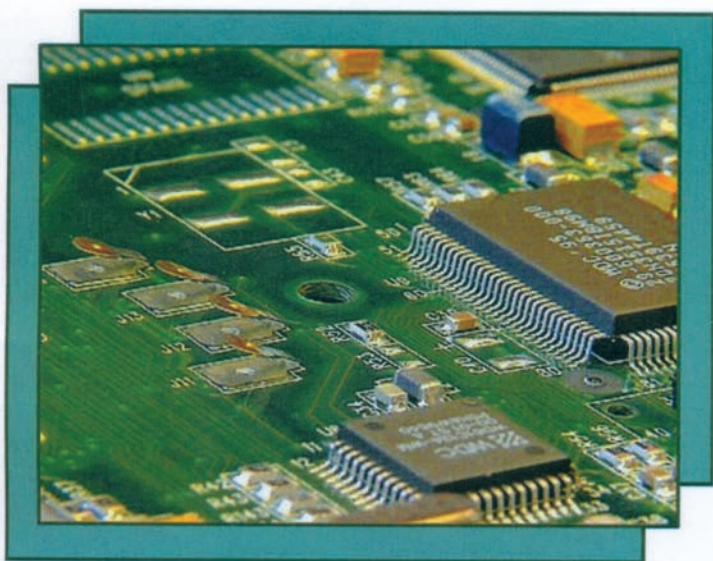


В. М. Кичак, В. В. Стронський

# ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОНІКА

Курсове проектування



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

В. М. Кичак, В. В. Стронський

# **Технічна електроніка**

## **Курсове проектування**

**Навчальний посібник**

Вінниця  
ВНТУ  
2016

УДК 621.382  
ББК 32.85я73  
К64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 11 від 21.06.2012 р.).

Рецензенти:

С. М. Злепко, доктор технічних наук, професор  
А. Г. Ложковський, доктор технічних наук, професор  
О. Б. Шарпан, доктор технічних наук, професор

**Кичак, В. М.**

**К64** Технічна електроніка. Курсове проектування : навчальний посібник / В. М. Кичак, В. В. Стронський. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 148 с.

В посібнику розглянуті основні питання розрахунку та конструювання гібридних інтегральних мікросхем. Він розроблений відповідно до програми дисципліни “Технічна електроніка”. Посібник буде корисним студентам галузі знань 0509 “Радіотехніка, радіоелектронні апарати та зв’язок” під час навчального процесу, а також може бути цікавим для викладачів та фахівців.

УДК 621.382  
ББК 32.85я73

## Зміст

Вступ.....	5
1 Вибір робочої точки активного елемента та розрахунок надійності ГІС.....	12
1.1 Розрахунок робочого режиму біполярного транзистора .....	12
1.1.1 Приклад розрахунку вихідного каскаду на біполярному транзисторі.....	22
1.2 Розрахунок робочого режиму польового транзистора.....	26
1.3 Розрахунок показників надійності гібридних ІМС за раптовими відмовами.....	28
<i>Контрольні запитання</i> .....	35
2 Конструювання і технологія тонкоплівкових ГІС.....	37
2.1 Підкладки та матеріали елементів тонкоплівкових ГІС .....	37
2.2 Методи формування конфігурацій елементів тонкоплівкових ГІС.....	44
2.3 Розрахунок конструкції елементів тонкоплівкових ГІС.....	47
2.3.1 Конфігурація тонкоплівкових резисторів.....	47
2.3.2 Конструктивний розрахунок тонкоплівкових резисторів.....	48
2.3.3 Розрахунок прямокутних резисторів.....	50
2.3.4 Конструктивний розрахунок тонкоплівкових резисторів складної форми.....	53
2.4 Конструювання плівкових підгінних резисторів.....	56
2.4.1 Конструктивний розрахунок плівкового підгінного резистора по довжині.....	56
2.4.2 Конструктивний розрахунок плівкового підгінного резистора по ширині .....	59
2.5 Розрахунок тонкоплівкових конденсаторів.....	63
2.6 Приклад розрахунку тонкоплівкових конденсаторів .....	71
2.7 Розрахунок плівкових індуктивностей .....	75
2.8 Розрахунок плівкових контактних переходів.....	81
2.9 Розрахунок паразитних ємностей в гібридній інтегральній мікросхемі .....	86
<i>Контрольні запитання</i> .....	93
3 Конструювання і технологія товстоплівкових ГІС.....	94
3.1 Плати та пасти для товстоплівкових ГІС.....	94
3.2 Нанесення та термообробка паст.....	97
3.3 Пасти для провідників, контактних площадок, виводів .....	102
3.4 Конструктивний розрахунок елементів товстоплівкових ГІС .....	102
3.4.1 Розрахунок товстоплівкових резисторів.....	104
3.4.2 Розрахунок товстоплівкових конденсаторів .....	108
3.5 Підгонка товстоплівкових резисторів.....	109
3.6 Підгонка товстоплівкових конденсаторів.....	110
3.7 Навісні компоненти гібридних ІМС.....	112
3.8 Захист та складання товстоплівкових ГІС.....	129
3.9 Розробка топології товстоплівкових ГІС.....	130

3.10 Розробка ескізу топології гібридної ІМС .....	131
<i>Контрольні запитання</i> .....	134
Словник найбільш вживаних термінів .....	135
Література .....	137
Додаток А .....	139
Додаток Б .....	140
Додаток В .....	141
Додаток Г .....	143
Додаток Д .....	144
Додаток Е .....	145
Додаток Ж .....	146
Додаток И .....	147

## Вступ

Інтегральна мікросхема (integrated circuit) (ІМС) – це конструктивно закінчений виріб електронної техніки, що виконує певну функцію перетворення інформації і містить сукупність електрично зв'язаних між собою електрорадіоелементів (electric radioelements) (ЕРЕ), виготовлених у єдиному технологічному циклі.

Термін «інтегральна мікросхема» – це об'єднання значного числа транзисторів (transistors), діодів (diodes), конденсаторів (condensers), резисторів (resistors) і з'єднуючих провідників у єдину конструкцію (конструктивна інтеграція); виконання схемою функцій перетворення інформації, більш складних у порівнянні з функціями окремих ЕРЕ (схемотехнічна інтеграція); виконання в єдиному технологічному циклі одночасно всіх ЕРЕ схеми і між'єднань і одночасне формування груповим методом великого числа однакових ІМС (технологічна інтеграція).

За способом виготовлення розрізняють напівпровідникові (semiconductors) і плівкові (pellicles) ІМС. У напівпровідникових ІМС усі ЕРЕ і частина між'єднань сформовані в приповерхневому шарі напівпровідникової (звичайно кремнієвої) підкладки. У плівкових ІМС пасивні ЕРЕ виготовлені у вигляді сукупності тонких (thin) (менше 1 мкм) або товстих (thick) (10–50 мкм) плівок, нанесених на діелектричну підкладку. Гібридні (hybrid) ІМС (ГІС) являють собою комбінацію плівкових пасивних (passives) ЕРЕ з мініатюрними безкорпусними дискретними активними приладами (active devices) (напівпровідниковими ІМС, транзисторами, діодами), розташованими на загальній діелектричній підкладці. ЕРЕ, що є невід'ємною складовою частиною ІМС і не можуть бути виділені з неї як самостійний виріб, називають елементами (elements) ІМС, а дискретні активні ЕРЕ навісними компонентами (hanging components) (або просто компонентами), підкреслюючи тим самим, що їх виготовляють окремо у вигляді самостійних приладів, що можуть бути придбані виробником ГІС як покупні вироби. На відміну від дискретних компонентів, елементи ІМС називають інтегральними (інтегральний резистор, інтегральний діод).

У сполучених ІМС активні ЕРЕ виконані в приповерхневому шарі напівпровідникового кристала (crystal) (як у напівпровідникової ІМС), а пасивні нанесені у вигляді плівок на покриту діелектриком поверхню того ж кристала (як у плівкової ІМС). Перелічимо особливості ІМС як нового типу виробів електронної техніки:

а) ІМС самостійно виконує закінчену, часто досить складну функцію. Вона може бути підсилювачем, запам'ятовувальним пристроєм, генератором, детектором і т. д. Жоден з ЕРЕ самостійно таких функцій

виконувати не може, для цього його варто з'єднати з іншими дискретними ЕРЕ за окремою схемою;

б) випуск і застосування ІМС супроводжуються істотним зменшенням маси, габаритів і вартості радіоелектронної апаратури, зниженням споживаної потужності і підвищенням надійності;

в) елементи ІМС розташовуються в межах однієї підкладки на порівняно невеликих відстанях один від одного і формуються одночасно; це обумовлює малий технологічний розкид їхніх параметрів. Особливо висока точність виконання співвідношення параметрів декількох елементів (наприклад, відношення опорів). Ця точність зберігається при зміні температури навколишнього середовища, тому що всі елементи ІМС працюють практично при одній температурі і термічні коефіцієнти параметрів елементів однієї і тієї ж ІМС приблизно однакові. Цю особливість ІМС часто використовують при створенні пристроїв, мало чутливих до впливу технологічного розкиду параметрів елементів і до зміни температури;

г) при розробці напівпровідникових ІМС прагнуть вибрати схемотехнічні рішення з мінімальним числом пасивних елементів. Резистори і конденсатори займають значну площу ІМС, технологічні можливості створення цих елементів з достатньою точністю в широкому діапазоні номіналів обмежені.

Позначення ІМС. Кожен конструктивно-технологічний варіант (група) інтегральних мікросхем згідно з ОСТ 11.073.915-80 має такі позначення: 1, 5, 6, 7 – напівпровідникові, 2, 4, 8 – гібридні, 3 – плівкові і деякі інші ІМС (наприклад, вакуумні, керамічні). За функціональним призначенням ІМС підрозділяють на підгрупи (Г – генератори, Д – детектори, К – комутатори і ключі, Л – логічні елементи, М – модулятори, Н – набори елементів, П – перетворювачі сигналів, Е – схеми джерел вторинного живлення, Б – схеми затримки, З – схеми порівняння, Т – тригери, П – підсилювачі, Ф – фільтри, ФІ – формувачі імпульсів, Р – схеми запам'ятовувальних пристроїв, І – схеми цифрових пристроїв, У – схеми обчислювальних засобів, Ц – фоточутливі схеми із зарядовим зв'язком, Х – багатофункціональні схеми). У межах кожної підгрупи ІМС підрозділяють на види, кожному виду присвоєна певна буква; таким чином, поєднання двох букв у позначенні ІМС характеризує її вид і підгрупу (наприклад, ГС – генератори гармонічних сигналів, ЛЛ – логічні елементи, І, ІР – набори резисторів, ПВ – підсилювачі високої частоти, ВМ – мікропроцесори, ВЕ – мікро-ЕОМ, ВК – схеми мікропрограмного керування, ВТ – мікрокалькулятори й ін.).

Позначення інтегральної мікросхеми складається з таких елементів: перший елемент – цифра, що означає групу, другий елемент – три цифри

(від 000 до 999) або дві цифри (від 00 до 99), що означають порядковий номер розробки серії ІМС, третій елемент – дві букви, що означають підгрупу і вид ІМС, четвертий елемент – умовний номер розробки ІМС за функціональною ознакою в даній серії. Інтегральні мікросхеми випускаються в складі серії, тобто в сукупності декількох видів ІМС, що мають єдине конструктивно-технологічне виконання і призначені для спільного застосування в апаратурі. Два перших елементи позначення ІМС відносяться до позначення серії (тобто воно містить від трьох до чотирьох цифр). Наприклад, ІМС синхронізації мікропроцесорного комплексу серії 1800 з порядковим номером 2 її розробки в даній серії (за функціональною ознакою) має позначення 1800ВБ2, ІМС логічні елементи І-НЕ, що відкриває перелік схем широкорозповсюдженої серії 133, – позначення 133ЛА1.

При необхідності розроблювач ІМС має право наприкінці умовної позначки додатково вказувати букви (від А до Я, крім букв З, М, ПРО, Т, Ш, П, Ч, І, Ї), що характеризують відмінність ІМС одного виду за електричними характеристиками. При маркуванні ця буква може бути замінена кольоровою точкою.

Для ІМС, що використовуються у пристроях широкого застосування, на початку позначення додають букву К: К1800ВБ1, К133ЛА1.

Для безкорпусних ІМС до складу позначення вводять додатково два елементи: букву Б на початку позначення і цифру (від 1 до 6) – наприкінці. Цифра характеризує конструктивне виконання безкорпусних ІМС: 1 – із гнучкими выводами; 2 – зі стрічковими (павучковими) выводами і выводами, виконаними на діелектричній (у тому числі поліімідній) плівці; 3 – із твердими (кульковими або стовпцевими) выводами; 4 – на загальній підкладці або пластині, не розділені один від одного; 5 – те ж, що і 4, але розділені без втрати орієнтації (наприклад, наклеєні на плівці); 6 – кристали з контактними площадками без выводів. Наприклад, Б106ЛБ1А-1 – напівпровідникова ІМС серії Б106-1 (логічний елемент І-НЕ / АБО-НЕ) у безкорпусному виконанні з гнучкими выводами.

При переході серії мікросхем для виконання в більш дешевому пластмасовому корпусі на початку позначення ставлять букву Р. Наприклад, при переході мікросхем серії 140 у металоскляному корпусі на пластмасовий корпус 201.14-1 серію стали позначати Р140. ІМС операційного підсилювача, що входить у цю серію, має позначення Р140УД1А.

Для позначення ІМС підвищеної якості перед цифровим позначенням серії вказують букви ОС (а при їхньому малому випуску – букви ОСМ).

Для мікросхем, що поставляються на експорт (крок виводів 1,27 або 2,54 мм), на початку позначення додають букву Е. Наприклад, напівпровідникова логічна ІМС серії К1500 (логічний елемент І-НЕ) в експортному виконанні має позначення ЕК1500ЛА1.

Ціль задачі і методика виконання курсового проекту. Задачею виконання курсового проекту (КП) є розробка конструкції ІМС і технологічного маршруту її виробництва відповідно до заданої в технічному завданні (ТЗ) принципової електричної схеми. Конструктивно-технологічний варіант виготовлення ІМС вибирається студентом у результаті аналізу завдання на КП або задається керівником проекту.

Метою роботи над курсовим проектом є надбання практичних навичок розв'язання інженерної задачі створення конкретного мікроелектронного виробу, а також закріплення, поглиблення й узагальнення теоретичних знань, надбаних на попередніх етапах навчання у вузі.

### **Основні етапи виконання курсового проекту**

етап I – аналіз технічного завдання з метою виявлення суті, оцінки обсягу і плану майбутньої роботи;

етап II – вибір технології виготовлення ІМС, виходячи з аналізу технічного завдання (функції, виконуваної ІМС, масштабів виробництва, умов експлуатації). Особливу увагу при цьому необхідно звернути на технологічні обмеження, що полегшить наступну роботу пов'язану з конструюванням елементів ІМС, вибором компонентів і розробкою конструкції ІМС у цілому;

етап III – розрахунок елементів і вибір компонентів ІМС відповідно до принципової електричної схеми з урахуванням технологічних обмежень;

етап IV – розробка топології (topology) і вибір корпусу ІМС. Розробку ескізу топології ІМС і наступних варіантів топології проводять відповідно до правил проектування, викладених у розділах 1 – 4 для різних конструктивно-технологічних типів ІМС. Вибір корпусу ІМС роблять з числа уніфікованих конструкцій (див. розділ 5) за такими вихідними даними: розміром кристала напівпровідникової ІМС або плати ГІС і числом зовнішніх виводів ІМС (числом контактних площадок зовнішніх виводів на топології ІМС); герметичністю корпусу й умовами експлуатації (останні дані вказуються в ТЗ). Площа і розміри монтажною площадки повинні відповідати розмірам кристала або плати або трохи перевершувати їх, число виводів корпусу і їхня рядність також повинні відповідати топології ІМС;

етап V – перевірка (verification) якості розробки топології і конструкції ІМС. Методика перевірки правильності розробки топології ІМС різних

типів наведена у розділах 1 – 3. Додатково для оцінювання якості розробки наводять розрахунки паразитних зв'язків і показників надійності (indexes of reliability);

етап VI – коректування або переробка топології або конструкції ІМС.

Виправлення в топології і конструкції роблять, якщо перевірка якості і перевіріні розрахунки дають на це підстави.

Етап VII – оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Вона повинна містити обґрунтування вибраного конструкторського і технологічного рішення у вигляді порівняльної оцінки цього рішення з іншими можливими варіантами, показ переваг прийнятого інженерного рішення з точки зору ефективності виробництва, якості і вартості. Пояснювальна записка повинна виконуватися на аркушах паперу для писання або паперу в лінію формату А4, необхідні ілюстрації і креслення повинні бути виконані на міліметровому папері формату А4 або більшого формату.

Обсяг пояснювальної записки без врахування креслень і графіків повинен складати приблизно 30 – 40 сторінок рукописного тексту. Вона повинна містити титульний лист, зміст до технічного завдання, підписане керівником, опис принципу дії проектованої ІМС, вибір і обґрунтування конструктивно-технологічного варіанта виробництва ІМС, опис технології зі структурною схемою процесу, розрахунок конструктивних і електричних параметрів елементів ІМС, ескіз топології ІМС на міліметровому папері, перевіріні розрахунки і скоректований при необхідності варіант топології, дослідницьку частину (видається за розсудом керівника проекту), висновки, список використаної літератури і держстандартів, додаток (маршрутну або операційні карти технологічного процесу);

етап VIII – оформлення конструкторської документації на ІМС. Її обсяг складає 5 листів форматів А4, А3. Креслення варто виконувати відповідно до ЄСКД олівцем або тушшю. Вони повинні містити як мінімум таку інформацію: електричну схему ІМС, топологічне креслення ІМС, складальне креслення ІМС, структурну схему технологічного процесу. Інша інформація вноситься на креслення за вказівкою керівника проекту. На кресленнях і пояснювальній записці повинен стояти особистий підпис студента, що засвідчує самостійність виконання проекту і відповідальність за прийняті рішення. Зразки креслень наведені в додатках А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, И;

етап IX – підготовка до захисту курсового проекту. На цьому етапі проводиться робота зі складання короткої (8 – 10 хв) доповіді про найбільш істотні результати курсового проектування, підготовки до

обґрунтування і захисту прийнятих інженерних рішень, підготовки відповідей на можливі запитання членів комісії з приймання КП.

Організація і керівництво курсовим проектом. Курсовий проект за курсом «Конструювання і технологія мікросхем» виконують з використанням одного з чотирьох найбільш розповсюджених варіантів конструктивно-технологічного виконання інтегральних мікросхем: напівпровідникової на біполярних транзисторах, напівпровідникової на МДН-транзисторах, гібридної тонкоплівкової і гібридної товстоплівкової. У зв'язку з цим технічне завдання на проект повинно містити необхідну і достатню кількість даних, опираючись на які студент повинен самостійно обґрунтувати і вибрати спосіб виготовлення ІМС. Однак, з погляду на ранній (за 2 – 3 роки) розподіл студентів на місця роботи, замовлену систему підготовки фахівців для того або іншого підприємства або об'єднання, кафедри і керівники проектів можуть вже в ТЗ визначати технологію виробництва ІМС з урахуванням специфіки майбутньої роботи молодого фахівця. Типове ТЗ на розробку конструкції ІМС повинно містити: «електричну схему ІМС із вказанням номіналів і характеристик елементів і компонентів; короткий опис реалізованої функції і необхідні характеристики вхідних і вихідних сигналів, а також призначення, серійність виробництва, умови експлуатації ІМС і літературу, що рекомендується.

Різноманітність функціонального призначення ІМС, варіантів їхнього конструктивно-технологічного виконання дозволяє видати кожному студентові індивідуальне завдання на проект.

Завдання на проект повинно бути підписано керівником, датоване і зареєстроване в журналі обліку КП кафедри. Керівництво курсовим проектуванням починається з видачі ТЗ на проект. Індивідуальна бесіда керівника зі студентом про завдання є необхідною умовою успіху подальшої роботи, тому що дозволяє виявити ступінь підготовленості студента, відзначити окремі, найбільш відповідальні етапи КП, уточнити графік його виконання.

Велике організуюче значення на перших етапах курсового проектування має вступна лекція по КП, прочитана лектором курсу, у якій роз'яснюються роль цього виду навчальної роботи для підготовки фахівця, рівень вимог до занять, сутність виданих завдань і шляхи їхньої реалізації.

У процесі виконання КП кафедра і керівник проекту проводять групові й індивідуальні консультації. Як правило, групові консультації проводяться за розкладом і не повинні переходити в лекції. На цих консультаціях необхідно давати конкретні вказівки щодо усунення утруднень, що зустрілися, проводити розбір розв'язків типових задач, що зустрічаються при виконанні КП, аналізувати типові помилки, виконувати

найбільш важкі розрахунки. Індивідуальні консультації повинні проводитися регулярно 1 – 2 рази в тиждень. Головна їх ціль – контроль за ходом і правильністю виконання КП, виявлення допущених помилок, допомога студентові в знаходженні правильного шляху рішення питання.

Після завершення роботи керівник ретельно перевіряє проект і, якщо він задовольняє усі вимоги до КП, допускає проект до захисту, роблячи відповідні написи на кресленнях і в записці з поданням попередньої оцінки.

Захист курсового проекту. Захист є особливою формою перевірки виконання курсового проекту. Ця процедура повинна привчити майбутнього інженера до публічного захисту прийнятих ним технічних рішень. Захист включає коротку доповідь (8 – 10 хв) студента із теми проекту перед призначеною кафедрою комісією викладачів із двох-трьох чоловік і відповіді на запитання, що задаються членами комісії. Студент при захисті повинен дати пояснення проекту, виявити достатній рівень теоретичної підготовки й уміння застосувати її при розв'язанні конкретної задачі.

Результати захисту оцінюються оцінкою за п'ятибальною системою. Студент, що не виконав і не подав КП у встановлений термін або не захистив його з неповажної причини, вважається таким, що має академічну заборгованість.

Курсові проекти, що містять оригінальні обгрунтовані рішення, нові теоретичні, технологічні і конструкторські пророблення і пропозиції щодо практичної їх реалізації, висуваються на конкурс курсових проектів, міські і республіканські огляди студентських робіт, а проекти, що мають найбільшу наукову і практичну цінність, – на всеукраїнський конкурс наукових праць «Студент і науково-технічний прогрес».

# 1 ВИБІР РОБОЧОЇ ТОЧКИ АКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА ТА РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ГІС

## 1.1 Розрахунок робочого режиму біполярного транзистора

Робочий режим, тобто режим підсилення (mode of strengthening), це режим, коли транзистор працює з навантаженням  $R_n$  у вихідному колі. Зазвичай опір навантаження (resistance of loading) в багато раз менший вихідного опору (resistance of output)  $R_{вих}$  самого транзистора. Зокрема ця умова виконується, якщо навантаження шунтоване малим вхідним опором (input resistance) наступного каскаду. В таких випадках для спрощення розрахунків можна приблизно вважати, що транзистор працює в режимі без навантаження.

В залежності від того, в якому режимі працює джерело коливачь у вхідному колі, підсилення буде відбуватися з більшими або меншими лінійними спотвореннями. Розглянемо два найбільш характерні випадки. Нехай джерело коливачь створює синусоїдальну електрорушійну силу (ЕРС)  $e_{ex} = E_{m,ex} \sin \omega t$  і має внутрішній опір  $R_{i,k}$ . Будемо вважати цей опір і опір навантаження  $R_n$  лійними. Вхідний опір транзистора  $R_{ex}$ , як відомо, нелінійний, оскільки нелінійна вхідна характеристика (input description)  $i_{ex} = f(u_{ex})$ , що відображає нелінійні властивості самого транзистора.

Оскільки опір  $R_{ex}$  у транзисторів малий, найбільш часто буває, що  $R_{вх} \ll R_{i,k}$  і тоді джерело коливачь працює як генератор струму, тобто в режимі, близькому до короткого замикання. Вхідний змінний струм в цьому випадку  $I_{вх} \approx E_{вх} / R_{i,k}$  і є синусоїдальним, оскільки ЕРС  $E_{вх}$  синусоїдальна, а опір  $R_{i,k}$  лінійний. Змінний струм на виході приблизно пропорційний вхідному струму і також синусоїдальний. Очевидно і вихідна напруга  $U_{вх} = I_{вх} R_n$  буде синусоїдальною, тобто підсилення відбувається з малими нелійними спотвореннями. Як наслідок, хоча вхідна напруга  $U_{вх} = I_{вх} R_{вх}$  виявляється спотвореною (несинусоїдальною), оскільки  $R_{вх}$  нелінійний, проте на виході отримують майже не спотворені підсилені коливачь. Невеликі нелійнні спотворення все ж таки спостерігаються через те, що залежність  $I_{вх}$  від  $I_{вх}$  не є строго лінійною.

Значно рідше буває, що  $R_{вх} \gg R_{i,k}$ , оскільки джерела коливачь з дуже малим внутрішнім опором зустрічаються не так часто. В цьому випадку струм  $I_{вх} \approx E_{вх} / R_{вх}$  і є несинусоїдальним, оскільки  $R_{вх}$  нелінійний. Але тоді і вихідний струм, пропорційний вхідному струму, буде несинусоїдальним, а відповідно, і вихідна напруга буде спотворена, не дивлячись на те, що вхідна напруга в даному режимі приблизно дорівнює ЕРС і має синусоїдальну форму.

Найпростіший розрахунок робочого режиму є наближеним, що допустимо в багатьох випадках, оскільки параметри транзисторів мають розкид.

Якщо  $R_H \ll R_{вх}$ , то коефіцієнт підсилення (coefficient of strengthening) за струмом  $K_i$  приблизно дорівнює  $h_{21}$ , тобто  $K_i \approx \alpha$  для схеми СБ і  $K_i \approx \beta$  для схеми СЕ.

Коефіцієнт підсилення каскаду за напругою

$$K_u = U_{m \text{ вих}} / U_{m \text{ вх}} = I_{m \text{ вих}} R_H / (I_{m \text{ вх}} R_{вх}) = K_i R_H / R_{вх}. \quad (1.1)$$

Вхідний опір каскаду можна наближено вважати рівним параметру  $h_{11}$  транзистора:

$$R_{вх} \approx h_{11}, \quad (1.2)$$

тоді

$$K_u \approx R_H h_{21} / h_{11}. \quad (1.3)$$

Але  $h_{21} / h_{11} = y_{21}$  і, відповідно, можна написати

$$K_u \approx R_H y_{21}. \quad (1.4)$$

Виведення формул для більш повного розрахунку режиму підсилення ґрунтується на використанні рівнянь

$$U_{m1} = h_{11} I_{m1} + h_{12} U_{m2}, \quad (1.5)$$

$$I_{m2} = h_{21} I_{m1} + h_{22} U_{m2}. \quad (1.6)$$

Виразимо  $U_{m2}$  через  $I_{m2}$ . При цьому врахуємо, що  $U_2 = E_2 - I_2 R_2$ . Тоді  $\Delta U_2 = -\Delta I_2 R_2$ , оскільки приріст постійної величини  $E_2$  дорівнює нулю. Приріст можна розглядати як амплітуди; отримаємо  $U_{m2} = -I_{m2} R_2$ . Знак

«мінус» показує, що між змінами  $U_2$  і  $I_2$  існує фазовий зсув на  $180^\circ$ .  
 Перепишемо рівняння (1.5) і (1.6), замінивши  $U_{m2}$  на  $-I_{m2}R_n$ :

$$U_{m1} = h_{11}I_{m1} - h_{12}I_{m2}R_n, \quad (1.7)$$

$$I_{m2} = h_{21}I_{m1} - h_{22}I_{m2}R_n. \quad (1.8)$$

Розв'яжемо друге рівняння відносно  $I_{m2}$ :

$$I_{m2} + h_{22}I_{m2}R_n = h_{21}I_{m1}; \quad (1.9)$$

$$I_{m2}(1 + h_{22}R_n) = h_{21}I_{m1}. \quad (1.10)$$

Поділивши обидві частини останньої нерівності на  $1 + h_{22}R_n$  і на  $I_{m1}$ , отримаємо

$$I_{m2}/I_{m1} = K_i = h_{21}/(1 + h_{22}R_n) = h_{21}R_{вих}/(R_{вих} + R_n), \quad (1.11)$$

при  $R_n \ll R_{вих}$  отримуємо  $K_i \approx h_{21}$ .

Поділивши на  $I_{m1}$  обидві частини рівняння (1.7), отримаємо формулу для  $R_{вх}$ :

$$U_{m1}/I_{m1} = R_{вх} = h_{11} - h_{12}cR_n. \quad (1.12)$$

При малому  $R_n$  і з врахуванням того, що значення мале (значно менше одиниці), отримуємо  $R_{вх} \approx h_{11}$ .

Знаючи коефіцієнти підсилення  $K_i$  і  $K_u$ , при заданому вхідному струмі або вхідній напрузі можна знайти відповідні їм на виході, а також вхідну і вихідну потужність і коефіцієнт підсилення за потужністю.

Наприклад, якщо заданий вхідний струм  $I_{max}$ , то

$$U_{m \text{ вх}} = I_{m \text{ вх}} R_{\text{вх}} \approx I_{m \text{ вх}} h_{11}, \quad (1.13)$$

$$P_{\text{вх}} = 0,5 I_{m \text{ вх}} U_{m \text{ вх}} \quad (1.14)$$

$$I_{m \text{ вих}} = K_i I_{m \text{ вх}} \approx I_{m \text{ вх}} h_{21}, \quad (1.15)$$

$$I_{m \text{ вих}} = K_u U_{m \text{ вих}} \quad \text{або} \quad U_{m \text{ вих}} = I_{m \text{ вих}} R_{\text{н}}, \quad (1.16)$$

$$P_{\text{вих}} = 0,5 I_{m \text{ вих}} U_{m \text{ вих}}, \quad (1.17)$$

$$K_p = K_u K_i. \quad (1.18)$$

Розглянутий найпростіший розрахунок режиму підсилення за допомогою параметрів транзистора роблять при малих амплітудах коливань, оскільки їх не можна показати на характеристиках і графоаналітичний розрахунок неможливий.

Слід відмітити, що інколи коефіцієнтом підсилення транзисторного каскаду за напругою вважають відношення вихідної напруги до ЕРС джерела підсилювальних коливань ( $E_{m \text{ вх}}$ ). Це має певний зміст, оскільки через малий вхідний опір транзистора  $U_{m \text{ вх}}$  звичайно значно менше  $E_{m \text{ вх}}$ . Відповідно до цього змінюється і розрахунок коефіцієнта підсилення каскаду за напругою і потужністю. Значення  $K_u$  і  $K_p$  розраховані таким чином, будуть залежати від співвідношення між вхідним опором транзистора і опором джерела коливань  $R_{i,к}$ .

Перейдемо зараз до графоаналітичного розрахунку робочого режиму транзистора. Цей метод розрахунку більш точний, оскільки враховує нелінійні властивості транзистора. Крім того, графоаналітичний метод дозволяє зробити більш повний розрахунок: визначаються величини, пов'язані не тільки зі змінними, а й з постійними складовими струмів і напруги.

Для графоаналітичного розрахунку користуються так званими робочими характеристиками. Оскільки транзистор завжди працює із вхідним струмом, необхідно користуватися вхідними і вихідними характеристиками (output descriptions). Як приклад розглянемо ці

характеристики для каскаду зі спільним емітером, що має опір навантаження  $R_n$ , однаковий для постійного і змінного струму.

В сімействі вихідних характеристик (рис. 1.1, а) побудова робочої характеристики, яка інакше називається лінією навантаження (line of loading), відбувається за заданими або вибраними значеннями напруги джерела живлення  $E_2$  і опору навантаження  $R_n$ .

Оскільки для вихідного кола транзистора справедливе рівняння

$$E_2 = U_{k-e} + I_k R_n, \quad (1.19)$$

то побудова лінії навантаження відбувається по точках її перетину з осями координат.

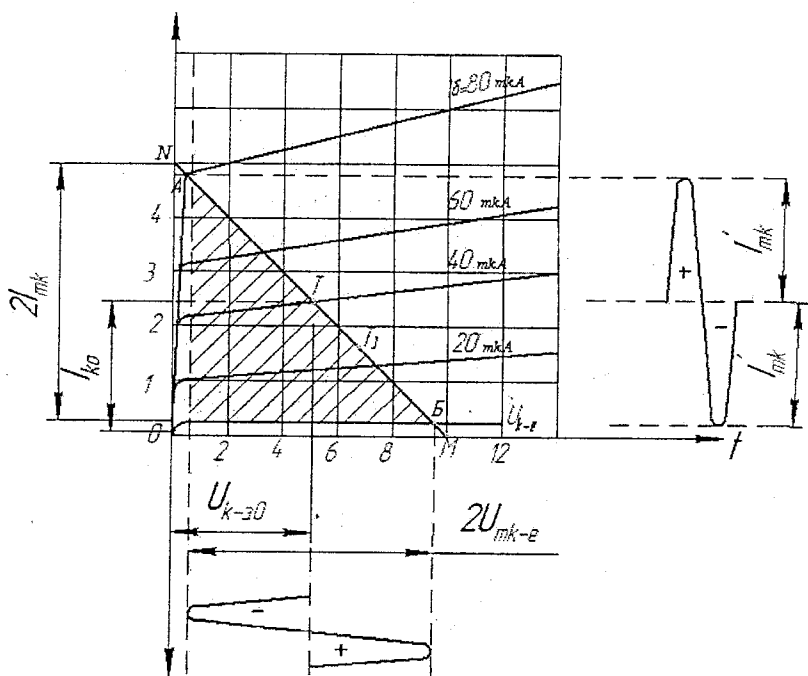


Рисунок 1.1, а – Графоаналітичний розрахунок режиму підсилення транзистора за допомогою вихідних і вхідних характеристик

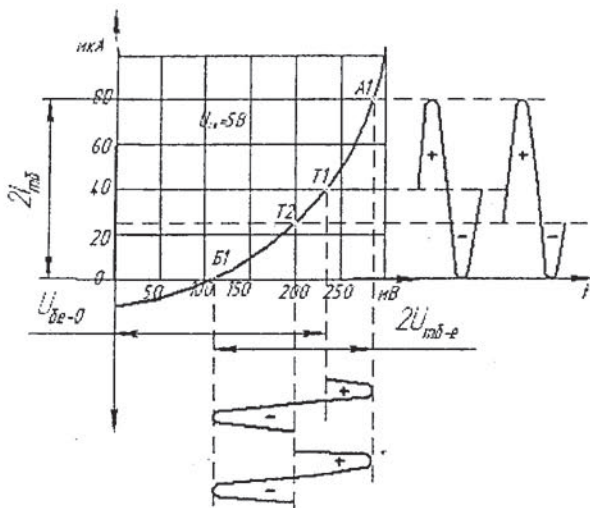


Рисунок 1.1, б

При  $I_k = 0$  отримуємо  $E = U_{к-е}$ , тобто відкладаємо  $E$  по осі напруги (точка М). А при  $U_{к-е} = 0$  отримуємо  $I_k = E_2 R_H$  і відкладаємо це значення по осі струму (точка N).

