних з'єднань</i>         |                  |                |
| <i>Зм</i>        | <i>Лист</i>         | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | <i>Літера</i>                              | <i>Маса</i>      | <i>Масштаб</i> |
| <i>Розробив</i>  | <i>Іванов І. І.</i> |                 |               |             |  |                  |                |
| <i>Перевірів</i> | <i>Петров П. П.</i> |                 |               |             |  |                  |                |
| <i>Т. контр</i>  | <i>Петров П. П.</i> |                 |               |             | <i>Аркуш 1</i>                             | <i>Аркушів 1</i> |                |
| <i>Н. контр</i>  | <i>Петров П. П.</i> |                 |               |             | <b>ВНТУ, гр. ТКп-09</b>                    |                  |                |
| <i>Затвердив</i> |                     |                 |               |             |  |                  |                |





Додаток Ж

| 08-40.ТЕ.312.00.000 |                |      |                  |                |       |                  |                |      |                  |                |       |
|---------------------|----------------|------|------------------|----------------|-------|------------------|----------------|------|------------------|----------------|-------|
| Номер<br>вершини    | Координати, мм |      | Номер<br>вершини | Координати, мм |       | Номер<br>вершини | Координати, мм |      | Номер<br>вершини | Координати, мм |       |
|                     | X              | Y    |                  | X              | Y     |                  | X              | Y    |                  | X              | Y     |
| 1                   | 0              | 0    | 41               | 44,5           | 117   | 81               | 105,5          | 94   | 121              | 152            | 93,5  |
| 2                   | 0              | 160  | 42               | 44,5           | 123,5 | 82               | 105,5          | 110  | 122              | 152            | 104,5 |
| 3                   | 200            | 160  | 43               | 60,5           | 123,5 | 83               | 116,5          | 1101 | 123              | 168            | 104,5 |
| 4                   | 200            | 0    | 44               | 60,5           | 124,5 | 84               | 116,5          | 94   | 124              | 168            | 105,5 |
| 5                   | 3              | 115  | 45               | 44,5           | 124,5 | 85               | 118            | 94   | 125              | 152            | 105,5 |
| 6                   | 3              | 22,5 | 46               | 44,5           | 135,5 | 86               | 118            | 89   | 126              | 152            | 116,5 |
| 7                   | 19             | 22,5 | 47               | 60,5           | 135,5 | 87               | 111,5          | 89   | 127              | 168            | 116,5 |
| 8                   | 19             | 23,5 | 48               | 60,5           | 136,5 | 88               | 111,5          | 105  | 128              | 168            | 117,5 |
| 9                   | 3              | 23,5 | 49               | 44,5           | 136,5 | 89               | 110,5          | 105  | 129              | 152            | 117,5 |
| 10                  | 3              | 34,5 | 50               | 44,5           | 147,5 | 90               | 110,5          | 89   | 130              | 152            | 124   |
| 11                  | 19             | 34,5 | 51               | 60,5           | 147,5 | 91               | 99,5           | 89   | 131              | 157            | 124   |
| 12                  | 19             | 35,5 | 52               | 60,5           | 149   | 92               | 99,5           | 105  | 132              | 157            | 122,5 |
| 13                  | 3              | 35,5 | 53               | 65,5           | 149   | 93               | 98,5           | 105  | 133              | 173            | 122,5 |
| 14                  | 3              | 42   | 54               | 65,5           | 142,5 | 94               | 98,5           | 89   | 134              | 173            | 111,5 |
| 15                  | 8              | 42   | 55               | 49,5           | 142,5 | 95               | 87,5           | 89   | 135              | 157            | 111,5 |
| 16                  | 8              | 40,5 | 56               | 49,5           | 141,5 | 96               | 87,5           | 105  | 136              | 157            | 110,5 |
| 17                  | 24             | 40,5 | 57               | 65,5           | 141,5 | 97               | 86             | 114  | 137              | 173            | 110,5 |
| 18                  | 24             | 49,5 | 58               | 65,5           | 130,5 | 98               | 86             | 124  | 138              | 171            | 99,5  |
| 19                  | 8              | 29,5 | 59               | 49,5           | 130,5 | 99               | 121            | 124  | 139              | 157            | 99,5  |
| 20                  | 8              | 28,5 | 60               | 49,5           | 129,5 | 100              | 121            | 114  | 140              | 157            | 98,5  |
| 21                  | 24             | 28,5 | 61               | 65,5           | 129,5 | 101              | 95             | 215  | 141              | 173            | 98,5  |
| 22                  | 24             | 17,5 | 62               | 65,5           | 118,5 | 102              | 95             | 56,5 | 142              | 173            | 92    |
| 23                  | 8              | 17,5 | 63               | 49,5           | 118,5 | 103              | 105            | 56,5 | 143              | 168            | 9     |
| 24                  | 8              | 16,5 | 64               | 49,5           | 117   | 104              | 105            | 215  | 144              | 168            | 93,5  |
| 25                  | 24             | 16,5 | 65               | 84             | 21    | 105              | 111            | 3    | 145              | 155            | 18    |
| 26                  | 24             | 10   | 66               | 84             | 51    | 106              | 111            | 28   | 146              | 155            | 48    |
| 27                  | 19             | 10   | 67               | 89             | 51    | 107              | 121            | 28   | 147              | 160            | 48    |
| 28                  | 19             | 11,5 | 68               | 89             | 21    | 108              | 121            | 3    | 148              | 160            | 18    |
| 29                  | 7              | 96   | 69               | 86             | 75    | 109              | 111            | 132  | 149              | 168            | 18    |
| 30                  | 7              | 101  | 70               | 86             | 85    | 110              | 111            | 157  | 150              | 168            | 48    |
| 31                  | 37             | 101  | 71               | 121            | 85    | 111              | 121            | 157  | 151              | 173            | 48    |
| 32                  | 37             | 96   | 72               | 121            | 75    | 112              | 121            | 132  | 152              | 173            | 18    |
| 33                  | 9,5            | 54   | 73               | 86             | 105   | 113              | 142            | 18   | 153              | 177            | 92    |
| 34                  | 9,5            | 64   | 74               | 86             | 110   | 114              | 142            | 48   | 154              | 177            | 127   |
| 35                  | 34,5           | 64   | 75               | 92,5           | 110   | 115              | 147            | 48   | 155              | 187            | 127   |
| 36                  | 34,5           | 54   | 76               | 92,5           | 94    | 116              | 147            | 18   | 156              | 187            | 92    |
| 37                  | 43             | 70   | 77               | 93,5           | 94    | 117              | 151            | 66   | 157              | 187            | 11    |
| 38                  | 43             | 100  | 78               | 93,5           | 110   | 118              | 151            | 76   | 158              | 187            | 46    |
| 39                  | 48             | 100  | 79               | 104,5          | 110   | 119              | 176            | 76   | 159              | 197            | 46    |
| 40                  | 48             | 70   | 80               | 104,5          | 94    | 120              | 176            | 66   | 160              | 197            | 11    |

08-40.ТЕ.312.00.000

Лист

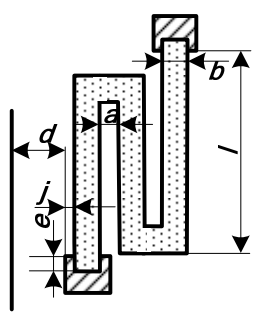
3

Изм. Лист № докум. Подп. Дата



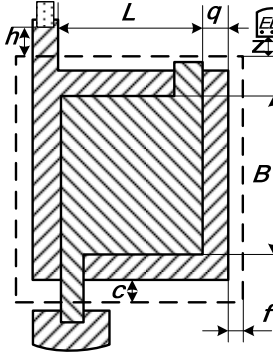
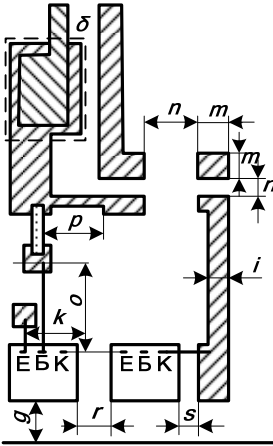
## Додаток К

