

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

В.О. Піддубний, І.О. Товкач

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПАСИВНІ РАДОКОМПОНЕНТИ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент *Черняк Микола Григорович*, канд. техн. наук, доц. кафедри систем керування літальними апаратами інституту аерокосмічних технологій, Національний технічний університет КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Жук Сергій Якович*, д-р техн. наук, проф.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.) за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету (протокол № 03/2021 від 25.03.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Укладачі: *Піддубний Володимир Олексійович*, канд. техн. наук, доц.
Товкач Ігор Олегович, канд. техн. наук.

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПАСИВНІ РАДІОКОМПОНЕНТИ

Елементна база радіоелектронної апаратури: Пасивні радіокомпоненти В 4 ч. Ч. 1. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.О.Піддубний, І.О.Товкач. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,05 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

В навчальному посібнику наводяться матеріали лекцій розділу «Пасивні радіокомпоненти» кредитного модуля «Елементна база радіоелектронної апаратури», який викладається студентам радіотехнічного факультету, що навчаються за освітньою програмою «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Наводиться матеріал пов'язаний з пасивною радіоелементною базою, який достатній для ознайомлення студентів з сучасним станом елементної бази та закладає основи для її правильного вибору при проектуванні електронної апаратури.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень	5
ВСТУП	6
1. Лекція 1. ПАСИВНІ ТА АКТИВНІ ЕРЕ, ДІЕЛЕКТРИКИ	7
1.1. Загальна характеристика елементної бази.....	7
1.2. Матеріали в РЕА	11
1.3. Діелектрики	13
1.4. Контрольні питання	27
2. КОНДЕНСАТОРИ	28
2.1. Класифікація конденсаторів	28
2.2. Параметри конденсаторів.....	32
2.3. Конструкції конденсаторів.....	37
2.4. SMD-компоненти	43
2.5. Контрольні питання	45
3. Лекція 3. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.....	46
3.1. Класифікація провідникових матеріалів.....	46
3.2. Матеріали високої провідності.....	51
3.3. Матеріали високого питомого опору	54
3.4. Контрольні питання	57
4. Лекція 4. РЕЗИСТОРИ.....	58
4.1. Класифікація резисторів.....	58
4.2. Позначення резисторів	60
4.3. Основні параметри резисторів.....	62
4.4. Конструктивні типи резисторів	66
4.5. Контрольні питання	69
5. ІНДУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ	70
5.1 Класифікація котушок індуктивності	70
5.2. Магнітні матеріали.....	70

5.3. Параметри котушок індуктивності	73
5.4. Види котушок індуктивності	75
5.5. Трансформатори та дроселі.....	77
5.6. Контрольні питання	83
6. КОНТАКТНІ ТА КОМУНТАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ.....	84
6.1. Класифікація контактних та комутаційних пристроїв	84
6.2. Основні параметри і характеристики.....	85
6.3. Механічний перемикач.....	87
6.4. Реле	88
6.5. З'єднувачі.....	89
6.6. Друковані плати	90
6.7. Контрольні запитання.....	96
Список літератури.....	97

Перелік умовних позначень та скорочень

БТ	біполярний транзистор
ВСШ	відношення сигнал/шум
ВЧ	високі частоти
ГІС	гібридні інтегральні схеми
ДП	друковані плати
ЗСІ	знакосинтезуючі індикатори
ІС	інтегральна схема
ІМС	інтегральна мікросхема
ЕВП	електровакуумні прилади
ЕРЕ	електрорадіоелементи
НВЧ	надвисокі частоти
НЧ	низькі частоти
РЕА	радіоелектронна апаратура
ТКО	температурний коефіцієнт опору
ТКЄ	температурний коефіцієнт ємності
ТМП	технологія монтажу на поверхню
GSM	Generalized Spatial Modulation
GPS	Global Positioning System
ТНТ	Throughb Hole Technology

ВСТУП

Даний навчальний посібник призначений для підготовки бакалаврів за напрямком освітньої програми «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та може бути використаний для інших освітніх програм.

Підготовка спеціалістів за дисципліною «Елементна база радіоелектронної апаратури» передбачає 36 годин лекцій, 18 годин лабораторних занять та домашню контрольну роботу, які орієнтовані на отримання знань і навичок в виборі пасивної та активної елементної радіоелектронної бази (ЕРЕ) сучасної електронної апаратури та систем побудованих на їх основі. Дисципліна складається з чотирьох розділів: Пасивні радіокомпоненти, напівпровідники та діоди, багатоперехідні структури та основи мікроелектроніки.