З'єднуючи ці точки по прямій, отримуємо лінію навантаження (робочу характеристику). Наприклад, для отримання великої вихідної потужності слід взяти робочу ділянку АБ (рис. 1.1, а). За проєкціями робочої ділянки на осі координат визначасмо подвійні амплітуди перших гармонік змінних складових вихідного струму (output current) і вихідної напруги (output voltage)  $2I_{мк}$  і  $2U_{мк-е}$ . Після цього можна знайти вихідну потужність

$$P_{вих} = 0,5 I_{мк} U_{мк-е}. \quad (1.20)$$

На рис. 1.1, а заштрихований так званий трикутник корисної потужності. Його гіпотенузою є робоча ділянка АБ, а катетами – відповідно подвійні амплітуди струму  $2I_{мк}$  і напруги  $2U_{мк-е}$ . Нескладно обчислити, що площа трикутника відповідає чотирьом корисним потужностям  $2I_{мк} U_{мк-е}$ .

Нехай опір джерела коливань  $R_{i.k.}$  в багато разів більший вхідного опору  $R_{вх}$  транзистора. Тоді нелінійність опору  $R_{вх}$  практично можна не враховувати, оскільки властивості вхідного кола визначаються опором  $R_{i.k.}$ . Якщо останній лінійний, то при синусоїдальній ЕРС джерела коливань струм  $I_k$  також буде синусоїдальним. В цьому випадку робоча точка Т відповідає струму  $I_{б0}$ , який є середнім відносно точок бази т. А і т. Б. Робоча точка Т визначає амплітуду першої гармоніки вхідного струму  $I_{мб}$  (як половину різниці струмів бази, що відповідає точкам А і Б), а також струм  $I_{к0}$  і напруга  $U_{к-е0}$  в режимі спокою. За цими значеннями можна знайти потужність  $P_{к0}$ , що виділяється в транзисторі в режимі спокою, яка не повинна перевищувати максимальної потужності  $P_{к макс}$ , що є одним із параметрів транзистора:

$$P_{к0} = I_{к0}U_{к-е0} \leq P_{к макс}. \quad (1.21)$$

Якщо є сімейство вихідних характеристик транзистора, то можна побудувати вхідну робочу характеристику шляхом перенесення по точках в це сімейство вхідної робочої характеристики. Однак в довідниках звичайно не наводиться сімейство вхідних характеристик, а даються лише характеристики для  $U_{к-е}=0$  і для деякого  $U_{к-е}>0$  або навіть тільки одна остання крива. Оскільки вхідні характеристики для різних  $U_{к-е}$ , що перевищують 1В, розташовані дуже близько одна до одної, то і робоча характеристика мало відрізняється від них. Тому розрахунок вхідних струмів і напруги можна наближено робити за вхідною характеристикою при  $U_{к-е}>0$ , взятою із довідника. На цю криву переносяться точки А, Т і Б вихідної робочої характеристики, і утворюються точки А1, Т1, і Б1 (рис. 1.1, б). Проекція робочої ділянки АБ на вісь напруги виражає подвійну амплітуду вхідної напруги  $2U_{мб-е}$ . Знаючи  $I_{мб}$  і  $U_{мб-е}$ , можна розрахувати вхідний опір  $R_{вх}$  і вхідну потужність каскаду  $P_{вх}$  за формулами:

$$R_{вх} = U_{мб-е} / I_{мб}, \quad (1.22)$$

$$P_{вх} = 0,5 U_{мб-е} I_{мб}. \quad (1.23)$$

Робоча точка Т1 визначає також постійну напругу бази  $U_{б-е0}$ . Знаючи  $U_{б-е0}$  і вважаючи приблизно, що постійна складова струму бази в режимі

підсилення дорівнює  $I_{\delta 0}$ , неважко розрахувати опір гасильного резистора  $R_{\delta}$ , через який від джерела  $E_2$  буде подаватися постійна напруга на базу:

$$R_{\delta} = (E_2 - U_{\delta - e0}). \quad (1.24)$$

Коефіцієнти підсилення каскаду за струмом (напругою, потужністю) визначаються за звичайними формулами:

$$K = I_{mk} / I_{mb}; \quad K = U_{mk-e} / U_{mb-e}; \quad K = K_i K_u. \quad (1.25)$$

Наближено можна вважати, що постійна складова струму колектора в режимі підсилення дорівнює струму спокою  $I_{k0}$ . Тоді потужність  $P_0$ , що витрачається джерелом живлення  $E_2$ , визначається за формулою

$$P_0 = E_2 I_{k0}, \quad (1.26)$$

а ККД каскаду (правильніше ККД вхідного кола)

$$\eta = P_{вн} / P_0. \quad (1.27)$$

При робочій точці  $T$  вхідний струм мало спотворений: обидві його півхвилі мають майже однакові амплітуди. А вхідна напруга при цьому дуже спотворена. В неї додатна півхвиля за амплітудою значно менша, ніж від'ємна. Проте, вихідний струм і вихідна напруга стають мало спотвореними. Такий результат, як вже було показано раніше, характерний для режиму, в якому джерело коливаний працює як генератор струму (при  $R_{i.k} \gg R_{вх}$ ) і задає на вхід транзистора синусоїдальний струм. Якщо джерело коливаний працює як генератор напруги (при  $R_{i.k} \ll R_{вх}$ ) і задає на вхід синусоїдальну напругу, то робоча точка переходить в положення  $T_2$  і вихідний струм стає дуже спотвореним. Відповідно будуть дуже спотворені вихідний струм і вихідна напруга, оскільки на вихідних характеристиках робоча точка буде знаходитись в положенні  $T_3$  і вона розділить робочу ділянку АБ на дві нерівні частини.

Коли амплітуди додатної і від'ємної півхвилі струму колектора неоднакові (позначимо їх відповідно  $I_{mk}'$  і  $I_{mk}''$ ), то можна знайти амплітуду другої гармоніки цього струму  $I_{mk2}$  і рівний їй приріст постійної складової  $\Delta I_{k0}$  за формулою

$$I_{mk2} = \Delta I_{k0} = 0,25(I_{mk}' - I_{mk}''). \quad (1.28)$$

Тоді постійна складова (середнє значення) струму колектора в режимі підсилення

$$I_{k,cp} = I_{k0} + \Delta I_{k0}. \quad (1.29)$$

Для схеми з СЕ звичайно  $I_{mk}' < I_{mk}''$ . Відповідно,  $\Delta I_{k0} < 0$  і  $I_{k,cp} < I_{k0}$ .

Зміна постійної складової колектора при переході від режиму спокою до режиму підсилення є ознакою нелінійних спотворень. Коли міліамперметр, що вимірює цей струм, показує одне і те саме значення при відсутності або наявності коливань на вході, то, відповідно, спотворень немає.

Принципи графічних побудов для підсилення з невеликими спотвореннями залишаються в силі і для багатьох інших режимів, з іншим положенням робочої точки. Деякі зміни в побудовах будуть для трансформаторного включення навантаження і каскадів з навантаженням в вигляді резонансного коливального контуру (див. рис. 1.1). Для подібних схем інакше будується лінія навантаження. Це пояснюється тим, що резонансний контур або навантажений трансформатор має різний опір постійної і змінної складової колекторного струму. Котушка контуру або первинна обмотка трансформатора для постійного струму являє порівняно малий опір. Можна знехтувати втратою постійної споживаючої напруги на цьому малому опорі і вважати наближено, що постійна колекторна напруга дорівнює напрузі джерела:

$$U_{k-c0} \approx E_2 \quad (1.30)$$

Для змінної складової колекторного струму опір резонансного контуру великий – тисячі і десятки тисяч ом. Таким може бути опір змінному струму із боку первинної обмотки навантаженого трансформатора. Відповідно за постійним струмом транзистор працює в

режимі без навантаження, а за змінним струмом – в режимі навантаження. Основне рівняння робочого режиму (1.19) тепер можна писати інакше:

$$U_{к-с} = E_2 - \Delta I_k R_{н}. \quad (1.31)$$

Замість струму  $I_k$  слід враховувати його приріст  $\Delta I_k$ , тобто змінну складову струму, оскільки тільки для неї існує навантажувальний опір  $R_{н}$ . Під  $\Delta I_k$  тут слід розуміти зміну струму з достатньо великою частотою, Наприклад з резонансною частотою контуру, оскільки тільки на цій частоті контур має великий і чисто активний опір.

Особливості лінії навантаження трансформаторного або резисторного каскаду зводиться до того, що робочій точці відповідає напруга  $E_2$ . При побудові лінії навантаження резисторного каскаду на осі струму від початку координат відкладається відрізок  $E_2/R_{н}$ , а в даному випадку такий відрізок відкладається від рівня струму  $I_{к0}$ , тобто характеристика проходить вище. Цікаво, що при від'ємній півхвилі струму, коли колекторний струм зменшується ( $-\Delta I_k < 0$  і  $I_k < I_{к0}$ ), напруга колектора стає більше  $E_2$ . Вся ділянка ТМ робочої характеристики відповідає колекторним напругам, що перевищують напругу джерела.

Це дивно, на перший погляд, явище пояснюється наявністю в колекторному колі накопичувачів енергії – індуктивності первинної обмотки трансформатора або індуктивності і ємності коливального контуру. Дійсно, якщо  $\Delta I_k > 0$ , струм зростає і відбувається накопичення енергії в магнітному полі котушки. Приріст струму має такий самий знак, як і сам струм, спад напруги на  $R_{н}$  віднімається з  $E_2$  і напруга колектора знижується. В даному випадку виникаюча в котушці контуру або обмотці трансформатора ЕРС самоіндукції направлена зустрічно струму і протидіє його наростанню. Вона направлена також зустрічно ЕРС джерела  $E_2$  і напруга колектора стає менше  $E_2$ .

При зменшенні струму відбувається зворотнє явище. Електрорушійна сила самоіндукції змінює знак і підтримує струм. Вона складається з ЕРС джерела  $E_2$  і напруга колектора зростає. Іншими словами, спад напруги не змінює знак і не віднімається від  $E_2$ , а додається до нього. Це ж слідує з рівняння (1.31). Коли  $I_k < 0$ , значення  $I_k R_{н}$  додається до  $E_2$ .

Таким чином, в трансформаторному або резонансному підсилювальному каскаді миттєва напруга колектора може бути значно вища  $E$ . В іншому графічні побудови і обчислення для режиму підсилення виконуються попереднім порядком за наведеними вище формулами.

### 1.1.1 Приклад розрахунку вихідного каскаду на біполярному транзисторі

У схемі вихідного каскаду, розроблюваної ГІС, використовується транзистор КТ104А. Знайдемо значення основних величин, що характеризують роботу схеми.

Лінія навантаження побудована за значеннями  $E_2=30$  В і  $R_n=1$  кОм. За цими даними знаходимо струм:

$$I_k = \frac{E_2}{R_n} \quad (1.32)$$

$$I_k = \frac{E_2}{R_n} = \frac{30}{1000} = 30 \text{ (мА)}.$$

Наносимо лінію навантаження на рисунку 1.2 та визначаємо з нього основні параметри.

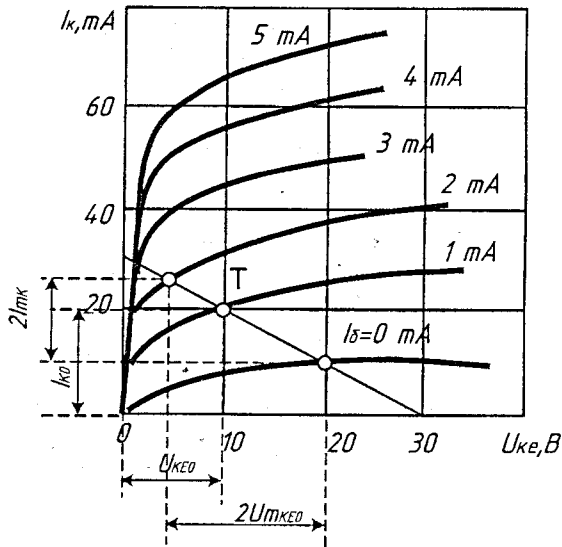


Рисунок 1.2 – Вихідна характеристика з побудованою навантажувальною прямою для розрахунку режиму роботи транзистора КТ104А

На даному рисунку перетини лінії навантаження з вихідними струмами дозволяють визначити робочі характеристики транзистора.

Робоча ділянка відповідає значенням:

$$2I_{mk} = 12,5 \text{ (мА)},$$

$$2U_{mk-e} = 16 \text{ (В)},$$

$$2I_{mб} = 2 \text{ (мА)}.$$

Далі знайдемо:

$$I_{mб} = 1 \text{ (мА)},$$

$$U_{mk-e} = 8 \text{ (В)},$$

$$I_{mk} = 6,25 \text{ (мА)}.$$

Вихідну потужність знаходять за формулою:

$$P_{вих} = 0,5 I_{mk} U_{mk-e}, \quad (1.33)$$

де  $I_{mk}$  — максимальний струм колектора;

$U_{mk-e}$  — максимальна напруга на ділянці колектор — емітер.

Після підстановки значень у вираз (1.33) буде отримано

$$P_{вих} = 0,5 \cdot 6,25 \cdot 8 = 25 \text{ (мВт)}.$$

Робоча точка Т визначає значення:

$$I_{с} = 1 \text{ (мА)};$$

$$I_{к0} = 20 \text{ (мА)};$$

$$U_{к-е0} = 10 \text{ (В)}.$$

Розрахуємо потужність, що виділяється в транзисторі:

$$P_{k0} = I_{k0} \cdot U_{k-e0}. \quad (1.34)$$

Підставляємо дані до виразу (1.34) та отримаємо:

$$P_{K0} = 20 \cdot 10 = 200 \text{ (мВт)}.$$

По точках А<sub>1</sub>, Б<sub>1</sub>, Т<sub>1</sub> вхідної характеристики знаходимо  $2U_{m\delta-e} = 0,23 \text{ (В)}$ , тобто  $U_{m\delta-e} = 0,115 \text{ (В)}$ .

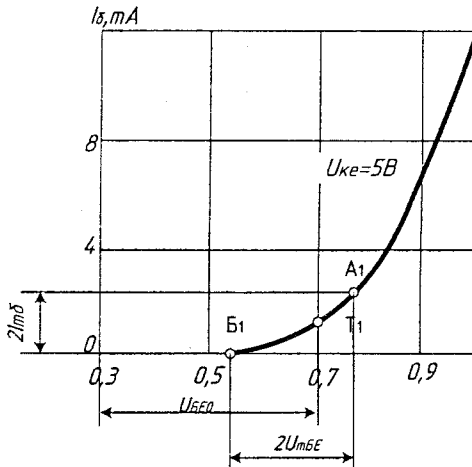


Рисунок 1.3 – Вхідна характеристика для розрахунку режиму роботи транзистора КТ104А

Тепер розраховує вхідну потужність та вхідний опір за формулами:

$$P_{ax} = 0,5 \cdot I_{m\delta} \cdot U_{m\delta-e}, \quad (1.35)$$

$$R_{ex} = \frac{U_{m\delta-e}}{I_{m\delta}}. \quad (1.36)$$

Вносимо дані до формул (1.35-1.36) та отримаємо:

$$P_{\text{ex}} = 0,5 \cdot 1 \cdot 0,115 = 0,0575 \text{ (мВт)},$$

$$R_{\text{ex}} = \frac{0,115}{1} = 0,115 \text{ (Ом)}.$$

Далі знайдемо коефіцієнти підсилення за струмом, напругою та потужністю за виразами:

$$K_I = \frac{2I_{\text{мк}}}{2I_{\text{мб}}}; \quad (1.37)$$

$$K_U = \frac{2U_{\text{мк-е}}}{2U_{\text{мб-е}}}; \quad (1.38)$$

$$K_P = K_I \cdot K_U; \quad (1.39)$$

$$K_P = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (1.40)$$

Підставимо дані у вирази (1.37-1.40) та отримаємо:

$$K_I = \frac{2 \cdot 6,25}{2 \cdot 1} = 6,25;$$

$$K_U = \frac{2 \cdot 8}{2 \cdot 0,115} = 69,565;$$

$$K_P = 6,25 \cdot 69,565 = 434,782;$$

$$K_P = \frac{25}{0,0575} = 434,78.$$

Потужність, що використовується джерелом  $E_2$ , має вигляд:

$$P_0 = E_2 \cdot I_{K0}, \quad (1.41)$$

Внесемо в формулу (1.41) дані:

$$P_0 = 30 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 600 \text{ (мВт)}.$$

Коефіцієнт корисної дії знаходиться за формулою:

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_0}. \quad (1.42)$$

Підставимо в (1.42) отримані раніше дані:

$$\eta = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{600 \cdot 10^{-3}}; \eta = 4,16 \%$$

## 1.2 Розрахунок робочого режиму польового транзистора

Польовий транзистор (field-effect transistor) може бути включений за схемою зі спільним витоком, спільним стоком і спільним затвором. В більшості практичних схем на польових транзисторах використовують автоматичне зміщення за рахунок власного струму польового транзистора на резисторі  $R_u$ . На достатньо низьких частотах, коли опором конденсаторів можна знехтувати в порівнянні з  $R_u$ , то коефіцієнт підсилення за напругою для схеми зі спільним витоком визначається з такого виразу:

$$K_U = S_{\text{MAX}} \cdot \frac{R_I \cdot R_H}{R_I + R_H}, \quad (1.43)$$

де  $R_I$  – динамічний опір польового транзистора, що визначається таким чином:

$$R_I = dU_C / dI_C \text{ при } U_{\text{зв}} = \text{const}. \quad (1.44)$$

При автоматичному зміщенні режим роботи каскада визначається системою рівнянь:

$$\begin{cases} I_C = I_{00} \cdot (1 - U_{\text{зв}} / U_{\text{ВУС}})^2, \\ U_{\text{зв}} = I_C \cdot R_B. \end{cases} \quad (1.45)$$

Із системи рівнянь (1.45) знаходиться значення струму стоку в робочій точці польового транзистора:

$$I_C = \frac{U_{ВЛХ}}{R_B} + \frac{U_{ВЛХ}^2}{2 \cdot R_I^2 \cdot I_{C0}} \left( 1 - \sqrt{\frac{4 \cdot I_{C0} \cdot R_B}{U_{ВЛХ}} + 1} \right). \quad (1.46)$$

Значення опору в колі витоку знаходиться з рівняння (1.46) при відомому значенні струму стоку:

$$R_B = \frac{U_{ВЛХ}}{I_C} \left( 1 - \sqrt{I_C / I_{C0}} \right). \quad (1.47)$$

Для каскаду зі спільним стоком коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = \frac{S \cdot R_E}{1 + S \cdot R_E}, \quad (1.48)$$

де

$$R_E = \frac{R_B \cdot R_I}{R_I + R_I}. \quad (1.49)$$

Вхідний опір каскаду зі спільним стоком визначається опором  $R_3$ . Вихідний опір каскаду зі спільним стоком визначається за формулою

$$R_{ВЛХ} = \frac{R_I \cdot R_B}{(S \cdot R_I + 1) \cdot R_B + R_I}. \quad (1.50)$$

Коефіцієнт підсилення за напругою для схеми зі спільним затвором

$$K_U = \frac{(S \cdot R_I + 1) \cdot R_B}{(S \cdot R_I + 1) \cdot R_I + R_I + R_B}, \quad (1.51)$$

де  $R_I$  – внутрішній опір генератора вхідного сигналу.

Вхідний опір каскаду зі спільним затвором визначається формулою

$$R_{ВХ} = \frac{R_I + R_H}{1 + S \cdot R_I}, \quad (1.52)$$

а вихідний опір таким виразом

$$R_{ВЛХ} = \frac{R_I \cdot R_H}{R_I + R_H}. \quad (1.53)$$

Вибір робочої точки польового транзистора визначається максимальним вхідним опором, максимальною потужністю розсіювання, максимальною зміною струму стоку, максимальним коефіцієнтом

підсилення за напругою, наявністю напруги зміщення. Для досягнення максимальної вхідної напруги треба вибрати максимальну напругу живлення, значення якої обмежується допустимою напругою стоку польового транзистора. Оптимальне значення опору навантаження знаходиться таким чином:

$$R_H = \frac{E_{ж} - U_{відс}}{2 \cdot I_c} \quad (1.54)$$

Мінімальне значення потужності розсіювання досягається при мінімальних значеннях напруги і струму стоку. Максимальний коефіцієнт підсилення при невеликих значеннях опору навантаження досягається при роботі польового транзистора в точці з максимальною крутістю.

### 1.3 Розрахунок показників надійності гібридних ІМС за раптовими відмовами

В основу статистичних методів розрахунку інтенсивностей відмов покладено припущення, що будь-яку мікросхему можна розглядати як функціональний вузол, що складається із різномірних “дискретних” елементів. Таким чином, при розрахунках слушний експоненційний закон надійності. Вказані припущення дозволяють розраховувати інтенсивність відмов гібридних ІМС простим додаванням інтенсивностей відмов елементів, з яких складається мікросхема. На практиці найбільше розповсюдження отримала методика статистичного розрахунку надійності ІМС, що базується на таких припущеннях: ми маємо справу тільки з раптовими відмовами; коефіцієнти режиму роботи ІМС є функцією тільки плюсової температури навколишнього середовища; вплив електричного режиму роботи та інших експлуатаційних факторів визначається відповідними коефіцієнтами.

Розрахунок надійності гібридних ІМС на етапі їхньої розробки в більшості випадків оснований на визначенні інтенсивності відмов (intensity refusal) і наступному обчисленні ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  за необхідний проміжок часу. Для розрахунку надійності гібридних ІМС у цей час застосовують в основному статистичні методи визначення  $\lambda(t)$ , які базуються на припущенні, що гібридна ІМС являє собою функціональний вузол з різномірних дискретних елементів, а відмова будь-якого з них приводить до відмови ІМС. При цьому функціонально-надійнісна схема складається з послідовного ланцюжка компонентів ненадійності, які працюють одночасно, а їхні відмови є випадковими й незалежними подіями, тобто для такої схеми справедливий експоненційний закон надійності. Отже, інтенсивність відмови ІМС визначається простим підсумовуванням інтенсивності відмов компонентів ненадійності.

Як компоненти ненадійності гібридних ІМС використовують елементи й компоненти схеми, а також елементи конструкції ІМС (рис. 1.4), для яких відомі або можуть бути визначені значення інтенсивності відмов: плівкові резистори 1, конденсатори 2 і провідники 3, дискретні кристали напівпровідникових приладів 4 й ІМС 12, дискретні резистори 5 і конденсатори 6, контакти між плівковими провідниками 7, дровтові перемички 8, зварені й паяні з'єднання 9, підкладка 10, корпус 11 й ін.

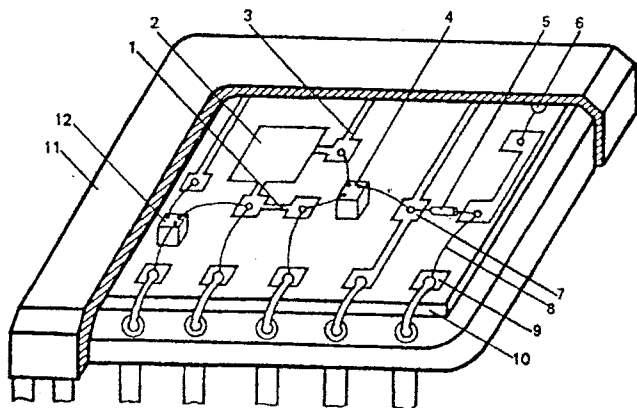


Рисунок 1.4 – Конструкція гібридної ІМС

Розрахунок надійності роблять після розробки топології й конструкції гібридної ІМС з урахуванням реальних режимів роботи елементів і компонентів і впливу факторів навколишнього середовища.

Вхідними даними для розрахунку надійності гібридних ІМС є:

- принципова електрична схема й режим роботи, топологія, конструкція, технологія виготовлення і складання ІМС;
- значення інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  для кожного компонента ненадійності при нормальних умовах (температура  $T = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , вологість  $(60 \pm 20) \%$ , атмосферний тиск 840–1067 Па, номінальний електричний режим);
- час безвідмовної роботи  $t$  або мінімальний час напрацювання на відмову і умови експлуатації;
- залежність інтенсивності відмов окремих компонентів ненадійності  $\lambda_i$  від електричного режиму й зовнішніх умов:

$$\lambda_i = \alpha_i k_i \lambda_{0i}, \quad (1.55)$$

де  $\alpha_i = f(T, K_H)$  – коефіцієнт, що враховує вплив навколишньої температури й електричного навантаження;

$k_i$  – коефіцієнт, що враховує впливи механічних навантажень, вологості й атмосферного тиску.

Значення інтенсивності відмов  $\lambda_{\Sigma}$  гібридної ІМС, що містить плату з повним набором плівкових елементів і компонентів з гнучким дротовим монтажем, при обліку режиму роботи й умов експлуатації відповідно до викладеної методики визначається виразом:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Sigma} = & [N_{\text{ІМС}} \lambda_{\text{вІМС}} \alpha_{\text{ІМС}} + N_T \lambda_{\text{от}} \alpha_T + N_D \lambda_{\text{од}} \alpha_D + \\ & + N_R \lambda_{\text{ор}} \alpha_R + N_C \lambda_{\text{оч}} \alpha_C + N_m \lambda_{\text{ом}} \alpha_m + N_{\text{кн}} \lambda_{\text{окн}} + \\ & + N_n \lambda_{\text{он}} \alpha_n + \left( \sum_{i=1}^k N_{\text{вІМС}i} + 3N_T + 2N_D + 2N_n \right) \lambda_{\text{впр}} + \\ & + 2 \left( \sum_{i=1}^k N_{\text{вІМС}i} + 3N_T + 2N_D + 2N_n + 2N_e \right) \lambda_{\text{всод}} + \\ & + \lambda_{\text{он}} + \lambda_{\text{ок}} ] k_i, \end{aligned} \quad (1.56)$$

де  $N_{\text{ІМС}}, N_T, N_D, N_R, N_C, N_n, N_{\text{кп}}, N_H, N_{\text{ВІМС}}, N_B$ , – кількість кристалів ІМС, транзисторів, діодів, плівкових резисторів, конденсаторів, провідників і контактних площадок, націпних пасивних елементів (компонентів), виводів  $i$ -й ІМС і виводів корпусу, відповідно;

$\lambda_{\text{вІМС}}, \lambda_{\text{от}}, \lambda_{\text{од}}, \lambda_{\text{оч}}, \lambda_{\text{ор}}, \lambda_{\text{ом}}, \lambda_{\text{окн}}, \lambda_{\text{он}}, \lambda_{\text{всод}}, \lambda_{\text{впр}}, \lambda_{\text{од}}$  – інтенсивності відмов напівпровідникових ІМС, транзисторів, діодів, плівкових резисторів, конденсаторів, провідників і контактних площадок, навісних пасивних елементів (компонентів), дротових перемичок, з'єднань, підкладки й корпусу, відповідно;

$\alpha$  – поправкові коефіцієнти, що враховують вплив температури й електричного навантаження на відповідний компонент ненадійності;

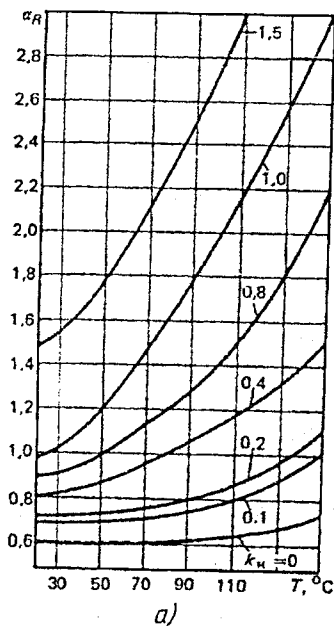
$k = N_{\text{ІМС}}$  – кількість напівпровідникових ІМС.

У випадку застосування в гібридній ІМС твердого монтажу компонентів, вираз (1.56) спрощується. Розрахункове значення ймовірності безвідмовної роботи гібридної ІМС за час  $t$

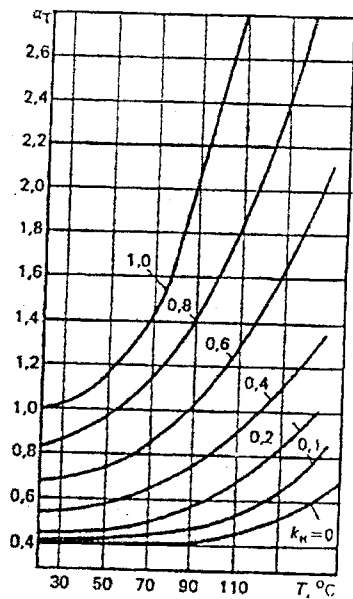
$$P_p(t) = \exp(-\lambda_{\Sigma} t). \quad (1.57)$$

Середні статистичні значення, що рекомендують для розрахунків, інтенсивності відмов основних елементів і компонентів гібридних ІМС такі:

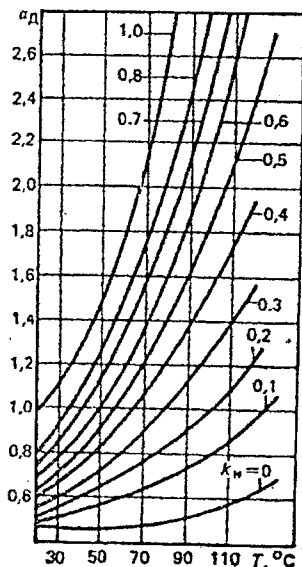




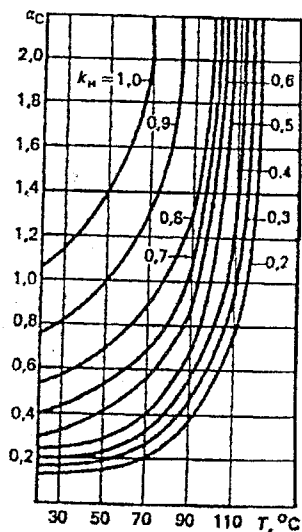
a)



б)



в)



г)

Рисунок 1.5 – Залежності поправкових коефіцієнтів від температури й коефіцієнта навантаження  $k_n$  для плівкових резисторів (а), транзисторів (б), діодів (в) і плівкових конденсаторів (г)

Коефіцієнт навантаження транзисторів і діодів визначають за формулою

$$k_{HT} = k_{HD} = \max \left\{ \begin{array}{l} k_{HI} = I_i / I_{i\text{дон}}, \\ k_{HU} = U_i / U_{i\text{дон}}, \end{array} \right. \quad (1.60)$$

де  $I_i$  – струм колектора  $i$ -го транзистора або відкритого діода;

$U_i$  – напруга на ділянці колектор – емітер  $i$ -го транзистора або на закритому діоді;

$I_{i\text{доп}}, U_{i\text{доп}}$  – допустимі значення струмів і напруги транзисторів і діодів.

Коефіцієнт навантаження дискретних резисторів

$$k_{nR} = k_{mR} = \frac{P_i}{P_{\text{дон}}}, \quad (1.61)$$

а плівкових резисторів

$$k_{nR} = \frac{P_i}{P_{\text{дон}}} = \frac{I_i \rho S}{(b_i^2 P_0)}. \quad (1.62)$$

Значення коефіцієнтів навантаження плівкових і дискретних конденсаторів визначаються співвідношенням

$$k_{nC} = \frac{U_i}{U_{\text{дон}}}. \quad (1.63)$$

Для різних умов експлуатації значення коефіцієнта  $k_1$ , що входить в (1.56) і враховує вплив механічних навантажень, таке: лабораторні 1,0; польові 1,07; корабельні 1,37; автомобільні 1,46; залізничні 1,54; літакові 1,65.

Значення коефіцієнта  $k_2$  залежно від вологості й температури становлять: 1,0 при вологості 60–70 % і  $T = 20 \div 40$  °С; 2,0 при вологості 90–98% і  $T = 20 \div 25$  °С; 2,5 при вологості 90 – 95 % і  $T = 30 \div 40$  °С.

Значення коефіцієнта  $k_3$  враховує вплив атмосферного тиску, змінюється в межах 1,0–1,45 залежно від зміни висоти від 1 до 40 км (зміна  $k_3$  становить приблизно 0,1 на кожні 5 км).