Таблиця К.1 – Конструктивні та технологічні обмеження при проектуванні тонкоплівкових гібридних мікросхем

| Елемент топології   | Зміст обмеження  | Розмір обмеження, мм |            |            |             |             |
|---|--|----------------------|------------|------------|-------------|-------------|
|   |  | М                    | Ф          | МФ         | ЕІ          | ТА          |
| 1   | 2  | 3                    | 4          | 5          | 6           | 7           |
|  | Точність виготовлення лінійних розмірів плівкових елементів та розмірів між ними $\Delta l$ , $\Delta b$ , $\Delta a$ , $\Delta L$ , $\Delta B$ при розміщенні плівкових елементів в одному шарі, мм | $\pm 0,01$           | $\pm 0,01$ | $\pm 0,01$ | $\pm 0,01$  | $\pm 0,01$  |
|   | Мінімально допустимий розмір резистора, мм<br>$b$<br>$l$   | 0,1<br>0,3           | 0,1<br>0,1 | 0,1<br>0,3 | 0,15<br>0,3 | 0,05<br>0,1 |
|   | Мінімально допустимі розміри між плівковими елементами, розміщеними в одному шарі $a$ , мм   | 0,3                  | 0,1        | 0,3        | 0,1         | 0,05        |
|   | Максимально допустиме співвідношення розмірів $l/a$  | 10                   | 100        | 30         | 100         | 100         |
|   | Максимально допустимий розмір між плівковими елементами, розміщеними в різних шарах $c$ , мм   | 0,2                  | 0,1        | 0,2        | 0,1         | 0,1         |
|   | Перекриття для суміщення плівкових елементів, що розміщені в різних шарах $e$ , мм   | $\geq 0,2$           | $\geq 0,1$ | $\geq 0,2$ | $\geq 0,1$  | $\geq 0,1$  |
|   | міні відстань від плівкових елементів до краю плати $d$ , мм   | 0,5                  | 0,2        | 0,5        | 0,4         | 0,2         |
|   | міні ширина плівкових провідників $i$ , мм   | 0,1                  | 0,05       | 0,1        | 0,1         | 0,05        |
|   | міні допустима відстань між краями плівкового резистора та краєм його контактної площадки $j$ , мм   | 0,2                  | 0,1        | 0,2        | 0,1         | 0,1         |



Продовження таблиці К1

| 1   | 2   | 3           | 4   | 5   | 6   | 7 |
|---|---|-------------|-----|-----|-----|---|
|    | <p>міні допустимі відстані, мм між краями діелектрика та нижньою обкладинкою конденсатора <math>f</math></p>  | 0,1         | 0,1 | 0,1 | 0,1 | – |
|   | <p>між краями верхньої та нижньої обкладинок конденсатора <math>q</math></p>  | 0,2         |     |     |     |   |
|   | <p>між краями діелектрика та з'єднанням виводів конденсатора у місці виводу верхньої обкладинки <math>c</math></p>  | 0,3         |     |     |     |   |
|   | <p>від плівкового конденсатора до приклеюваних навісних компонентів <math>z</math></p>  | 0,5         |     |     |     |   |
|   | <p>міні площа перекриття обкладинок <math>L \times B</math>, мм<sup>2</sup></p>   | 0,5×0,5     |     |     |     |   |
|   | <p>тах відхилення ємності конденсатора від номінального значення, %</p>   | ± 12        |     |     |     |   |
|  | <p>міні відстань від дротяного провідника чи виводу до краю контактної площадки чи до краю плівкового провідника, незахищеного ізоляцією <math>k</math>, мм</p>   | 0,2         |     |     |     |   |
|   | <p>міні розміри контактних площадок для монтажу навісних компонентів з кульковими виводами <math>m</math>, мм<br/><math>n</math>, мм</p>  | 0,2<br>0,1  |     |     |     |   |
|   | <p>міні відстань між контактними площадками для монтажу навісних компонентів з кульковими чи стовпчиковими виводами, плівковим резистором <math>p</math>, діелектриком конденсатора <math>\delta</math>, мм</p> | 0,6<br>0,35 |     |     |     |   |

Продовження таблиці К1

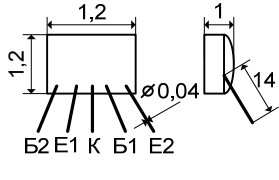
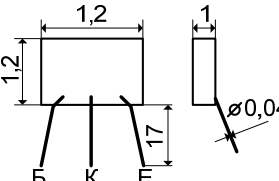
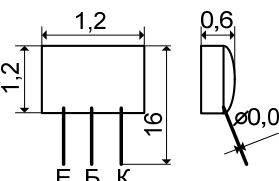
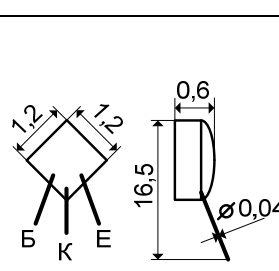
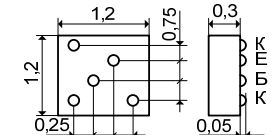
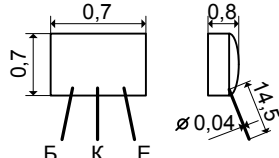
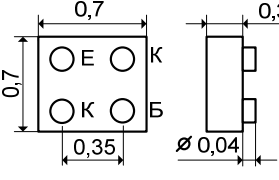
| 1 | 2  | 3 | 4 | 5         | 6 | 7 |
|---|--|---|---|-----------|---|---|
|   | <p>мін відстань, мм, від краю навісного компонента до:</p> <p>краю плати <i>g</i>,</p> <p>краю іншого компонента <i>r</i>,</p> <p>краю навісного пасивного компонента,</p> <p>краю контактної площадки, що використовується для приварки дротяних виводів <i>s</i>,</p> <p>дротяного провідника, лудженого плівкового елемента</p> |   |   | 0,4       |   |   |
|   |  |   |   | 0,4       |   |   |
|   |  |   |   | 0,6       |   |   |
|   |  |   |   | 0,4       |   |   |
|   |  |   |   | 0,3       |   |   |
|   |  |   |   | 0,2       |   |   |
|   | мін розміри контактних площадок для контролю електричних параметрів, мм  |   |   | 0,2×0,2   |   |   |
|   | мін відстань між контактними площадками для приварки та припаювання дротяних провідників, мм   |   |   | 0,2       |   |   |
|   | тах довжина гнучкого виводу без додаткового кріплення <i>o</i> , мм  |   |   | 3,0       |   |   |
|   | <p>мін розміри контактних площадок для приварки дротяних виводів навісних компонентів при діаметрі дроту, мм:</p> <p>∅ 0,03</p> <p>для одного провідника</p> <p>для двох провідників</p> <p>для трьох провідників</p> <p>∅ 0,04</p> <p>Те ж</p> <p>∅ 0,05</p> <p>Те ж</p>  |   |   | 0,15×0,1  |   |   |
|   |  |   |   | 0,2×0,2   |   |   |
|   |  |   |   | 0,2×0,3   |   |   |
|   |  |   |   | 0,2×0,15  |   |   |
|   |  |   |   | 0,25×0,25 |   |   |
|   |  |   |   | 0,25×0,40 |   |   |
|   |  |   |   | 0,25×0,2  |   |   |
|   |  |   |   | 0,3×0,3   |   |   |
|   |  |   |   | 0,3×0,5   |   |   |