Тематика навчального посібника охоплює матеріал, який дозволяє студентам орієнтуватися в сучасному стані ЕРЕ, розуміти їх будову та принципи роботи, основні напрямки їх розвитку, технології виготовлення та застосування, особливості конструктивної та схемотехнічної реалізації елементної бази інтегральних мікросхем. Матеріал з пасивних радіо компонент, який викладений в частині першій посібника, і дозволяє орієнтуватися в сучасній елементній базі радіотехнічних пристроїв, характеристиках і параметрах ЕРЕ, основних напрямках їх розвитку, об'єктивно оцінювати їх функціональні можливості.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до робочої навчальної програми (силабусу) дисципліни «Елементна база радіоелектронної апаратури». Він містить необхідний теоретичний матеріал, який дозволяє застосовувати набуті знання для правильного вибору компонентної бази, обирати необхідні компоненти зі світової компонентної бази у відповідності до заданих схемотехнічних, експлуатаційних та інших вимог.

Лекція 1. ПАСИВНІ ТА АКТИВНІ ЕРЕ, ДІЕЛЕКТРИКИ

1.1. Загальна характеристика елементної бази

Весь спектр компонентної бази РЕА можна розбити на активні та пасивні компоненти.

До **активних** компонентів відносяться радіоелектронні прилади, які можуть здійснювати випрямлення, підсилення, генерацію, перетворення частоти змінних струмів та інші активні процеси обробки сигналів.

До **пасивних** відносяться резистори, конденсатори, котушки індуктивності, трансформатори та інші радіоелементи, що не беруть активної участі в обробці сигналів.

Всі ці компоненти можна назвати електронними приладами. Таким чином електронний прилад це прилад, у якому обробка сигналу здійснюється за допомогою електронів або іонів, що рухаються у вакуумі, газі, провіднику чи напівпровіднику. Всі електронні прилади можна розбити на такі класи:

- електровакуумні прилади (ЕВП);
- газорозрядні прилади;
- дискретні напівпровідникові прилади (НПП);
- інтегральні напівпровідникові мікросхеми (ІМС);
- пасивні радіоелементи (радіодеталі);
- знаковинтезуючі індикатори.

Електровакуумні прилади – це пристрої, які використовують явища, що виникають при русі електронів у вакуумі. Їх робота основана на взаємодії електронного потоку з електричним полем електродів.

До них відносяться:

- **електронні лампи**, які застосовуються для модуляції, генерації та підсилення коливань;
- **прилади надвисоких частот (НВЧ)**: магнетрони, клістри, лампи хвилі, що біжить;

- **електронно-променеві трубки**, які застосовуються для отримання світлових зображень сигналів;
- **фотоелектронні прилади** (електронно-оптичні перетворювачі, фотоелектронні підсилювачі).

Якщо рух електронів у приладі супроводжується зіткненнями їх із молекулами газу, то це **газорозрядні прилади**.

До них відносять газотрони, тиратрони, газові стабілітрони та декатрони.

В сучасній РЕА найбільше розповсюдження отримали напівпровідникові прилади. Це прилади, в яких використовуються електронні явища, що відбуваються в об'ємі напівпровідників та на межі напівпровідника та металу.

Це діоди, транзистори (біполярні та уніполярні), тиристори, фотоелектронні прилади (фоторезистори, фотодіоди, фототиристори).

Зараз вся РЕА використовує **інтегральні мікросхеми**, які завдяки малим розмірам та високій надійності дають можливість значно розширити функціональні можливості та конструктивно-технологічний рівень виконання будь-якої техніки, що використовує радіоелементи.

Інтегральна мікросхема – це виріб, який виконує певну функцію обробки сигналу і має високу щільність розміщення нероздільно виконаних і електрично-з'єднаних елементів або компонентів та кристалів, яких з точки зору вимог до випробувань, постачання та експлуатацію розглядається як неподільний.

Під елементом мікросхеми розуміють частину ІС, яка виконує функцію ЕРЕ і не може бути виділена як самостійний виріб.

Компонент ІС – це частина ІС, яка може бути виділена як самостійний виріб (безкорпусні, VT, VD, C, L та інші).

Основною особливістю ІС, як до речі і напівпровідникових приладів, є наявність кристалу напівпровідникового матеріалу з великою кількістю створених на його поверхні шару статичних неоднорідностей (р-н переходів).

Складність ІС оцінюється ступінем інтеграції.

$$K = \lg N,$$

де N - кількість елементів та простих компонентів в ІС.

Діляться на малі ІС ($K=10^2$), середні ІС ($K=10^3$), великі ІС ($K=10^4$), надвеликі ІС ($K=10^6$), ультравеликі ІС ($K>10^9$).

Пристрої функціональної електроніки – це пристрої, в яких використовується сукупність різних фізичних явищ у твердих тілах, рідинах та газах для формування. Збереження та обробки сигналів.