Розрахунок проектної надійності гібридних ІМС роблять у такому порядку:

1) за розробленою топологією і конструкцією складають функціонально-надійнісну схему й визначають кількість однотипних компонентів ненадійності  $N_{MC}, N_T, N_D, N_R, N_C, N_m, N_{ki}, N_n, N_B$ ;

2) за довідковими даними визначають значення  $\lambda_{0i}$  для кожного компонента ненадійності;

3) використовуючи вирази (1.58) – (1.63), розраховують електричний режим роботи для активних і пасивних елементів, визначають коефіцієнти навантаження  $k_m$ ;

4) залежно від умов експлуатації, користуючись залежностями на рис. 1.6, визначають коефіцієнти  $\alpha_R, \alpha_T, \alpha_D, \alpha_C$  (при цьому приймають  $\alpha_{MC} \approx \alpha_T$ );

5) за довідковими даними визначають значення коефіцієнта  $k_i$ , при цьому для безкорпусних гібридних ІМС  $k_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ , для корпусних гібридних ІМС  $k_i = k_1$ . Слід зазначити, що на такі компоненти ненадійності, як підкладка, з'єднання, дровові виводи й перемички, корпус, діють тільки зовнішні умови що характеризуються  $k_i$  тобто для них  $\lambda_i = \lambda_{0i} \cdot k_i$ ;

6) за допомогою виразу (1.56) визначають сумарну інтенсивність відмов спроектованої гібридної ІМС;

7) за заданим часом й отриманим значенням  $\lambda_{\Sigma}$ , використовуючи вираз (1.57), розраховують імовірність безвідмовної роботи й порівнюють її зі значенням, заданим у технічному завданні (ТЗ) або обговореним в технічних умовах (ТУ).

Оскільки в гібридних ІМС плівкові елементи формуються одночасно в певному технологічному циклі, властивості матеріалів і фізико-хімічні процеси супутнім відмовам, дуже корельовані. У цьому випадку в еквівалентній схемі надійності доцільно використати як компоненти ненадійності не окремі плівкові елементи, а комплекси (групи) однотипних елементів, виготовлених в одному технологічному циклі, а замість  $\lambda_C, \lambda_R$  й інших величин вводити питомі інтенсивності відмов для одиниці довжини резистивної плівки з певною шириною ( $\lambda_{0R}$ ), одиниці площі плівкових конденсаторів ( $\lambda_{0C}$ ), що ізолюють області для багат шарових комутаційних плат гібридних великих інтегральних схем (ВІС) ( $\lambda_{0n}$ ) та т. і. При цьому інтенсивності відмов груп однотипних елементів визначаються виразом

$$\lambda_R = \sum_{i=1}^k l_i \lambda_{R0i}; \lambda_C = \sum_{i=1}^m S_{0i} \lambda_{C0}; \lambda_n = \sum_{i=1}^l S_{ni} \lambda_{n0}, \quad (1.64)$$

де  $l_i$  – довжина резистора  $i$ -ї групи;

$S_{oi}, S_{Li}$  – площі взаємного перекриття металевих обкладинок у конденсаторах та ізолюючих областях.

При цьому розрахунок надійності стає більш доступним, його процедура спрощується. Необхідні значення питомих інтенсивностей відмов визначають шляхом випробувань спеціальних тестових структур.

Таким чином, розрахунок показників надійності за викладеною методикою дозволяє оцінити проектну надійність розроблюваної гібридної ІМС і якщо буде потреба вжити заходів для її підвищення.

### *Контрольні запитання*

1. Яке має бути співвідношення між вихідним опором та опором навантаження в режимі підсилення?
2. В якому випадку коефіцієнт підсилення за струмом біполярного транзистора приблизно дорівнює  $h_{21}$ ?
3. Як визначаються  $h$  параметри транзистора?
4. Згідно з яким рівнянням відбувається побудова лінії навантаження біполярного транзистора?
5. Яким чином знаходиться вихідна потужність підсилювального каскаду графоаналітичним методом?
6. Як визначити коефіцієнти підсилення підсилювального каскаду за струмом, напругою, потужністю графоаналітичним методом?
7. Як знаходиться коефіцієнт корисної дії підсилювального каскаду?
8. Що відноситься до компонентів ненадійності гібридних ІМС?
9. Як знаходиться сумарна інтенсивність відмов гібридних ІМС?
10. Яким чином визначаються коефіцієнти навантаження для резисторів, конденсаторів, діодів, транзисторів?
11. В яких межах знаходиться значення коефіцієнта, що враховує вплив атмосферного тиску?
12. Які відомі схеми включення біполярних транзисторів?
13. Які відомі схеми включення польових транзисторів?
14. Як визначається динамічний опір польового транзистора?

15. Як визначається вхідний опір каскаду зі спільним стоком?
16. Чим визначається вибір робочої точки польового транзистора?
17. Що треба для досягнення максимальної вхідної напруги польового транзистора?
18. Який вигляд мають стік-затворні характеристики польових транзисторів різних типів?
19. Який вигляд мають вихідні характеристики біполярних транзисторів для різних схем включення?
20. Який вигляд мають вхідні характеристики біполярних транзисторів для різних схем включення?
21. Як позначаються на схемах електричних принципів різні типи польових транзисторів?

## 2 КОНСТРУЮВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ГІС

### 2.1 Підкладки та матеріали елементів тонкоплівкових ГІС

Підкладки ГІС є діелектричною і механічною основами для розташування плівкових і націпних елементів і служать для тепловідведення. Хімічний склад матеріалів (materials) підкладок наведено в табл. 2.1, а електрофізичні параметри деяких з них – у табл. 2.2.

Для малопотужних ГІС можна застосовувати безлужне боросилікатне скло марки 341-1 і 348-3, а також ситали. У порівнянні із ситалами скло має меншу теплопровідність, що не дозволяє використовувати його при підвищених рівнях потужності. Ситал має ряд переваг перед склом. Він добре обробляється, витримує різкі перепади температури, має високий електричний опір, газонепроникний, а за механічною міцністю в 2-3 рази міцніший за скло. Для потужних ГІС застосовують кераміку (ceramics) полікорів, а для особливо потужних ГІС – берилієву кераміку, що має дуже високу теплопровідність.

Недоліком кераміки є значна шорсткість поверхні, що ускладнює одержання відтворених номіналів тонкоплівкових елементів. З цієї причини кераміку 22ХС використовують тільки для товстоплівкових ГІС. Збільшення класу чистоти обробки поверхні шляхом глазурування кераміки шаром безлужного скла приводить до значного зменшення теплопровідності.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад підкладок ГІС

Матеріал	Склад									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	LiO <sub>2</sub>
								K <sub>2</sub> O	MnO	
C41-1	60,5	13	–	9,5	9,0	7,5	–	0,25	–	–
C48-3	66,3	3,5	–	–	–	0,5	20,9	8,0	0,6	0,2
CT50-1	25,0	20,0	25,0	–	–	–	30,0	–	0,06	–

У випадках, коли потрібно забезпечити гарне тепловідведення, високу механічну міцність і твердість конструкції, застосовують металеві підкладки.

Таблиця 2.2 – Електрофізичні параметри матеріалів підкладок ГІС

Параметр	Матеріал							
	скло		ситал	плав-лений кварц	кераміка			
	C41-1	C48-3	CT50-1		22ХС	полікор	глазована	
Марка	2	3	4	5	6	7	8	
Клас чистоти обробки поверхні	14	14	13-14	14	12	12-14	14	

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Температурний коефіцієнт лінійного розширення ТКЛР при $T = 20-300\text{ }^{\circ}\text{C}$	(41±2) $\times 10^{-7}$	(48±2) $\times 10^{-7}$	(50±2) $\times 10^{-7}$	55 $\times 10^{-7}$	(60±2) $\times 10^{-7}$	(70-75) $\times 10^{-7}$	(73-78) $\times 10^{-7}$
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м <sup>2</sup> С)	1	1,5	1,5	7-15	10	30-45	1,2-1,7
Діелектрична проникність при $f = 10^6\text{ Гц}$ і $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	7,5	3,2-8	5-8,5	3,8	10,3	10,5	13-16
Тангенс кута діелектричних втрат при $f = 10^6\text{ Гц}$ і $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$20 \times 10^{-4}$	$15 \times 10^{-4}$	$20 \times 10^{-4}$	–	$6 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4}$	$18 \times 10^{-4}$
Об'ємний опір при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом·см	$10^{17}$	$10^{14}$	–	$10^{15}$	–	–	–
Електрична проникність, кВ/мм	40	40	–	–	50	–	50

Габаритні розміри підкладок стандартизовані. Звичайно стандартною платою називається частина підкладки з розташованими на її поверхні плівковими елементами однієї ГІС). Розподіл стандартної підкладки на частині, кратній двом і трьом, дає ряд типорозмірів (model size) плат, наведених у табл. 2.3. Плати № 3-10 використовують у стандартних корпусах, інші – у безкорпусних ГІС і мікрозборках. Товщина підкладок складає 0,35–0,6 мм. Розміри підкладок мають тільки мінусові допуски в межах (0,1–0,3 мм).

Таблиця 2.3 – Типорозміри ГІС (розміри, мм)

Типорозмір	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ширина	96	60	48	30	24	20	16	12	10	10	5	2,5	16	32	8	8	24
Довжина	120	96	60	48	30	24	20	16	16	12	6	4	60	60	15	10	60

Матеріали резисторів. Параметри тонкоплівкових резисторів визначаються властивостями застосовуваних резистивних матеріалів, товщиною резистивної плівки та умовами її формування. Для створення

ГПС необхідні резистивні плівки з питомим поверхневим опором (specific superficial resistance)  $p_s$  від десятків до десятків тисяч ом на квадрат. Чим менша товщина плівок, тим вище  $p_s$ , але одночасно підвищується ТКР, а також погіршується тимчасова і температурна стабільність плівок.

Як резистивні матеріали використовують чисті метали (clean metals) і сплави (alloys) з високим електричним опором, а також спеціальні резистивні матеріали – кермети, що складаються з частинок металу і діелектрика (dielectric) (наприклад, Cr і 8i). Широко розповсюджені плівки хрому і танталу (табл. 2.4). Сплави, з яких найчастіше використовують ніхром, мають більше значення  $p_s$  в порівнянні з плівками чистих металів. На основі керметів одержують високоомні резистори. Найбільш розповсюджений кермет, до складу якого входять хром і монооксид кремнію (50-90% Cr, 50-10% 8i). У залежності від вмісту хрому можна одержати резистивні плівки з питомим опором від сотень ом на квадрат до десятків кілоом на квадрат, що мають високу стабільність. Однак у зв'язку з тим, що властивості керметних плівок дуже залежать від технологічних факторів, резистори мають гіршу відтворюваність номіналів і більший ТКР у порівнянні з металевими. Тому Cr-8i виготовляють легуванням невеликою кількістю домішок заліза, нікелю, кобальту, вольфраму (PC-3001, PC-3710, PC-5604ДО, МЛТ-3М, PC-5406Н). При порівняно малому ТКР і високій стабільності відтворення питомих поверхневих опорів діапазон опорів сплавів PC досить широкий: 50 Ом/м<sup>2</sup> – 50 кОм/м<sup>2</sup>. Найчастіше використовують сплави PC-3001, PC-3710 (37,9% Cr, 9,4% М, 52,7% 8i), МЛТ-3М (43,6% 8i, 17,6% Cr, 14,1% Ре, 24,7% ЧУ). Матеріали конденсаторів. Обкладинки конденсаторів повинні мати високу провідність, корозійну стійкість, технологічну сумісність з матеріалом підкладки і діелектрика конденсатора: ТКЛР, близькі до ТКЛР підкладки і діелектрика, гарну адгезію до підкладки і діелектрика, високу механічну міцність. Найкращим матеріалом для обкладинок конденсаторів є алюміній, що, однак, має погану адгезію до підкладки.

Таблиця 2.4 – Основні параметри матеріалів тонкоплівкових резисторів

Матеріал		Параметри		
Для напilenня резистивної плівки	Контактних площадок	Поверховий опір резистивної плівки $p_s$ , Ом/мм	Допустима питома потужність розсіювання $P_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	Температурний коефіцієнт опору ТКР при T = 60 -125 °C
1	2	3	4	5
Ніхром, проволока Х20Н80 (ГОСТ 12766-67)	Мідь	300	2	$1 \cdot 10^{-4}$

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5
Ніхром, проволока (ГОСТ 8803-58)	Золото з підшарком хрому	10 50	2	$-2,25 \cdot 10^{-4}$
Сплав МЛТ-3М (6КО.028.005 ТУ)	Мідь з підшарком ванадію (лужена), мідь з підшаром ніхрому (захищена нікелем)	500		$2 \cdot 10^{-4}$
Хром (ГОСТ 5905-67)	Мідь (лужена)	500	1	$0,6 \cdot 10^{-4}$
Кермет К-50С (ЕТО.021.013 ТУ)	Золото з підшарком хрому (ніхрому)	3000 5000 10000	2	$3 \cdot 10^{-4}$ $-4 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-4}$
Тантал ТВЧ; стрічка товщиною 0,3-3 мм (РСТУ1244-67)	Алюміній з підшарком ванадію	20-100	3	$-2 \cdot 10^{-4}$
	Мідь з підшарком ніхрому	100		
	Тантал	10		
Сплав РС-3001 (ЕТО.021.019 ТУ) Сплав РС-3710 (ЕТО.021.034 ТУ)	Золото з підшарком хрому (ніхрому)	1000	2	$-0,2 \cdot 10^{-4}$
		2000		
		3000		$-3 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 2.5 – Основні параметри діелектричних матеріалів тонкоплівкових конденсаторів  $p_s$ , Ом/м

Матеріал		Параметри																																							
Для наплення діелектрика	Для наплення обкладінок	Питомий поверхневий опір	Питома сміність $C_0$ , нФ/см <sup>2</sup>	Робоча напруга	Діелектрична проникність $\epsilon$ при $f = 1$ кГц	Тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta$ при $f = 1$ кГц	Електрична проникність $E_{\text{пр}}$ , В/см	Температурний коефіцієнт ємності ТКЄ при $T = 60 - 125$ °C, 1/°C																																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9																																	
Моноокис кремнію (ГОСТ 5.634-70)	Алюміній А99 (ГОСТ 11069-64)	0,2	5·10 <sup>3</sup>	60	5,0-6,0	0,01-0,02	(2-3)·10 <sup>6</sup>	2·10 <sup>-4</sup>																																	
			10 <sup>4</sup>	30					Моноокис германію (ГОСТ 19602-74)	5·10 <sup>3</sup>	10	11-12	0,005-0,007	10 <sup>6</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	10 <sup>4</sup>	7	1,5·10 <sup>4</sup>	5	Боро-силікатне скло (ЕТО.035.01 ТУ)	2,5·10 <sup>3</sup>	24	4	0,001-0,0015	(3-4)·10 <sup>6</sup>	0,35·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>3</sup>	15	10 <sup>4</sup>	10	1,5·10 <sup>4</sup>	8	Скло електровакуумне С41-1 (НПО.027.600)	1,5·10 <sup>4</sup>	12,6	5,2	0,002-0,003	0,5·10 <sup>-4</sup> T = -60 ± 25 °C; (1,5-1,8) × 10 <sup>-4</sup> при T = 25 ± 155 °C	2·10 <sup>4</sup>	10-12,6	3·10 <sup>4</sup>
Моноокис германію (ГОСТ 19602-74)			5·10 <sup>3</sup>	10	11-12	0,005-0,007				10 <sup>6</sup>	3·10 <sup>-4</sup>																														
			10 <sup>4</sup>	7																																					
			1,5·10 <sup>4</sup>	5																																					
Боро-силікатне скло (ЕТО.035.01 ТУ)			2,5·10 <sup>3</sup>	24	4	0,001-0,0015			(3-4)·10 <sup>6</sup>	0,35·10 <sup>-4</sup>																															
			5·10 <sup>3</sup>	15																																					
			10 <sup>4</sup>	10																																					
			1,5·10 <sup>4</sup>	8																																					
Скло електровакуумне С41-1 (НПО.027.600)			1,5·10 <sup>4</sup>	12,6	5,2	0,002-0,003			0,5·10 <sup>-4</sup> T = -60 ± 25 °C; (1,5-1,8) × 10 <sup>-4</sup> при T = 25 ± 155 °C																																
	2·10 <sup>4</sup>	10-12,6																																							
	3·10 <sup>4</sup>	6,3-10																																							
	4·10 <sup>4</sup>	6,3																																							

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
П'ятиокис танталу (електрохімічне анодування)	Тантал ТВЧ (РСТУ1244-67), нижні обкладинки	1-Ю	$6 \cdot 10^4$	15				
			$10^5$	10				
	Алюміній А99 (ГОСТ 11069-64) з підшарком ванадію (верхня обкладинка)	0,2	$2 \cdot 10^5$	3	23	0,02	$2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^4$

Для запобігання відшаровуванню нижньої обкладинки спочатку напиляють підшар титану або ванадію. Верхня обкладинка, яка напильється на діелектрик, не потребує підшару. Застосування золота для обкладинок не рекомендується через високу рухливість атомів і можливу дифузію крізь діелектрик, що приводить до короткого замикання обкладинок.

Матеріал діелектрика повинен мати гарну адгезію до підкладки і матеріалу обкладинок, мати високу електричну міцність і малі втрати, мати високу діелектричну проникність і мінімальну гігроскопічність, не розкладатися в процесі формування плівок. Як діелектричні матеріали найчастіше використовують моноокиси кремнію і германію. У табл. 2.5 наведені основні параметри діелектричних матеріалів тонкоплівкових конденсаторів.

Матеріали провідників і контактних площадок. Вони повинні мати малий питомий опір, гарну адгезію до підкладки, високу корозійну стійкість. Найпоширенішим матеріалом тонкоплівкових провідників і контактних площадок у ГІС підвищеної надійності є золото з підшаром хрому, чи ніхрому титану, підшар забезпечує високу адгезію, а золото – потрібну провідність, високу корозійну стійкість, можливість паяння і зварювання. Товщина золотих плівкових провідників звичайно складає 0,5–1 мкм.

В апаратурі з менш жорсткими вимогами до надійності як провідники використовують плівки міді чи алюмінію з підшаром хрому, чи ніхрому титану. Для запобігання окислюванню міді і поліпшення умов паяння чи зварювання її покривають нікелем, золотом чи сріблом. Для паяння мідні

контактні площадки доцільно обслуговувати зануренням схеми в припой, при цьому інші плівкові елементи повинні бути захищені.

Алюміній має досить високу корозійну стійкість і може використовуватися як із захисним покриттям нікелю для забезпечення можливості паяння, так і без нього, якщо приєднання націпних компонентів і зовнішніх контактів здійснюється зварюванням. Товщина мідних і алюмінієвих провідників дорівнює один мікрометр, а товщина нікелевого чи золотого покриття звичайно складає десяти – соті частки мікрометра.

У табл. 2.6 наведені основні параметри струмопровідних матеріалів, підшару і покриття, а в табл. 2.7 – параметри діелектричних матеріалів, застосовуваних для захисту елементів тонкоплівкових ГІС. Варто розрізняти багатошарове розведення від багаторівневого, коли створюється система комутації елементів і компонентів ГІС у кілька поверхів (рівнів), розділених шаром діелектрика. У кожному з рівнів розведення може бути багатошаровим.

Таблиця 2.6 – Параметри багатокомпонентних систем провідників та контактних площадок тонкоплівкових ГІС

Матеріали підшарку, слою та покриття	Товщина шарів, мкм	Литомий поверхневий опір $\rho_s$ , Ом/м	Рекомендований спосіб контактування зовнішніх виводів
1	2	3	4
Підшарок – ніхром X20N80 (ГОСТ 2238-58) Шар – золото Зл999,9 (ГОСТ 7222-54)	0,01-0,03 0,6-0,8	0,03-0,05	Паяння мікропаяльником або зварювання імпульсним непрямым нагріванням
Підшарок – ніхром X2080 (ГОСТ 2238-58) Шар – мідь МВ (вакуумплавлена) (МРТУ 14-14-42-65) Покриття – нікель (МРТУ 14-14-46-65)	0,01-0,03 0,6-0,8 0,08-0,12	0,02-0,04	Зварювання імпульсним непрямым нагріванням
Підшарок – ніхром X20N80 (ГОСТ 2238-58) Шар – мідь МВ (вакуумплавлена) (МРТУ 14-14-42-65). Покриття – золото Зл999,9 (ГОСТ 7222-54)	0,01-0,03 0,6-0,8 0,05-0,06	0,02-0,04	Паяння мікропаяльником або зварювання імпульсним непрямым нагріванням

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4
Підшарок – ніхром X20H80 (ГОСТ 2238-58) Шар – алюміній А97 (ГОСТ 11069-64)	0,01-0,03 03-0,5	0,06-0,1	Зварювання спареним електродом
Підшарок – ніхром X20H80 (ГОСТ 2238-58) Шар – алюміній А99 (ГОСТ 11069-58) Покриття - нікель (МРТУ 14-14-46-65)	0,04-0,05 0,25-0,35 0,05	0,1-0,2	Зварювання імпульсним непрямым нагріванням

Таблиця 2.7 – Електрофізичні параметри матеріалів, які застосовуються для захисту елементів тонкоплівкових ГІС

Матеріали	Параметри				
	Питома ємність $C_0$ , пФ/мм <sup>2</sup>	Тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$ при $f = 1$ кГц	Питомий об'ємний опір $\rho_v$ , Ом·см	Електрична проникність $\epsilon_{ст}$ , В/см	Температурний коефіцієнт ТКС при $T = -60 \div +85$ °С, 1/°С
Монооксид кремнію 6К0.028.004 ТУ	17	0,03	$1 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-4}$
Халькогенідне скло ІКС-24	50	0,01	$1 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-4}$
Від'ємний фоторезист ФН-108 ХАО.028.077ТУ	12	0,01	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-4}$
Фоторезист ФН-11 ТУ 6-14-631-71	50-80	—	$3 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^6$	—
Лак поліімідний електроізоляційний	80-100	—	$2 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^6$	—
Оксид кремнію SiO <sub>2</sub>	100	—	$1 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^6$	—

## 2.2 Методи формування конфігурацій елементів тонкоплівкових ГІС

Для формування конфігурацій провідного, резистивного і діелектричного шарів використовують різні методи: масковий – відповідні

матеріали напилюються на підкладку через знімні маски; фотолітографічний – плівку наносять на всю поверхню підкладки, а потім витравлюють з певних ділянок; електроннопроменевий – деякі ділянки плівки видаляють за заданою програмою з підкладки випаровуванням під впливом електронного променя; лазерний – аналогічний електроннопроменевому, тільки замість електронного застосовують промінь лазера. Найбільше поширення отримали два перших способи, а також їх комбінація.

Масковий метод (mask method). При масковому методі рекомендується така послідовність формування шарів для виготовлення ГІС, що містять резистори, провідники, перетин плівкових провідників, конденсатори. Напилювання:

- 1) резисторів;
- 2) провідників і контактних площадок (contact grounds);
- 3) міжшарової ізоляції;
- 4) провідників;
- 5) нижніх обкладинок конденсаторів;
- 6) діелектрика;
- 7) верхніх обкладинок конденсаторів;
- 8) захисного шару (defense layer).

При відсутності конденсаторів виключаються операції 5 – 7, а при відсутності перетинів – операції 3, 4.

Фотолітографічний метод (photolithography method). При фотолітографічному методі для виготовлення ГІС, що містять резистори і провідники, використовують два варіанти технології:

1) напилювання матеріалу резистивної плівки; напилювання матеріалу провідної плівки; фотолітографія провідного шару; фотолітографія резистивного шарування; нанесення захисного шару.

2) після проведення перших двох операцій – фотолітографія провідного і резистивного шарів, фотолітографія провідного шару; нанесення захисного шару.

При виробництві мікросхем, що містять провідники і резистори з двох різних резистивних матеріалів, рекомендується така послідовність операцій; напилювання плівки першого резистивного матеріалу; напилювання матеріалу провідної плівки; фотолітографія провідного шару.

Фотолітографія другого резистивного шару; фотолітографія першого резистивного шару; нанесення захисного шару.

Комбінований масковий і фотолітографічний метод. При поєднанні маскового і фотолітографічного методів для мікросхем, що містять

резистори, провідники і конденсатори, використовують два варіанти технології:

1) напилювання резисторів через маску; напилювання провідної плівки на резистивну, фотолітографія провідного шару; почергове напилювання через маску нижніх обкладинок (lower tracing), діелектрика і верхніх обкладинок (higher tracing) конденсаторів; нанесення захисного шару;

2) напилювання резистивної плівки; напилювання провідної плівки на резистивну; фотолітографія провідних і резистивного шарів; фотолітографія провідного шару, напилювання через маску нижніх обкладинок діелектрика і верхніх обкладинок конденсаторів, нанесення захисного шару (рис. 2.1, а – ж). Монтаж навісних компонентів наведений на рис.2.1, и.

Для схем без конденсаторів застосовують один з трьох варіантів:

1) напилювання через маску резисторів; напилювання провідної плівки; фотолітографія провідного шару; нанесення захисного шару;

2) напилювання резистивної плівки; фотолітографія провідного шару, напилювання через маску провідників і контактних площадок; нанесення захисного шару, напилювання через маску нижніх обкладинок діелектрика і верхніх обкладинок конденсаторів, нанесення захисного шару.

3) напилювання резистивної плівки, напилювання через маску контактних площадок і провідників; фотолітографія резистивного шару; нанесення захисного шару.

Рекомендації застосування методів виготовлення ГІС. Масковий метод застосовують у дрібносерійному і серійному виробництві. Точність виготовлення R- і С-елементів  $\pm 10\%$ . Фотолітографічний метод застосовують у масовому виробництві. Досяжна точність виготовлення пасивних елементів  $\pm 1\%$ . Комбінований масковий і фотолітографічний метод застосовують в серійному і масовому виробництві, при цьому максимальна роздільна здатність при виготовленні плівкових елементів 50 мкм, точність виготовлення R- і С- елементів  $\pm 1$  і  $10\%$ , відповідно. Технологічний процес виробництва топкоплівкових ГІС комбінованим методом (масковим і подвійної фотолітографії): а – напилювання суцільних резистивної і провідної плівок; б – травлення провідних і резистивного шарів; в – селективне травлення провідного шару. Напилення через маску: г – нижніх обкладинок конденсаторів; д – діелектрика; е – верхніх обкладинок конденсаторів; ж – нанесення захисного шару; з – монтаж навісних компонентів конденсаторів; нанесення захисного шару, монтаж навісних компонентів.

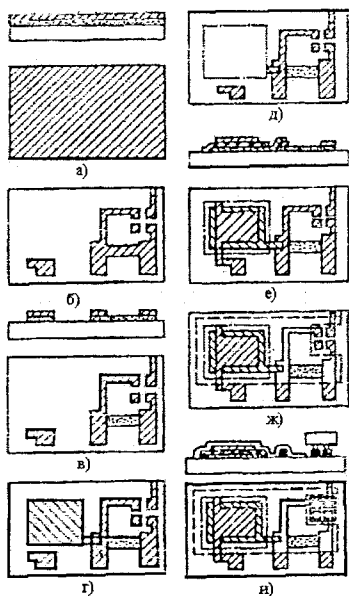


Рисунок 2.1 – Технологічний процес виробництва тонкоплівкових ГІС комбінованим методом (масковим і подвійної фотолітографії)

## 2.3 Розрахунок конструкції елементів тонкоплівкових ГІС

### 2.3.1 Конфігурація тонкоплівкових резисторів

Резистивні елементи плівкових ГІС отримують напленням на підкладку резистивної смуги і контактної площадки (рис. 2.2).

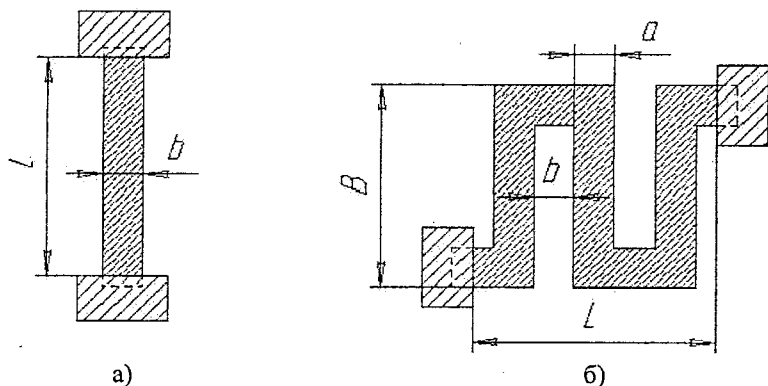


Рисунок 2.2 – Типи резисторів: а) прямокутний, б) типу «меандр»

Якщо розрахункова довжина резистора занадто велика і не може бути розміщена на підкладці в одну лінію, його виконують у вигляді зігнутих смужок.

При масковому методі виготовлення резисторів, відстань між сусідніми резистивними смужками повинна бути не менша 300 мкм, довжина резистивних ділянок / не повинна перевищувати «а» більш ніж у 10 разів, для забезпечення необхідної міцності маски. Точність виготовлення резисторів типу меандр не перевищує 20%. Для отримання більшої точності пропонується застосовувати конфігурацію, наведену на рис. 2.7, і виконувати методом фотолітографії.

Контактні площадки слід розміщувати з протилежних сторін резистора для усунення похибок суміщення провідникового і резистивного шарів.

### 2.3.2 Конструктивний розрахунок тонкоплівкових резисторів

Конструктивний розрахунок (constructive calculation) тонкоплівкових резисторів полягає у визначенні форми, геометричних розмірів і мінімальної площі. При цьому необхідно, щоб резистори забезпечували розсіювання заданої потужності при задовільненні необхідної точності  $\gamma_R$  в умовах існуючих технологічних можливостей.

Вихідними даними для розрахунку можуть бути: номінал резистора  $R_i$ , Ом; допуск на номінал  $\gamma_{R_i}$ , %; потужність розсіювання  $P_i$ , мВт; робочий діапазон температур  $T_{\max} - T_{\min}$ , °С; технологічні обмеження; крок координатної сітки, мм.

Порядок розрахунку тонкоплівкових резисторів

1. Визначають оптимальний з точки зору мінімуму площі під резисторами опір квадрата резистивної плівки:

$$\rho_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n 1/R_i}}, \quad (2.1)$$

$n$  – число резисторів;

$R_i$  – номінал  $i$ -го резистора.

2. З таблиці 2.4 вибирають матеріал резистивної плівки з питомим опором, найближчим до розрахункового  $R_{s \text{ опт}}$ . При цьому необхідно, щоб

TKR матеріалу був найменшим, а питома потужність розсіювання (power dispersions)  $P_0$  – максимальною.

3. Проводять перевірку правильності вибраного матеріалу з точки зору точності виготовлення резисторів.

Повна відносна похибка (full relative error) виготовлення плівкового резистора  $\gamma_R = \Delta R/R$  складається із суми похибок:

$$\gamma_R = \gamma_{K\Phi} + \gamma_{ps} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rct} + \gamma_{Rk}; \quad (2.2)$$

де  $\gamma_{K\Phi}$  – похибка коефіцієнта форми (error coefficient form);

$\gamma_{ps}$  – похибка відтворення величини поверхневого опору плівки;

$\gamma_{Rt}$  – температурна похибка;

$\gamma_{Rct}$  – похибка за рахунок старіння;

$\gamma_{Rk}$  – похибка перехідних опорів контактів.

Похибка коефіцієнта форми  $\gamma_{K\Phi}$  залежить від похибок геометричних розмірів - довжини  $l$  і ширини  $b$  резистора:

$$\gamma_{K\Phi} = \Delta l/l + \Delta b/b, \quad (2.3)$$

де  $\Delta l$  та  $\Delta b$  – абсолютна похибка розмірів, вибирається із табл. 2.8.

Похибка відтворення питомого поверхневого опору  $\gamma_{ps}$  залежить від умов напilenня і матеріалу резистивної плівки. В умовах серійного виробництва її значення не перевищує 5%.

Температурна похибка залежить від TKR матеріалу плівки:

$$\gamma_{Rt} = \alpha_R(T_{\max} - 20 \text{ }^\circ\text{C}), \quad (2.4)$$

де  $\alpha_R$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу плівки,  $1/^\circ\text{C}$  (таблиця 2.4).

Похибка  $\gamma_{Rct}$  обумовлена старінням плівки, викликана повільною зміною структури плівки у часі і її окиснюванням. Вона залежить від матеріалу плівки і ефективності захисту, а також від умов зберігання і експлуатації (таблиця 2.4).

Похибка перехідних опорів контактів  $\gamma_{Rk}$  залежить від технологічних умов напilenня плівок, питомого опору резистивної плівки і геометричних розмірів контактного переходу. Найчастіше  $\gamma_{Rk} = 1\text{-}2\%$ .

Допустима похибка коефіцієнта норми:

$$\gamma_{\text{Кф доп}} = \gamma_R - \gamma_{\rho_s} - \gamma_{R_t} - \gamma_{R_{ct}} - \gamma_{R_k} \quad (2.5)$$

Якщо величина  $\gamma_{\text{Кф доп}}$  від'ємна, то це означає, що виготовлення резистора заданої точності із вибраного матеріалу неможливе. У цьому випадку необхідно вибрати другий матеріал з меншим ТКР або використати підгонку резисторів.

4. Визначають конструкцію резисторів за величиною коефіцієнта норми Кф:

$$K_{\text{фi}} = R_i / \rho_s \quad (2.6)$$

При  $1 < K_{\text{фi}} < 10$  пропонується конструювати резистори прямокутної форми (rectangular form), при  $K_{\text{фi}} > 10$  – резистор складної форми (difficult form) (меандр складений), при  $0,1 < K_{\text{фi}} < 1$  – резистор прямокутної форми, у якого довжина менша ширини. Конструювати резистор з  $K_{\text{фi}} < 0,1$  не рекомендується, тому що він буде мати великі контактні площадки і займати значну площу на платі.