Додаток Л

Таблиця Л.1 – Електричні і конструктивні параметри мініатюрних діодів

| Тип діода          | Пряма напруга, В при I <sub>пр</sub> , мА |                 | Зворотний струм, мкА | Максимальна зворотна напруга, В | Максимальний прямий струм | Максимальна температура, °С | Рисунок |
|--------------------|---|-----------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------|
|                    | U <sub>пр</sub>                           | I <sub>пр</sub> |                      |                                 |                           |                             |         |
| 2Д 101             | 1   | 100             | 5                    | 30                              | 20                        | 85                          |         |
| 2Д 102 А           | 1   | 50              | 0,1                  | 250                             | 100                       | 125                         |         |
| 2Д 102 Б           | 1   | 50              | 1                    | 300                             | 100                       | 125                         |         |
| КД 102 А           | 1   | 50              | 0,1                  | 250                             | 100                       | 100                         |         |
| КД 102 Б           | 1   | 50              | 1                    | 300                             | 100                       | 100                         |         |
| КД 103 А           | 1   | 50              | 0,4                  | 50                              | 100                       | 100                         |         |
| 2Д 103 А           | 1   | 50              | 1                    | 75                              | 100                       | 125                         |         |
| КД 103 Б           | 1   | 10              | 3                    | 300                             | 10                        | 70                          |         |
| 2Д 104 А           | 1   | 10              | 3                    | 300                             | 10                        | 70                          |         |
| КД 104 А           | 1   | 10              | 3                    | 300                             | 10                        | 70                          |         |
| 3Д 110А            | 1,45                                      | 10              | 0,001                | 50                              | 10                        | 85                          |         |
| АД 110А            | 1,5                                       | 10              | 0,005                | 50                              | 10                        | 85                          |         |
| 2Д 115А-1          | 1   | 50              | 1                    | 100                             | 30                        | 125                         |         |
| 2Д1 18А-1          | 1   | 300             | 50                   | 200                             | 300                       | 100                         |         |
| Д 202              | 1   | 400             | 500                  | 100                             | 400                       | 125                         |         |
| Д 203              | 1   | 400             | 500                  | 200                             | 400                       | 125                         |         |
| Д 204              | 1   | 400             | 500                  | 300                             | 400                       | 85                          |         |
| Д 205              | 1   | 400             | 500                  | 400                             | 400                       | 85                          |         |
| МДЗ                | 1   | 5               | 100                  | 15                              | 12                        | 70                          |         |
| 2Д 413 А,Б         | 1   | 20              | -                    | 24                              | 20                        | 125                         |         |
| КД 413 А,Б         | 1   | 20              | -                    | 24                              | 20                        | 85                          |         |
| КД 417 А           | 0,45                                      | 1               | 5                    | 24                              | 20                        | 100                         |         |
| 2Д419Б, КД419Б     | 0,4                                       | 1               | -                    | 30                              | 10                        | 125                         |         |
| 2Д419В, КД419В     | 0,4                                       | 1               | -                    | 50                              | 10                        | 125                         |         |
| 2Д 922 А, КД 922 А | 1   | 50              | 0,5                  | 18                              | 50                        | 100                         |         |
| 2Д 922 Б, КД 922 Б | 1   | 35              | 0,5                  | 21                              | 35                        | 100                         |         |
| 2Д 922 В, КД 922 В | 0,55                                      | 10              | 0,5                  | 10                              | 10                        | 100                         |         |

Таблиця Л.2 – Електричні та геометричні параметри транзисторів

| Тип транзистора           | Структура | $U_{к-б},$<br>В | $I_{кmax},$<br>мА | $h_{21e}$ | $P_{к max},$<br>мВт | Інтервал<br>робочих<br>температур,<br>$^{\circ}C$ | Маса,<br>г  | Рисунок   |
|---------------------------|-----------|-----------------|-------------------|-----------|---------------------|---|---|---|
| 1                         | 2         | 3               | 4                 | 5         | 6                   | 7   | 8   | 9   |
| 2Т 118 А-1<br>2Т 118 Б-1  | p-n-p     | 15              | 50                | -         | 30                  | -60...+85   | 0,003   |    |
| КТ 120 А-1                | p-n-p     | 60              | 10                | 20-200    | 15                  | -10...+65   | 0,06  |    |
| КТ 120 Б-1                |           | 30              |                   |           |                     |   |   |   |
| КТ 120 В-1                |           | 60              |                   |           |                     |   |   |   |
| 2Т 126 А-1,Б-1            |           | 25              | 50                | 15-60     | 15                  | -60...+85   |   |   |
| 2Т 126 В-1,Г-1            |           | 45              |                   | 40-200    |                     |   |   |   |
| 2Т 127 А1                 | n-p- n    | 25              | 50                | 15-60     | 15                  | -60...+85   | 0,006   |   |
| 2Т 127 Б1                 |           |                 |                   | 40-200    |                     |   |   |   |
| 2Т 127 В1                 |           | 45              |                   | 15-60     |                     |   |   |   |
| 2Т 127 Г1                 |           |                 |                   | 40-200    |                     |   |   |   |
| 2Т 202 А-1,<br>КТ 202 А-1 | p-n-p     | 15              | 20                | 15-70     | -60...+85           | 0,002   |  |   |
| 2Т 202 Б-1,<br>КТ 202 Б-1 |           |                 |                   | 40-160    |                     |   |   |   |
| 2Т 202 В-1,<br>КТ 202 В-1 |           | 30              |                   | 15-70     |                     |   |   |   |
| 2Т 202 Г-1,<br>КТ 202 Г-1 |           |                 |                   | 40-160    |                     |   |   |   |
| 2Т 202 Д-1,<br>КТ 202 Д-1 |           | 15              |                   | 100-300   |                     |   |   |   |
| 2Т 205 А-3,<br>КТ 205 Б-3 | n-p- n    | 250             | 20                | 10-40     | 40                  | -60...+125  | 0,003   |  |
| КТ 206 А<br>КТ 206 Б      | n-p- n    | 20              | 20                | 30-90     | 15                  | -60...+85   | 0,002   |  |
|                           |           | 12              |                   | 70-210    |                     |   |   |   |
| КТ 207 А                  | p-n-p     | 60              | 10                | 9         | 15                  | -45...+85   | 0,01  |  |
| КТ 207 Б                  |           | 30              |                   | 30-150    |                     |   |   |   |
| КТ 207 В                  |           | 15              |                   | 30-200    |                     |   |   |   |

Продовження таблиці Л.2

| 1                           | 2     | 3     | 4      | 5         | 6                | 7          | 8          | 9     |  |        |
|-----------------------------|-------|-------|--------|-----------|------------------|------------|------------|-------|--|--------|
| 2 Т 211 А-1                 | p-n-p | 15    | 20     | 40-120    | 25               | -60...+125 | 0,002      |       |  |        |
| 2 Т 211 Б-1                 |       |       |        | 80-240    |                  |            |            |       |  |        |
| 2 Т 211 В-1                 |       |       |        | 160-480   |                  |            |            |       |  |        |
| 2 Т 214 А-1                 |       | (30)  | 50     | 50        | 20               | -60...+100 |            |       |  |        |
| 2 Т 214 Б-1                 |       | (7)   |        |           | 30-90            |            |            |       |  |        |
| 2 Т 214 В-1,<br>2 Т 214 Г-1 |       |       |        |           | 40-120           |            |            |       |  |        |
| 2 Т 214 Д-1                 |       |       |        |           | 80               |            |            |       |  |        |
| 2 Т 214 Е-1                 |       | (20)  |        |           | 40               | -45...+85  |            |       |  |        |
| КТ 214 А-1                  |       | (30)  |        |           | 20               |            |            |       |  |        |
| КТ 214 Б-1                  |       | (7)   |        |           | 30-90            |            |            |       |  |        |
| КТ 214 В-1,<br>КТ 214 Г-1   |       |       |        |           | 40-120           |            |            |       |  |        |
| КТ 214 Д-1                  |       |       |        |           | 80               |            |            |       |  |        |
| КТ 214 Е-1                  |       | (20)  |        |           | 40               | -60...+100 |            |       |  |        |
| 2 Т 215 А-1                 |       | (100) |        |           | 20               |            |            |       |  |        |
| 2 Т 215 Б-1                 |       | (90)  |        |           | 30-90            |            |            |       |  |        |
| 2Т 215 В-1                  | n-p-n | (80)  |        |           | 50               | 50         | -60...+100 | 0,002 |  |        |
| 2 Т 215 Г-1                 |       | (60)  |        |           |                  |            |            |       |  | 40-120 |
| 2 Т 215 Д-1                 |       | (30)  |        |           |                  |            |            |       |  | 80     |
| 2 Т 215 Е-1                 |       | (100) | 40     | -45...+85 |                  |            |            |       |  |        |
| КТ 215 А-1                  |       | (90)  | 20     |           |                  |            |            |       |  |        |
| КТ 215 Б-1                  |       | (80)  | 30-90  |           |                  |            |            |       |  |        |
| КТ 215 В-1                  |       |       | 40-120 |           |                  |            |            |       |  |        |
| КТ 215 Г-1                  |       |       | (60)   | 40-120    |                  |            |            |       |  |        |
| КТ 215 Д-1                  |       | (30)  | 80     | 80        |                  |            |            |       |  |        |
| КТ 215 Е-1                  |       |       | 40     |           |                  |            |            |       |  |        |
| 2Т 307 А-1,<br>КТ 307 А-1   | n-p-n | 10    | 20     | 20        | 15               | -60...+85  | 0,002      |       |  |        |
| 2Т 307 Б-1,<br>КТ 307 Б-1   |       |       |        | 40        |                  |            |            |       |  |        |
| 2Т 307 В-1,<br>КТ 307 В-1   |       |       |        | 40        |                  |            |            |       |  |        |
| 2Т 307 Г-1,<br>КТ 307 Г-1   |       |       |        | 80        |                  |            |            |       |  |        |
| 2Т 314 А-2<br>КТ 314 А-2    | n-p-n | 65    | 60     | 30-120    | $0,5 \cdot 10^3$ | -60...+125 | 0,1        |       |  |        |