До пристроїв ФЕ відносяться:

- акустоелектронні (на об'ємних та поверхневих акустичних хвилях);
- магнітоелектронні (використовують переміщення магнітних доменів в різних твердих тілах);
- кріоелектронні (робота при наднизьких температурах);
- біоелектронні (для роботи з клітинами).

До пасивних компонентів, які найчастіше зустрічаються, відносять радіодеталі. Робота їх заснована на діелектричних, резистивних та провідникових властивостях твердого тіла. Пасивні ЕРЕ засновані на таких фізичних принципах як електричний контакт, взаємодія електричного та магнітного полів, напруга та електричний заряд.

До них належать електричні конденсатори, котушки індуктивності, резистори.

Елементною базою вважають також пристрої, складаються з окремих ЕРЕ, наприклад: LC-фільтри, електромеханічні елементи (з'єднувачі, перемикачі, реле).

У сучасній апаратурі кількість радіодеталей доходить до десятків та сотень тисяч, а в деяких складних комплексах – до мільйона штук. У зв'язку з цим вони суттєво впливають на масо-габаритні характеристики апаратури та її надійність.

До радіокомпонентів відносять:

- котушки індуктивності;

- дроселі та трансформатори;
- комутаційні та з'єднувальні пристрої;
- вироби пьезотехніки (кварцеві резонатори, кварцеві фільтри і т. д.).

Знакосинтезуючі індикатори (ЗСІ) – це електронні прилади, які перетворюють електричні сигнали у світлові. Вони використовуються для відображення інформації та мають широкий розвиток у зв'язку з інтенсивним застосуванням вимірювальних, обчислювальних та інформаційних систем. ЗСІ поділяють на напівпровідникові, рідинно-кристалічні, електровакуумні, газорозрядні.

Електронні прилади використовуються у всіх областях техніки і впливають на її розвиток, багато в чому визначаючи її рівень. Вони складають елементну базу будь-якої сучасної радіоелектронної апаратури.

Що ж таке РЕА?

РЕА – це виріб або складові його частини, в основу функціонування яких покладена наука про прийом, перетворення та передачу інформації за допомогою електромагнітних коливань.

В сучасній РЕА найбільше розповсюдження отримали напівпровідникові прилади, які використовують електронні явища, що відбуваються в об'ємі напівпровідників та на межі напівпровідника та металу.

Це – діоди, транзистори (біполярні та уніполярні), тиристори та оптоелектронні прилади, на базі яких створюються інтегральні мікросхеми, які завдяки малим розмірам та високій надійності дають можливість значно розширити функціональні можливості та конструктивно-технологічний рівень виконання будь-якої техніки, що використовує радіоелементи.

Елементною базою вважають також пристрої, складаються з окремих ЕРЕ, наприклад: LC-фільтри, електромеханічні елементи (з'єднувачі, перемикачі, реле).

Слід сказати, що конденсатори та резистори є стандартизованими а індуктивності частково (основна частина їх розраховується індивідуально під кожне завдання).

У сучасній апаратурі кількість радіодеталей доходить до десятків та сотень тисяч, а в деяких складних комплексах – до мільйона штук. У зв'язку з цим вони суттєво впливають на масо-габаритні характеристики апаратури та її надійність.

Тому основним напрямком в розвитку ЕРЕ є мініатюризація.

Мініатюризація – це напрям конструювання РЕА значно менших розмірів та маси в порівнянні з відомими.

Найкращих результатів в мініатюризації дозволяє отримати комплексна мініатюризація, при якій всі елементи комплексу мають сумірні значення малогабаритних показників. **Найпростіше комплексна мініатюризація реалізується для цифрової РЕА.**

Зараз значного поширення набули цифрові пристрої, які зараз використовуються в будь-якій РЕА. Це комп'ютери, контролери, пристрої пам'яті та інше, які ви будете вивчати в інших курсах.

1.2. Матеріали в РЕА

Матеріал – це проміжний продукт переробки речовини, яка являє собою сукупність взаємозв'язаних атомів, іонів та молекул, в виріб, котрий відповідає вимогам конкретного виробничого процесу, й має складний хімічний склад та (або) попередньо задану внутрішню структуру та довільну форму.

Приклади матеріалів: сталевий прокат, мідна фольга, монокристал кремнію, поліетиленова плівка, п'єзокераміка та інше.

Радіоматеріали – відрізняються тим, що під дією електромагнітних полів повинні виконувати інші властиві їм функції, наприклад, функція провідності, діелектрична функція, магнітні функції та інше.