Якщо в одній схемі є низькоомні та високоомні резистори, можна використовувати два резистивних матеріали, для вибору яких визначають  $\rho_{s \text{ опт}}$  спочатку для всіх резисторів, після чого розбивають резистори на дві групи так, щоб  $R_{i \text{ max}}$  першої групи був менший,  $R_{i \text{ min}}$  другої групи – більший величини  $\rho_{s \text{ опт}}$ . Потім за цією формулою розраховують  $\rho_{s \text{ опт1}}$  та  $\rho_{s \text{ опт2}}$  і вибирають для кожної групи резисторів окремо.

5. Подальший розрахунок проводять у залежності від форми резисторів.

### 2.3.3 Розрахунок прямокутних резисторів

Для резисторів, що мають  $K_{\text{ф}} \geq 1$ , спочатку визначають ширину, а потім довжину резистора. Розрахункова ширина (clearing width) резистора повинна бути не менша найбільшого значення однієї із трьох величин:

$$s_{\text{розр}} \geq \max\{s_{\text{техн}}; s_{\text{точн}}; s_p\}, \quad (2.7)$$

де  $s_{\text{техн}}$  – мінімальна ширина резистора, що визначається можливостями технологічного процесу;

$\epsilon_{\text{точн}}$  – ширина резистора, що визначається точністю виготовлення;

$\epsilon_p$  – мінімальна ширина резистора, при якій забезпечується задана потужність.

$$\epsilon_{\text{точн}} \geq \frac{\Delta\epsilon + \Delta l / K_\phi}{\gamma_{\text{кросн}}} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 K_\phi}} \quad (2.9)$$

де  $P_0$  – допустима питома потужність розсіювання (таблиця 2.4).

За ширину  $\epsilon$  резистора приймають найближче до  $\epsilon_{\text{розр}}$  більше значення, кратне кроку сітки. Для тонкоплівкової технології крок координатної сітки 1 або 0,5 мм. Наприклад, якщо крок сітки 1 мм, а масштаб 20:1, то округлення виконують до величини, кратної 0,05 мм.

Далі знаходять розрахункову довжину (clearing length) резистора:

$$l_{\text{розр}} = \epsilon K_\phi \quad (2.10)$$

За довжину резистора приймають найближче до  $l_{\text{розр}}$  значення, кратне кроку сітки.

Визначасмо повну довжину резистора з врахуванням перекриття контактних площадок:

$$l_{\text{нов}} = l + 2e \quad (2.11)$$

де  $e$  – розмір перекриття резистора і контактних площадок (табл. 2.8).

При використанні методу подвійної літографії  $l_{\text{нов}} = l$ .

Площа (area), яку займає резистор на підкладці:

$$S = l_{\text{нов}} \cdot \epsilon \quad (2.12)$$

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

Розрахункове значення довжини резистора  $l_{розр}$  вибирають із умови:

$$l_{розр} \geq \max\{l_{техн}; l_{точн}; l_p\}, \quad (2.13)$$

де  $l_{техн}$  – мінімальна довжина резистора, що визначається технологічною можливістю методу формування конфігурації;

$l_{точн}$  – мінімальна довжина резистора, при якій забезпечується задана точність;

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

$$l_p = \sqrt{PK_\phi / P_0}. \quad (2.14)$$

$$l_{точн} \geq (\Delta l + \Delta \epsilon K_\phi) / \gamma_{K_\phi}. \quad (2.15)$$

За довжину резистора  $l$  приймають найближче до  $l_{розр}$  значення, кратне кроку сітки. Розрахункову ширину резистора визначають за формулою:

$$s_{розр} = l / K_\phi. \quad (2.16)$$

За ширину резистора приймають найближче до  $s_{розр}$  значення кратне кроку сітки. При цьому слід оцінити отриману похибку і при необхідності коректувати значення довжини  $l$  резистора у більшу сторону.

Для перевірки знаходять дійсну питому потужність і похибку резистора. Резистор спроектований задовільно, якщо:

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

$$P'_0 = P/S \leq P_0; \quad (2.17)$$

2) похибка коефіцієнта форми  $\gamma'_{K\phi}$  не перевищує допустимого значення  $\gamma_{K\phi \text{ доп}}$ :

$$\gamma'_{K\phi} = \Delta l / l_{\text{нов}} + \Delta \epsilon / \epsilon \leq \gamma_{K\phi \text{ доп}}; \quad (2.18)$$

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

$$\gamma'_R = \gamma_{K\phi} + \gamma_{\text{рв}} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rcc} + \gamma_{R\kappa} \leq \gamma. \quad (2.19)$$

### 2.3.4 Конструктивний розрахунок тонкоплівкових резисторів складної форми

При конструюванні резисторів у вигляді резистивних смужок, з'єднаних провідниковими перемичками, сума довжин резистивних смужок повинна дорівнювати довжині, що визначається за формулою  $l = \epsilon K_\phi$ .

Резистори типу «меандр» розраховуються із умов мінімальної площі, яку займає резистор.

Розрахунок меандра проводять після визначення ширини  $\epsilon$  резистора у такій послідовності:

- визначають довжину середньої лінії (length of middle line) меандра:

$$l_{\text{ср}} = \epsilon K_\phi; \quad (2.20)$$

- задають відстань між резистивними смужками  $a$ . З врахуванням технологічних обмежень при масковому методі  $a_{\text{min}} = 300$  мкм, при фотолітографії  $a_{\text{min}} = 100$  мкм (звичайно задають  $a = \epsilon$ );

- знаходять крок однієї ланки меандра:

$$t = a + \epsilon. \quad (2.21)$$

Визначають оптимальне число ланок (optimal number of link) меандра  $n_{\text{опт}}$  із умови, що площа, яку займає резистор, була мінімальною. Це буде у тому випадку, коли габаритні розміри рівні між собою ( $L = B$ ).

Якщо відношення довжини середньої лінії меандра до ширини резистивної смужки більше 10, то оптимальне число ланок може бути визначено за формулою:

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{(l_{\text{ср}} / t)(B / L)}. \quad (2.22)$$

При  $L = B$  і  $a = \vartheta$  вираз спрощується:

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{K_{\phi} / 2}. \quad (2.23)$$

Значення  $n_{\text{опт}}$  округлюють до найближчого цілого.

Визначають довжину меандра:

$$L = n(a + \vartheta). \quad (2.24)$$

Обчислюють ширину меандра:

$$B = \frac{l_{\text{ср}} - a \cdot n}{n}, \quad (2.25)$$

де  $n$  – оптимальне число ланок, округлене до цілого.

Наведені розрахунки не враховують, що в резисторах типу «меандр» щільність струму в згинах нерівномірна. Це призводить до скорочення електричної довжини плівкового резистора і зменшення його опору. Нерівномірне розподілення щільності струму спостерігається, як показано (рис. 2.3) у межах трьох квадратів згину.

Для наближеного оцінювання опору меандра можна скористатися формулою:

$$R \approx \rho_s (l_{\text{ср}} / \vartheta) = \rho_s K_{\phi}. \quad (2.26)$$

Для уточненого розрахунку з врахуванням згинів опір можна визначити як суму опорів прямолінійних ланок і згинів.

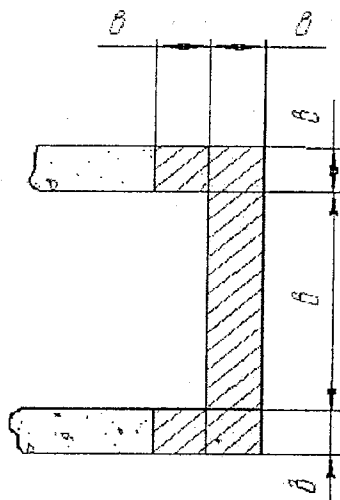


Рисунок 2.3 – Резистор складної форми

$$R = R_{зг}m + \frac{l_n n}{b} \rho_S, \quad (2.27)$$

де  $R_{зг}$  – опір згинів;

$m$  – число згинів;

$l_n$  – довжина прямокутних ланок;

$n$  – число ланок меандра.

Для згину під прямим кутом  $R_{зг} = 2,55 \rho_S$ , для П-образного згину  $R_{зг} = 4\rho_S$ . Звідси довжина прямолінійної ділянки однієї ланки меандра:

$$l_n = \frac{R - mR_{зг}}{\rho_S n} \cdot b. \quad (2.28)$$

Після цього коректують розміри  $L$  і  $B$  з метою забезпечення заданого номіналу резистора.

Квадратна форма резистора часто виявляється незручною при компонованні плівкових елементів на підкладці. Тоді, знаючи габаритну площу  $S=L \cdot B$  і задавшись одним із розмірів меандра (наприклад,  $B'$ ), визначають другий розмір  $L'$  і число ланок меандра  $n'$ .

$$L' = S/B', \quad n' = L'/t. \quad (2.29)$$

## 2.4 Конструювання плівкових підгінних резисторів

Наявність технологічних похибок ( $\gamma_p$  і  $\gamma_{K\phi}$ ) не дозволяють отримати плівкові резистори з точністю більше 10%. Тому у тих випадках, коли необхідна більша точність, необхідне підстроювання резисторів за допомогою підгонки (adapting).

Найбільше застосування отримали конструкції, що дозволяють провести підгонку по довжині ( $K_\phi > 1$ ) і по ширині ( $K_\phi < 1$ ). В обох випадках зміна опору відбувається в сторону збільшення. У першому випадку перерізають провідникові перемички, у другому електронним лазерним променем видаляється резистивна плівка на ділянці  $e_p$  (рис. 2.4).

### 2.4.1 Конструктивний розрахунок плівкового підгінного резистора по довжині

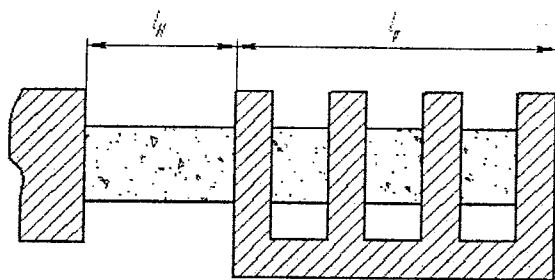
Довжина нерегульованої ділянки  $l_n$  розраховується з умови отримання найбільшого можливого опору  $R_{\max}$  при найбільшому питомому опорі  $\rho_{S \max}$  і найменшій ширині резистора  $e_{\min}$ . Підгонка в допуск відбувається шляхом послідовного включення підганяльних секцій.

Найбільший і найменший опір розраховується за формулами:

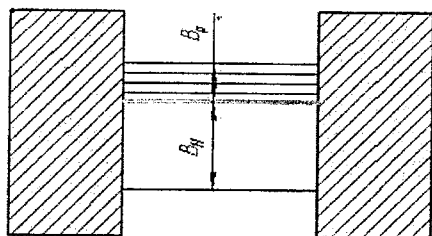
$$R_{\max} \approx \left( 1 + \frac{\gamma_R - \gamma_{Rl} - \gamma_{Cm}}{100} \right). \quad (2.30)$$

$$R_{\min} \approx \left( 1 - \frac{\gamma_R - \gamma_{Rl} - \gamma_{Cm}}{100} \right) \quad (2.31)$$

якщо при старінні опір може змінюватись в будь-яку сторону, і



а)



б)

Рисунок 2.4 – Конструкції резисторів: а) підганяльний резистор по довжині, б) підганяльний резистор по ширині

$$R_{\min} \approx R \left( 1 - \frac{\gamma_R - \gamma_{Rl}}{100} \right) \quad (2.32)$$

якщо при старінні опір резистора збільшується.

Кількість секцій підгонки, кожна з яких має опір не більше абсолютного допуску, визначається за такими формулами:

для симетричного  $\gamma_{ст}$

$$n = \frac{\gamma_{Кф} + \gamma_{Рс}}{\gamma_R - \gamma_{см}}; \quad (2.33)$$

для додатного  $\gamma_{ст}$

$$n = \frac{2(\gamma_{кф} + \gamma_{рл})}{\gamma_R - \gamma_{ст}}. \quad (2.34)$$

Довжина нерегульованої частини резистора:

$$l_n = \frac{R_{\max} \sigma_{\min}}{\rho_{ст\max}} - \Delta l. \quad (2.35)$$

Найменша величина опору резистора при довжині  $l_{n \max}$ :

$$R'_{\min} = \frac{\rho_{s \min}}{\sigma_{\max}}. \quad (2.36)$$

Для підгонки опору резистора в допуск необхідно збільшити опір отриманого резистора на величину:

$$\Delta R = R_{\min} - R'_{\min} \quad (2.37)$$

Опір кожної секції:

$$r_{\text{відз}} = \frac{\Delta R}{n}. \quad (2.38)$$

Підгінна довжина однієї секції:

$$l_{\text{нідз}} = \frac{r_{\text{нідз}} \rho_{\text{max}}}{\rho_{\text{min}}}. \quad (2.39)$$

Загальна довжина резистора:

$$l_{\text{заз}} = l_n + l_{\text{нідз}} \cdot n. \quad (2.40)$$

Величина  $n$  визначається за формулами (2.24) і (2.25).

#### 2.4.2 Конструктивний розрахунок плівкового підгінного резистора по ширині

Ширина плівкового підгінного резистора обчислюється за виразом:

$$b_0 = \frac{l_{\text{max}} \rho_{s \text{ max}}}{R_{\text{max}}}. \quad (2.41)$$

При паралельному з'єднанні секцій підгонки опір  $i$ -ї секції визначається за формулою:

$$r_i = R_i^* \left( 1 + \frac{R_i^*}{2} \right), \quad (2.42)$$

де  $R_i^*$  – опір резистора після видалення чергової секції підгонки.

Ширина кожної секції:

$$\Delta b_i = \frac{\rho S_{\text{min}} l_{\text{min}}}{r_i}. \quad (2.43)$$

Ширина зони, що регулюється:

$$b_p = \sum_{i=1}^n b_i. \quad (2.44)$$

Розрахунок резисторів можна проводити з допомогою програми, яка наводиться у додатку Б.

### Приклад розрахунку тонкоплівкових резисторів

Визначити форму, геометричні розміри, метод виготовлення і мінімальну площу, що займають резистори на підкладці, при таких вихідних даних: номінали резисторів  $R_1 = 6 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 100 \text{ кОм}$ , допустиме відхилення опору резисторів від номіналу  $R_1 = 5\%$ ,  $R_2 = 15\%$ , потужності розсіювання  $P_1 = 10 \text{ мВт}$ ,  $P_2 = 30 \text{ мВт}$ ,  $P_3 = 16 \text{ мВт}$ ; діапазон температур  $20\text{-}100 \text{ }^\circ\text{C}$ , похибка відтворення матеріалу резистивної плівки  $\gamma_{\rho_S} = 2,5\%$ , похибка старіння  $\gamma_{R_{cm}} = 0,3\%$ .

Визначаємо оптимальний опір квадрата резистивної плівки за формулою:

$$\rho_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{6+100+1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{100} + 1}}$$

За таблицею 2.4 вибираємо матеріал резистивної плівки з найближчим до  $\rho_S$  от значенням  $\rho_S$ - кермет К-50С. Його параметри:  $\rho_S = 10 \text{ кОм}/\square$ ,  $\text{TKR} = -5 \cdot 10^{-4} \text{ 1}/^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 20 \text{ мВт}/\text{мм}^2$ .

Перевіряємо правильність вибору матеріалу відповідно до виразу (2.4), температурна похибка  $\gamma_R = -5 \cdot 10^{-4} \cdot (-8) \cdot 100 = 4\%$ . а допустима похибка коефіцієнта форми для найбільш точного резистора з (2.5)  $\gamma_{K_{\phi,\text{дан}}} = 5 - 4 - 0,3 - 2,5 = -1,8 < 0$ . Це означає, що виготовити перший резистор із заданою точністю з даного матеріалу неможливо. Необхідно вибрати другий матеріал з меншою температурною похибкою або виготовити резистор  $R_1$  з меншою точністю і з подальшою підгонкою його до точності  $\pm 5\%$ . Підемо першим шляхом і виберемо другий матеріал. Найменшу температурну похибку має сплав РС-3001. Його параметри:  $\rho_S = 2 \text{ кОм}/\square$ ,  $\text{TKR} = -0,2 \cdot 10^{-4} \text{ 1}/^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 20 \text{ мВт}/\text{мм}^2$ .

Визначимо температурну похибку сплаву:  $\gamma_R = -0,2 \cdot 10^{-4} \cdot (-80) \cdot 100 = 0,16\%$ . Тоді допустима похибка коефіцієнта форми для резисторів становитиме:

$$\gamma_{K_{\phi,\text{дан}}} = 5 - 2,5 - 0,16 - 0,3 - 2,04 = 0,01\%,$$

$$\gamma_{K_{\phi,\text{дан}}} = 15 - 2,5 - 0,16 - 0,3 - 2,04 = 10,01\%.$$

Отже, сплав РС-3001 підходить для виготовлення всіх резисторів із заданою точністю без підгонки.

Визначаємо форму резисторів за коефіцієнтом форми:

$K_{\phi 1} = 3$  – резистор R1 прямокутної форми;

$K_{\phi 2} = 0,5$  – резистор R2 прямокутної форми, у якого ширина більша довжини;

$K_{\phi 4} = 50$  – резистор R3 складної форми.

Аналізуючи технологічні можливості, вибираємо метод виготовлення конфігурації резисторів.

З точки зору технологічності всі резистори доцільно виготовляти однаковим методом. Оскільки за умовою точність резистора  $R1 = \pm 5\%$  і необхідно, щоб резистори займали мінімальну площу, то слід вибрати фотолітографічний метод.

За таблицею 2.8. визначаємо технологічні обмеження для методу фотолітографії: точність виготовлення лінійних розмірів плівкових елементів та відстаней між ними  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta L$  –  $\pm 0,01$  мм. Далі проводимо розрахунок для кожного резистора.

Розрахунок резистора R1.

Розрахункову ширину резистора визначаємо за виразом (2.7–2.9).

$$e_{\text{плен}} = (0,01 + 0,01/3) / 0,0204 = 0,654.$$

З врахуванням округлення, приймаємо  $e = 0,66$  мм. Довжина резистора складатиме  $l = 0,66 \cdot 3 = 1,98$  мм.

Повну довжину резистора з урахуванням перекриття контактних площадок знаходимо за виразом (2.11):

$$l_{\text{пов}} = 1,98 + 2 \cdot 0,1 = 2,18 \text{ мм.}$$

Площа резистора становитиме:  $S = 0,66 \cdot 2,18$  мм. Для перевірки визначаємо дійсну питому потужність і похибку виготовлення резистора R1 за формулами (2.17–2.19):

$$P'_{\text{о1}} = 10/1,439 = 6,95 \text{ мВт/мм}^2 < 20 \text{ мВт/мм}^2,$$

$$\gamma'_{\text{кф1}} = (0,01/2,18) + (0,01/0,66) = 0,019 < 0,0204,$$

$$\gamma'_{\text{R1}} = 2,5 + 0,16 + 0,3 + 1,9 = 4,86 < 5\%.$$

Розрахунок резистора R2.

Оскільки коефіцієнт форми резистора R2 менший одиниці, розрахунок починаємо з визначення довжини за формулами (2.13 – 2.15):

$$l_{p2} = \sqrt{(30 \cdot 0,5) / 20} = 0,866;$$

$$l_{точн2} = (0,01 + 0,01 \cdot 0,5) / 0,12 = 0,125.$$

$I_{техн2}$  вибираємо із таблиці 2.8.

Для методу фотолітографії  $l_{техн} = 0,1$  мм. З урахуванням кроку координатної сітки  $l_2 = 0,87$  мм. Розрахункова ширина  $e_2 = 0,87 / 0,5 = 1,74$  мм. Повна довжина з урахуванням перекриття контактних площадок  $l_{пов2} = 87 + 2 \cdot 0,1 = 1,07$  мм. Площа резистора R2 становитиме  $S_2 = 1,07 \times 1,74 = 1,86$  мм<sup>2</sup>.

Виконаємо перевірку:

$$P'_{o2} = 30 / 1,86 = 16,1 \text{ мВт/мм}^2 < 20 \text{ мВт/мм}^2,$$

$$\gamma'_{кф2} = (0,01 / 1,07) + (0,01 / 1,74) = 0,015 < 0,12,$$

$$\gamma'_{R2} = 2,5 + 0,16 + 0,3 + 1,5 = 4,46 \% < 15\%.$$

Розрахунок резистора R3.

Після визначення  $K_\phi$  і вибору форми знаходимо ширину резистора R3 типу «меандр» за формулами (2.8, 2.9, 2.20–2.25).

$$e_{точн3} = \frac{0,01 + 0,01 / 50}{0,12} = 0,085;$$

$$e_{p3} = \sqrt{\frac{16}{20 \cdot 50}} = 0,126.$$

З врахуванням округлення  $e_3 = 0,130$  мм.

Довжина середньої лінії меандра:

$$l_{ср3} = 0,13 - 50 = 6,5 \text{ мм.}$$

Задаємося відстанню між сусідніми ланками меандра. Нехай  $a_3 = e_3 = 0,13$  мм. Крок однієї ланки  $t = 0,26$  мм. Оптимальна кількість ланок меандра:

$$n_{опт} = \sqrt{(0,13 \cdot 50) / 0,26} = 5.$$

Довжина меандра:

$$L = 5 \cdot 0,26 = 1,3 \text{ мм.}$$

Ширина меандра:

$$B = (6,5 - 0,13 \cdot 5) / 5 = 1,17 \text{ мм.}$$

Проведемо уточнення розрахунку з врахуванням нерівномірності густини струму у вигинах.

Топологія резистора наведена на рисунку 2.4. Виділимо елементи П-подібних вигинів, оскільки  $a = \sigma$ , кількість елементів вигинів  $m = n$ . Опір П-подібних вигинів  $R_u = 4 \rho_S$ .

Розрахуємо довжину прямолінійних ділянок:

$$l_n = \frac{100 - 5 \cdot 4 \cdot 2}{2 \cdot 5} \cdot 0,13 = 0,78.$$

Кінцеві габаритні розміри резистора: довжина  $L = 5 - (0,13 + 0,13) = 1,3$  мм, ширина становитиме  $B = l_n + 4\sigma = 0,78 + 4 \cdot 0,13 = 1,3$  мм. Габаритна площа резистора  $S_3 = 1,3 \cdot 1,3 = 1,69 \text{ мм}^2$ .

Виконаємо перевірку розрахунків.

$$P'_{\text{оз}} = 16 / 1,69 = 9,47 \text{ мВт/мм}^2 < 20 \text{ мВт/мм}^2,$$

$$\gamma'_{\text{кфз}} = (0,01 / 0,13) + (0,01 / \text{ОДЗ} \cdot 50) = 0,078 < 0,12,$$

$$\gamma'_{\text{рз}} = 2,5 + 0,16 + 0,3 + 7,8 = 10,76\% < 15\%.$$

Перевірка показала, що всі резистори спроектовані задовільно.

## 2.5 Розрахунок тонкоплівкових конденсаторів

Смість (сарасіту) тонкоплівкового конденсатора визначається площею перекриття його обкладинок.

На рисунку 2.5 наведена конструкція конденсатора з площею верхньої обкладинки більше  $5 \text{ мм}^2$ . При активній площі плівкового конденсатора менше  $5 \text{ мм}^2$  починає впливати крайовий ефект (regional effect). Причому тим сильніше, чи менша площа. При активній площі від 1 до  $5 \text{ мм}^2$  обкладинки конденсаторів можна виконувати у вигляді двох смужок, що перетинаються (рисунок 2.6).

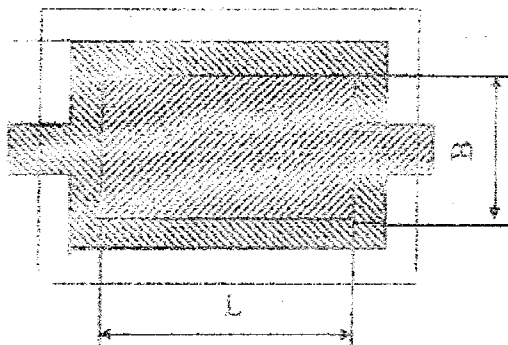


Рисунок 2.5 – Конструкція конденсатора з площею верхньої обкладинки більше  $5 \text{ мм}^2$

Якщо розрахункова площа конденсатора менша  $1 \text{ мм}^2$ , конденсатор можна виконати у вигляді послідовно об'єднаних конденсаторів (рис. 2.7).

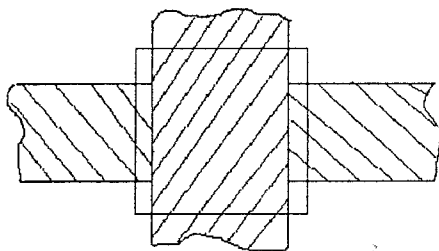


Рисунок 2.6 – Конструкція конденсатора з розрахунковою площею від 2 до  $5 \text{ мм}^2$

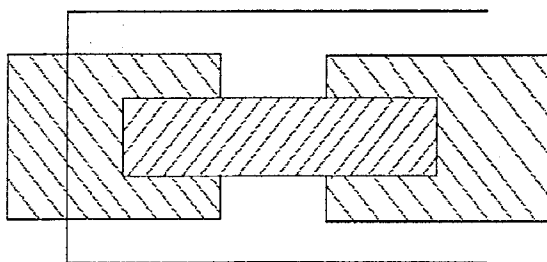


Рисунок 2.7 – Конструкція конденсатора з розрахунковою площею менше  $1 \text{ мм}^2$

Якщо розрахункова площа надто мала і не дозволяє конструювати конденсатор у межах даних розмірів, то можна використати як діелектрик підкладку (рисунок 2.8), яка придатна для напилення обкладінок з двох сторін.

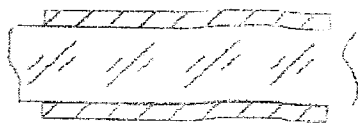


Рисунок 2.8 – Конструкція конденсатора, де як діелектрик використовується підкладка

Можна сконструювати також гребінцевий конденсатор (рисунок 2.9). Ємність такого конденсатора майже цілком визначається ємністю, обумовленою крайовим ефектом.

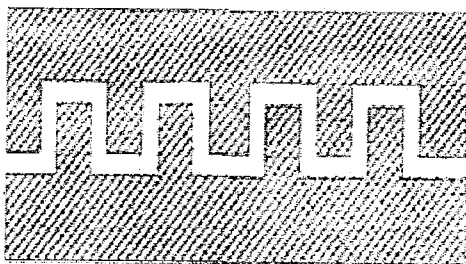


Рисунок 2.9 – Гребінцевий конденсатор

Мінімальна товщина діелектричного шару обмежена вимогами отримання суцільної плівки без наскрізних отворів із заданою електричною міцністю, а максимальна товщина обмежена механічними напруженнями у плівці. Товщину діелектрика визначають за формулою:

$$d = K_3 \cdot U_{\text{роб}} / E_{\text{пр}}, \quad (2.45)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу електричної міцності (для плівкових конденсаторів  $K_3 = 2 \div 3$ );

$U_{роб}$  – робоча напруга, В;

$E_{пр}$  – електрична міцність матеріалу діелектрика, В/мм.

Сумарну відносну похибку ємності конденсатора визначають за формулою:

$$\gamma_c = \gamma_{c0} + \gamma_S + \gamma_{Cr} + \gamma_{Ccr}, \quad (2.46)$$

де  $\gamma_{c0}$  – відносна похибка питомої ємності, яка характеризує відтворення питомої ємності в умовах даного виробництва (в залежності від матеріалу становить 3-5%);

$\gamma_S$  – відносна похибка активної площі (error of active area) плівкового конденсатора (залежить від точності геометричних розмірів, форми і площі верхніх обкладинок);

$\gamma_{Cr}$  – відносна температурна похибка (залежить від ТКС матеріалу діелектрика);

$\gamma_{Ccr}$  – відносна похибка, обумовлена старінням плівок конденсатора (залежить від матеріалу і методу захисту і не перевищує 2-3%).

Відносна температурна похибка:

$$\gamma_{Ccr} = \alpha_c (T_{max} - 20.^\circ\text{C}), \quad (2.47)$$

де  $\alpha_c$  – ТКС матеріалу діелектрика (таблиця 2.5).

Відносна похибка активної площі конденсатора:

$$\gamma_S = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta LB + \Delta BL}{LB}, \quad (2.48)$$

де  $\Delta S$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta B$  – абсолютні похибки площі, довжини і ширини верхньої обкладинки.

Відносна похибка активної площі конденсатора мінімальна, якщо обкладинки мають форму квадрата. Відхилення контуру верхньої обкладинки від квадрата супроводжуються збільшенням  $\gamma_S$ .

Для врахування цих відхилень використовують коефіцієнт форми обкладинок:

$$K_{\phi} = L/B. \quad (2.49)$$

Тоді відносну похибку активної площі конденсатора при  $\Delta L = \Delta B$  можна визначити за формулою:

$$\gamma_S = \Delta L \frac{1+K_{\phi}}{\sqrt{K_{\phi}S}}. \quad (2.50)$$

Для забезпечення заданої точності ємності при виготовленні конденсатора необхідно, щоб виконалась умова:

$$\Delta L \frac{1+K_{\phi}}{\sqrt{K_{\phi}S}} \leq \gamma_{S\text{дон}}, \quad (2.51)$$

де  $\gamma_{S\text{дон}}$  — максимально допустима відносна похибка активної площі.

$$\gamma_{S\text{дон}} = \gamma_C - \gamma_{C0} - \gamma_{C1} - \gamma_{C\text{ст}}. \quad (2.52)$$

Із виразу (2.51) виходить, що при вибраному із топологічних міркувань значенні коефіцієнта форми площа верхньої обкладинки:

$$S \geq \left( \frac{\Delta L}{\gamma_{S\text{дон}}} \right) \frac{(1+K_{\phi})^2}{K_{\phi}}. \quad (2.53)$$

Якщо рівність виконується, то отримуємо вираз для питомої ємності:

$$C_{\text{оточн}} = C \cdot \left( \frac{\gamma_{S\text{дон}}}{\Delta L} \right)^2 \frac{K_{\phi}}{(1+K_{\phi})^2}. \quad (2.54)$$

У випадку, коли  $K_{\phi} = 1$  цей вираз спрощується:

$$\frac{2\Delta L}{\sqrt{S}} \leq \gamma_{S\text{дон}}. \quad (2.55)$$

$$S = \left( \frac{\Delta L}{\gamma_{S\text{дон}}} \right)^2. \quad (2.56)$$

$$C_{\text{оточн}} = C \cdot \left( \frac{\gamma_{S\text{дон}}}{2\Delta L} \right)^2. \quad (2.57)$$

## Порядок розрахунку тонкоплівкових конденсаторів

1. Вибирають матеріал діелектрика за робочою напругою, з таблиці 2.5. Щоб конденсатор займав якомога меншу площу, необхідно вибрати матеріал з більш високими: діелектричною проникністю, електричною міцністю, а також малими значеннями ТКС і tg  $\delta$ .

2. Визначають мінімальну товщину діелектрика із умови електричної міцності (2.34). Товщина повинна бути у межах 0,1–1 мкм, в іншому випадку необхідно вибрати інший матеріал. При товщині діелектрика 0,1 мкм у ньому можливі пори, що може призвести до короткого замикання обкладинок. При товщині більш 1 мкм можливий розрив верхньої обкладинки у місці виводу через велику сходинку по товщині плівки. Оптимальна товщина діелектрика 0,3–0,5 мкм.

3. Визначають питому ємність конденсатора (пФ/см), виходячи із умови електричної міцності:

$$C_{0U} = 0.0885 \frac{\epsilon}{d}, \quad (2.58)$$

де  $d$  – товщина діелектрика у см;

$\epsilon$  – діелектрична проникність.

4. Оцінюють відносну температурну похибку (2.36).

5. Визначають за (2.52) допустиму похибку активної площі конденсатора. Якщо  $\gamma_{\text{дон}} \leq 0$ , то це означає, що виготовлення конденсатора із заданою точністю неможливе, потрібно вибрати інший матеріал діелектрика з меншою температурною похибкою. Зменшити похибку старіння можна за рахунок додаткового захисту мікроборки від вологи.

6. Визначають питому ємність конденсатора з урахуванням точності його виготовлення (2.54), для обкладинок квадратної форми – за (2.57); похибка довжини  $\Delta l$  за таблицею 2.8 для маскового методу.

7. Вибирають мінімальне значення питомої ємності конденсатора, враховуючи електричну міцність і точність виготовлення:

$$C_0 \leq \min \{ C_{0\text{дон}}, C_{0U} \}. \quad (2.59)$$

8. Визначають коефіцієнт, що враховує крайовий ефект:

$$K = \begin{cases} 1; C/C_0 \geq 5 \text{ мм}^2 \\ 1,3 - 0,06 C/C_0; 1 \leq C/C_0 < 5 \text{ мм}^2. \end{cases} \quad (2.60)$$

9. Визначають площу верхньої обкладинки:

$$S = (C/C_0) \cdot K. \quad (2.61)$$

Якщо площа перекриття обкладинок менша  $1 \text{ мм}^2$ , необхідно взяти другий діелектрик з меншим значенням  $\epsilon$  або збільшити товщину діелектрика у можливих межах, або конструювати конденсатор спеціальної форми (рисунки 2.7–2.9).

Якщо площа перекриття більша  $200 \text{ мм}^2$ , треба взяти інший діелектрик з більшим значенням  $\epsilon$  або зменшити товщину  $d$  у можливих межах, або використати навісний малогабаритний конденсатор.

10. Визначають розміри верхньої обкладинки конденсатора. Для конденсаторів квадратної форми ( $K_\Phi = 1$ ).

Розміри  $L$  і  $B$  округлюють до значення, кратного кроку координатної сітки з урахуванням масштабу топологічного креслення.

11. Визначають розміри нижньої обкладинки конденсатора з урахуванням допусків на перекриття (таблиця 2.8):

$$L = B = \sqrt{S}. \quad (2.62)$$

12. Визначають розміри діелектрика:

$$L_H = B_H = L + 2q, \quad (2.63)$$

де  $q$  – розмір перекриття нижньої обкладинки і діелектрика (табл. 2.8).