## Додаток М ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ ПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 1 Розрахунок плівкових резисторів

Дано, що резистори мають такі параметри:  $R5 = R9 = R10 = R11 = R12 = 3,7 \text{ кОм}$ ;  $R1 = R3 = R8 = 27 \text{ кОм}$ ;  $R4 = R6 = R13 = 57 \text{ кОм}$ ;  $R2 = R7 = 270 \text{ кОм}$ .

Визначимо оптимальний опір квадрата резистивної плівки:

$$\rho_{\text{Sonm}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}}, \quad (\text{M.1})$$

де  $R_i$  - номінал  $i$ -того резистора;  $n$  - кількість резисторів.

$$\rho_{\text{Sonm}} = \sqrt{\frac{3,7 \cdot 5 + 27 \cdot 3 + 57 \cdot 3 + 270 \cdot 2}{\frac{5}{3,7} + \frac{3}{27} + \frac{3}{57} + \frac{2}{270}}} = 23,08 \text{ (кОм/}\square\text{)}.$$

Для виготовлення резисторів будемо використовувати матеріал кермет К-50С ЕТО.021.013ТУ, оскільки його  $\rho_s = 10000 \text{ Ом/}\square$  найближчий до  $\rho_{\text{Sonm}}$ .

Дані для розрахунку:

- загальна похибка опорів –  $\gamma_R = \pm 10\%$ ;
- максимальна робоча температура –  $T_{\text{max}} = 120^\circ\text{C}$ ;
- потужність розсіювання –  $P = 30 \text{ мВт}$ ;
- похибка перехідних опорів контактів –  $\gamma_{Rk} = 2\%$ ;
- похибка відтворення величини резистивної плівки –  $\gamma_{\rho_s} \leq 4\%$ ;
- мінімальні довжина і ширина, які можуть бути зроблені за допомогою цього методу –  $\Delta l = \Delta b = 0,01 \text{ мм}$ .

Параметри резистивного матеріалу:

- питома потужність розсіювання –  $P_0 = 20 \text{ мВт/мм}^2$ ;
- температурний коефіцієнт опору –  $\alpha_R = -5 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ;
- зміна величини опору при старінні –  $\lambda_{Rcm} = \pm 0,3\%$ .

Крок координатної сітки –  $h = 1 \text{ мм}$ ;

Метод виготовлення резисторів – фотолітографія.

Відносна зміна опорів при максимальній робочій температурі:

$$\lambda_{Rt} = \alpha_R \cdot (T_{\text{max}} - 20^\circ) \cdot 100\% = -5 \cdot 10^{-4} \cdot (120 - 20) \cdot 100\% = -5\%.$$

Максимально допустима похибка коефіцієнта:

$$\gamma_{\text{Кфдоп}} = \gamma_R - \gamma_{\rho_s} - \gamma_{Rt} - \gamma_{Rcm} - \gamma_{Rk} = 10 - 4 + 5 - 0,3 - 2 = 8,7\%.$$

а) розрахунок резисторів  $R5 = R9 = R10 = R11 = R12 = 3,7 \text{ кОм} \pm 10\%$ .

Визначимо конструкцію резисторів за значенням коефіцієнта форми:

$$K_\phi = \frac{R}{\rho_s} = \frac{3,7}{10} = 0,37 - \text{отже, резистори прямокутної форми з довжиною, меншою}$$

за ширину ( $l < b$ ).

Для таких резисторів спочатку визначається довжина, а потім ширина:

$$l_{розр} \geq \max \{l_{техн}; l_{точн}; l_p\}, \quad (M.2)$$

де  $l_{техн}$  – мінімальна довжина резистора, обумовлена технологічними обмеженнями,  $l_{техн} = 0,1$  (мм).

$$l_{точн} \geq \frac{\Delta l + \Delta b \cdot K_\phi}{\gamma_{Кфдон}}, \quad (M.3)$$

де  $l_{точн}$  – довжина резистора, що визначається точністю виготовлення.

$$l_p = \sqrt{\frac{P \cdot K_\phi}{P_0}}, \quad (M.4)$$

де  $l_p$  – мінімальна довжина резистора, при якій забезпечується задана потужність.

$$l_{точн} \geq \frac{0,01 + 0,01 \cdot 0,37}{0,087} = 0,157 \text{ (мм)}.$$

$$l_p = \sqrt{\frac{30 \cdot 0,37}{20}} = 0,75 \text{ (мм)}.$$

Згідно з формулою (M.2) приймаємо найбільше із врахованих значень -  $l_{розр} = l_p = 0,75$  мм. Заокруглюємо до значення, кратного кроку координатної сітки у більшу сторону, щоб був запас із розсіювання потужності, -  $l = l_{розр} = 1$  мм.

Тепер, знаючи значення довжини резистора, визначаємо ширину резистора, за допомогою коефіцієнта форми

$$b = \frac{l}{K_\phi}, \quad (M.5)$$

$$b = \frac{1}{0,37} = 2,7 \text{ (мм)}.$$

Заокруглюємо до значення, кратного кроку координатної сітки  $b = 3$  мм.

Визначаємо повну довжину резистора з врахуванням перекриття контактних площадок

$$l_{нов} = l + 2 \cdot e, \quad (M.6)$$

де  $e$  – розмір перекриття резистора і контактних площадок. При використанні даного методу  $e = 0,1$  мм.

$$l_{нов} = 1 + 2 \cdot 0,1 = 1,2 \text{ (мм)}.$$

Загальна площа резистора на схемі становить

$$S = l_{нов} \cdot b, \quad (M.7)$$

$$S = 1,2 \cdot 3 = 3,6 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Всі розрахунки зроблено, виконаємо перевірку:

– потужності

$$P_0' = \frac{P}{S} \leq P_0, \quad (M.8)$$

$$P_0' = \frac{30}{3,6} = 8,33 < 20 \text{ (мВт/мм}^2\text{)}, \text{ отже, виготовлений резистор не буде виділяти}$$

більшу потужність, ніж задана в умові;

– похибки коефіцієнта форми

$$\gamma_{K\phi}' = \frac{\Delta l}{l_{нов}} + \frac{\Delta b}{b} \leq \gamma_{K\phi доп}, \quad (M.9)$$

$$\gamma_{K\phi}' = \frac{0,01}{1,2} + \frac{0,01}{3} = 0,012 < 0,087;$$

– перевірка сумарної похибки

$$\gamma_R' = \gamma_{\rho_s} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{cm}} + \gamma_{R_k} + \gamma_{K\phi} \leq \gamma_R, \quad (M.10)$$

$$\gamma_R' = 4 - 5 + 0,3 + 2 + 1,2 = 2,5 < 10 \text{ (\%)}.$$

Виконавши перевірку видно, що параметри резисторів R5, R9, R10, R11, R12 розраховано правильно.

б) розрахунок резисторів  $R1 = R3 = R8 = 27 \text{ кОм} \pm 10\%$ .

Визначимо конструкцію резисторів за значенням коефіцієнта форми:

$$K_\phi = \frac{R}{\rho_s} = \frac{27}{10} = 2,7 \text{ – отже, резистори прямокутної форми з довжиною, більшою}$$

за ширину ( $l > b$ ).