За електричними властивостями матеріали поділяються:

– **Провідники** – металічні матеріали з великою електропровідністю:

$$\rho=10^{-8}\div 10^{-5}\text{ Ом}\cdot\text{м}; \text{TK}\rho < 0; E_g=0\text{ eV}$$

– **Напівпровідники** – мають меншу електропровідність, та $\text{TK}\rho < 0$;

$$\rho=10^{-6}\dots 10^7\text{ Ом}\cdot\text{м}; \text{TK}\rho < 0; 0,1 < E_g < 3,0\text{ eV}$$

– **Діелектрики** – ці матеріали мають малу електропровідність:

$$\rho=10^7\dots 10^{18}\text{ Ом}\cdot\text{м}; \text{TK}\rho < 0; E_g > 3,0\text{ eV},$$

де ρ – питомий опір, $\text{TK}\rho$ – температурний коефіцієнт питомого опору, E_g – ширина забороненої зони.

В РЕА використовується велика кількість матеріалів, які мають різне функціональне призначення. Загальну класифікацію матеріалів можна представити графічно в наступному вигляді.

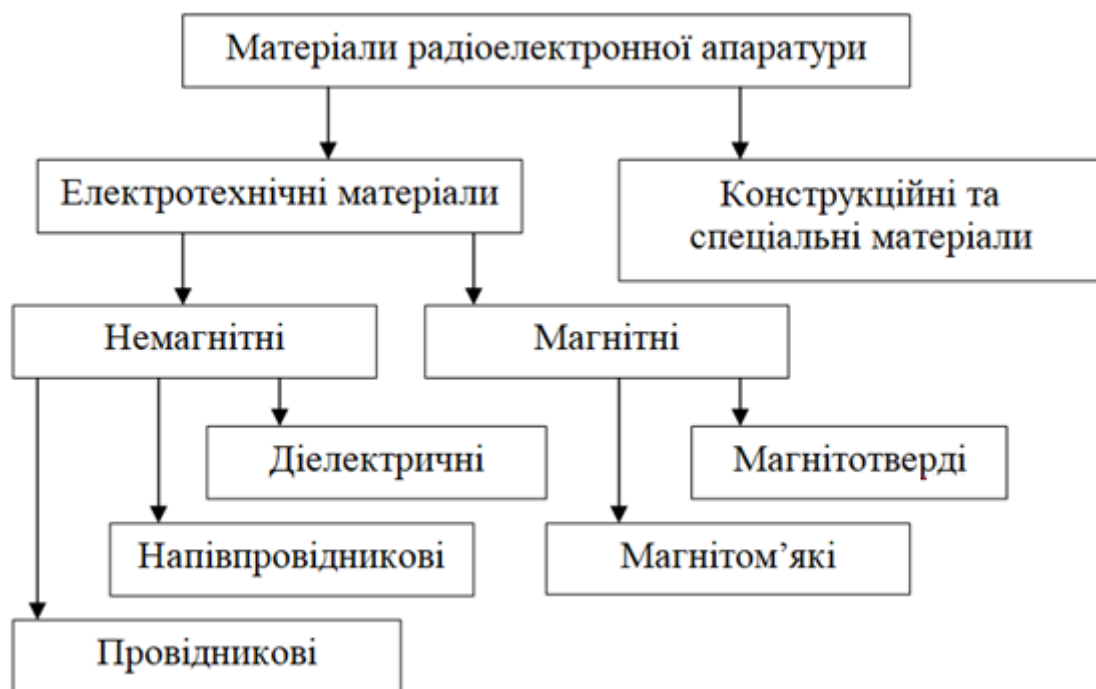


Рис.1.1. Матеріали в РЕА

Більшість матеріалів має безпосереднє електротехнічне значення, тобто їх використання в РЕА визначається безпосередньо електричними та магнітними властивостями матеріалу. Крім електротехнічних використовуються

конструкційні та спеціальні матеріали. До останніх відносять речовини для обезжирювання деталей, змазки та тому подібне.

1.3. Діелектрики

Діелектрики є найбільш численною групою матеріалів. У техніці до діелектриків відносять речовини, які погано проводять електричний струм. Питомий опір для них складає $\rho = 10^7 \dots 10^{18}$ Ом·м. Вони бувають природні та синтетичні, органічні та неорганічні, газоподібні, рідкі, тверді, аморфні та кристалічні.

Головна властивість діелектрика – це здатність поляризуватися під дією електричного поля.

Поляризація – процес зміщення та впорядкування зв'язаних електричних зарядів під дією зовнішнього електричного поля.

За цією властивістю діелектрики поділяють на неполярні та полярні.

Неполярні діелектрики характеризуються пружним видами деформації. Є:

- електронно-пружна;
- іонно-пружна;
- дипольно-пружна (орієнтаційна).

При електронно-пружній поляризації відбувається деформація електронної хмаринки атома, її зміщення відносно ядра, що призводить до виникнення дипольного моменту.