13. Визначають площу, що займає конденсатор:

$$L_0 = B_0 = L_H + 2j. \quad (2.64)$$

Спочатку проектують конденсатор квадратної форми, а при відсутності місця на кресленні топології, задаються однією із сторін конденсатора, коефіцієнтом форми і обчислюють розміри прямокутної форми.

Для перевірки ємності у процесі або після виготовлення мікроборки, у конденсаторі необхідно передбачити спеціальні контактні площадки.

Якщо конденсатор шунтується резистором і при цьому повний опір паралельного з'єднання виміряти неможливо, то при проектуванні топології вказані елементи пропонується виконати незашунтованими. У цьому випадку кінцеве з'єднання виконується навісним провідником після необхідних вимірювань.

14. Виконують перевірку розрахунку.

Конденсатор спроектований правильно, якщо:

- робочий тангенс кута (tangent of corner) діелектричних втрат (dialectical loss) не перевищує заданого:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{роб}} \leq \operatorname{tg} \delta. \quad (2.65)$$

Якщо знехтувати опором виводів обкладинок, то робочий тангенс кута можна подати у вигляді суми тангенсів кутів втрат у діелектрика  $\operatorname{tg} \delta_{\text{дielek}} \text{ і в обкладинках } \operatorname{tg} \delta_{\text{об}}$ :

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{роб}} = \operatorname{tg} \delta_{\text{дielek}} + \operatorname{tg} \delta_{\text{об}}. \quad (2.66)$$

Величина  $\operatorname{tg} \delta_{\text{дielek}}$ , визначається за таблицею 2.5.

Тангенс кута втрат у обкладинках знаходять за формулою:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{об}} \approx \frac{2}{3} \omega R_{\text{об}} C, \quad (2.67)$$

де  $R_{\text{об}}$  – опір обкладинок конденсатора, Ом;

$C$  – ємність конденсатора, Ф;

$\omega$  – кутова частота (angular frequency);

$\omega = 2\pi f_{\text{max}}$  ( $f_{\text{max}}$  – частота, Гц).

Опір обкладинок конденсатора залежить від його форми:

$$R_{\text{об}} = \rho_{\text{Sob}} K_{\phi}, \quad (2.68)$$

де  $\rho_{\text{Sob}}$  – питомий поверхневий опір матеріалу обкладинок (таблиця 2.6);

Перевірний розрахунок тонкоплівкових конденсаторів складається з таких пунктів:

- робоча напруженість електричного поля  $E_{\text{роб}}$  не перевищує  $E_{\text{цр}}$  матеріалу діелектрика:

$$E_{\text{роб}} \leq E_{\text{цр}}, \quad (2.69)$$

$$E_{\text{роб}} = U_{\text{роб}} / d, \quad (2.70)$$

$$d = 0,0885 \varepsilon / C_0, \text{ см}; \quad (2.71)$$

- похибка активної площі конденсатора не перевищує допустиму:

$$\gamma_{S_{\text{роб}}} \leq \gamma_{S_{\text{дан}}} \quad (2.72)$$

де  $\gamma_{S_{\text{роб}}}$  визначається за (2.50), а  $\gamma_{S_{\text{дан}}}$  – за (2.52).

Якщо один із пунктів перевірки не виконується, необхідно вибрати другий матеріал діелектрика або змінити конструкцію конденсатора.

Якщо у схемі є декілька конденсаторів, то для виготовлення у єдиному технологічному циклі доцільно вибирати для всіх конденсаторів один і той же діелектрик з однаковою товщиною. У іншому випадку для напilenня шлівки діелектрика конденсатора знадобляться різні маски, що ускладнить технологію.

Для декількох конденсаторів на одній обкладинці розрахунок починають з конденсатора, що має найменшу ємність. Після вибору матеріалу і необхідних обчислень визначають питому ємність, при якій конденсатор буде займати мінімальну площу:

$$C_{0\text{min}} = C_{\text{min}} / S_{\text{min}} \quad (2.73)$$

Кінцевий вибір  $C_0$  виконують за формулою:

$$C_0 \leq \min\{C_{0U}, C_{0\text{min}}, C_0\}. \quad (2.74)$$

Обчислюють товщину діелектрика, яка відповідає питомій ємності  $C_0$  за (2.60). Якщо товщина діелектрика не виходить за межі можливості тонкоплівкової технології (0,1–1мкм), то продовжують подальший розрахунок, якщо ні – вибирають другий матеріал.

## 2.6 Приклад розрахунку тонкоплівкових конденсаторів

Визначити геометричні розміри і мінімальну площу двох конденсаторів на одній підкладці, виготовлених в одному технологічному циклі, при таких вихідних даних: ємність конденсаторів  $C1 = 100$  пФ,

$C_2 = 2500$  пФ; допустиме відхилення ємності від номіналу конденсаторів 15%; робоча напруга  $U_{\text{роб}} = 15$  В; діапазон температур 60–125 °С; тангенс кута діелектричних втрат на робочій частоті  $\text{tg } \delta = 0,03$ ; максимальна робоча частота  $f_{\text{max}} = 400$  кГц; похибка відтворення питомої ємності  $\gamma_{C_0} = 5\%$ ; похибка старіння  $\gamma_{\text{ст}} = 1\%$ . За таблицю 2.5 з врахуванням вихідних даних вибираємо матеріал діелектрика для двох конденсаторів – монооксид кремнію. Його параметри: питома ємність  $C_0 = 500$  (нФ/см<sup>2</sup>); тангенс кута діелектричних втрат на робочій частоті  $\text{tg } \delta = 0,01$ ; діелектрична проникність  $\epsilon = 5$ ; електрична міцність  $E_{\text{нор}} = 3 \cdot 10^6$  (В/см); ТКС =  $2 \cdot 10^{-4}$ . Мінімальну товщину діелектрика  $d$  і питому ємність  $C_0$  для забезпечення необхідної електричної міцності знаходимо за (2.45) і (2.58):

$$d_{\text{min}} = \frac{3 \cdot 15}{2 \cdot 10^6} = 0,225 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

$$C_{0U} = \frac{0,0885 \cdot 5}{0,225 \cdot 10^{-4}} = 197 \cdot 10^5 \left( \frac{\text{нФ}}{\text{см}^2} \right).$$

Температурна похибка ємності відповідно до (2.47):

$$\gamma_{C_0} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot (125 - 20) \cdot 100\% = 2,1\%,$$

а допустима похибка активної площі

$$\gamma_{S_{\text{дол}}} = 15 - 5 - 1 - 2,1 = 6,9\%.$$

Мінімальну питому ємність для забезпечення точності виготовлення найменшого за номіналом конденсатора визначають за (2.57):

$$C_{0\text{min}} = 100 \cdot \left( \frac{0,069}{2 \cdot 0,01} \right)^2 = 1190 \left( \frac{\text{нФ}}{\text{мм}^2} \right).$$

Визначаємо, яка повинна бути питома ємність найменшого за номіналом конденсатора з урахуванням технологічних можливостей виготовлення за площею покриття і за товщиною діелектрика. Задаємося

$$C_{0 \min} = 100/1 = 100 \left( \frac{\text{пФ}}{\text{мм}^2} \right),$$

$$S_{\min} = 100 \text{ мм}^2,$$

$$C_0 = 100/1 = 100 \text{ пФ/мм}^2.$$

Таким чином, отримані три значення питомої ємності:

$$C_0 = 197 \text{ пФ/мм}^2;$$

$$C_{0 \text{ точн}} = 1190 \text{ пФ/мм}^2;$$

$$C_{0 \min} = 100 \text{ пФ/мм}^2.$$

Остаточню вибираємо  $C_0 = 100 \text{ пФ/мм}^2$ .

Визначаємо, яка товщина діелектрика відповідає вибраній питомій ємності:

$$d = \frac{0,0885 \cdot 5}{100 \cdot 10^2} = 0,44 \cdot 10^{-4} \text{ (см)},$$

що цілком відповідає тонкоплівковій технології.

Далі проводимо розрахунок геометричних розмірів конденсаторів.

Розрахунок конденсатора С1.

Відношення  $C_1/C_0 = 100/100 = 1 \text{ мм}^2$ . Коефіцієнт, що враховує крайовий ефект,  $k = 1,3 - 0,06 \cdot 1 = 1,24$ . Площа перекриття обкладинок  $S_1 = 1 \cdot 1,24 = 1,24 \text{ мм}^2$ ; форма обкладинок – перетинні смужки квадратної форми ( $K_\Phi = 1$ ); розміри обкладинок  $L_1 = B_1 = \sqrt{1,24} = 1,11 \text{ мм}$ ;  $L_{n1} = B_{n1} = 1,11 \text{ мм}$ ;  $L_{g1} = B_{g1} = 1,11 + 2 \cdot 0,1 = 1,31 \text{ мм}$ ; площа конденсатора по діелектрику  $S_{g1} = 1,72 \text{ мм}^2$ .

Виконаємо перевірку конструкції:

$$\text{tg} \delta_{\text{поб1}} = \frac{2}{3} \cdot 2\pi \cdot 400 \cdot 10^8 \cdot 0,2 \cdot 100 \cdot 10^{-12} = 0,00003,$$

$$\text{tg} \delta_{\text{поб1}} = 0,02 \text{ (див. таблицю 2.5),}$$

$$\text{tg} \delta_{\text{поб1}} = 0,02 + 0,00003 < 0,03,$$

$$E_{\text{поб1}} = \frac{15}{0,44 \cdot 10^{-4}} = 0,34 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}} < 2 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}},$$

$$\gamma_{\text{поб1}} = \frac{0,01 \cdot 2}{\sqrt{1,24}} = 1,8\% < 6,9\%.$$

Розрахунок конденсатора С2.

Розрахунок конденсатора С2 проводимо аналогічно.

Відношення  $C_2/C_0 = 2500/100 = 25 \text{ мм}^2$ . Коефіцієнт, що враховує крайовий ефект,  $k = 1$ . Площа перекриття обкладинок  $S_2 = 25 \text{ мм}^2$ , форма обкладинок квадратна ( $K_\Phi = 1$ ); розміри обкладинок становлять:  $L_2 = B_2 = \sqrt{25} = 5 \text{ мм}$ ;  $L_{n2} = B_{n2} = 5 + 2 \cdot 0,2 = 5,4 \text{ мм}$ ;  $L_{g2} = B_{g2} = 5,4 + 2 \cdot 0,1 = 5,6 \text{ мм}$ ; площа конденсатора по діелектрику  $S_{g2} = 5,6^2 = 31,36 \text{ мм}^2$ .

Перевірка розрахунку:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{роб2}} = \frac{2}{3} \cdot 2\pi \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 2500 \cdot 10^{-12} = 1,88 \cdot 10^{-3},$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{роб2}} = 0,02 + 0,00188 < 0,03,$$

$$E_{\text{роб2}} = \frac{15}{0,44 \cdot 10^{-4}} = 0,34 \cdot 10^6 \frac{B}{\text{см}} < 2 \cdot 10^6 \frac{B}{\text{см}},$$

$$\gamma_{\text{роб2}} = \frac{0,01 \cdot 2}{\sqrt{25}} = 0,4\% < 6,9\%.$$

Перевірка показала, що конденсатори не виходять за межі точності, мають запас електричної міцності і тангенс кута діелектричних втрат менший заданого.

## 2.7 Розрахунок плівкових індуктивностей

Крім резисторів і конденсаторів, в складі ГС в плівковому виконанні використовуються і індуктивності (inductance), які в ГС мають дві поширені форми – квадратну спіральну і круглу спіральну. Виконують їх напиленням струмопровідного шару з подальшою фотолітографією необхідної форми, або напиленням його через маску зі спіральними отворами на плату ГС. Матеріал, що напиляється, немагнітний – мідь, її сплави, алюміній, золото. Геометричні розміри квадратної і круглої плівкової спіралей з центральними контактними площадками.

На рис. 2.10 показано два варіанти плівкових індуктивностей, де  $A_1$ ,  $D_1$  – внутрішні розміри спіралі,  $A_2$ ,  $D_2$  – зовнішні розміри спіралі,  $b$  – ширина провідника струму,  $t$  – крок спіралі,  $l_{\text{ср}}$  – середня довжина спіралі.

Крім перерахованих геометричних розмірів, характеристикою спіралі є  $W$  – число її витків, на рисунку 2.10 показані спіралі з  $W = 2$ .

Для плівкової котушки індуктивності її основна електрофізична характеристика – індуктивність  $L$ , що розраховується за формулою:

для круглої спіралі

$$L_{\text{кр}} = 0,0494 d \cdot W^{5/3} \lg(8d/c), \quad (2.75)$$

де  $d = \frac{1}{4} (D_2 + D_1)$ ;  $c = \frac{1}{2} (D_2 - D_1)$  – смуга, зайнята витками спіралі.

Для квадратної спіралі

$$L_{\text{кв}} = 0,0554 d \cdot W^{5/3} \lg(8d/c), \quad (2.76)$$

де  $d = \frac{1}{4} (A_2 + A_1)$ ;  $c = \frac{1}{2} (A_2 - A_1)$  – смуга, зайнята витками котушки.

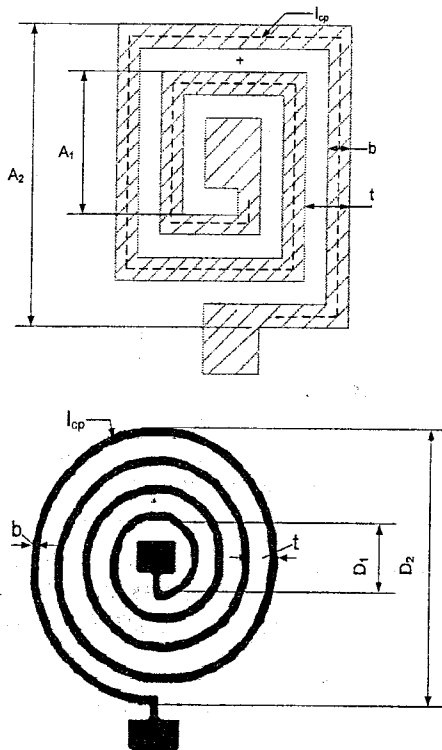


Рисунок 2.10 – Плівкові індуктивності

Якщо розміри котушки задані в сантиметрах, індуктивність за формулами (2.75) і (2.76) отримується в мікрогенрах. Якщо спіраль розміщена на магнітній підкладці або в магнітному середовищі, індуктивність, що обчислена за формулами (2.75) і (2.76), необхідно помножити на магнітну проникність  $\mu$  підкладки або середовища.

Для круглої і квадратної форм спіралі при заданій індуктивності мінімальна довжина провідника спіралі досягається при умові  $d/c \approx 0,75$ . Це ж відповідає максимальній добротності (good quality)  $Q$ .

Добротність котушки індуктивності

$$Q = 2\pi f \frac{L}{R_L}, \quad (2.77)$$

де  $f$  – робоча частота;

$R_L$  – опір провідника спіралі;

$$R_L = \rho_s \cdot K_\phi.$$

Зі збільшенням робочої частоти в формулу (2.77) необхідно вводити частотно-залежне значення поверхневого опору провідника через ефект відгородження струму до поверхні провідника з підвищенням частоти.

Крок спіралі знаходиться таким чином:

$$h = b + p, \quad (2.78)$$

де  $b$  – ширина провідника спіралі;

$p$  – відстань між витками.

Індуктивність залежить від співвідношення зовнішнього  $D$  та внутрішнього  $d$  діаметрів спіралі. Товщина провідної плівки залежить від глибини проникнення електромагнітної хвилі в матеріал плівкового провідника (скін-ефект) та матеріалу з якого виготовлена плівкова індуктивність (наприклад, алюміній, срібло, мідь). З урахуванням скін-ефекту ширина провідної плівки уточнюється в більшу сторону в 1,5–2 рази.

Варто пам'ятати, що плівкові котушки індуктивності мають меншу індуктивність і порівняно низьку добротність в порівнянні з намотаними об'ємними, особливо в діапазоні 1 ... 10 МГц.

Доцільність застосування плівкових котушок індуктивності проявляється із підвищенням частотного діапазону – 10 ... 1000 МГц.

Порядок розрахунку і конструювання плівкової індуктивності в складі ГІС

Як вихідні дані повинні бути задані: номінальні значення індуктивності  $L$ , мкГн; добротність  $Q$ ; робоча частота, Гц.

1. Вибирають розмір  $b$  провідника струму плівкової індуктивності, керуючись методом формування провідника струму. Мінімально допустима ширина плівкових провідників складає 100 мкм при масковому методі і 50 мкм при методі фотолітографії.

2. Із таблиці 2.2 підбирають матеріал провідника струму і задають тим самим конкретне значення  $\rho_s$ .

3. Вибирають форму та геометрію індуктивного елемента. Круглу форму плівкової котушки беруть тільки в тому випадку, якщо наявні дуже високі вимоги до підвищення добротності пристрою за рахунок добротності індуктивності. Задають крок спіралі  $t$  і її внутрішній розмір  $A_1$ . Мінімальний крок спіралі  $t_{\min} = 2 \cdot b$ . Розмір центральної контактної площадки всередині спіралі залежить від методу приєднання провідника до неї і дорівнює 250 мкм для термокомпресії і 400 мкм для паяння. Розмір  $A_1$  дорівнює сумі розмірів центральної контактної площадки і двох кроків спіралі.

4. Визначають  $R_L$  із формули (2.77) для добротності, а із  $R_L$  за вибраними  $\rho_s$  і  $b$  для спіралі визначають її довжину  $l_{sp}$ , що дозволить за розмірами  $A_1$ ,  $D_1$ ,  $b$ ,  $t$  шукати число витків  $W$  спіралі.

5. За відомими значеннями  $W$ ,  $A_1$ ,  $D_1$ ,  $b$ ,  $t$  геометрично визначають розмір  $A_2$  ( $D_2$ ) спіралі і обчислюють коефіцієнти  $c$ ,  $d$  для співвідношень (2.75) і (2.76).

6. Повідомимо  $d$  і  $c$  і заданому  $L$  з формул (2.75) і (2.76) визначають число витків  $W$  спіралі.

Якщо  $W$  по пп. 4 і 6 дуже відрізняються, необхідно оптимізувати розмір спіралі  $A_2$  ( $D_2$ ),  $t$  на основі того, що при умові  $\frac{d}{c} = 0,75$  (визначають  $A_2$  ( $D_2$ ), із співвідношень (2.75) і (2.76) знаходять  $W$ ).

При заданому значенні  $L$  буде мінімальна довжина  $l$  спіралі і максимальна її добротність  $Q$ . Використовуючи співвідношення (2.75) і

(2.76) по заданим значенням  $A_1 (D_1)$  і  $\frac{d}{c} = 0,75$  визначають  $A_2 (D_2)$ . Із співвідношення (2.75) і (2.76) знаходять  $W$ . За відомого довжиною спіралі  $l$ , що обчислена із співвідношення (2.77) через  $R_L, \rho_S, b$  і за відомими  $A_1, A_2, (D_1, D_2), W, b$  визначають крок спіралі  $t$ .

7. Результати розрахунків зводять у таблицю, в якій наведені задані значення  $L, Q, f$ , розраховані і прийняті значення  $A_1, A_2, D_1, D_2, d, c, W, b, t, R_L, \rho_S, l, K_\phi$ .

В результаті обмежень на геометричні розміри індуктивність не перевищує одиниць мікрогенрі (зазвичай припускають, що зовнішній діаметр  $D_2 \leq 10$  мм, а внутрішній  $D_1 \geq 0,5$  мм). Через таке мале значення  $L$  індуктивні елементи можна використовувати при робочих частотах більше 30–50 МГц. В структурах котушок індуктивності (рис. 2.11) один із виводів знаходиться всередині спіралі. Якщо необхідно вивести його назовні, то вивід проводять по шару діелектрика, нанесеного на витки.

Для оцінювання індуктивності використовується вираз:

$$L = \left( \frac{K_L}{m^2} \right)^2 \cdot D_1^3, \quad (2.79)$$

де  $L$  – в мкГн;

$m, D$  – в мм;

Коефіцієнт  $K_L$  знаходиться з кривої [2]. Орієнтовне значення добротності

$$Q = 16f \cdot D_1 \cdot K_L^2 \cdot b \left[ \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right]^{-1}, \quad (2.80)$$

де  $f$  – в МГц;

$m, D, b$  – в мм;

$R_s$  – в Ом/□.

З підвищенням частоти, через вплив міжвиткової ємності і дії скін-ефекту, змінюються параметри котушки індуктивності. Індуктивність

$$L \approx L_0 \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \right], \quad (2.81)$$

де  $L_0$  – індуктивність на низькій частоті;

$f_0$  – власна резонансна частота:

$$f_0 = \frac{\nu}{(4l\sqrt{\epsilon_n})}, \quad (2.82)$$

де  $l$  – довжина провідника котушки в мм;

$\nu = 3 \cdot 10^{11}$  мм/с – швидкість світла;

$\epsilon_n$  – у відн. один.

При розрахунку геометричних розмірів котушки індуктивності, ширина витка (при заданій добротності) визначається із співвідношення (2.76). Оскільки останнє не враховує вплив скін-ефекту, то реальну ширину слід взяти в 1,5-2 рази більшу розрахункової. Потім із заданого значення  $L$  визначають решту геометричних розмірів.

Приклад. Розрахувати індуктивність і добротність (на частоті 50 МГц) котушки, показаної на рис. 2.10 (квадратна спіраль) і виготовленої зі срібла. Прийmemo:  $D_1=0,5$  мм;  $b=0,1$  мм;  $m=0,2$  мм;  $n=10$ ; товщина плівки срібла  $d=10$  мкм, опір срібла  $\rho=1,6 \cdot 10^{-6}$  Ом·см.

Із виразу (2.79) і даних [2] отримаємо  $L = 0,27$  мкГн. Із (2.80) при  $R_s = \frac{\rho}{d} = 1,6 \cdot 10^{-3}$  Ом/□ отримаємо  $Q \approx 130$ . Реальна добротність буде в 2-3 рази менша.

## 2.8 Розрахунок плівкових контактних переходів

Плівкові контактні переходи є найбільш розповсюдженими елементами гібридних схем і мікроборок. В плівкових контактах між металевими плівками завжди є окисний шар, що виник у момент заміни маски і випаровувачів. Еквівалентний опір контактного переходу залежить від геометричних розмірів контакту, провідності контактних плівок і величини питомого перехідного опору контактного шару  $\rho_k$ . Під питомим перехідним опором розуміють опір одиниці площі контактного шару струму, що протікає по нормалі до контакту і має розмірність Ом·мм<sup>2</sup>.

При розрахунку резисторів з врахуванням похибок задаються відносною похибкою  $\gamma_{R_k}$ , обумовленою контактним опором. Величину  $\gamma_{R_k}$  вибирають порядку 1-3%. Допустимий опір контактного переходу:

$$R_{\text{пер доп}} = \frac{\gamma \cdot R_k^R}{2} \quad (2.83)$$

Розрахунок полягає у визначенні мінімального опору плівкового контакту і порівнянні з допустимою величиною.

$$R_{\text{пер min}} = \frac{\sqrt{\rho_s \cdot \rho_k}}{e} \quad (2.84)$$

де  $\rho_s$  – питомий поверхневий опір резистивної плівки;

$\rho_k$  – питомий опір контактного шару;

$e$  – ширина резистора, мм.

Величина  $\rho_k$  залежить від технології виготовлення мікроборки. При використанні багатопозиційних установок для наплення у глибокому вакуумі  $\rho_k = 0,05 \dots 0,25$  Ом·мм<sup>2</sup>, якщо технологічний процес пов'язаний з розвакууванням установки  $\rho_k = 5 \dots 25$  Ом·мм<sup>2</sup>.

Довжина перекриття плівок знаходиться за формулою:

$$l_{\text{пер min}} = 1,5 \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_s}} \quad (2.85)$$

При розрахунках  $R_{\text{пер min}}$ , може бути більшим, ніж  $R_{\text{пер доп}}$ . Довести  $R_{\text{пер min}}$  до допустимого значення можна за допомогою збільшення ширини резистора. Якщо збільшення невелике (20-50%), то воно відбувається по всій довжині резистора. Але якщо збільшення буде у 2-3 рази, то слід зробити «гантелевидні» збільшення (рисунок 2.11), але відношення  $\sigma/\sigma'$  не повинно бути більшим ніж 3,5. На рисунку 2.11  $\sigma'$  – ширина збільшеної частини резистора, а  $\eta$  – похибка базування.

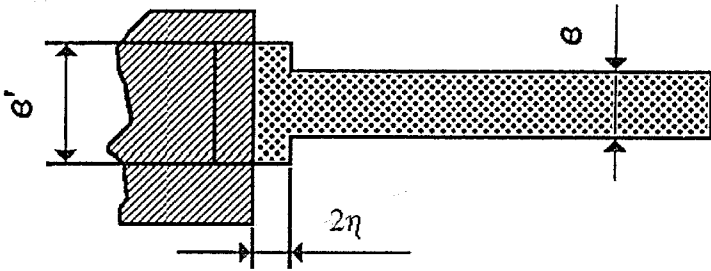


Рисунок 2.11 – Контактний перехід резистора

Повна довжина перекриття становитиме:

$$l_{\text{пер max}} = l_{\text{пер min}} + 2(\Delta l + \eta), \quad (2.86)$$

де  $\Delta l$  – абсолютна похибка довжини резистора;

$\eta$  – абсолютна похибка базування.

Приклад розрахунку розмірів контактного переходу.

Визначити розміри контактного переходу плівкового резистора з такими вихідними даними:  $R = 2$  кОм;  $\rho_s = 500$  Ом/□;  $\rho_k = 0,25$  Ом·мм<sup>2</sup>; ширина резистора  $\sigma = 0,2$  мм;  $\gamma_{R_k} = 4\%$ ;  $\eta = 0,05$  мм.

Визначаємо допустимий опір контактного переходу (2.83):

$$R_{пер доп} = \frac{4 \cdot 2000}{2 \cdot 100} = 40 \text{ (Ом)}.$$

Визначимо мінімальне значення перехідного опору (2.84):

$$R_{пер min} = \frac{\sqrt{0,25 \cdot 500}}{0,2} = 55,9 \text{ (Ом)}.$$

Таким чином мінімальний опір має більше значення, ніж допустимий.

Збільшуємо ширину резистора до  $b = 0,3$  мм. Тоді

$$R_{пер min} = \frac{\sqrt{0,25 \cdot 500}}{0,3} = 37,26 \text{ (Ом)}.$$

Тобто  $R_{пер min} < R_{пер доп}$ .

За формулою (2.85) визначаємо мінімальну довжину перекриття:

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

Повна довжина становитиме (2.86):

$$l_{пер max} = 0,034 + 2 \cdot (0,02 + 0,05) = 0,174 \text{ (мм)}.$$

Приймаємо  $l_{пер\max} = 0,2$  мм. У вакуумі  $\rho_k = 0,05 \div 0,25$  Ом·мм<sup>2</sup>, якщо технологічний процес пов'язаний з розвакууванням установки  $\rho_k = 5 \div 25$  Ом·мм<sup>2</sup>.

Таблиця 2.8 – Параметри провідникових паст

Параметр	Тип пасты				
	ПП-1	ПП-2	ПП-3	ПП-4	ПП-5
Питомий поверхневий опір, Ом/□	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Міцність зчеплення плівки з керамікою, Па	$5 \cdot 10^6$	-	$5 \cdot 10^6$	-	$5 \cdot 10^6$
Розтікання паст, мкм	<150	<150	<50	<50	<20
Шорсткість поверхні плівки, мкм	<5	<5	-	-	<5
Товщина шару, мм	10-20	15-20	15-20	15-20	15-20

Пасты (pastes) ПП-1 використовуються для провідників, нижніх обкладинок конденсаторів і контактних площадок першого шару.

Пасты ПП-2 – для виготовлення верхніх обкладинок конденсаторів, змочуваних припоєм при луженні.

Таблиця 2.9 – Параметри резистивних паст

Параметри	Марки паст									
	Пр-5	Пр-20	Пр-100	Пр-500	Пр-1к	Пр-3к	Пр-6к	Пр-20к	Пр-50к	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Питомий поверхневий опір, Ом/□	5	20	100	500	$10^3$	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	
Коефіцієнт шуму, мкВ/В	0,5	0,5	0,5	1	2	5	5	10	10	

## Продовження таблиці 2.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температурний коефіцієнт опору, 1/°C	$\pm 8 \cdot 10^{-4}$								
Питома потужність розсіювання, Вт/мм <sup>2</sup>	3								
Допустима робоча напруга, В	20								

Таблиця 2.10 — Параметри паст для товстоплівкових конденсаторів і міжшарової ізоляції

Параметри	Конденсатори		Міжшарова ізоляція			
	Марки паст					
	ПК 1000-30	ПК-12	ПД-1	ПД-2	ПД-3	ПД-4
Товщина плівки, мкм	40-60	40-60	60-70	50-60	30-50	30-50
Мінімальний розмір, мм	1×1	1×1	-	-	-	-
Діапазон номінальних значень, пФ	50-300	100-2500	-	-	-	-
Допустиме відхилення величини ємності від номінального значення, %	±15	±15	-	-	-	-
Питома ємність, пФ/см <sup>2</sup>	3700	10000	160	220	-	-
Тангенс кута діелектричних втрат	0,035	0,035	20	30	20	30
Температурний коефіцієнт, 1/°C	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	-
Пробивна напруга, В	150	150	500	500	500	500

## 2.9 Розрахунок паразитних ємностей в гібридній інтегральній мікросхемі

Ємність між двома довільно вибраними плівковими елементами визначають за формулою:

$$C = 0,0885e'cl, \quad (2.87)$$

де  $e'$  – розрахункова відносна діелектрична проникність;

$c$  – коефіцієнт, що відповідає взаємному положенню провідних елементів в мікросхемі (в таблиці 2.11 наведені формули для розрахунку ємнісного коефіцієнта  $c$ );

$l$  – довжина плівкових провідників.

$$e' = e_2 \text{ при } e_1 > e_2, \quad (2.88)$$

$$e' = \frac{e_1 + e_2}{2} \text{ при } e_2 \approx e_1, \quad (2.89)$$

де  $e_1$  – відносна діелектрична проникність зовнішнього середовища;

$e_2$  – відносна діелектрична проникність матеріалу підкладки.

В табл. 2.11 через  $K$  і  $K'$  позначені основний та додатковий повні еліптичні інтеграли 1-го роду з модулями  $K$  і  $K'$ . Тут же наводяться вирази і для визначення модулів  $k$  і  $k'$ .







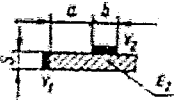
Часткові ємності між паралельними провідниками (parallel conductor) розташовані на підкладці біля інших паралельних провідників, можуть бути оцінені за наступною формулою:

$$C_{ij} = 0,0885 \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} l C_{ij}, \quad (2.90)$$


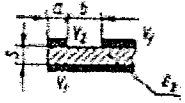

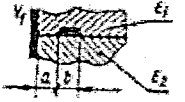
де  $C_{ij}$  – ємнісний коефіцієнт  $i$ -го і  $j$ -го провідників;

$l$  – довжина провідників.

Таблиця 2.11 – Основні співвідношення для розрахунку паразитних ємностей

Розміщення провідних елементів в гібридній плівковій мікросхемі	$e' = e_2 > e_1$	$e' = \frac{e_1 + e_2}{2}$
1	2	3
	$c_1 = \frac{K}{K'};$ $k = \text{th} \frac{\pi a}{2S}$	
	$k' = \sqrt{1 - K^2};$ $c_2 = c_1$	
	$c_3 = c_1$	
	$c_4 = \frac{1}{c_1}$	
	$c_5 = \frac{1}{2} c_4$	
	<p style="text-align: center;">-</p>	$c_6 = (1,3 \div 1,4) c_2$
	$c_7 = \frac{K}{K'};$ $k = \frac{\text{th} \frac{\pi a}{2S}}{\text{th} \frac{\pi(a+b)}{2S}};$ $k' = \sqrt{1 - K^2}$	<p style="text-align: center;">-</p>

Продовження таблиці 2.11

1	2	3
	$c_8 = \frac{1}{2} c_7$	$c_8 = \frac{K}{K'};$ $k = \frac{a}{a+b};$ $k' = 1 - K^2$
	$c_9 = \frac{1}{c_7}$	$c_9 = 2 \frac{K}{K'};$ $k = \sqrt{\frac{b}{a+b}};$ $k' = 1 - K^2$
	$c_{10} = 2c_9$	$c_{10} = 2c_9$
	<p style="text-align: center;">—</p>	$c_{11} = 2c_8$

Для системи паралельних провідників (рис. 2.12) шириною  $b$ , розміщених на підкладці на відстані  $a$  один від одного, ємнісні коефіцієнти  $C_{ij}$  обчислюються таким чином.

На рис. 2.12 зображені такі системи: а – два провідники; б – три провідники; в – чотири провідники; г – п'ять провідників; д – шість провідників. Тут  $b_1, b_2, \dots, b_5$  – ширина провідників;  $a_1, a_2, \dots, a_5$  – відстань між провідниками.