Для таких резисторів спочатку визначається ширина, а потім довжина:

$$b_{розр} \geq \max\{b_{техн}; b_{точн}; b_p\}, \quad (M.11)$$

де  $b_{техн}$  – мінімальна ширина резистора, обумовлена технологічними обмеженнями,  $b_{техн} = 0,1$  (мм).

$$b_{точн} \geq \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K_\phi}}{\gamma_{K\phi доп}}, \quad (M.12)$$

де  $b_{точн}$  – ширина резистора, що визначається точністю виготовлення.

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 \cdot K_\phi}}, \quad (M.13)$$

де  $b_p$  – мінімальна ширина резистора, при якій забезпечується задана потужність.

$$b_{точн} \geq \frac{0,01 + \frac{0,01}{2,7}}{0,087} = 0,157 \text{ (мм)},$$

$$b_p = \sqrt{\frac{30}{20 \cdot 2,7}} = 0,75 \text{ (мм)}.$$

Згідно з формулою M.11 приймаємо найбільше із вирахованих значень –  $b_{розр} = b_p = 0,75$  мм. Закруглюємо до значення, кратного кроку координатної сітки у більшу сторону, щоб був запас із розсіювання потужності, –  $b = b_{розр} = 1$  мм.

Тепер, знаючи значення ширина резистора, визначаємо його довжину, за допомогою коефіцієнта форми

$$l = b \cdot K_\phi, \quad (M.14)$$

$$l = 1 \cdot 2,7 = 2,7 \text{ (мм)}.$$

Закруглюємо до значення, кратного кроку координатної сітки  $l = 3$  мм.



Визначаємо повну довжину резистора з врахуванням перекриття контактних площадок (за формулою (4.13):

$$l_{нов} = 3 + 2 \cdot 0,1 = 3,2 \text{ (мм)}.$$

Загальна площа резистора на схемі становить (за формулою 4.14)

$$S = 3,2 \cdot 1 = 3,2 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Всі розрахунки зроблені, виконаємо перевірку:

– потужності (за формулою М.8)

$$P_0' = \frac{30}{3,2} = 9,375 < 20 \text{ (мВт/мм}^2\text{)}, \text{ отже, виготовлений резистор не буде виділяти}$$

більшу потужність, ніж задана в умові;

– похибки коефіцієнта форми (за формулою М.9)

$$\gamma_{K\phi}' = \frac{0,01}{1} + \frac{0,01}{3,2} = 0,013 < 0,087;$$

– перевірка сумарної похибки (за формулою М.10)

$$\gamma_R' = 4 - 5 + 0,3 + 2 + 1,3 = 2,6 < 10 \text{ (\%)}. \text{}$$

Виконавши перевірку видно, що параметри резисторів R1, R3, R8 розраховано правильно.

в) розрахунок резисторів  $R2 = R7 = 270 \text{ кОм} \pm 10\%$ .

Визначимо конструкцію резисторів за значенням коефіцієнта форми

$$K_\phi = \frac{R}{\rho_s} = \frac{270}{10} = 27 - \text{отже, це будуть резистори складної форми (меандр)}.$$

Для таких резисторів спочатку визначається ширина, а потім довжина:

$$b_{розр} \geq \max \{ b_{техн}; b_{точн}; b_p \},$$

$$b_{точн} \geq \frac{0,01 + \frac{0,01}{27}}{0,087} = 0,119 \text{ (мм)},$$

$$b_p = \sqrt{\frac{30}{20 \cdot 27}} = 0,235 \text{ (мм)}.$$

Серед наведених вище розрахунків, найбільше значення має  $b_p = 0,235 \text{ мм}$ , тому його будемо використовувати для подальших розрахунків. Тепер це значення округлюємо до кроку координатної сітки,  $b_{розр} = b_p = 0,3 \text{ мм}$ .

Визначаємо довжину середньої лінії меандра

$$l_{cp} = b \cdot K_\phi, \tag{М.15}$$

$$l_{cp} = 0,3 \cdot 27 = 8,1 \text{ (мм)}.$$

Тепер визначаємо найменшу кількість ланок у меандрі, виходячи з такої умови, що мінімальною вона буде при однакових значеннях відстані між ланками ( $a$ ) та ширини однієї ланки меандра ( $b$ ) тобто  $a = b$ , а також при однаковій загальній довжині ( $L$ ) та ширині ( $B$ ) меандра ( $L = B$ ). При використанні фотолітографічного методу  $a \geq 0,1 \text{ мм}$ , а згідно з отриманим значенням  $b_{розр} = 0,3 \text{ мм}$ , тому вибираємо  $b_{розр} = a = b = 0,3 \text{ мм}$ .

Тепер визначаємо крок однієї ланки

$$t = a + b, \tag{М.16}$$

$$t = 0,3 + 0,3 = 0,6 \text{ (мм)}.$$

Визначимо оптимальну кількість ланок меандра

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{K_{\phi}}{2}}, \quad (\text{M.17})$$

$n_{opt} = \sqrt{\frac{27}{2}} = 3,67$ , але число ланок повинно бути цілим, тому округлюємо до більшого – кількість ланок меандра  $n = 4$ .

Визначимо загальну довжину меандра

$$L = n \cdot (a + b) = n \cdot t, \quad (\text{M.18})$$

$$L = 4 \cdot 0,6 = 2,4 \text{ (мм)}.$$

Тепер загальну ширину меандра

$$B = \frac{l_{sep} - a \cdot n_{opt}}{n_{opt}}, \quad (\text{M.19})$$

$$B = \frac{8,1 - 0,3 \cdot 4}{4} = 1,73 \text{ (мм)}.$$

Загальна площа меандра становить

$$S = L \cdot B, \quad (\text{M.20})$$

$$S = 2,4 \cdot 1,73 = 4,15 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Всі розрахунки зроблені, виконаємо перевірку:

– потужності (за формулою М.8)

$P_0' = \frac{30}{4,15} = 7,23 < 20 \text{ (мВт/мм}^2\text{)}$  отже меандр має великий запас міцності за потужністю.

– похибки коефіцієнта форми (за формулою М.9)

$$\gamma_{K\phi}' = \frac{\Delta l}{L} + \frac{\Delta b}{B} \leq \gamma_{K\phi}, \quad (\text{M.21})$$

$$\gamma_{K\phi}' = \frac{0,01}{2,4} + \frac{0,01}{1,73} = 0,01 < 0,087;$$

– перевірка сумарної похибки (за формулою М.10)

$$\gamma_R' = 4 - 5 + 0,3 + 2 + 1 = 2,3 < 10 \text{ (\%)}.$$

Виконавши перевірку видно, що параметри резисторів R2, R7 розраховано правильно.

## 2 Розрахунок плівкових конденсаторів

В даній схемі конденсатори мають такі параметри:

$C1 = C2 = C7 = C8 = 470 \text{ пФ}; \quad C3 = C4 = C5 = C6 = C9 = C11 = 680 \text{ пФ}; \quad C10 = C12 = 2700 \text{ пФ}.$

Дані для розрахунку:

- робоча напруга –  $U = 15 \text{ В};$
- діапазон робочих температур –  $T_{max} = 120^\circ\text{C};$
- тангенс кута діелектричних втрат –  $\text{tg } \delta = 0,03;$
- максимальна частота –  $f = 10 \text{ кГц};$

- похибка відтворення ємності на виробництві –  $\gamma_{C_0} = 5\%$ ;
- похибка старіння матеріалу –  $\gamma_{cm} = 1\%$ ;
- крок координатної сітки –  $h = 0,5$  мм.

Діелектричний матеріал – монооксид кремнію, що має такі параметри:

- питомий поверхневий опір –  $\rho_s = 0,2$  Ом/□;
- робоча напруга –  $U_{роб} = 30$  В;
- діелектрична проникність –  $\epsilon = 5$ ;
- тангенс кута діелектричних втрат в діелектрику –  $tg\delta_{diel} = 0,02$ ;
- електрична міцність –  $E_{np} = 2 \cdot 10^6$  В/см;
- робоча частота –  $f_{роб} = 500$  кГц;
- температурний коефіцієнт ємності –  $\alpha_C = 2 \cdot 10^{-4}$  1/°С.