При іонно-пружній відбувається деформація іонної решітки з виникненням дипольного моменту (це зміщення іонів в кристалічній решітці матеріалу).

При дипольно-пружній відбувається пружне зміщення дипольних молекул. Вона характерна для матеріалів, що мають кристалічну структуру.

Ці види поляризації характерні малими втратами в широкому частотному діапазоні.

В полярних діелектриках крім пружних деформацій існують релаксаційні механізми, при яких поляризація значно запізнюється від прикладеного електричного поля. Така поляризація характеризується більшими затратами енергії.

Діелектрична проникність ϵ характеризує ступінь ослаблення напруженості зовнішнього прикладеного поля внутрішнім полем діелектрика

$$\epsilon = E_{\text{зовн.}} / (E_{\text{зовн.}} - E_{\text{внутр.}})$$

Цей вид поляризації суттєво залежить від температури. Він характерний для полярних газів, рідин та твердих діелектриків.

При електро- та іонно-релаксаційних поляризаціях відбувається направлене зміщення надлишкових електронів чи дірок, які збуджені тепловою енергією. Для цих діелектриків ϵ більше.

Поляризація діелектриків залежить від частоти електричного поля.

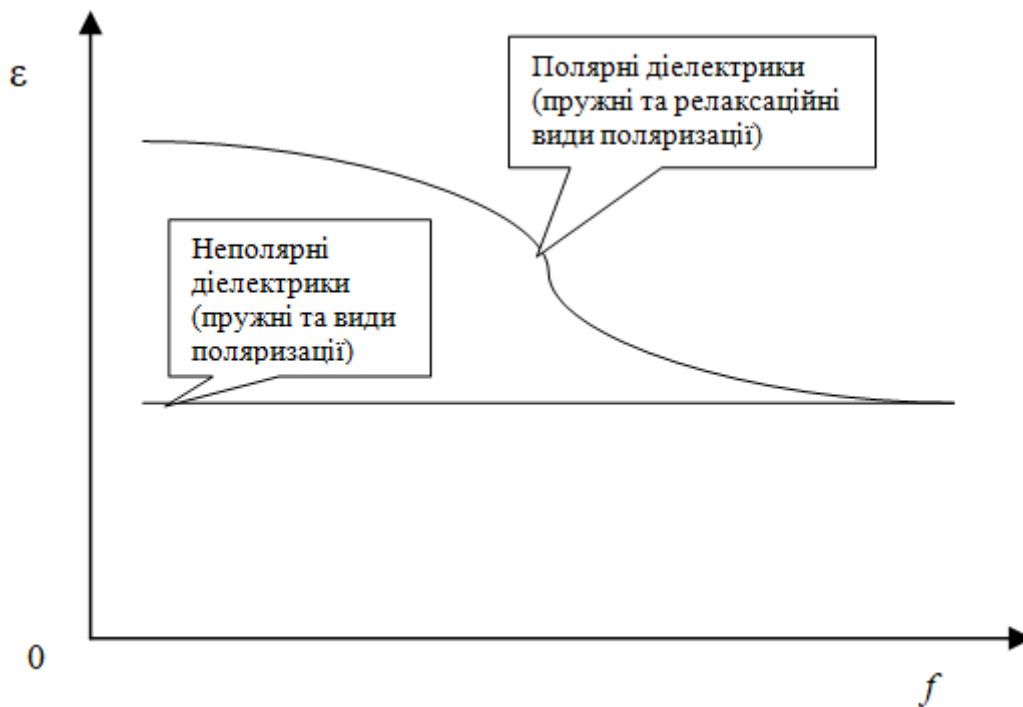


Рис.1.2. Залежність діелектричної проникності від частоти

Тобто всі діелектрики можна розбити на два класи: неполярні та полярні діелектрики.