Для системи, зображеної на рис. 2.12, а:

$$C_{12} = 1,56 + 0,41 \lg \frac{b_1 b_2}{a_1^2}. \quad (2.91)$$

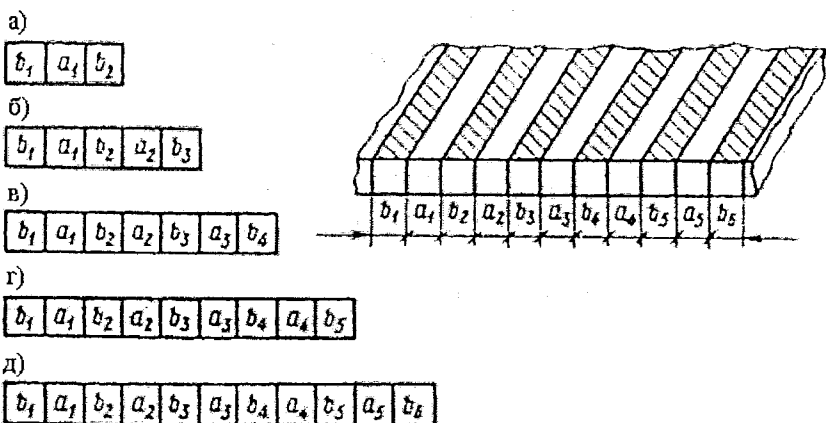


Рисунок 2.12 – Система паралельних плівкових провідників, розміщених на підкладці

Для системи, зображеної на рис. 2.12, б:

$$C_{12} = 1,18 + 0,381 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}, \quad (2.92)$$

$$C_{13} = 0,58 + 0,27 \cdot \lg \left( \frac{b_1^{13/12} \cdot b_3^{13/12}}{a_1^{1/3} \cdot b_2^{3/2} \cdot a_2^{1/3}} \right). \quad (2.93)$$

Для системи, зображеної на рис. 2.12, в:

$$C_{12} = 1,10 + 0,29 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}. \quad (2.94)$$

$$C_{13} = 0,37 + 0,171 \lg \frac{b_1 b_3^{3/2}}{b_2^{1/6} \cdot a_1^{1/3} \cdot a_2^{1/3}}. \quad (2.95)$$

$$C_{14} = 0,36 + 0,18 \lg \frac{b_1 b_4}{b_2^{3/4} \cdot a_2^{1/2} \cdot b_3^{3/4}}. \quad (2.96)$$

$$C_{23} = 0,96 + 0,41 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2}. \quad (2.97)$$

Для системи, зображеної на рис. 2.12, г:

$$C_{12} = 1,07 + 0,2 \lg 8 \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}. \quad (2.98)$$

$$C_{13} = 0,32 + 0,15 \lg \frac{b_1 b_3^{3/2}}{b_2^{11/6} \cdot a_1^{1/3} \cdot a_2^{1/3}}. \quad (2.99)$$

$$C_{14} = 0,21 + 0,11 \lg \frac{b_1 b_4^{3/2}}{b_2 a_1^{1/2} b_3}. \quad (2.100)$$

$$C_{23} = 0,92 + 0,40 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2}. \quad (2.101)$$

$$C_{24} = 0,25 + 0,15 \lg \frac{b_2^{1/3} b_4^{13/12}}{a_2^{1/3} b_3^{3/2} a_3^{1/3}}. \quad (2.102)$$

Для системи, зображеної на рис. 2.12, д:

$$C_{12} = 1,06 + 0,28 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}. \quad (2.103)$$

$$C_{13} = 0,30 + 0,14 \lg \frac{b_1 b_3^{3/2}}{b_2^{11/6} \cdot a_1^{1/3} \cdot a_2^{1/3}}. \quad (2.104)$$

$$C_{14} = 0,18 + 0,091 \lg \frac{b_1 b_4^{3/2}}{b_2 a_1^{1/2} b_3}. \quad (2.105)$$

$$C_{23} = 0,91 + 0,391 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2}. \quad (2.106)$$

$$C_{24} = 0,22 + 0,141 \lg \frac{b_2^{13/12} b_4^{13/12}}{a_2^{1/3} a_3^{3/2} a_5^{1/5}}. \quad (2.107)$$

$$C_{34} = 0,89 + 0,39 + 0,391 \lg \frac{b_3 b_4}{a_3^2}. \quad (2.108)$$

Оцінювання ємностей між ввігнутих та прямих кутів паралельними плівковими провідниками, що розташовуються на підкладці (рис. 2.13), може бути виконано за формулою (2.87). Для цього розглядається система провідників, що розбивається на дві: перша складається із провідників, котрі розташовані під прямим кутом, з відстанню  $2b$  від вигину першого провідника, друга – із паралельних ділянок провідників, розрахунок ємностей яких проводять за формулами (2.87) – (2.93).

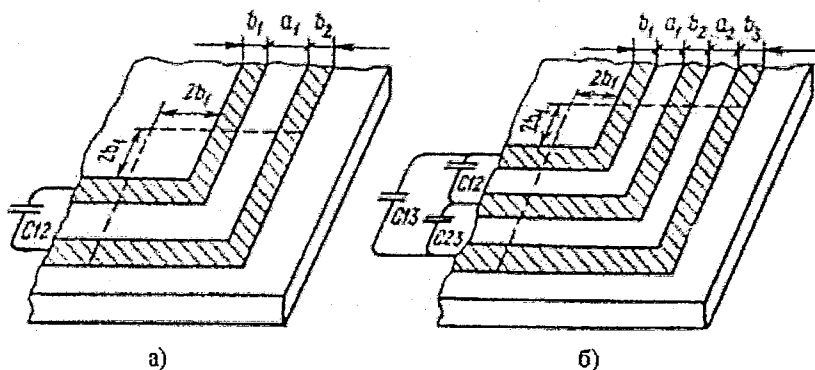


Рисунок 2.13 – Ввігнуті під прямим кутом паралельні плівкові провідники, розташовані на підкладці: а – два провідники, б – три провідники

При оцінюванні ємностей паралельних провідників, розташованих під прямим кутом, у формулі (2.87) замість  $l$  слідує підставляти  $l_{екв}$ . Значення  $l_{екв}$  і ємнісних коефіцієнтів визначається в даному випадку таким чином.

Для системи, показаної на рис. 2.13, а: при оцінюванні ємності  $C_{12}$

$$\begin{aligned} l_{екв} &= 20,25b_1, \\ C_{12} &= 1,18 + 0,311\lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}. \end{aligned} \quad (2.109)$$

Для системи, показаної на рис. 2.13, б: при оцінюванні ємності  $C_{12}$

$$\begin{aligned} l_{екв} &= 20,25b_1, \\ C_{12} &= 1,18 + 0,311\lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}. \end{aligned} \quad (2.110)$$

При оцінюванні ємності  $C_{23}$  маємо:

$$\begin{aligned} l_{екв} &= 26,23b_1, \\ C_{23} &= 1,18 + 0,311\lg \frac{b_3 b_2^2}{a_2^3}. \end{aligned} \quad (2.111)$$

При оцінюванні ємності  $C_{13}$  маємо:

$$\begin{aligned} l_{екв} &= 23,19b_1, \\ C_{13} &= 0,58 + 0,271\lg \frac{b_1^{13/12} b_3^{13/12}}{a_1^{1/3} b_2^{3/2} a_2^{1/3}}. \end{aligned} \quad (2.112)$$

### Контрольні запитання

1. Як визначається допустима похибка коефіцієнта форми тонкоплівкового резистора?
2. Послідовність розрахунку тонкоплівкових прямокутних резисторів.
3. Послідовність розрахунку тонкоплівкових резисторів складної форми.
4. Перевірний розрахунок тонкоплівкових резисторів.
5. Як визначається найменша товщина діелектрика тонкоплівкового конденсатора?
6. Як визначається максимально допустима похибка площини тонкоплівкового конденсатора?
7. Послідовність розрахунку тонкоплівкових конденсаторів малої площі.
8. Послідовність розрахунку тонкоплівкових конденсаторів, що мають площу більшу за  $5 \text{ мм}^2$ .
9. Перевірний розрахунок тонкоплівкових конденсаторів.
10. В яких випадках резистори та конденсатори виконуються у навісному вигляді та недоцільне їх виконання за тонкоплівковою технологією?

### 3. КОНСТРУЮВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ТОВСТОПЛІВКОВИХ ГІС

#### 3.1 Плати та пасти для товстоплівкових ГІС

Плати товстоплівкових ГІС повинні бути дешевими, мати високу механічну міцність, теплопровідність, термостійкість та хімічну стійкість.

Найбільш підходящим матеріалом для плат товстоплівкових ГІС є високо-глиноземна кераміка 22ХС, полікор та кераміка на основі оксиду берилію, електрофізичні параметри яких наведено в табл. 3.1.

Висока механічна міцність кераміки дозволяє використовувати плату як деталь корпусу із отворами, пазами, а висока теплопровідність дає можливість виготовляти потужні мікросхеми.

Найвищу теплопровідність має берилієва кераміка, проте у масовому виробництві її не використовують через високу токсичність оксиду берилію. Кераміку типу «полікор» застосовують для створення багатошарових товстоплівкових ГІС.

В умовах масового виробництва використовують плати з кераміки 22ХС, які виготовляють пресуванням порошків або методом шлікерного лиття з подальшим обпалюванням при температурі 1650 °С.

Точність виготовлення пасивної частини мікросхеми значною мірою залежить від товщини та шпаруватості плати. Максимальна кривизна поверхні (макронерівність) не повинна перевищувати 4мкм на 1мм. Шпаруватість (мікронерівність) робочої поверхні плати повинна бути не нижче 8-го класу (висота нерівностей 0,32-0,63мкм). Більш висока чистота обробки поверхні плати не потрібна, оскільки адгезія товстих плівок до шпаруватої поверхні краща, а вплив мікронерівностей мало впливає на властивості плівок товщиною 10-70 мкм.

Розміри плат визначаються конкретною конструкцією корпусів. Максимальні розміри плат. 60×48 мм. Плати великих розмірів не застосовують через погіршення параметрів плівкових елементів внаслідок короблення плат при випалюванні плівок. Товщина плат 0,6–1 мм.

Нанесення матеріалу товстих плівок, у склад яких, як правило, входить метал, оксид металу та скло, на плату проводиться шляхом продавлювання через сітчастий трафарет, що має закриті та відкриті ділянки (рис. 3.1). Для трафаретного друку матеріал товстих плівок повинен мати консистенцію пасти. Пасти поділяють на провідні (для провідників, контактних площадок та обкладинок конденсаторів), резистивні та діелектричні (для конденсаторів, ізоляційних та захисних шарів).

До складу паст входять основні матеріали, які надають плівкам необхідні для їх функціонування фізичні властивості і допоміжні

матеріали, які надають пастам основні технологічні та фізико-хімічні властивості.

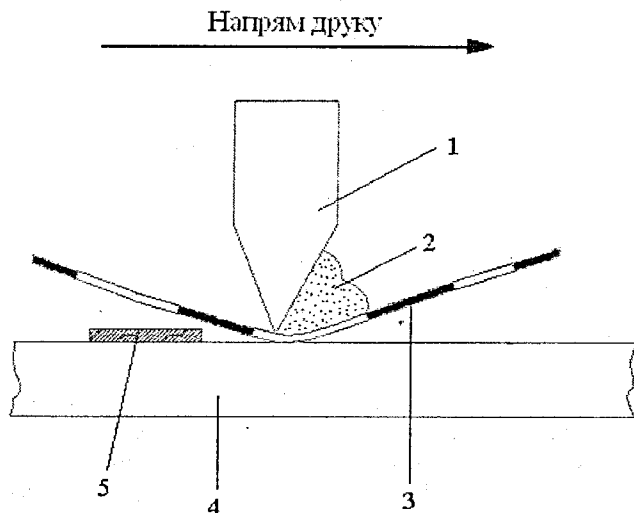


Рисунок 3.1 – Схема процесу трафаретного друку безконтактним методом:  
1 – рапель; 2 – паста; 3 – трафарет; 4 – плата; 5 – відбиток пасты

Як основні матеріали в провідникові та резистивні пасты входять метали Ag, Au, Pt, Pd, In, Os, Ro, сплави Pt-Au, Pd-Ag, Pd-Au, багатокомпонентні системи Pd-PdO-Ag. Із ціллю економії дорогіх металів для формування резисторів застосовують сплави Ag-Ru, Bi-Ru, Ru-Ig та пасты на основі рутенію. Залежність питомого поверхневого опору від концентрації металевих порошоків в пасті подано на рис. 3.2. Основним матеріалом для діелектричної пасты служить роздрібнена кераміка із високою діелектричною проникністю та низьким  $\text{tg } \delta$ , наприклад кераміка на основі  $\text{BaTiO}_3$ . Для міжшарової ізоляції використовують кристалізуюче скло з малим значенням діелектричної проникності.

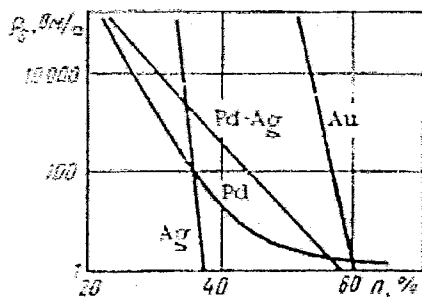


Рисунок 3.2 – Залежність  $\rho_s$  паст від концентрації металевих порошоків у скляній фриті

Для доброго зчеплення шівки із платою та зв'язування частинок основного матеріалу між собою в склад паст вводять порошок скла (найчастіше вісмутоборосилікатне скло). Для надання пасті необхідної в'язкості та поверхневого натягу, дозволяючи їй легко проникати крізь трафарети (stencils) і, не розтікаючись, закріплюватися на платі, вводять додаткові органічні речовини та розчинники. В склад паст входить приблизно 2/3 основної речовини і скла, а також 1/3 органічних домішок. Характеристики провідних, резистивних і діелектричних паст наведені у табл. 3.1-3.3, а параметри пасивних елементів товстошліткових ГІС – у табл. 3.4.

Таблиця 3.1 – Питомий поверхневий опір  $\rho_s$ , резистивних паст

Позначення пасти	ПР-5	ПР-100	ПР-500	ПР-1к	ПР-3к	ПР-6к	ПР-20к	ПР-50к	ПР-100к
Питомий поверхневий опір $\rho_s$ , Ом/□	5	100	500	1000	3000	6000	20000	50000	100000

Таблиця 3.2 – Характеристики провідних паст (ПП)

Позначення паст	Товщина шару, мм	Питомий поверхневий опір $\rho_s$ , Ом/□, не більше	Область застосування
ПП1	10-20	0,05	Для виготовлення провідників, нижніх обкладинок конденсаторів і контактних площадок першого шару з розмірами сторін елементів не менше 0,2 мм
ПП2	15-20	5,0	Для виготовлення верхніх обкладинок конденсаторів, не змочуваних припоєм при обробці лугом
ПП3	15-25	0,05	Для виготовлення провідників, нижніх обкладинок конденсаторів і контактних площадок під монтаж навісних компонентів із жорсткими выводами
ПП4	15-25	0,05	Для виготовлення провідних елементів, які наносяться на шар діелектрика

### 3.2 Нанесення та термообробка паст

Нанесення паст може бути виконано двома способами: безконтактним та контактним.

При безконтактному способі (contactless method) підкладку, на яку потрібно нанести пасту, встановлюють під сітчастим трафаретом із деяким прорізом; пасту подають поверх трафарету та пересуванням ракеля через отвори у трафареті переносять на підкладку у вигляді стовпців, які копіюють отвори у сітці (див рис. 3.1). Розтікаючись, стовпці

об'єднуються, утворюючи такий же малюнок, як і на трафареті. Сітчасті трафарети виготовляють із капрону, нейлону або нержавіючої сталі.

Таблиця 3.3 – Характеристики паст для діелектрика конденсаторів (ПК) та міжшарового діелектрика (ПД)

Позначення паст	Товщина плівки, мкм	Питома ємність $C_0$ , пФ/см <sup>2</sup>	Тангенс кута діелектричних втрат на частоті 1,5 МГц, $\text{tg } \delta \times 10^3$	Область застосування
ПК 1000-30	40-60	3700	3,5	Для діелектрика конденсаторів, ізоляції проводів, що перетинаються
ПК 12	40-60	10000	3,5	Для діелектрика конденсаторів
ПД-1	40-70	160	2	Для міжшарової ізоляції при двох рівнях плівкових елементів
ПД-2	50-60	220	3	Для міжшарової ізоляції при трьох (та більше) рівнях плівкових елементів
ПД-3	30-50	-	2	Для верхнього захисного шару при використанні паст ПД-1
ПД-4	30-50	-	3	Для верхнього захисного шару при використанні паст ПД-2

Таблиця 3.4 – Основні параметри пасивних елементів товстошлівкових ГС

Параметри	Елементи		
	Резистори	Конденсатори	Міжшарова ізоляція
Товщина плівки, мкм	15-20	40-60 (діелектрик)	30-70
Мінімальний розмір l×l	0,8×0,8	1×1	-
Діапазон номіналів	25 Ом – 1 МОм	50-2500 пФ	-
Допустимі відхилення від номіналу, %	±2	±15	-
Температурний коефіцієнт опору ТКР, 1/°С, при T = -60 ÷ +125 °С	±8×10 <sup>-4</sup>	-	-
Максимально допустима питома потужність розсіювання P <sub>0</sub> , мВт/мм <sup>2</sup>	30-80	-	-
Температурний коефіцієнт ємності ТКР, 1/°С, при T = -60 ÷ +85 °С	-	±3,5×10 <sup>-4</sup>	3×10 <sup>-4</sup>
Напруга пробою U <sub>проб</sub> , В	-	150	500

Якість трафаретного друку залежить від швидкості переміщення та тиску ракеля, прорізу між сітчастим трафаретом та платою, натягу трафарету та властивостей пасти. Необхідно строго дотримуватися паралельності плати, трафарету і напрямку руху ракеля.

Для усунення нерівномірності товщини резисторів рекомендується складати топологію так, щоб усі резистори розташовувалися по довжині у одному напрямку по руху ракеля. Через цю ж причину не рекомендується проектувати довгі та вузькі, а також короткі та широкі резистори.

Із рис. 3.3 видно, що при використанні однієї і тієї ж пасти короткі резистори мають більшу товщину плівки, а отже і менше значення  $\rho_s$ , ніж довгі, через різні прогини відкритих ділянок трафарету.

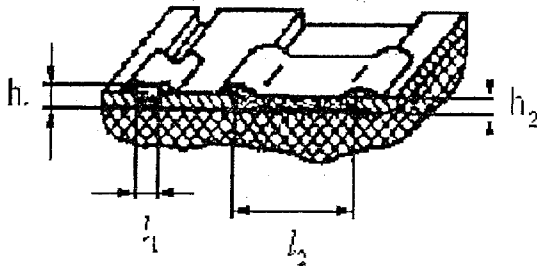


Рисунок 3.3 – Вплив ширини та довжини резистора на товщину відбитка (при  $l_1 < l_2$ ,  $h_1 > h_2$ )

При контактному способі трафаретного друку плату встановлюють під трафаретом без отвору. Відокремлення плати від трафарету здійснюється вертикальним переміщенням без ковзання задля уникнення розмазування відбитка пасти. При контактному способі (contact method) пасту можна наносити пульверизацією за допомогою розпилювача. Точність відбитка при контактному способі вища, ніж при безконтактному.

Пасти після нанесення піддають термообробці (heat treatment) – сушінню та випалюванню. Сушіння необхідне для видалення із пасти летких компонентів (розчинника). Сушіння проводять при температурі  $80 \div 150$  °C протягом 10-15 хв в установках з інфрачервоним (ІЧ) підігрівом. ІЧ-випромінювання проникає у глибину шару пасти на усю його товщину, забезпечуючи рівномірне сушіння без утворення кориньки на поверхні.

Випалювання проводять у печах конвеєрного типу неперервної дії з поступовим підвищенням температури до максимальної, витримкою при ній та подальшим охолодженням. Ряд печей містить приставки ІЧ сушіння, що дозволяє об'єднати дані операції.

Спочатку при термообробці відбувається вигорання органічного в'язучого (температура  $300-400$  °C, при цьому швидкість нагрівання для запобігання утворенню пазирів не повинна перевищувати  $20$  град/хв.). У другій, центральній температурній зоні конвеєрної печі, відбувається сплавлювання частинок основних матеріалів між собою з утворенням провідних містків, та спікання їх зі склом та керамічною платою при температурі  $500-1000$  °C. На виході із печі плати охолоджуються з

невеликою швидкістю задля запобігання їх розтріскуванню та відшаруванню плівок від плат.

Перед першим нанесенням паст плати піддають очищенню та термічному відпалюванню при температурі 600–620 °С. Пасту для створення провідних шарів випалюють при температурі 750–800 °С, пасту діелектрика конденсаторів і ізоляційний шар – при 700–750 °С, верхні обкладинки конденсаторів – при 700–720 °С, діелектрик захисного шару при 620–650 °С, резистори при – 600–650 °С. Для виключення появи наскрізних порожнин в діелектрику конденсаторів його наносять у два шари, причому кожен шар сушать та випалюють окремо.

Якщо одна і та сама паста наноситься на обидві сторони плати, то можливе окреме нанесення та випалювання пасту із кожної сторони, а також нанесення та сушіння пасту з однієї сторони, нанесення, сушіння та випалювання із іншої сторони при одночасному випалюванні раніше нанесеної пасту.

Послідовність технологічних операцій нанесення та термообробки паст при виробництві товстоплівкових ГІС слідє вибирати такою, щоб кожна наступна операція мала більш низьку температуру випалювання у порівнянні з попередньою. Останніми наносять та випалюють резистивні пасту. Можливі такі варіанти:

1) для схем із одношаровим розведенням, які містять провідники, конденсатори та резистори, – формування провідників, контактних площадок та нижніх обкладинок конденсаторів; формування шару діелектрика; формування верхніх обкладинок конденсаторів; формування резисторів;

2) для схем із двошаровим розведенням, які містять провідники та резистори, – формування провідників; нанесення міжшарової ізоляції із отворами для контактних переходів; формування другого шару провідників; формування резисторів;

3) для схем із тришаровим розведенням, які містять провідники та резистори, – формування провідників, шин живлення і зовнішніх контактних площадок; нанесення діелектрика міжшарової ізоляції з вікнами для контактів; формування другого шару провідників та контактів до першого шару; нанесення ще одного шару ізоляції; формування верхнього шару провідників; формування захисного діелектрика; формування резистивних шарів.

Послідовність нанесення шарів вказано для однієї сторони плати, при використанні другої сторони дана послідовність зберігається.

### 3.3 Пасты для провідників, контактних площадок, виводів

Пасты для провідників і контактних площадок вибирають з табл. 3.2. Провідники, розташовані у нижньому шарі при багат шаровій розводці з'єднань не повинні знаходитися під резисторами, які коректують лазерним променем. Мінімальний розмір круглого отвору в міжшаровій ізоляції для з'єднання двох рівнів 0,6 мм, квадратного отвору  $0,5 \times 0,5$  мм. Контактна площадка над переходом повинна бути віддалена від інших елементів не менше ніж на 0,3 мм. Перетин провідників у одношаровому розведенні виконують за допомогою дротяних або плівкових перемичок (рис. 3.4, а, б).

Дротяні перемички (wire bridges) використовують у разі навісних компонентів з гнучкими виводами, а плівкові – з жорсткими виводами. При цьому розміри контактних площадок плівкових перемичок мають бути на 0,2 мм більші ніж ширина перемички (рис. 3.4, б) із кожної сторони.

Варіанти конструктивного виконання зовнішніх контактних площадок та виводів показано на рис. 3.4. Відігнутий кінець виводу не повинен виходити за межі зовнішнього контуру контактної площадки. Внутрішній діаметр контактної площадки для монтажу зовнішнього виводу не повинен бути більше діаметра отвору у платі ніж на 0,1 мм.

### 3.4 Конструктивний розрахунок елементів товстоплівкових ГІС

Максимальне число резистивних шарів на одній стороні плати, виконаних із паст із різним питомим опором, рівне трьом. Резистори рекомендовано орієнтувати однаково, а резистори близькі за номіналами, виготовляти із однієї пасты і розташовувати на одній стороні плати. Контактні площадки резисторів доцільно розташовувати у одному шарі із провідними елементами. Якщо принципова електрична схема не передбачає зовнішніх виводів для кожного резистора, то для забезпечення контролю в процесі лазерної підгонки необхідно створювати технологічні дротяні перемички для з'єднання елемента із зовнішніми контактними площадками, які видаляють після підгонки (зривають пінцетом).

Товстоплівкові конденсатори не слід розташовувати на стороні плати, яку заливають компаундом. Якщо плівкові конденсатори з'єднані між собою, то вони можуть мати спільну нижню або верхню обкладинки.

Основні конструктивно-технологічні обмеження для товстоплівкових ГІС наведено у табл. 3.5.

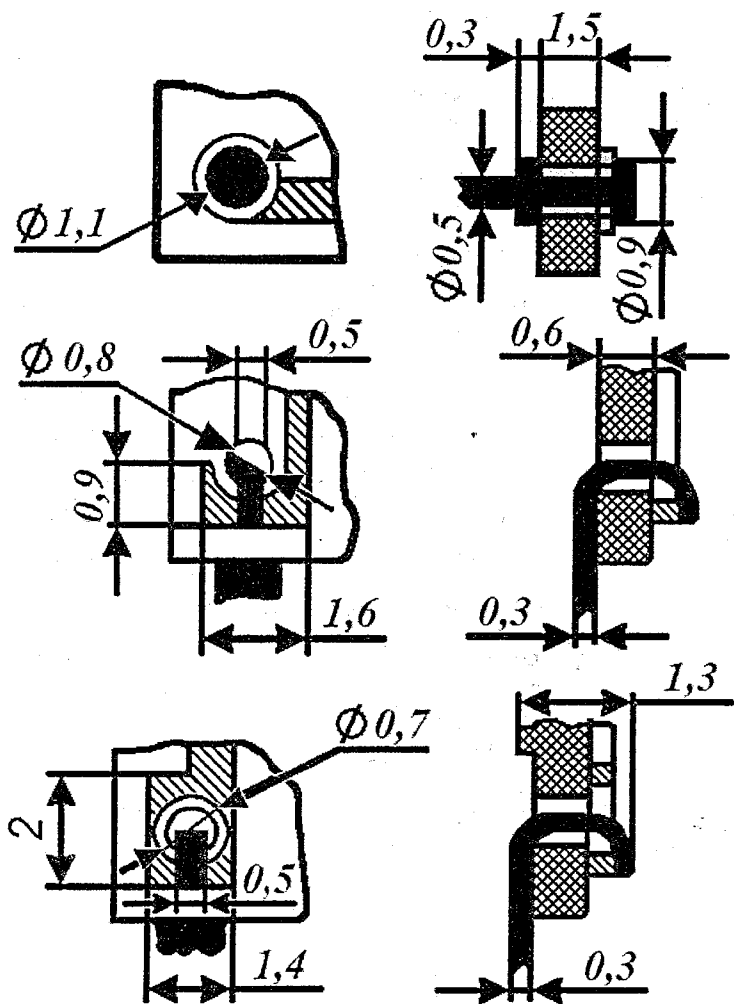


Рисунок 3.4 – Варіанти конструктивного виконання зовнішніх контактних площадок та виводів

### 3.4.1 Розрахунок товстоплівкових резисторів

Враховуючи особливості товстоплівкової технології, усі товстоплівкові резистори виготовляють із підгонкою, у зв'язку із чим розрахунок резисторів на точність не проводять.

Мінімальний розмір резистора, що визначається можливостями товстоплівкової технології, знаходять за табл. 3.4.

Резистори можна розташовувати на обох сторонах плати, проте не більше трьох резистивних шарів на одній стороні. Усі резистори повинні мати прямокутну форму. Не рекомендовано використовувати резистори з коефіцієнтом форми більше 5-6 і менше 0,2.

Вихідні дані для розрахунку: номінал резистора  $R_i$ , кОм; потужність розсіювання  $P_i$ , мВт; відносна похибка виготовлення резистора до підгонки  $\gamma_R$ , % (див. табл. 3.5); максимально допустима питома потужність розсіювання резистивної плівки  $P_0$ , мВт/мм<sup>2</sup>; мінімальні розміри резистора  $b_{\min} \times l_{\max} = 0,8 \times 0,8$  мм; крок координатної сітки, мм.

#### Порядок розрахунку товстоплівкових резисторів

1. Усі резистори розташовують в порядку їх номіналів і розбивають орієнтовно на групи так, щоб при виготовленні кожний резистор складався не більше ніж із 5-6 квадратів. Розбивання проводять на основі номіналів опорів і значення  $\rho$ , резистивних паст (див. табл. 3.1).

2. Для кожної групи визначають оптимальне значення питомого опору резистивної паст  $\rho_{soon}$ :

$$\rho_{soon} = \sqrt{\frac{\sum_1^n R_i}{\sum_1^n 1/R_i}}, \quad (3.1)$$

де  $n$  – кількість резисторів.

3. За розрахованим значенням  $\rho_{soon}$  вибирають відповідно до табл. 3.1 пасту із питомим опором  $\rho_s$ , найближчим до  $\rho_{soon}$ .

4. Визначають коефіцієнт форми резистора:

$$K_\phi = R / \rho_s. \quad (3.2)$$

Для  $K_\phi \geq 1$  визначають геометричні розміри резистора: ширину  $b$  та довжину  $l$ .

5. Ширина резистора прямокутної форми  $b_{роз}$  повинна бути не менша найбільшого значення однієї з двох величин  $b_p$  або  $b_{техн}$ :

$$b_{роз} \geq \max(b_p, b_{техн}), \quad (3.3)$$

де  $b_{техн}$  – мінімальна ширина резистора, обумовлена можливостями товстоплівкової технології;

$$b_{техн} = 0,8 \text{ мм (див. табл. 3.5).}$$

Ширина резистора із умови виділення даної потужності

$$b_p \geq \sqrt{(K_p P_0) / (P_0 K_\phi)}, \quad (3.4)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт запасу потужності, який враховує підгонку резистора:

$$K_p = 1 + \gamma_R / 50. \quad (3.5)$$

При  $\gamma_R = 50\%$ ,  $K_p = 2$ .

6. Розрахункова довжина резистора

$$l_{роз} = b_{роз} \cdot K_\phi. \quad (3.6)$$

Розрахункові значення  $l_{роз}$ ,  $b_{роз}$  коректують. За довжину  $l$  і ширину  $b$  резистора приймають значення, найближчі до розрахункових в сторону зменшення опору резистора  $R$ , кратні кроку або половині кроку координатної сітки з урахуванням масштабу креслення топології. Наприклад, якщо крок координатної сітки 1мм. Масштаб 10 : 1, то герметичні розміри округляють до значення, кратного 0,1 мм, причому ширину  $b_{роз}$  коректують у більшу, а довжину  $l_{роз}$  – у меншу сторону. За відкоректованим значенням довжини резистора  $l$  в залежності від ширини  $b$  із графіків рис. 3.5, а-ж знаходять виправлене значення довжини резистора  $l_{вип}$  із врахуванням розтікання паст.

Для резисторів, які мають  $K_{\phi} < 1$ , розрахунок починають із визначення довжини за аналогією із наведеними формулами:

$$l_{роз} \geq \max \{ l_p, l_{техн} \},$$

$$l_p \geq \sqrt{(K_p \cdot P \cdot K_{\phi}) / P_0}, \quad (3.7)$$

$$l_{техн} = 0,8 \text{ мм (див. табл. 3.5),}$$

$$b_{роз} = l_{роз} / K_{\phi}.$$

7. Довжина резистора із врахуванням перекриття із контактними площадками

$$l_{нох} = l_{вип} + 2e, \quad (3.8)$$

де  $e$  – мінімальний розмір перекриття, який визначається за табл. 3.5. Зазвичай значення  $e$  беруть рівним ширині провідника.

7. Площа резистора

$$S = l_{\text{нох}} \cdot b. \quad (3.9)$$

Оптимальне число паст визначають із умови, щоб площа, яку займають усі резистори на платі, була мінімальною. Якщо виявиться, що при збільшенні числа паст виграш у площі незначний або розміри плати достатні, то доцільно зупинитися на меншому числі паст. При цьому похибка виготовлення резисторів буде тим меншою, чим менше відрізняється форма резистора від квадрата. Для вибору оптимального варіанта можна використати програму розрахунку товстоплівкових резисторів на ЕОМ.

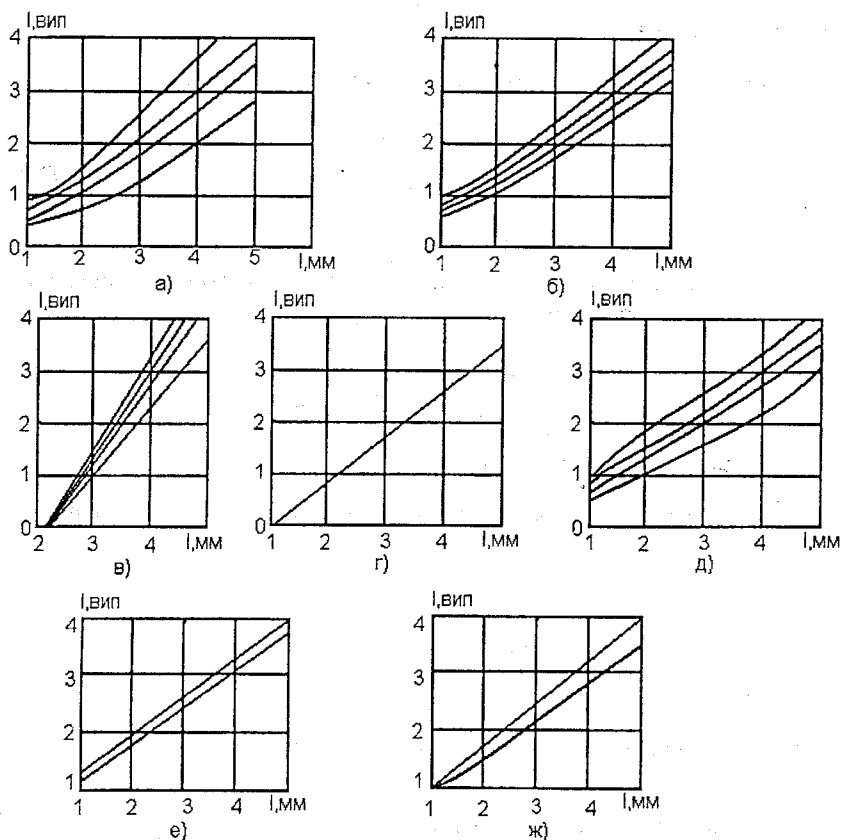


Рисунок 3.5 – Графік коректування довжини резисторів для урахування розтікання паст

### 3.4.2 Розрахунок товстоплівкових конденсаторів

Вихідні дані для розрахунку: ємність конденсатора  $C$ , пФ; відносна похибка виготовлення конденсатора  $\gamma_c$ , %; робоча напруга  $U_{роб}$ , В; технологічні обмеження (див. табл. 3.5).