Визначаємо мінімальну товщину діелектрика

$$d_{\min} \geq \frac{K_3 \cdot U}{E_{np}}, \quad (M.22)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу електричної міцності, який зазвичай дорівнює  $2 \div 4$ ;

$U$  – робоча напруга схеми;

$E_{np}$  – електрична міцність матеріалу.

Товщина повинна бути в межах 0,1..1 мкм, інакше потрібно вибрати інший матеріал.

$$d_{\min} = \frac{3 \cdot 15}{2 \cdot 10^6} = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}.$$

Отже, вибраний матеріал підходить для подальших розрахунків.

а) розрахунок конденсаторів  $C1 = C2 = C7 = C8 = 470 \text{ нФ} \pm 15\%$ .

Визначаємо мінімальне значення питомої ємності конденсатора, виходячи з такої умови:

$$C_0 \leq \min\{C_{0_U}; C_{0_{точн}}; C_{\min}\}, \quad (M.23)$$

де  $C_{0_U}$  – питома ємність за електричною міцністю;

$C_{0_{точн}}$  – питома ємність за точністю виготовлення;

$C_{\min}$  – питома ємність мінімальної площі.

Визначаємо питому ємність конденсатора, виходячи з умови електричної міцності

$$C_{0_U} = \frac{0,0885 \cdot \epsilon}{d_{\min}}, \quad (M.24)$$

$$C_{0_U} = \frac{0,0885 \cdot 5}{22,5 \cdot 10^{-6}} = 197 \text{ (пФ/мм}^2\text{)}.$$

Оцінюємо відносну температурну похибку

$$\gamma_{C_T} = \alpha_C \cdot (T_{\max} - 20^\circ), \quad (M.25)$$

$$\gamma_{C_T} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot (120 - 20) = 0,02$$

Визначаємо допустиму похибку активної площі конденсатора

$$\gamma_S = \gamma_C - \gamma_{C_0} - \gamma_{C_T} - \gamma_{C_{cm}}, \quad (M.26)$$

де  $\gamma_C$  – похибка ємності;

$\gamma_{C_{cm}}$  – похибка старіння матеріалу, зазвичай  $2 \div 3\%$ .

$$\gamma_S = 15 - 5 - 2 - 2 = 6\%$$

Визначаємо питому ємність конденсатора з урахуванням точності його виготовлення

$$C_{0_{точн}} = C \cdot \left( \frac{\gamma_S}{\Delta L} \right)^2 \cdot \frac{K_\phi}{(1 + K_\phi)^2}, \quad (M.27)$$

де  $\Delta L$  – абсолютна похибка довжини верхньої обкладинки,  $\Delta L = 0,01$  мм;

$K_\phi$  – коефіцієнт форми, для ТПК прямокутної форми  $K_\phi = 1$ .

$$C_{0_{точн}} = 470 \cdot \left( \frac{0,06}{0,01} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1+1)^2} = 4230 \text{ (пФ/мм}^2\text{)}.$$

Визначаємо питому ємність для мінімальної площі

$$C_{0_{\min}} = \frac{C}{S_{\min}}, \quad (M.28)$$

де  $S_{\min} = 1 \text{ мм}^2$  – мінімальна площа.

$$C_{0_{\min}} = \frac{470}{1} = 470 \text{ (пФ/мм}^2\text{)}.$$

Отже, найменшим значенням серед визначених є  $C_{0U} = 197 \text{ пФ/мм}^2$ , тому  $C_0 = C_{0U} = 197 \text{ пФ/мм}^2$ .

Визначимо коефіцієнт, що враховує крайовий ефект в конденсаторі

$$K = \begin{cases} 1, & C / C_0 \geq 5 \text{ мм}^2 \\ 1,3 - 0,06 \cdot (C / C_0), & 1 \leq C / C_0 \leq 5 \text{ мм}^2 \end{cases}, \quad (M.29)$$

$\frac{C}{C_0} = \frac{470}{197} = 2,4 \text{ (мм}^2\text{)}$ , отже, коефіцієнт буде дорівнювати

$$K = 1,3 - 0,06 \cdot 2,4 = 1,16.$$

Визначимо площу верхньої обкладинки конденсатора

$$S_B = K \frac{C}{C_0}, \quad (M.30)$$

$$S_B = 1,16 \cdot \frac{470}{197} = 2,78 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Визначимо розміри верхньої обкладинки конденсаторів

$$L_B = B_B = \sqrt{S}, \quad (M.31)$$

$$L_B = B_B = \sqrt{2,78} = 1,67 \text{ (мм)}.$$

Заокруглимо до значення кроку координатної сітки ( $h = 0,5$  мм):

$$L_B = B_B = 2 \text{ мм}.$$

Визначимо розміри нижньої обкладинки конденсатора

$$L_H = B_H = L_B + 2 \cdot q, \quad (M.32)$$

де  $q$  – розмір перекриття верхньої та нижньої обкладинок,  $q = 0,2$  мм.

$$L_H = B_H = 2 + 2 \cdot 0,2 = 2,4 \text{ (мм)}.$$

Визначимо розмір діелектрика

$$L_D = B_D = L_H + 2 \cdot f, \quad (\text{M.33})$$

де  $f$  – розмір перекриття нижньої обкладинки і діелектрика,  $f = 0,1$  мм.

$$L_D = B_D = 2,4 + 2 \cdot 0,1 = 2,6 \text{ (мм)}.$$

Визначимо площу, яку буде займати конденсатор

$$\begin{aligned} S &= L_D \cdot B_D, & (\text{M.34}) \\ S &= 2,6 \cdot 2,6 = 6,76 \text{ (мм}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Виконаємо перевірку:

– робочий тангенс кута діелектричних втрат

$$\text{tg} \delta_{\text{роб}} \leq \text{tg} \delta, \quad (\text{M.35})$$

$$\text{tg} \delta_{\text{роб}} = \text{tg} \delta_{\text{діел}} + \text{tg} \delta_{\text{обкл}}, \quad (\text{M.36})$$

$$\text{tg} \delta_{\text{обкл}} \approx \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_S \cdot K_\phi \cdot C; \quad (\text{M.37})$$

$$\text{tg} \delta_{\text{обкл}} \approx \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 470 \cdot 10^{-12} = 0,15 \cdot 10^{-3},$$

$$\text{tg} \delta_{\text{роб}} = 0,02 + 0,00015 \approx 0,02,$$

отже,  $\text{tg} \delta_{\text{роб}} = 0,02 < \text{tg} \delta = 0,03$ , тому за тангенсом кута діелектричних втрат розрахунки правильні;

– робоча електрична міцність матеріалу діелектрика

$$E_{\text{роб}} \leq E_{\text{нр}}, \quad (\text{M.38})$$

причому

$$E_{\text{роб}} = \frac{U}{d_{\text{min}}}, \quad (\text{M.39})$$

$$E_{\text{роб}} = \frac{15}{22,5 \cdot 10^{-6}} = 0,67 \cdot 10^{-6} \text{ (В/см)},$$

отже,  $E_{\text{роб}} = 0,67 \cdot 10^{-6} < E_{\text{нр}} = 2 \cdot 10^{-6}$ , тому є запас міцності діелектрика при робочому режимі;

– похибка активної площі конденсатора

$$\gamma_{S_{\text{роб}}} \leq \gamma_S, \quad (\text{M.40})$$

причому

$$\gamma_{S_{\text{роб}}} = \Delta L \cdot \frac{1 + K_\phi}{\sqrt{S_C}}; \quad (\text{M.41})$$

$$\gamma_{S_{\text{роб}}} = 0,01 \cdot \frac{1+1}{\sqrt{6,76}} = 0,008, \text{ отже } \gamma_{S_{\text{роб}}} = 0,8\% < \gamma_S = 7\%, \text{ похибка знаходиться у відпові-}$$

дних межах, отже розрахунок конденсаторів С1, С2, С7 та С8 – правильний.

б) розрахунок конденсаторів  $C10 = C12 = 2700 \text{ нФ} \pm 15\%$ .

Обираємо мінімальне значення питомої ємності конденсатора, виходячи з формули (М.23).