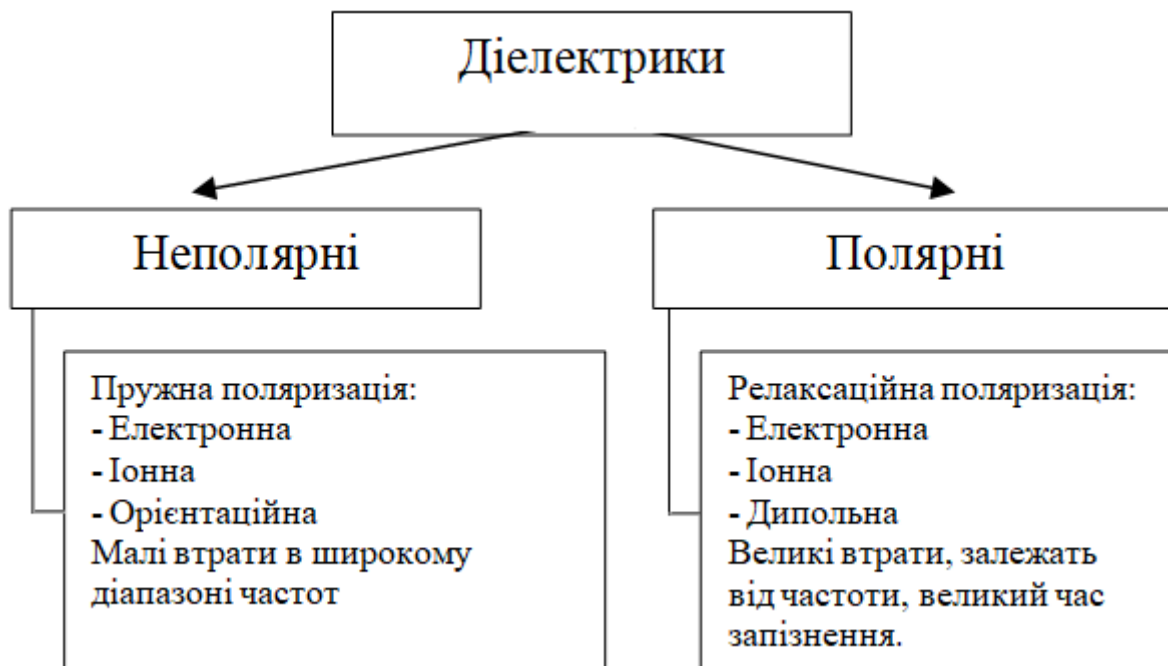


Рис.1.3. Поділ діелектриків

В залежності від зовнішнього впливу, при якому з'являється поляризація, її поділяють на:

- електричну – полярні та неполярні діелектрики;
- механічну – п'єзоелектрики;
- теплову – піроелектрики;
- спонтанну – сегнетоелектрики (відбувається сама без дії зовнішнього впливу в деякому діапазоні температур. Це – позистори з позитивним ТКО);
- залишкова – електрети (довго зберігається після зняття зовнішнього поля).

Класифікацію діелектриків можна зобразити наступним чином (рис1.4).

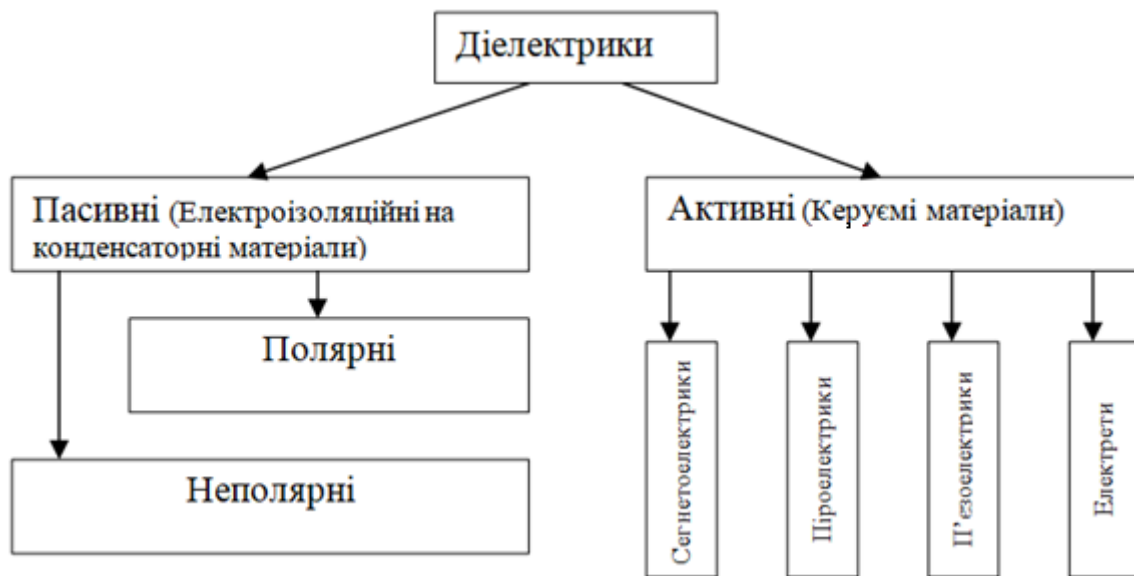


Рис.1.4. Поділ діелектриків

В РЕА використовується велика кількість матеріалів, які мають різне функціональне призначення. Їх можна класифікувати за агрегатним станом на:

- **газоподібні** (азот, повітря, елегаз);
- **рідкі** (синтетичні та мінеральні масла);
- **тверді** (полярні та неполярні - більшість діелектриків).