Розрахунок конденсаторів на точність не проводять. Якщо точність виготовлення конденсаторів задана вище 15%, необхідно передбачити ділянку підгонки на верхній обкладинці.

#### Порядок розрахунку товстоплівкових конденсаторів

1. В залежності від діапазону номінальних значень вибирають діелектричну пасту за табл. 3.3, пасти для нижньої та верхньої обкладинки вибирають відповідно до табл. 3.2.

2. Визначають площу верхньої обкладинки конденсатора

$$S = C/C_o. \quad (3.10)$$

3. Розраховують геометричні розміри верхньої обкладинки конденсатора. Для обкладинок квадратної форми

$$L = B = \sqrt{S}. \quad (3.11)$$

4. Розраховують геометричні розміри нижньої обкладинки конденсатора

$$L_n = B_n = L + 2p; \quad (3.12)$$

де  $p$  – перекриття між нижньою та верхньою обкладинками (див. табл. 3.5).

5. Визначають геометричні розміри діелектрика

$$L_o = B_o = L_n + 2f, \quad (3.13)$$

де  $f$  – перекриття між нижньою обкладинкою та діелектриком (див. табл. 3.5).

6. Розраховують площу, яку займає конденсатор на платі

$$S_d = L_d B_d. \quad (3.14)$$

Якщо квадратна форма обкладинок конденсаторів з деяких причин незручна, конструюють обкладинки прямокутної форми, взявши один із розмірів верхньої обкладинки  $L$  або  $B$ , і визначають другий розмір, виходячи із необхідної площі конденсатора і коефіцієнта форми обкладинок.

У разі великої кількості конденсаторів у схемі можна використати програму розрахунку на ЕОМ.

### 3.5 Підгонка товстоплівкових резисторів

В умовах масового виробництва відхилення від номіналів опорів резисторів може досягати 50 %, тому необхідно проводити їх підгонку. Підгонка товстоплівкових резисторів і конденсаторів принципово не відрізняється від тонкоплівкових та проводиться зміною конфігурації елементів або відпалюванням. Використовується лазерна підгонка видаленням частини резистивної плівки. Точність виготовлення резисторів з підгонкою в умовах масового виробництва складає біля 2 %.

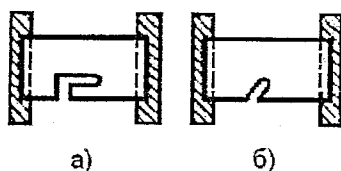


Рисунок 3.6 – Товстоплівковий резистор після лазерної підгонки: а – з ділянками грубої та точної підгонки; б – з підгонкою під кутом

Спочатку проводять грубу підгонку випалюванням плівки поперек резистора, після цього точну – вздовж резистора (рис 3.6, а). Випалювання резистивної плівки під кутом (рис. 3.6, б) дозволяє об'єднати грубу та точну підгонку.

Якщо при лазерній підгонці опір резистора тільки збільшувався за рахунок зменшення його ширини, то відпалювання нагріванням до температури 400–500 °С дозволяє змінити опір в обидві сторони, оскільки при цьому змінюються властивості резистивних плівок.



Рисунок 3.7 – Структурна схема технологічного процесу виготовлення товстоплівкових ГІС

### 3.6 Підгонка товстоплівкових конденсаторів

Для товстоплівкових конденсаторів використовують повітряно-абразивну підгонку видаленням частини верхньої обкладинки абразивом. Це є складною малопродуктивною операцією, при здійсненні якої можливе пошкодження діелектрика та нижньої обкладинки, що знижує вихід придатних схем. В товстоплівкових ГІС широко застосовують навісні

малогобаритні конденсатори. Монтаж навісних компонентів проводять методами, аналогічними до методів тонкоплівкових ГС.

Товстоплівкові ГС герметизують у металополімерні, металокерамічні, керамічні і пластмасові корпуси або заливанням склоемаллю.

На рис. 3.7 наведена загальна структурна схема технологічного процесу виготовлення товстоплівкових ГС. Варіант 1 використовують для схем із дрютяними виводами, герметизуючи в металополімерні корпуси, а варіант 2 – для схем із рамковими виводами, герметизуючи у керамічні, металокерамічні і пластмасові корпуси.

Послідовність операцій виготовлення товстоплівкових ГС, яка містить у своєму складі резистори, навісні та шпівкові конденсатори, провідники та перетини, активні компоненти з жорсткими виводами, армованою рамковими виводами, з герметизацією опресовуванням подана на рис 3.8.

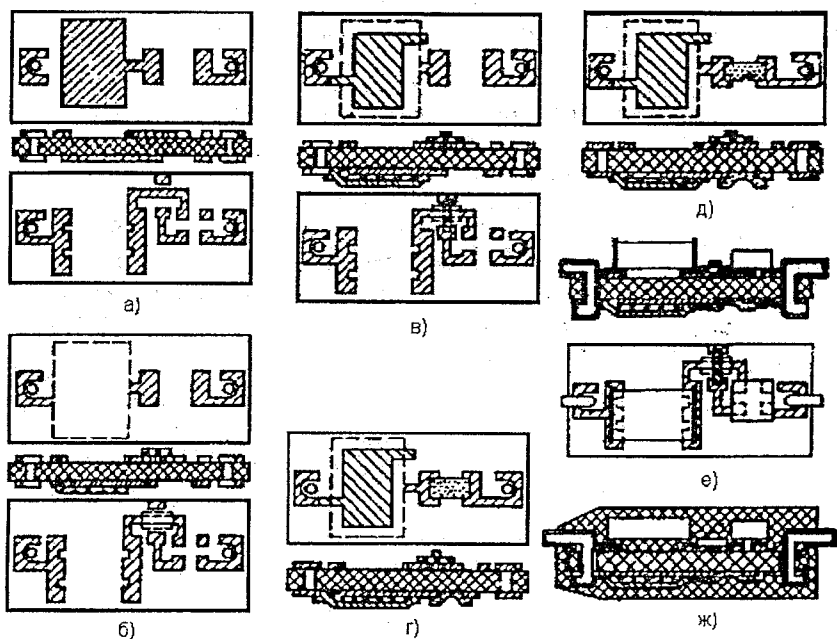


Рисунок 3.8 – Послідовність операцій виготовлення товстоплівкових ГС

Після очищення та відпалювання плати на неї наносять і випалюють почергово з обох сторін провідну пасту для формування провідників, контактних площадок і нижніх обкладинок конденсаторів (рис. 3.8, а), після чого формують діелектрик для конденсаторів та перетинів провідників (рис. 3.8, б). Верхні обкладинки та плівкові перемички (рис. 3.8, в) виготовляють із однієї пасти. Останніми формують резистори (рис. 3.8, г), які мають найнижчу температуру випалювання. Після обслуговування контактних площадок (верхні обкладинки конденсаторів, резистори і діелектрик припоєм не змочують, оскільки їх виготовляють із паст, інертних до припою) проводять лазерний підгонка резисторів (рис. 3.8, д). На рис. 3.8, е, ж подані заключні операції складання: встановлення виводів, монтаж навісних компонентів і герметизація опресуванням з використанням пластмаси, після чого проводять обрізання рамки і роз'єднання виводів.

### 3.7 Навісні компоненти гібридних ІМС

Навісні компоненти – безкорпусні діоди і діодні матриці, транзистори, напівпровідникові ІМС, конденсатори, трансформатори – можуть бути із гнучкими або жорсткими виводами.

У одній товстоплівковій ПС слід застосовувати навісні компоненти з однаковими діаметрами гнучких виводів для спрощення процесу складання. Із аналогічною ціллю розташування компонентів з гнучкими виводами на платі доцільно вказувати технологічними знаками, виконаними резистивними або діелектричними пастами (рис. 3.9). Навісні компоненти рекомендується розташовувати на одній стороні плати. Допускається встановлювання їх на резисторах і провідниках, захищених діелектриком. Не можна встановлювати навісні компоненти на стороні плати, яку заливають компаундом.

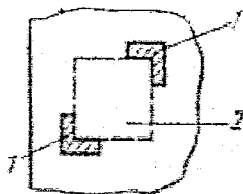


Рисунок 3.9 – Технологічний знак та місце встановлення навісного компонента із гнучкими виводами (1 – технологічний знак, 2 – місце встановлення)

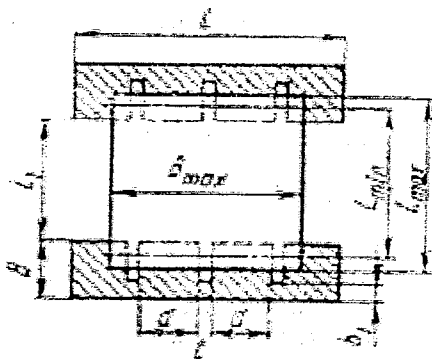


Рисунок 3.10 – Конструкція контактних площадок для монтажу навісних конденсаторів

Активні компоненти (транзистори, діоди, транзисторні та діодні зборки) рекомендується розташовувати рядами, паралельно сторонам плати. Компоненти, однотипні щодо розташування виводів, вважається за краще розташовувати однаково. Контактні площадки для однойменних виводів активних компонентів рекомендується розташовувати у одному ряду.

При монтажі навісних компонентів з жорсткими виводами провідники доцільно покривати захисним діелектриком, залишаючи відкритими тільки контактні площадки. Плівка діелектрика повинна стояти від краю обробленої лугом контактної площадки на 0,5 мм. Враховуючи, що навісні конденсатори мають великий допуск по довжині та ширині, розміри контактних площадок (мм) для них (рис. 3.10) визначають із таких залежностей:

$$l \geq B_{\max} + 0,4 \text{ мм},$$

$$L_1 \geq L_{\min} - 0,2 \text{ мм}, \quad (3.15)$$

$$L_1 + 2B \geq L_{\max} + 0,4 \text{ мм},$$

де  $L_{\min}$ ,  $L_{\max}$  – мінімальна і максимальна довжина конденсатора;

$B_{\max}$  – максимальна ширина конденсатора;

$B$ ,  $l$  – ширина та довжина контактних площадок;

$L_1$  – відстань між контактними площадками.

Для зменшення товщини шару припою контактні площадки для монтажу навісних конденсаторів допускається виготовляти з прорізами шириною  $t$  не більшою за 0,2 мм (рис. 3.10). Мінімальна відстань між прорізами  $d = 0,5$  мм. Мінімальна відстань від краю контактної площадки до прорізу  $b_1 = 0,2$  мм.

Мініатюрні і безкорпусні конденсатори та їх характеристики. Промисловістю випускається велике число типів конденсаторів: оксидно-напівпровідникові, електролітичні, керамічні, плівкові, паперові та металопаперові. Висока стабільність електричних параметрів оксидно-напівпровідникових конденсаторів дозволяє використовувати їх в колах постійного та пульсуючого струму. Конструктивно ці конденсатори являють собою напівпровідниковий шар оксиду металу, розташованого між обкладинками, виготовленими із алюмінію, танталу або ніобію. В електролітичних конденсаторах діелектриком служить оксидний шар на металі, який є однією з обкладинок, інша обкладинка – папір, просочений електролітом. Електролітичні конденсатори характеризуються великими: питомою ємністю, струмами витоку і значними втратами.

Останнім часом широке поширення отримали керамічні конденсатори, що мають високі значення номінальних напруг. Керамічні конденсатори К10-У5 мають високу питому ємність, близьку до ємності електролітичних конденсаторів, однак відрізняються високим опором ізоляції і значною величиною тангенса кута втрат, що звужує область їх застосування. Конструктивно ці конденсатори являють собою диск із сегнетокерамічного матеріалу, на торцеві поверхні якого нанесені срібні електроди; до останніх кріпляться мідні посріблені виводи. Для захисту від впливу навколишнього середовища конденсатори покриваються компаундом. Конденсатори К10-22 мають бусинкову конструкцію і призначені для роботи в колах постійного, змінного та імпульсного струмів в складі герметизованих блоків апаратури на основі мікросхем.

Оксидно-напівпровідникові танталові безкорпусні конденсатори типу К53-15 та К53-16 застосовуються в основному в фільтрах живлення, колах розв'язки і блокування в складі гібридних інтегральних мікросхем. Їх герметизація здійснюється в корпусі мікросхеми.

Таблиця 3.5 – Основні електричні і конструктивні дані мініатюрних конденсаторів

Тип конденсатора	Номинальна ємність, мкФ	Номинальна робоча напруга, В	Допустимі відхилення ємності від номінальної, %	Діапазон робочих температур, °С	Основні розміри А×В×С, або D×H, мм
1	2	3	4	5	6
Оксидно-напівпровідникові					
K53-1	0,1; 0,15; 0,22	6	±10; ±20; ±30	-80...+85	3,2×7,5
	0,1; 0,15	10			
	0,068; 0,1	15			
	0,047; 0,068	20			
	0,033; 0,047	30			
	3,3; 4,7	6			
	2,2; 3,3	15			
	1; 1,5; 2,2	20			
1; 1,5;	30				
K53-2	0,047; 0,068; 0,1	6; 10; 15 30	-20; +50	-	4,7×2,7
	0,15; 0,22; 0,33				
	0,47; 0,68; 1				
	1,5; 1,5; 2,2; 3,3				
	4,7; 6,8; 10; 15				
Електролітичні об'ємнопористі					
K52-4A	01-10	-	-	-40...+70	(1,5-2,5) × (5-7,5)
Керамічні литі секційні					
КЛС	0,00001-0,068	70-250	±5; ±10; ±20	-60...+85	3×3×3
Керамічні					

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6
K10-Y5	0,1	3			
	0,01; 0,015; 0,022; 0,033	10			
	0,0068; 0,01; 0,015; 0,02	25	±20	-60...+85	6×5
	0,0068	50			
	0,0047	100			
K10-7A	0,0000068 - 0,0033	100-250	±10; ±20	-25...+2170	4×4×3
K10-78	0,000022 - 0,0047	25			
K10-9	0,0000022 - 0,47	15	±5; ±10; ±20	-60...+85	2×2×0,6
K10-22	0,000046 - 0,1	—	—	-60...+70	1,7-6,7
Оксидно-папівпровідникові танталові безкорпусні					
K53-15	0,1-33	3-30	±20; ±30	-60...+85	(2,5; 5; 10) × (4; 8) × (1,5; 2)
K53-16	0,01-10	1,6-30	±20; ±50; -20	-60...+85	(1,7; 2,1) × (3,2-4,8) × (1; 1,4)

Електричні і конструктивні характеристики мініатюрних конденсаторів наведені в табл. 3.5. Для деяких типів конденсаторів в таблиці вказані кінцеві значення ємності. В цьому випадку проміжні номінальні значення вибираються відповідно до ГОСТ 2519-67.

Габаритні креслення деяких типів конденсаторів показані на рис. 3.11.

Приклади запису конденсаторів в конструкторській документації:

- 1) конденсатор K53-1-15-3,  $3 \pm 20\%$  O. 464. 023ТУ;
- 2) конденсатор K1С-2-а-М47-22 $\pm 10\%$  O. 460. 020ТУ;
- 3) конденсатор K10-9-М47-240 $\pm 20\%$  O. 460.068ТУ.

Мініатюрні і безкорпусні діоди, діодні матриці та їх характеристики. Як активні компоненти гібридних інтегральних мікросхем

використовуються діодні матриці, безкорпусні та мініатюрні діоди. Діодні матриці за конструктивним виконанням поділяють на безкорпусні та корпусні. Безкорпусні діодні матриці, як правило, обтягуються герметизуючими компаундами, лаками, емаллями, склом, смолами, які захищають *p-n* переходи від зовнішніх впливів.

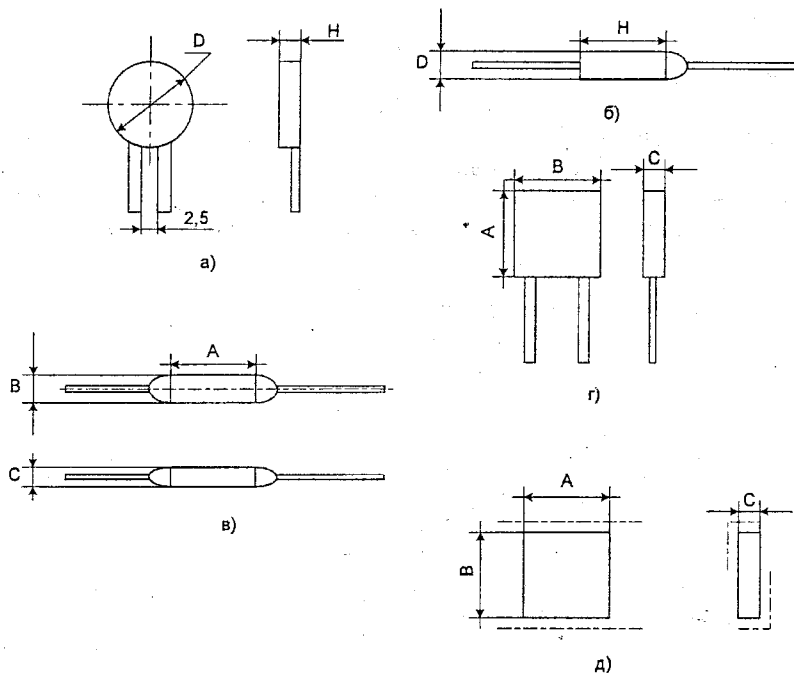


Рисунок 3.11 – Габаритні креслення мініатюрних конденсаторів таких типів:

а) K10-Y5; б) K53-15; в) КПС; г) K10-7Б; д) K10-9

Конструкція корпусних діодних матриць передбачає розміщення активного елемента в корпусі, частіше за все в пластмасовому. Робочий діапазон температур для діодних матриць лежить в межах  $-60 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Крім діодних матриць, в складі гібридних інтегральних мікросхем використовують діоди типів Б29, Б30 і КД103А–Б. Діоди типів Б29 та Б30

являють собою кристал, захищений від впливу зовнішніх факторів. Їх робочий діапазон температур  $-60 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Кремнієві імпульсні діоди типів КД103А + Б герметизуються спеціальними захисними покриттями і використовуються в діапазоні температур  $-55 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Як правило, цей тип діодів використовують у схемах як ключові елементи, які мають малу довжину імпульсів.

Електричні та конструктивні характеристики мініатюрних і безкорпусних діодів і діодних матриць наведені в таблиці 3.6. В даній таблиці в графі, де вказано тип пристрою, вказано позначення діодних матриць, в маркуванні яких присутні буквені індекси. Ці індекси вказують, яке число діодних структур входить в дану діодну матрицю. Наприклад, матриця типу КД907А – з однієї діодної структури, КД907Б – з двох, КД907В – з трьох і КД907Г – з чотирьох діодних структур. Габаритні креслення деяких типів діодних матриць і діодів, а також схеми їх ввімкнення подані на рис. 3.12 і 3.13.

Таблиця 3.6 – Основні електричні і конструктивні дані мініатюрних і безкорпусних діодів та діодних матриць

Тип пристрою	Прама напруга (В) при прямому струмі, мА	Максимальна зворотна напруга, В	Максимальний струм, мА	Зворотний струм, мкА	Паразитна ємність, пФ	Час відновлення, нс	Кількість елементів, шт.	Конструктивні дані
1	2	3	4	5	6	7	8	9
КД 901А							1	Безкорпусна
Б							2	Загальний катод
В	0,4/0,01	10	5	0,2	4	20	3	
Г	0,7/1							
КД 902А							1	
Б	0,5/0,01	5	5	0,2	2	10	2	Безкорпусна
В	0,8/1						3	

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Д							1	
Е	0,55/0,01						2	
Ж	0,85/1						3	
И							4	
КД 904А	0,45/0,01						1	Безкорпус- на
Б	0,8/1	10	5	0,2	2	10	2	Загальний анод
В; Д							3	
Г; Е							4	
КД 907А							1	Безкорпус- на
Б	1/50	40	50	6	4	4	2	Загальний катод
В							3	

Приклади запису діодних матриць в конструкторській документації:

- 1) діодна матриця КД901А 3.336.001ТУ;
- 2) діодна матриця КД907А 3.362.013ТУ;
- 3) діодна матриця КД908 3.362.015ТУ;
- 4) діодна матриця КД917А 3.362.015ТУ.

В гібридних інтегральних мікросхемах, призначених для підсилення і генерації електричних сигналів, як навісні елементи можуть використовуватись тунельні діоди. В залежності від напівпровідникового матеріалу, на базі якого виконаний даний прилад, тунельні діоди поділяються на германієві та арсенід-галійові.

Промисловістю виготовляються такі типи діодів: германієві – ГІ 302 А-Г, ГІ 304 А-Б, ГІ 305 А-Б; арсенід-галійові – АІ 101 А-І, АІ 201 А-Л, АІ 301 А-Г. Електричні і конструктивні характеристики тунельних діодів наведені в таблиці 3.7, а їх габаритні креслення – на рис. 3.14.

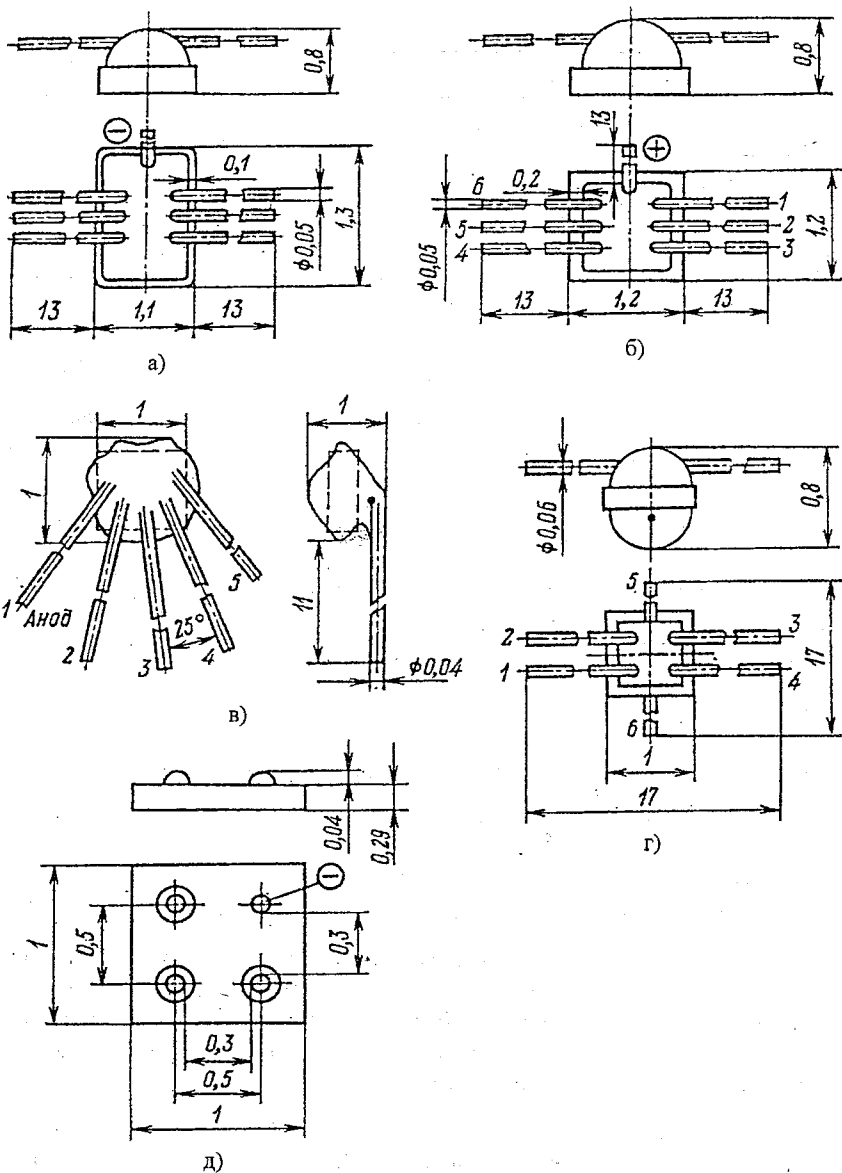


Рисунок 3.12 – Габаритні креслення діодних матриць типів: а – КД901; б – КД902; в – КД904; г – КД907; д – КД913

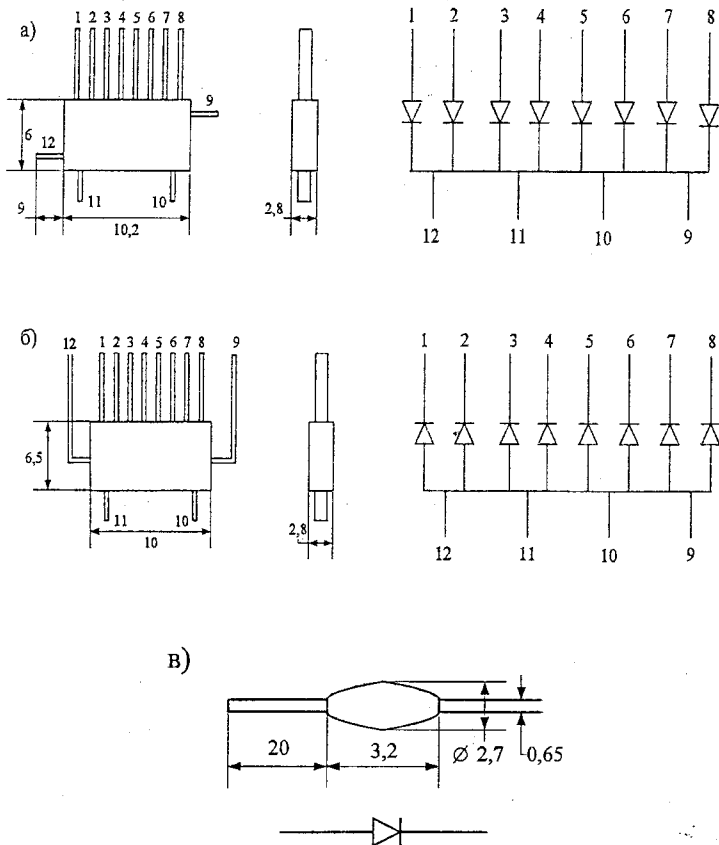


Рисунок 3.13 – Габаритні креслення діодних матриць мініатюрних діодів типів: а – КД908; б – КД917А; в – КД103А

### Мініатюрні та безкорпусні транзистори та їх характеристики

В таблиці 3.9 наведені електричні та конструктивні характеристики мініатюрних та безкорпусних транзисторів. В даній таблиці прийняті такі умовні позначення:  $f_T$  – гранична частота передачі струму в схемі із загальним емітером;  $U_{к-б\ max}$  – максимально допустима напруга колектор-база;  $I_{к\ max}$  – максимально допустимий струм колектора;  $C_k$  – ємність колекторного переходу;  $h_{21e}$  – коефіцієнт передачі по струму в схемі зі спільним емітером;  $P_{к\ max}$  – потужність, що розсіюється транзистором.

В залежності від напівпровідникового матеріалу, в якому сформовані р-п переходи, транзистори поділяються на германієві та кремнієві. До германієвих відносяться транзистори типів ГТ109А – И, ГТ310А – Е, ГТ612, ГТ358. Робочий кристал транзисторів ГТ109 і ГТ310 загерметизований в металічному корпусі, в інших – безкорпусний варіант виконання. Конструктивні розміри корпусних транзисторів наведені на рис. 3.15. Робочий інтервал температур для транзисторів ГТ109А – И і ГТ310А – Е знаходиться в межах  $-20 \dots +55 \text{ }^\circ\text{C}$ .

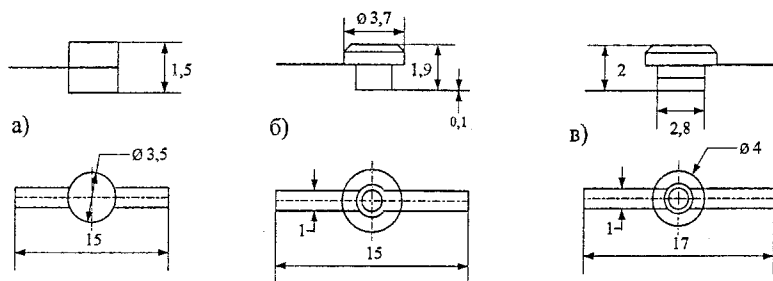


Рисунок 3.14 – Габаритні креслення тунельних діодів типів: а – ГИ302А–Г; б – ГИ304А – В; ГИ305А – Б; в – АИ101А – И; АИ201А – Л; АИ301А – Г

До кремнієвих відносяться транзистори типів КТ202, КТ307, КТ318, КТ324, КТ331, КТ332, КТ336, КТ348, КТ354 та ін. Всі вони є безкорпусними і призначені для використання як навісні елементи в герметизованих гібридних мікросхемах.

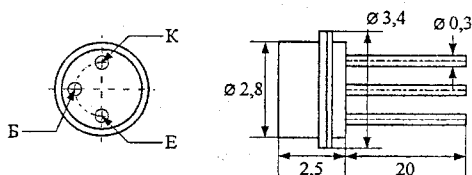


Рисунок 3.15 – Габаритне креслення мініатюрних транзисторів типів: ГТ109А – И; ГТ301А – Е

Температура навколишнього середовища при експлуатації даних типів транзисторів може знаходитися в межах  $-60 \dots +75 \text{ }^\circ\text{C}$ , за винятком транзисторів КТ332А – Д, які мають робочий діапазон температур  $-60 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Габаритні креслення деяких типів транзисторів наведені на рис. 3.16.