Питома ємність конденсатора (за (М.24))

$$C_{0_U} = 197 \text{ пФ/мм}^2.$$

Питома ємність конденсатора з урахуванням точності його виготовлення визначається за формулою (М.27):

$$C_{0_{точн}} = 2700 \cdot \left( \frac{0,06}{0,01} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1+1)^2} = 24300 \text{ (пФ/мм}^2\text{)}.$$

Питома ємність мінімуму площі (за формулою (М.28))

$$C_{0_{\min}} = \frac{2700}{1} = 2700 \text{ (пФ/мм}^2\text{)}.$$

Отже, найменшим значенням серед розрахованих є  $C_{0U} = 197$  пФ/мм<sup>2</sup>, тому  $C_0 = C_{0U} = 197$  пФ/мм<sup>2</sup>.

Визначаємо коефіцієнт, що враховує крайовий ефект в конденсаторі (за формулою (М.29))

$$\frac{C}{C_0} = \frac{2700}{197} = 13,7 \text{ (мм}^2\text{)}, \text{ отже, коефіцієнт буде дорівнювати одиниці } K = 1.$$

Визначимо площу верхньої обкладинки конденсатора (за формулою (М.30))

$$S_B = 1 \cdot \frac{2700}{197} = 13,7 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Визначимо розміри верхньої обкладинки конденсаторів (за формулою (М.31))

$$L_B = B_B = \sqrt{13,7} = 3,7 \text{ (мм)}.$$

Визначимо розміри нижньої обкладинки конденсатора (за формулою (М.32)):

$$L_H = B_H = 3,7 + 2 \cdot 0,2 = 4,1 \text{ (мм)}.$$

Визначимо розмір діелектрика (за формулою (М.33))

$$L_D = B_D = 4,1 + 2 \cdot 0,1 = 4,3 \text{ (мм)}.$$

Визначимо площу, яку буде займати конденсатор (за формулою (М.34))

$$S_C = 4,3 \cdot 4,3 = 18,49 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Виконаємо перевірку:

– тангенса кута втрат (за формулами (М.35)–(М.37))

$$\text{tg} \delta_{\text{обкл}} \approx \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 680 \cdot 10^{-12} = 0,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\text{tg} \delta_{\text{роб}} = 0,02 + 0,0002 \approx 0,02,$$

отже,  $\text{tg} \delta_{\text{роб}} = 0,02 < \text{tg} \delta = 0,03$ , тому за тангенсом кута діелектричних втрат розрахунки правильні;

– електричної міцності діелектрика (за формулами (М.38), (М.39))

$$E_{\text{роб}} = \frac{15}{22,5 \cdot 10^{-6}} = 0,67 \cdot 10^{-6} \text{ (В/см)},$$

Отже,  $E_{\text{роб}} = 0,67 \cdot 10^{-6} < E_{\text{нр}} = 2 \cdot 10^{-6}$ , тому є запас міцності діелектрику при робочому режимі;

– похибки активної площі (за формулами (М.40), (М.41))

$$\gamma_{S_{\text{роб}}} = 0,01 \cdot \frac{1+1}{\sqrt{18,49}} = 0,005, \text{ отже } \gamma_{S_{\text{роб}}} = 0,5\% < \gamma_S = 7\%, \text{ тому похибка активної}$$

площі конденсатора знаходиться у відповідних межах і розрахунок конденсаторів С10 та С12 – правильний.

## Додаток Н ПРИКЛАДИ ОФОРМЛЕННЯ ЛІТЕРАТУРИ

Література оформлюється згідно з ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 “Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання”.

| Характеристика джерела | Приклад оформлення   |
|------------------------|--|
| Книги:<br>Один автор   | 1. Коренівський Д. Г. Дестабілізуючий ефект параметричного білого шуму в неперервних та дискретних динамічних системах / Коренівський Д. Г. — К. : Ін-т математики, 2006. — 111 с. — (Математика та її застосування) (Праці / Ін-т математики НАН України ; т. 59).  |
| Два автори             | 1. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / О. В. Суберляк, П. І. Баштанник. — Львів : Растр-7, 2007. — 375 с.  |
| Три автори             | 1. Акофф Р. Л. Идеализированное проектирование: как предотвратить завтрашний кризис сегодня. Создание будущего организации / Акофф Р. Л., Магидсон Д., Эддисон Г. Д. ; пер. с англ. Ф. П. Тарасенко. — Днепропетровск : Баланс Бизнес Букс, 2007. — XLIII, 265 с.  |
| Чотири автори          | 1. Елементи інформатики [Текст] : довідник / В. С. Височанський, А. І. Кардаш, В. С. Костев, В. В. Черняхівський . — К. : Наук. думка, 2003. - 192 с.<br>2. Механізація переробної галузі агропромислового комплексу : [підруч. для учнів проф.-техн. навч. закл.] / О. В. Гвоздев, Ф. Ю. Ялпачик, Ю. П. Рогач, М. М. Сердюк. — К. : Вища освіта, 2006. — 478, [1] с. — (ПТО: Професійно-технічна освіта). |
| П'ять і більше авторів | 1. Психология менеджмента / [ Власов П. К., Липницкий А. В., Лушихина И. М. и др. ] ; под ред. Г. С. Никифорова. — [3-е изд.]. — Х. : Гуманитар. центр, 2007. — 510 с.<br>2. Коротковолновые антенны [Текст] : учеб. пособие / Г. З. Айзенберг, С. П. Белоусов, Я. М. Журбин и др. ; под общ. ред. А. А. Стогния. — 2-е изд. — М. : Радио и связь, 2003. — 192 с.  |
| Без автора             | 1. Информационные технологии в маркетинге [Текст] : учеб. / под ред. Г. А. Титаренко. — М. : ЮНИТИ, 2000. — 335 с. — (Техbook). — 13ВК 5-238-00154-1.<br>2. Проблеми типологічної та квантитативної лексикології : [зб.наук.праць / наук. ред. Каліущенко В. та ін.]. — Чернівці : Рута, 2007. — 310 с.  |
| Багатотомний документ  | 1. Історія Національної академії наук України, 1941—1945 / [упоряд. Л. М. Яременко та ін.]. — К. : Нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського, 2007— . — (Джерела з історії науки в Україні).<br>Ч. 2 : Додатки — 2007. — 573, [1] с.<br>2. Межгосударственные стандарты : каталог в 6 т. / [сост. Ковалева И. В., Рубцова Е. Ю. ; ред. Иванов В. Л.]. — Львов : НТЦ   |