Найбільш розповсюдженим газоподібним діелектриком є повітря. Воно заповнює весь простір, проникає в пори, заповнює пустоти, а також розчиняється в рідинах.

Основне призначення газоподібних діелектриків – охолодження різноманітних пристроїв та апаратури.

Вид поляризації в газах – електронна.

Діелектричні втрати в газах дуже малі ($tg\delta = 10^{-5} \dots 10^{-8}$) і майже не залежать від частоти.

Розглянемо властивості деяких газоподібних діелектриків.

Повітря ($\epsilon \approx 1$) – суміш азоту, кисню з домішками вуглекислого газу та інших. Електрична міцність повітря 3,2 МВ/м. Не токсичне, вибухово та пожаробезпечне. В звичайному стані в своєму складі містить вологу та пил.

Азот ($\epsilon \approx 1$) за характеристиками близький до повітря. Використовується в випадках, коли не допускається присутність кисню. Не токсичний, вибухово та пожаробезпечний. Часто використовується в рідкому стані. Точка кипіння - -196 °С. Використовується в криогенній техніці.

Водень ($\epsilon \approx 1$) – легкий газ з високою теплоємністю. Використовується для охолодження РЕА. Не окислює інші матеріали, але може утворювати гідриди. Високо проникний. Вибухово та пожаронебезпечний в суміші з киснем. Температура кипіння - -253 °С.

Аргон ($\epsilon \approx 1$) – інертний газ. Використовується для охолодження РЕА та в газорозрядних приладах.

Елегаз (гексафторид сірки SF₆) ($\epsilon \approx 1$) – синтетичний діелектрик з високою нагрівостійкістю (до 800 °С) та електричною міцністю (відношення пробивної напруги газу до пробивної напруги повітря 2,5). Хімічно стійкий, негорючий. Не має запаху. Може довго працювати при +150 °С. В ньому не виникає електрична дуга, тому він використовується для заповнення високовольтних трансформаторів та вимикачів.

Рідкі діелектрики - це матеріали, які призначені для підвищення електричної міцності ізоляції, відводу тепла, гасіння електричної дуги в високовольтній апаратурі. Основний тип провідності – іонний.

Рідкі діелектрики характеризуються наступним:

- більша ніж в 30 раз теплопровідність (в порівнянні з газами);
- більша в 3 рази теплоємність;
- Електрична міцність – 10...30 МВ,м;
- Незмінність об'єму при зміні тиску.

Їх можна розділити на мінеральні, синтетичні та рослинні.

До мінеральних відносяться трансформаторне, конденсаторне та кабельне масла.

Трансформаторне масло – це суміш вуглеводів. Одержується з нафти багатоступінчатою перегонкою та очисткою в концентрованій сірчаній кислоті,

нейтралізацією а їдкому натрі та багаторазовою промивкою водою. Використовується для підвищення якості ізоляції та поліпшення тепло відводу в високовольтний трансформаторах та вимикачах високої напруги.

Конденсаторне масло одержують з трансформаторного шляхом вакуумного обезгажування. Це малов'язка рідина, практично нейтральна. $\epsilon \approx 2,1...2,3$. Тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta = 0,0004...0,0008$. Електрична міцність – 20...25 МВ/м. Температура загорання – 135 °С. Температура застигання - -45 °С. Використовується для заливки та просочування паперових конденсаторів.

Кабельне масло одержують з газоподібних фракцій нафти. Використовують для просочування паперу ізоляції силових кабелів. Для збільшення в'язкості додають в його склад каніфоль – дипольно-іонний діелектрик, який змочується водою.

Каніфоль – це натуральна смола, крихка, жовтого чи коричневого кольору, яку отримують з живиці(природної смоли хвойних дерев). Температура розм'ягчення – 40...60 °С. Крім входження в склад кабельних масел використовується для виготовлення лаків а основне завдяки властивості при 150 °С розчиняти окисли металів (міді, заліза), як флюс для пайки.

Недоліки мінеральних масел це низька нагрівостійкість та висока гігроскопічність.

До синтетичних (більш висока пробивна напруга, нагрівостійкість та діелектрична проникність ($\epsilon \approx 5...10$)) **відносяться:**

- власне синтетичні масла;
- кремнійорганічні масла;
- фреони.

До синтетичних масел відносяться:

Совол (хлорований дифеніл) – полярний діелектрик ($\epsilon \approx 5$). Використовується для просочення паперу конденсаторів.

Совтол – це совол, розбавлений трихлорбензолом. Має меншу в'язкість та температуру загусання (-35 °С). Використовується в трансформаторах.