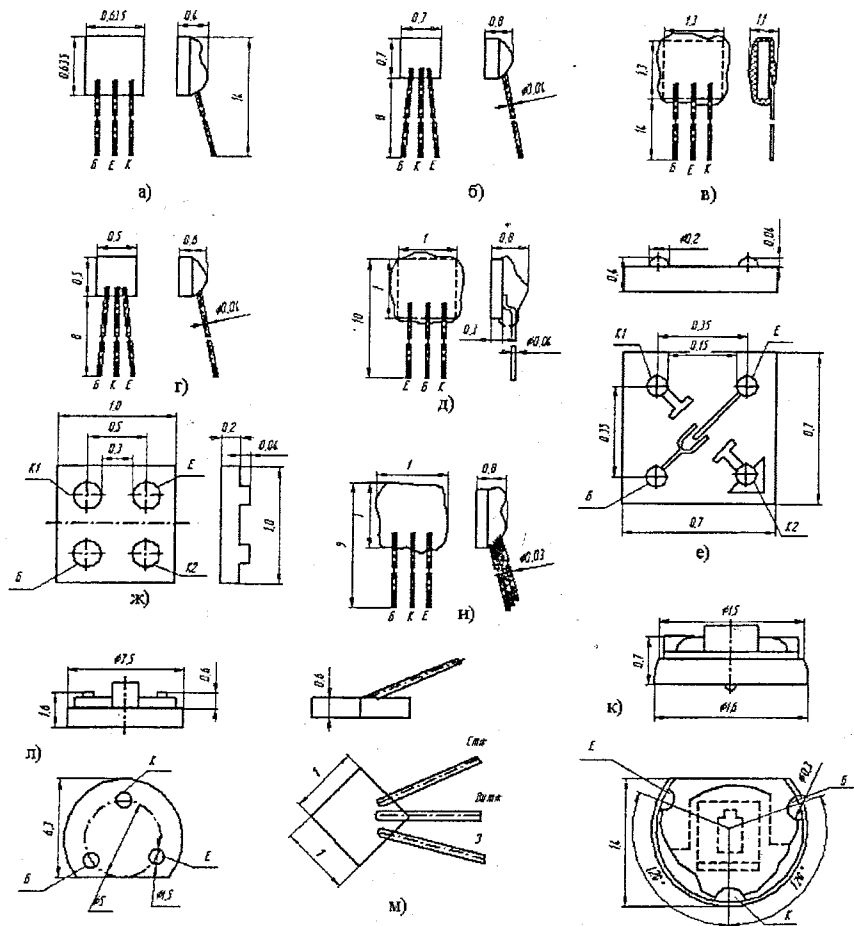


Рисунок 3.16 – Габаритні креслення безкорпусних транзисторів типів:  
 а) КТ202; б) КТ307; в) КТ319; г) КТ324; д) КТ331; е) КТ336; ж) КТ348;  
 и) КТ354; к) КТ353; л) КТ612А; м) КТ201

Таблиця 3.7 – Основні електричні та конструктивні дані тунельних діодів

Тип діода		Струм піку, мА	Відношення струму піку до струму впадини	Напруга піку, мВ	Напруга розчину, мВ	Ємність, пФ	Діапазон робочих температур		Конструктивні дані
							від	до	
ГИ 302	А	1,7-2,3	4,5	0,06	-	80	-60	+70	Мініатюрний корпус, див. рис. 3.14
	Б	4,3-5,8				150			
	В	8,5-11,5				180			
	Г	13-17				120			
ГИ 304	А	4,5-5,1	5	0,075	440	20	-60	+70	Мініатюрний корпус, див. рис. 3.14
	Б	4,9-5,5		0,075	440	20			
АИ 101	А	1 ± 0,25	5	0,16		4	-60	+85	Мініатюрний корпус, див. рис. 3.14
	Б	1 ± 0,25	5	0,16		2-8			
	В	2 ± 0,3	6	0,16		5			
	Д	2 ± 0,3	6	0,16		2,5-10			
	Е	5 ± 0,6	6	0,18		8			
	И	5 ± 0,6	6	0,18		4,5-13			

Таблиця 3.8 – Основні електричні і конструктивні дані польових транзисторів

Тип транзистора	Макс. струм стоку, при $U_{п.с.} = 10 \text{ В}$ , $U_{п.а.} = 0$	Круглість характеристики струму стоку при $U_{п.а.} = -10 \text{ В}$	Напруга відсічки при $I = 10 \text{ мкА}$	Макс. напруга між стоком і затвором, В	Діапазон робочих температур, °С		Конструктивні дані
					від	до	
КП102Е	0,55	0,25-0,70	2,8	-20	-55	70	Безкорпусний, габаритні розміри 1×1×0,6 мм
Ж	1	0,30-0,90	4				
И	1,80	0,35-1	5,5				
К	3	0,45-1,20	7,5				
Л	6	0,65-1,30					
КП103Е	0,3-0,7	0,4-1,8	1,5	-15	-55	70	Безкорпусний, габаритні розміри 1×1×0,6 мм
Ж	0,55-1,2	0,7-2,1	2,2				
И	1-2,1	0,8-2,6	4				
К	1,7-3,8	1,4-3,5	6				
Л	3-6,6	1,8-3,8	7				
М	5,4-12	2-4,4					
КП201Е	0,3-0,65	0,4	1,5	-15	-55	70	Безкорпусний
Ж	0,55-1,2	0,7	2,2				
И	1-2,1	0,8	3				
К	1,7-3,8	1,4	4				
Л	3-6	1,8	6				

Таблиця 3.9 – Основні електричні і конструктивні дані мініатюрних і безкорпусних транзисторів

Тип транзистора	Структура	$f_T$ , МГц	$U_{к-б \text{ max}}$ , В	$I_{к \text{ max}}$ , мА	$h_{21e}$	$P_{к \text{ max}}$ , Вт	Конструктивні дані
1	2	3	4	5	7	8	9
ГТ109 А Б В Г Д Е Ж З	p-n-p	10	6	20	20-50 35-80 60-130 110-250 20-70 50-100 100 20-80	30	Металевий корпус (див. рис. 3.15)
ГТ310 А Б В Г Д Е	p-n-p	160 160 120 120 80 80	10	10	20-70 60-180 20-70 60-180 20-70 60-180		Металевий корпус (див. рис. 3.15)
КТ202 А Б В Г	p-n-p	5	15 15 30 30	10	15-70 40-160 15-70 40-160	15	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
КТ307 А Б В Г	n-p-n	250	10	20	$\geq 20$ $\geq 40$ $\geq 40$ $\geq 80$	15	Безкорпусний (див. рис. 3.16)

Продовження таблиці 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
КТ319 А Б В	n-p-n	100	5	15	15 25 40	15	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
КТ324 А Б В Г Д Е	n-p-n	800  600	10	20	20-60 40-120 80-250 40-120 20-80 60-250	15	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
КТ331 А Б В Г	n-p-n	250 250 250 400	15	20	20-60 40-120 80-220 40-120	15	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
КТ332 А Б В Г Д	n-p-n	300- 500	15	20	20-60 40-120 80-220 40-120 80-220	15	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
КТ336 А Б В Г Д Е	n-p-n	250 250 250 450 450 450	10	20	20-60 40-120 80 20-60 40-120 80	50	Безкорпусний (див. рис. 3.16)

Продовження таблиці 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
КТ348 А					25-75		
Б					35-120		
В	n-p-n	100	5	15	80-250	15	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
Г					25-75		
Д					35-120		
Е					80-250		
ГТ353 А					15-400		
Б	n-p-n	100	10	20	15-400	30	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
В					15-400		
КТ354 А		1000			40-140		
Б	n-p-n	1300	10	20	80-240		Безкорпусний (див. рис. 3.16)
В		1000			120-400		
1Т612	n-p-n	1500	12	120	-	360	Безкорпусний (див. рис. 3.16)
КТ607А	n-p-n	700	30	300	-	1000	Мініаторний корпус
КТ120 А			60		20-200		
Б	p-n-p	3	30	10	-	10	Безкорпусний
Мініаторний кремнієвий транзистор	n-p-n	1500- 2500	40- 50	150- 200	-	500- 1000	Мініаторний корпус (див. рис. 3.16)

Транзистори КТ120 Б використовуються в діодному ввімкненні при відімкненому емітерному виводі.

Як навісні елементи гібридних інтегральних мікросхем можуть використовуватися і польові транзистори, виконані в безкорпусному варіанті. Основні параметри деяких типів польових транзисторів наведені в табл. 3.8.

Приклади запису транзисторів в конструкторській документації:

- 1) транзистор ГТ109В ХХ3.365.138ТУ;
- 2) транзистор ГТ310Б ХХ3.365.139ТУ;
- 3) транзистор КТ319А ХХ3.365.144ТУ.

### 3.8 Захист та складання товстоплівкових ГІС

Захист здійснюють глазуруванням поверхні сформованої плівкової структури склом із низькою температурою розм'якшення, яка не перевищує 500 °С задля уникнення зміни параметрів резисторів. Товщина захисного діелектричного шару 30-60 мкм, опір ізоляції більший ніж  $10^{12}$  Ом при постійній напрузі 100 В.

Якщо товстоплівкова ГІС встановлюється у корпус, то захист з використанням глазурування, як правило, не проводять.

Після нанесення та випалювання усіх шарів пасивної частини схеми проводиться підгонка плівкових елементів, монтаж навісних компонентів, армування (reinforce) (встановлення виводів) та герметизація.

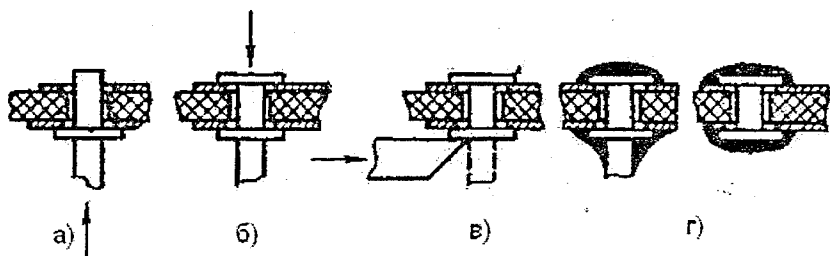


Рисунок 3.17 – Армування плат виводами та контактними переходами:

- а – встановлення виводу; б – розклепування;  
в – обрізання виводу для утворення контактного переходу;  
г – вивід та контактний перехід після обробки лугом

Для здійснення контролю у процесі підгонки контактні площадки елементів повинні бути оброблені лугом. Армування можна проводити до і після підгонки. Виводи та контактні переходи у вигляді дроту (рис. 3.17, а-г) встановлюють перед підгонкою, а рамкові виводи, з'єднані між собою на загальній рамці, – на заключному етапі складання перед герметизацією. Після герметизації рамку обробляють і виводи роз'єднують.

### 3.9 Розробка топології товстоплівкових ГС

При розробці топології враховують особливості товстоплівкової технології, конструктивні та технологічні обмеження.

Послідовність розробки топології аналогічна послідовності, прийнятої для тонкоплівкових ГС.

Плівкові елементи можуть розташовуватися на обох сторонах плати. З'єднання між елементами, розташованими на різних сторонах плати, здійснюють через отвори або зовнішні контактні площадки (рис. 3.18, а, б). Сумарна площа елементів в одному рівні не повинна перевищувати 70% площі робочої сторони плати.

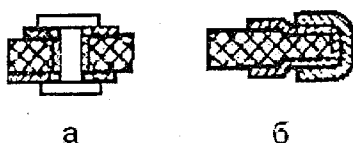


Рисунок 3.18 – Контактні переходи для з'єднання елементів, розташованих на різних сторонах плати:

а) через отвір у платі; б) через бічну поверхню плати

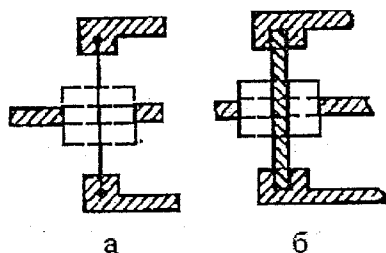


Рисунок 3.19 – Конструкції перемичок при одношаровому розведенні товстоплівкових ГС:

а) провідові; б) плівкові

### 3.10 Розробка ескізу топології гібридної ІМС

Ескіз топології слід виконувати у масштабі 10 : 1 або 20 : 1 на міліметровому папері. Крок координатної сітки топологічного креслення рекомендується вибирати рівним 1 або 0,5 мм. На кресленні необхідно показувати обидві сторони плати.

Оскільки до складу резистивних і провідних паст входять дорогі метали, чим меншою є сумарна площа плівкових провідників і резисторів, тим більш економічне виробництво мікросхеми. Для врахування витрат матеріалів на кресленнях плати вказують площі елементів, нанесених різними пастами.

Таблиця 3.10 – Конструктивно-технологічні обмеження при проектуванні товстоплівкових ГІС

Зміст обмеження	Величина обмеження, мм
1	2
Точність виготовлення лінійних розмірів плівкових елементів і відстаней між ними $\Delta l$ , $\Delta b$ , $\Delta a$ при розташуванні плівкових елементів в одному шарі:	
для паст ПП-3	$\pm 0,05$
для інших паст	$\pm 0,1$
Мінімальний розмір резистора $b_{\min} \times l_{\min}$	$0,8 \times 0,8$
Максимальне відхилення опору від номіналу:	
до підгонки	-50%
після підгонки	$\pm 2\%$
Мінімальна відстань $a$ між плівковими елементами, розташованими в одному шарі:	
для паст ПП-1, ПП-2	0,2
для паст ПП-3	0,05
для паст ПП-4	0,1
для інших паст	0,3

Продовження таблиці 3.10

1	2
Мінімальна відстань $s$ між плівковими елементами, розташованими в різних шарах	0,4
Перекриття $e$ для зміщення плівкових елементів, розташованих у різних шарах	0,1
Мінімальна відстань від краю плати до: плівкового елемента $d$	0,1
краю отвору $j$	0,5
краю навісного компонента $q$	1,0
Мінімальні розміри контактних площадок для монтажу навісних компонентів з круглими або прямокутними виводами:	
$m$	0,2
$n$	0,1
Мінімальні відстані:	
між краями діелектрика та нижньої обкладинки $f$	0,2
між краями нижньої та верхньої обкладинок $P$	0,3
між краєм діелектрика та провідником у місці виводу верхньої обкладинки $k$	0,4
Мінімальна площа перекриття обкладинок конденсатора $L \times B$	1,0×1,0
Мінімальна площа перекриття обкладинок конденсатора від номіналу, %	±15
Мінімальна ширина провідників:	
при перенесенні на кераміку:	
паста ПП-1	0,2
паста ПП-3	0,15

Продовження таблиці 3.10

1	2
при перенесенні на діелектричний шар: паста ПП-1 паста ПП-3 паста ПП-4	  0,3 0,2 0,1
Мінімальна ширина провідника при паянні до нього гнучких виводів	0,4
Мінімальні розміри контактних площадок $a \times b$ для монтажу активних компонентів із гнучкими выводами і дріт'яних перемичок методом паяння: при ручному монтажі: для одного виводу для двох виводів для трьох виводів при автоматичному монтажі: для одного виводу для двох виводів для трьох виводів Мінімальні розміри контактних площадок для контролю	  0,3×0,4 0,4×0,7 0,4×1,0  0,6×0,6 0,6×0,9 0,6×1,2 0,4×0,4
Мінімальна відстань від краю активного компонента: до контактної площадки навісного конденсатора $r$ до контактної площадки, до якої припадає вивід даного елемента, $s$ до обробленого лугом плівкового елемента $t$ Максимальна довжина гнучкого виводу навісного компонента без додаткового кріплення	 1,0 0,8 0,2 3,0

## Контрольні запитання

1. Вкажіть вимоги до плат товстоплівкових ГІС.
2. Які відомі способи нанесення паст на підкладку мікросхеми?
3. Яка послідовність нанесення шарів для схем з одно-, дво-, та тришаровим розведенням?
4. В чому полягає підгонка товстоплівкових резисторів?
5. Які вимоги до застосування навісних компонентів ГІС?
6. Вкажіть порядок розробки ескізу топології товстоплівкових ГІС.
7. Яка умова вибору оптимального числа паст для виготовлення товстоплівкових резисторів?
8. Який порядок розрахунку товстоплівкових резисторів?
9. В якому випадку розрахунок товстоплівкових резисторів починається з довжини?
10. Який порядок розрахунку товстоплівкових конденсаторів?
11. Як залежить питомий поверхневий опір паст від концентрації металевих порошків?
12. Вкажіть варіанти конструктивного виконання зовнішніх контактних площадок та виводів.
13. Як визначається коефіцієнт форми товстоплівкового резистора?
14. Вкажіть варіанти армування плат виводами та контактними переходами.
15. Який температурний діапазон роботи діодних матриць?
16. Чим обробляються контактні площадки елементів для здійснення контролю в процесі підгонки?
17. В якому масштабі слід виконувати ескіз топології гібридної мікросхеми?
18. Які матеріали використовуються для виготовлення тунельних діодів?

## Словник найбільш вживаних термінів

інтегральна мікросхема	– integrated circuit
електрорадіоелементи	– electric radioelements
транзистори	– transistors
діоди	– diodes
конденсатори	– condensers
резистори	– resistors
напівпровідникові	– semiconductors
плівкові	– pellicles
тонкі	– thins
товсті	– thicks
гібридні	– hybrids
пасивні	– passive
активні прилади	– active devices
елементи	– elements
навісні компоненти	– hanging components
кристал	– crystal
топологія	– topology
перевірка	– verification
показники надійності	– indexes of reliability
режим підсилення	– mode of strengthening
опір навантаження	– resistance of loading
вихідний опір	– resistance of output
вхідний опір	– resistance of input
вхідна характеристика	– input description
вихідна характеристика	– output description
лінія навантаження	– line of loading
вихідний струм	– output current
вихідна напруга	– output voltage
польовий транзистор	– field – transistor
інтенсивність відмов	– intensity refusal
матеріали	– materials
товщина	– thickness
типорозміри	– model size
питомий поверхневий опір	– specifics superficial resistance
чисті метали	– clean metals
сплави	– alloys
діелектрик	– dielectric
масковий метод	– mask method
контактні площадки	– contact grounds
захисний шар	– defense layer

фотолітографічний метод	– photolithography method
нижня обкладинка	– lower tracing
верхня обкладинка	– higher tracing
конструктивний розрахунок	– constructive calculation
потужність розсіювання	– power dispersion
точність виготовлення	– exactness making
повна відносна похибка	– fall relative error
похибка коефіцієнта форми	– error of coefficient form
прямокутна форма	– rectangular form
складна форма	– difficult form
розрахункова ширина	– clearing width
розрахункова довжина	– clearing length
площа	– area
довжина середньої лінії	– length of middle line
оптимальне число ланок	– optimal number of links
підгонка	– adapting
ємність	– capacity
крайовий ефект	– regional effect
похибка активної площі	– error of active area
тангенс кута	– tangent of corner
діелектричних втрат	– dialectical loss
кутова частота	– angular frequency
індуктивність	– inductance
добротність	– good quality
пасти	– pastes
паралельні провідники	– parallel explorer
графарети	– stencils
безконтактний спосіб	– contactless method
контактний спосіб	– contact method
термообробка	– heat treatment
армування	– reinforce
дротяні перемички	– wire bridges

## Література

1. Александров К. К. Электротехнические чертежи и схемы. / К. К. Александров, Е. Г. Кузьмина. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
2. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем. / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина; под ред. И. П. Степаненко. – М. : Радио и связь, 1983. – 232 с.
3. Бойко В. І. Основи технічної електроніки : у 2 кн. Кн. 2. Схемотехніка : підручник. / [В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін.]. – К. : Вища школа, 2007. – 510 с.
4. Борисенко А. С. Технология и оборудование для производства микроэлектронных устройств. Учебник для техникумов. / А. С. Борисенко, Н. И. Бавыкин. – М. : Машиностроение, 1983. – 320 с.
5. Дорошенко Д. Д. Радіокомпоненти та мікроелектронна технологія. Навчальний посібник. / Дорошенко Д. Д., Колесницький О. К., Тужанський С. Є. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 145 с.
6. Дубов Є. В. Проектування мікросбірок та гібридних інтегральних схем. / Дубов Є. В., Лободзінська Р. Ф., Мізерний В. М. – Вінниця : ВДТУ, 2000. – 137 с.
7. Ефимов И. Е. Микроэлектроника : Проектирование, виды микросхем, новые направления : учеб. пособие для вузов. / Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. – М. : Высшая школа, 1978. – 312 с.
8. Жеребцов И. П. Основы электроники. – 5-е изд-е, перераб. и доп. / Жеребцов И. П. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
9. Расчет и конструирование микросхем / [Ю. Калниболотский, Ю. Королев, Г. Богдан, В. Рогоза]. – К. : Вища школа, 1983 – 279 с.
10. Коледов Л. А. Конструирование и технология микросхем. / Коледов Л. А. – М. : Высшая школа, 1984. – 232 с.
11. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. / Коледов Л. А. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
12. Філінюк М. А. Конструювання та розрахунок гібридних микросхем. Навчальний посібник. / Філінюк М. А. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 98 с.
13. Кухарчук В. В. Методичні вказівки до оформлення дипломних проєктів (робіт) для студентів всіх спеціальностей. / В. В. Кухарчук, О. Г. Ігнатенко, Р. Р. Обертюх. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 55 с.
14. Лавриненко В. Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. / Лавриненко В. Ю. – К. : Техніка, 1977. – 376 с.
15. Лисенко Г. Л. Методичні вказівки до оформлення курсових проєктів (робіт) у Вінницькому національному технічному університеті. / Г. Л. Лисенко, А. Г. Буда, Р. Р. Обертюх. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 60 с.
16. Матсон Э. А. Конструкции и технологии микросхем. / Матсон Э. А. – Минск : Высшая школа, 1985. – 206 с.

17. Матсон Э. А., Крыжановский Д. В. Справочное пособие по конструированию микросхем. / Э. А. Матсон, Д. В. Крыжановский. – Минск : Высшая школа, 1982. – 224 с.
18. Матсон Э. А. Конструкции и расчёт микросхем и микроэлементов ЭВА. / Матсон Э. А., Крыжановский Д. В., Петкевич В. И. – Минск : Высшая школа, 1979. – 192 с.
19. Козырь И. Я. Микроэлектроника : учеб. пособие для вузов. В 9 кн. / Под ред. Л. А. Коледова. Кн. 5. И. Я. Козырь. Качество и надежность интегральных микросхем. / Козырь И. Я. – М. : Высшая школа, 1987. – 144 с.
20. Николаев И. М. Интегральные микросхемы и основы их проектирования : учебник для техникумов. / И. М. Николаев, Н. А. Филинюк. – М. : Радио и связь, 1992. – 424 с.
21. Пономарев М. Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВМ. / Пономарев М. Ф. – М. : Радио и связь, 1982. – 288 с.
22. Пономарев М. Ф. Конструирование и расчет микросхем и микропроцессоров. / М. Ф. Пономарев, Б. Г. Коношлев. – М. : Радио и связь, 1986. – 176 с.
23. Полупроводниковые приборы : Транзисторы : Справочник. / Под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 424 с.
24. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА / [Романичева Э. Т., Иванова А. К., Куликов А. С. и др.]. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
25. Схемотехніка електронних систем : у 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої : підручник. / [В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін.]. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К. : Вища школа, 2004. – 366 с.
26. Терещук Р. М. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства : справ. радиолобителя. / Терещук Р. М., Терещук К. М., Седов С. А. – Изд. 4-е, стер. – К. : Наукова думка, 1988. – 800 с.
27. Шелохвостов В. П. Проектирование интегральных микросхем : учеб. пособие. / В. П. Шелохвостов, В. Н. Чернышэв. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 208 с.
28. Чернышов А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. / Чернышов А. А. – М. : Радио и связь, 1988. – 256 с.
29. Якубовский С. В. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы. / Якубовский С. В., Барканов Н. А., Кудряшов Б. П. – М. : Радио и связь, 1985. – 365 с.

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет радіотехніки, зв'язку та приладобудування  
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

ГІБРИДНА ІНТЕГРАЛЬНА СХЕМА ВИХІДНОГО КАСКАДУ

Пояснювальна записка  
з дисципліни: «Технічна електроніка»  
до курсового проекту за спеціальністю  
«Телекомунікації»

08-34.ТЕ.177.00.000 ПЗ

Керівник курсового проекту:  
асистент Стронський В. В.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 р.

Розробив: ст. гр. ТКт-126  
Достокор І. А.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 р.

Вінниця ВНТУ 2016 р.

Додаток Б

№ ряд	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	№ екс.	Примітка
			Документація загальна			
			Вперше розроблена			
1	A4	08-34.ТЕ.033.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	32		
2	A4	08-34.ТЕ.033.00.000 ПЕЗ	Перелік елементів	1		
3	A4	08-34.ТЕ.033.00.000 ЕЗ	Схема електрична принципова	1		
4	A4	08-34.ТЕ.033.00.000 Е4	Схема комутаційних з'єднань	1		
5	A3	08-34.ТЕ.033.00.000 Е8	Топологічне креслення	1		
6	A4	08-34.ТЕ.033.00.000 Е8	Топологічне креслення	1		
7	A3	08-34.ТЕ.033.00.000 СК	Складальне креслення	1		
08-34.ТЕ.033.00.000 ВКП						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		
Розробив	Дідеску І. Л.				Лит.	Аркушів
Перевірив	Строцький В. В.					1
Реценз.						1
Н. Контр.	Строцький В. В.				ВНТУ, гр.ТКт-126	
Затверд.						

## Додаток В

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

ЗАТВЕДЖЕНО

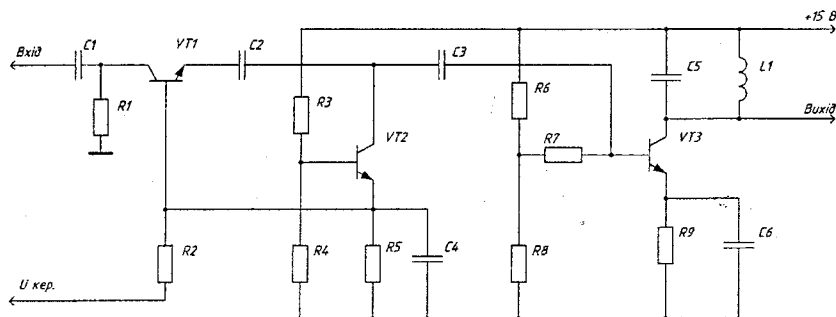
Зав. кафедрою ТКСТБ

к.т.н., професор Бортник Г. Г.

### ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на курсовий проект з дисципліни  
«Технічна електроніка»

Студенту гр. ТКТ-126 Достокору І. А. пропонується розробити гібридну інтегральну схему вихідного каскаду за його принциповою схемою та вхідними характеристиками.



Технічні характеристики вхідного каскаду:

$R1 = 100 \text{ кОм}$ ;  $R2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R3 = 63 \text{ кОм}$ ;  $R4 = 47 \text{ кОм}$ ;  $R5 = 1 \text{ кОм}$ ;  
 $R6 = 75 \text{ кОм}$ ;  $R7 = 1 \text{ МОм}$ ;  $R8 = 2,7 \text{ кОм}$ ;  $R9 = 1,6 \text{ кОм}$ ;

$P=30 \text{ мВт}$ ,  $\gamma_R=8\%$ ,  $\gamma_{cr}=1,5\%$ ,  $\gamma_{ps}=1,5\%$ ;  $\gamma_{Rk}=1,5\%$ ;

$T = -40+110^\circ\text{C}$ ; VT1-VT3 – КТ104А,  $\gamma_{Co}=8\%$ ,  $\text{tg}\delta=0,035$ ;

$C1=C2=C3=C4=0,03 \text{ мкФ}$ ,  $C5=C6=0,1 \text{ мкФ}$ ,  $U_{доc}=9 \text{ В}$ ,  $\gamma_C=19\%$ .

Тему затверджено на засіданні кафедри ТКСТБ, протокол № 1 від 01.09.15 р.

Дата видачі завдання «14» січня 2016 р.

Дата подання до захисту «15» квітня 2016 р.

Керівник \_\_\_\_\_ В. В. Стронський

Завдання отримав \_\_\_\_\_ І. А. Достокор

ЗМІСТ

Анотація.....	2
Annotation.....	3
Вступ.....	4
1 Обґрунтування технології виготовлення мікросхеми.....	5
2 Вибір режиму роботи активного елемента.....	6
3 Розрахунок параметрів півкових елементів.....	11
3.1 Розрахунок резисторів.....	11
3.2 Розрахунок конденсаторів.....	20
3.3 Розрахунок індуктивності.....	27
3.4 Розрахунок провідників і контактних площадок.....	31
4 Комутаційна схема.....	32
5 Розробка ескізу топології мікросхеми.....	36
5.1 Вибір матеріалу підкладки та розрахунок площі підкладки.....	36
5.2 Розробка топологічної схеми пристрою.....	39
5.3 Розрахунок паразитних ємностей.....	40
6 Технологія виготовлення мікросхеми.....	41
7 Розрахунок показників надійності мікросхеми.....	44
Висновки.....	48
Література.....	49

08-34.ТЕ.084.00.000 ПЗ

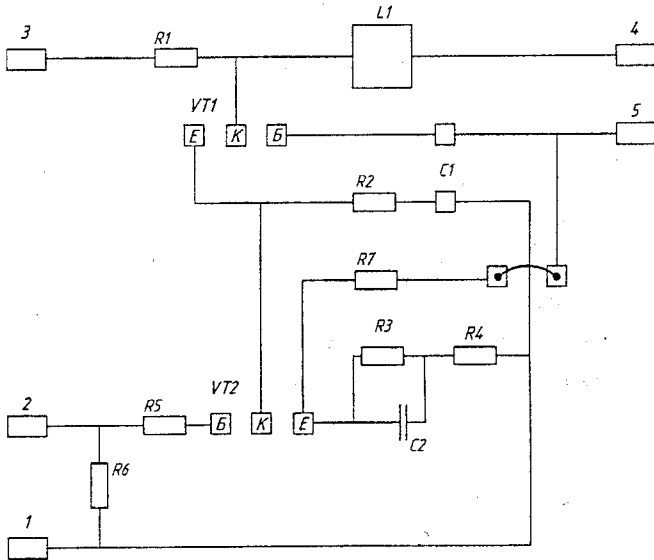
Змк.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Дзюбенко С. В.			Підсилювач НЧ  Пояснювальна записка	Літера	Аркул	Аркулів
Перевірив		Стронський В. В.					1	42
Рецензент								
Н. Контр.		Стронський В. В.						
Загверд.								
						ВНТУ, гр. ТКг-12б		

Додаток Д

08-34. TE.067.00.000 E3

Перше заст.

Справа №



підп. дата

інв.№ дубл.

Форм.інв.№

підп. дата

інв.№ підп.

08-34. TE.067.00.000 E4

Зм.	Лист	№ док-м.	Підп.	Дата
Розробив		Гаврилова М. О.		
Перевірив		Стронський В. В.		
Н. контр.		Стронський В. В.		
Затвердж.				

Вихідний каскад передачі  
сигналу на індикатор  
Схема електрична комутаційна

Літ	Маса	Масштаб
У		
Аркуш 1	Аркушів 1	

ВНТУ, гр ТКм-128

Додаток Е

Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
<u>Резистори</u>			
R1	200 кОм ±10%; 40 мВт	1	плівковий
R2	360 Ом ±10%; 40 мВт ОЖО.467.104 ТУ	1	навісний
R3, R5	2,7 кОм ±10%; 40 мВт	2	плівкові
R4	6,8 кОм ±10%; 40 мВт	1	плівковий
R6	18 кОм ±10%; 40 мВт	1	плівковий
R7	680 кОм ±10%; 40 мВт ОЖО.467.081 ТУ	1	навісний
<u>Конденсатори</u>			
C1	0,91 нФ ±18%; 18 В	1	плівковий
C2	0,75 нФ ±18%; 18 В	1	плівковий
C3	0,56 нФ ±18%; 18 В	1	плівковий
C4	1,5 нФ ±18%; 18 В	1	плівковий
<u>Індуктивність</u>			
L	0,05 мкГн ±10%	1	плівкова
<u>Діоди</u>			
VD1, VD2	ДЗ10 ААО.336.258 ТУ	2	навісні
<u>Транзистори</u>			
VT1	ГТ308В ЦПЗ.365.009 ТУ	1	навісний
VT2	КТ346А ААО.336.015 ТУ	1	навісний
VT3	ГТ402В ГОСТ 5.1673-72	1	навісний
VT4	ГТ404В ГОСТ 5.1673-72	1	навісний

08-34.ТЕ.033.00.000 ПЕЗ

Змін.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробив		Гузь М. Д.		
Перевірів		Строцький В. В.		
Реценз.				
Н. контр.		Строцький В. В.		
Затвердж.				

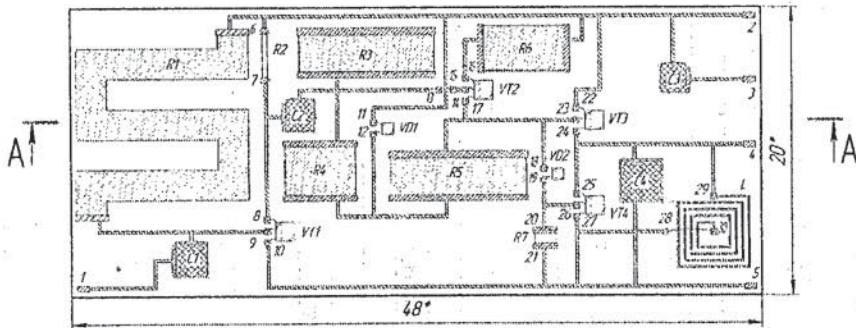
Підсилювач НЧ

Перелік елементів

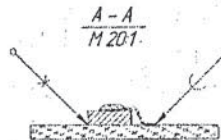
Літ.	Аркуш	Аркушів
	1	1
ВНТУ, зр.ТКм-10		

08-34. TE.033.00.000 СК

Rz60 √(√)



1. \*Разміри для довідок
2. Встановлення безкарпусних компонентів проводити за ГОСТ4: ТО 010.220.
3. Елементи за електричними параметрами повинні відповідати схемі електричній принциповій 08-34. TE.033.00.000 ЕЗ
4. Маркування безкарпусних компонентів, елементів та контактних площадок показано умовно.



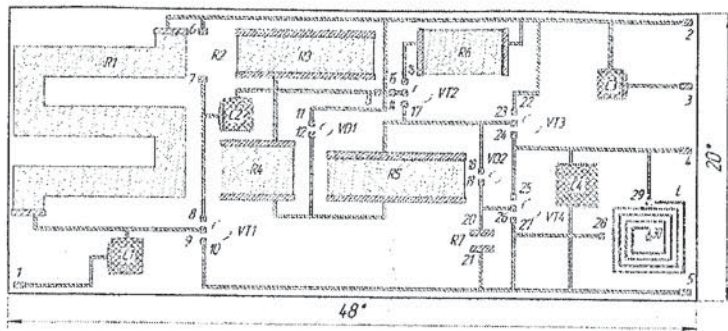
				08-34. TE.033.00.000 СК			
№ п/п	№ деталі	Вісок	Висн	Підсилювач НЧ	Лит	Матр	Матрицал
1	2	3	4				S1
				Складальне креслення	Сук	Ассамбл	І
				Сигнал С50-7	ВНТУ, зр ТКм-10		
				ТХА.735.062 ТУ			

Коробоч

08-34. TE.033.00.000 СК

08-34 ТЕ.033.00.000 ЕВ

Rz60 ✓✓✓



Таблиця 1

Позначення	Найменування	Матеріал	Характеристики	Метод отримання
	Резистор	Кермет К-50С ЕТО 02103 ТУ	$R_s = 10 \text{ Ом}/\square$	Фотолитографія
	Провідники векми об'ємними континстатор	Алюміній А99 ГОСТ 18269-64	$R_s = 0,2 \text{ Ом}/\square$	Фотолитографія
	Континстив підкладки	Золото з підшаром хрому ГОСТ 6835-80	$R_s = 0,1 \text{ Ом}/\square$	Фотолитографія
	Діелектрик конденсатора	Березинатъе оско ЕТО 035075 ТУ	—	Фотолитографія
	Індуктивність, векми об'ємні конденстатор	Алюміній А99 ГОСТ 18269-64	$R_s = 0,2 \text{ Ом}/\square$	Фотолитографія

1 \*Разміри для довідок.

2 Виготовлення шарів плати проводити згідно з табл 1

3 Зовнішній вигляд плати повинен відповідати ГОСТ 17647-93

08-34. ТЕ.033.00.000 ЕВ				Лист	Місяц	Рік випуску
Зам. АСХ	№ докум.	Інженер	Проєкт			
Розроб.	Зам. М. Д.					51
Перевір.	Виконав.					
Узгодив						
Зачекував						
Начальн.	Продовжив					
Зам.						
Підсилювач НЧ				АСХ	Автомоб.	Т
Топологічне креслення						
Сигнал С50-1				ВНТУ, зр ТКМ-10		
ТХ0.735.062 ТУ				Ферр.соль. А3		

*Навчальне видання*

**Кичак Василь Мартинович  
Стронський Віктор Володимирович**

## **ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОНІКА** **Курсове проектування**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено В. Стронським

Підписано до друку 11.04.2016 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 9,7.  
Наклад 75 пр. Зам. № 2016-045.

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.  
publish.vntu.edu.ua; email: kive.vntu@gmail.com.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.