|                                |  |
|--------------------------------|--|
|                                | <p>"Леонорм-Стандарт", 2005— .— (Серия "Нормативная база предприятия"). Т. 1. — 2005. — 277 с.</p> <p>3. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]. Т. 1. Механика. Молекулярная физика : учеб, пособие / И. В. Савельев. —• 2-е изд., перераб. — М. : Наука, 1982. — 432 с.</p> <p>4. Бондаренко В. Г. Теорія ймовірностей і математична статистика. Ч.1 / В. Г. Бондаренко, І. Ю. Канівська, С. М. Парамонова. — К. : НТУУ "КПІ", 2006. — 125 с.</p>  |
| Матеріали конференцій, з'їздів | <p>1. Економіка, менеджмент, освіта в системі реформування агропромислового комплексу : матеріали Всеукр. конф. молодих учених-аграрників ["Молодь України і аграрна реформа"], (Харків, 11—13 жовт. 2000 р.) / М-во аграр. політики, Харк. держ. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва. — Х. : Харк. держ. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва, 2000. — 167 с.</p> <p>2. Кібернетика в сучасних економічних процесах : зб. текстів виступів на республік. міжвуз. наук.-практ. конф. / Держкомстат України, Ін-т статистики, обліку та аудиту. — К. : ІСОА, 2002. — 147 с.</p> <p>3. Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій : праці конф., 6—9 черв. 2000 р., Київ. Т. 2 / відп. Ред. В. Т. Трощенко. — К. : НАН України, Ін-т пробл. міцності, 2000. — С. 559—956, XIII, [2] с. — (Ресурс 2000).</p> <p>4. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. праць / наук. ред. В. І. Моссаковський. — Дніпропетровськ : Навч. кн., 1999. — 215 с.</p> |
| Препринти                      | <p>1. Шиляев Б. А. Расчеты параметров радиационного повреждения материалов нейтронами источника ННЦ ХФТИ/ANL USA с подкритической сборкой, управляемой ускорителем электронов / Шиляев Б. А., Воеводин В. Н. — Х. ННЦ ХФТИ, 2006. — 19 с. — (Препринт / НАН Украины, Нац. науч. центр "Харьк. физ.-техн. ин-т" ; ХФТИ 2006-4).</p> <p>2. Панасюк М. І. Про точність визначення активності твердих радіоактивних відходів гамма-методами / Панасюк М. І., Скорбун А. Д., Сплошной Б. М. — Чорнобиль : Ін-т пробл. безпеки АЕС НАН України, 2006. — 7, [1] с. — (Препринт / НАН України, Ін-т пробл. безпеки АЕС ; 06-1).</p>  |
| Депоновані наукові праці       | <p>1. Социологическое исследование малых групп населения / В. И. Иванов [и др.] ; М-во образования Рос. Федерации, Финансовая академия. — М., 2002. — 110 с. — Деп. в ВИНТИ 13.06.02, № 145432.</p> <p>2. Разумовский, В. А. Управление маркетинговыми исследованиями в регионе / В. А. Разумовский, Д. А. Андреев. — М., 2002. — 210 с. — Деп. в ИНИОН Рос. акад. наук 15.02.02, № 139876.</p>  |
| Словники                       | <p>1. Тимошенко З. І. Болонський процес в дії : словник-довідник основ. термінів і понять з орг. навч. процесу у вищ. навч. закл. / З. І. Тимошенко, О. І. Тимошенко. — К. : Європ. ун-т, 2007. — 57 с.</p> <p>2. Українсько-німецький тематичний словник [уклад. Н. Яцко та ін.]. — К. : Карпенко, 2007. — 219 с.</p>   |



|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Атласи                              | 1. Україна : екол.-геогр. атлас : присвяч. всесвіт. дню науки в ім'я миру та розвитку згідно з рішенням 31 сесії ген. конф. ЮНЕСКО / [наук. редкол.: С. С. Куруленко та ін.] ; Рада по вивч. продукт. сил України НАН України [та ін.]. — / [наук. редкол.: С. С. Куруленко та ін.]. — К. : Варта, 2006. — 217, [1] с.  |
| Законодавчі та нормативні документи | 1. Експлуатація, порядок і терміни перевірки запобіжних пристроїв посудин, апаратів і трубопроводів теплових електростанцій : СОУ-Н ЕЕ 39.501:2007. — Офіц. вид. — К. : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2007. — VI, 74 с. — (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).  |
| Стандарти                           | 1. Графічні символи, що їх використовують на устаткуванні. Показчик та огляд (ISO 7000:2004, IDT) : ДСТУ ISO 7000:2004. — [Чинний від 2006-01-01]. — К. : Держспоживстандарт України 2006. — IV, 231 с. — (Національний стандарт України).<br>2. Якість води. Словник термінів : ДСТУ ISO 6107-1:2004 — ДСТУ ISO 6107-9:2004. — [Чинний від 2005-04-01]. — К. : Держспоживстандарт України, 2006. — 181 с. — (Національні стандарти України).<br>3. Вимоги щодо безпечності контрольно-вимірювального та лабораторного електричного устаткування. Частина 2-020. Додаткові вимоги до лабораторних центрифуг (EN 61010-2-020:1994, IDT) : ДСТУ EN 61010-2-020:2005. — [Чинний від 2007-01-01]. — К. : Держспоживстандарт України, 2007. — IV, 18 с. — (Національний стандарт України). |
| Каталоги                            | 1. Межгосударственные стандарты : каталог : в 6 т. / [сост. Ковалева И. В., Павлюкова В. А. ; ред. Иванов В. Л.]. — Львов : НТЦ "Леонорм-стандарт, 2006— . — (Серия "Нормативная база предприятия"). Т. 5. — 2007. — 264 с.   |
| Бібліографічні показки              | 1. Куц О. С. Бібліографічний показчик та анотації кандидатських дисертацій, захищених у спеціалізованій вченій раді Львівського державного університету фізичної культури у 2006 році / О. Куц, О. Вацеба. — Львів : Укр. технології, 2007. — 74 с.   |
| Дисертації                          | 1. Петров П. П. Активність молодих зірок сонячної маси: дис. ... доктора фіз.-мат. наук : 01.03.02 / Петров Петро Петрович. — К., 2005. — 276 с.  |
| Автореферати дисертацій             | 1. Новосад І. Я. Технологічне забезпечення виготовлення секцій робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 „Технологія машинобудування” / І. Я. Новосад. — Тернопіль, 2007. — 20, [1] с.<br>2. Нгуен Ші Данг. Моделювання і прогнозування макроекономічних показників в системі підтримки прийняття рішень управління державними фінансами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.06 „Автоматиз. системи упр. та прогрес. інформ. технології” / Нгуен Ші Данг. — К., 2007. — 20 с.  |

|   |   |
|---|---|
| Авторські свідоцтва                               | 1. А. с. 1007970 СССР, МКИ <sup>3</sup> В 25 J 15/00. Устройство для захвата неориентированных деталей типа валов / В. С. Ваулин, В. Г. Кемайкин (СССР). – № 3360585/25–08 ; заявл. 23.11.81 ; опубл. 30.03.83, Бюл. № 12.  |
| Патенти   | 1. Пат. 2187888 Российская Федерация, МПК <sup>7</sup> Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Приемопередающее устройство / Чугаева В.И.; заявитель и патентообладатель Воронеж. науч.-исслед. ин-т связи. – № 2000131736/09 ; заявл. 18.12.00 ; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23 (II ч.).  |
| Частина книги, періодичного, продовжаного видання | 1. Валькман Ю. Р. Моделирование НЕ-факторов — основа интеллектуализации компьютерных технологий / Ю. Р. Валькман, В. С. Быков, А. Ю. Рыхальский // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2007. — № 1. — С. 39—61.<br>2. Третьяк В. В. Возможности использования баз знаний для проектирования технологии взрывной штамповки / В. В. Третьяк, С. А. Стадник, Н. В. Калайтан // Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности : междунар. науч.-техн. конф., 3-5 окт. 2007 г. : тезисы докл. — Х., 2007. — С. 33.   |
| Електронні ресурси                                | 1. Богомольний Б. Р. Медицина екстремальних ситуацій [Електронний ресурс] ] : навч. посіб. для студ. мед. вузів III—IV рівнів акредитації / Б. Р. Богомольний, В. В. Кононенко, П. М. Чуев. — 80 Min / 700 MB. — Одеса : Одес. мед. ун-т, 2003. — (Бібліотека студента-медика) — 1 електрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. — Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000, XP ; MS Word 97-2000.— Назва з контейнера.<br>2. Internet шаг за шагом [Электронный ресурс] : интеракт. учеб. — Электрон, дан. и прогр. -СПб. : Питер Ком, 1997. — 1 электрон, опт. диск (CD-ROM). — Систем, требования : ПК от 486 DX 66 МГц ; RAM 1616 Мб ; Windows 95 ; зв. плата. — Загл. с этикетки диска.<br>3. Бібліотека і доступність інформації у сучасному світі: електронні ресурси в науці, культурі та освіті : (підсумки 10-ї Міжнар. конф. „Крим-2003”) [Електронний ресурс] / Л. Й. Костенко, А. О. Чекмарьов, А. Г. Бровкін, І. А. Павлуша // Бібліотечний вісник — 2003. — № 4. — С. 43. — Режим доступу до журн. : <a href="http://www.nbuv.gov.ua/articles/2003/03klinko.htm">http://www.nbuv.gov.ua/articles/2003/03klinko.htm</a> . |

*Навчальне видання*

**Філінюк Микола Антонович  
Войцеховська Олена Валеріївна**

# **ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОНІКА КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено О. Войцеховською

Підписано до друку

Формат 29,7×42  $\frac{1}{4}$ . Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк.

Наклад      прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет  
навчально-методичний відділ ВНТУ.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, к. 2201.

Тел. (0432) 59-87-36.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-87-38.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.