Поліметилсилоксан – кремнійорганічна рідина без кольору, розчинна в бензолі. Має:

- високу нагрівостійкість (до 300 °С);
- низьку температуру застигання (- 60 °С);
- ε мало змінюються в і широкому інтервалі температур;
- не гігроскопічні.

Використовуються для просочення ізоляції та захисту керамічних та слюдяних конденсаторів.

Фреони – з'єднання фтору з вуглецем (дихлордифторметан – $C_2Cl_2F_2$) мають негорючість, вибухобезпечність, малу гігроскопічність, малі діелектричні втрати, високу пробивну напругу (відношення пробивної напруги газу до пробивної напруги повітря 2,5, електрична міцність повітря 3,2 МВ/м), високу теплопровідність.

Недоліки – токсичність, реакція з гумою, висока летючість.

Призначення – охолоджувальні діелектричні рідини.

Рослинні масла:

1. **Ляне** – полярний діелектрик, висихає, тому використовується як плівкоутворювач в емалях, фарбах та лаках.

2. **Касторове** – слабо полярний діелектрик, нагрівостійкість до 240 °С. Призначення - пластифікатор в емалях, фарбах та лаках.

В радіотехніці особливе значення має урахування впливу частоти електричного поля на властивості матеріалу. Тому з поділом за хімічним складом ми будемо ділити діелектрики на полярні (низькочастотні) та неполярні (високочастотні).

Неполярні високочастотні полімери

1. **Поліетилен** – продукт полімеризації газоподібного етилену (C_2H_4). Використовується як ізолюючий матеріал для провідників та кабелів, для виготовлення каркасів котушок індуктивності, як діелектрик в конденсаторах.

2. **Полістирол** – полімер стиrolа ($C_2H_3C_6H_5$). Має високі діелектричні характеристики, особливо на ВЧ та НВЧ. Його недоліки – низька нагрівостійкість ($80\text{ }^\circ\text{C}$), швидке старіння. Використовується для виготовлення волокна, плівок, каркасів, лампових панелей, ізоляційних деталей в ВЧ апаратурі.

3. **Фторопласт 4** – політетрафторетилен. Один з найкращих матеріалів для діапазону ВЧ та НВЧ. Має високу нагрівостійкість (до $300\text{ }^\circ\text{C}$). Хімічна стійкість більша ніж у золота та платини. Не горючий. Не гігроскопічний, не змочується водою. Має малий коефіцієнт тертя. Легко оброблюється різанням. Має малу теплопровідність. При температурах вищих за $400\text{ }^\circ\text{C}$ виділяє фтор (отруйний газ). Використовується там де потрібні високі діелектричні властивості при дії агресивних середовищ.

Характеристики неполярних ВЧ полімерів наведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1

Характеристики неполярних ВЧ полімерів.

Параметр	Одиниця виміру	Поліетилен	Полістирол	Фторопласт 4
Електрична міцність	МВ/м	40...150	20...110	40...150
Робоча температура	$^\circ\text{C}$	- 60...+110	-40...+80	-296...+300
Діелектрична проникність, ϵ	Відносних одиниць	2,3...2,4	2,5...2,6	1,9...2,2
$\text{tg}\delta$	Відн.одиниць	0,0002...0,0003	0,0002...0,0004	0,0002...0,0003
Питомий опір, ρ	Ом·м	10^{14}	10^{15}	10^{17}

Полярні НЧ полімери

Для них характерні висока діелектрична проникність, низький $\text{tg}\delta$. Основні характеристики приведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2

Характеристики НЧ полімерів.

Параметр	Одиниці виміру	Полівінілхлорид	Лавсан	Нейлон, капрон	Фторопласт 3	Силікони
ϵ	Відносних одиниць	3,5...4,5	3...3,5	5...6	3,5	3,5
$\text{tg}\delta$	Відносних одиниць	0,2...0,5	0,002	0,06	0,04	0,01...0,03
ρ	Ом·м	10^{12}	10^{12}	10^9	10^{13}	10^{14}
T_{\max}	°С	80	200	200	130	250
T_{\min}	°С	-35	-80	-40	-195	-70

Використовуються для ізоляції монтажних проводів (полівінілхлорид), в конденсаторах (лавсан), для виготовлення термотривких компаундів, лаків, каучуків (силікони), для виготовлення складних деталей (лампові панелі, гнізда та інш.), для конденсаторів (фторопласт3).

Електроізоляційні лаки та емалі використовуються для захисту елементів апаратури від корозії, пилу та вологи. Вони поділяються за використанням на: просочувальні, покрівельні та волокнисті. За складом їх можна поділити на:

- **полімерні** (полістирольний та епоксидний лаки, тобто ті, в яких плівкоутворюючими елементами є полімери – полістирол, полівінілхлорид) та смоли (епоксидна, кремнійорганічна).
- **нітроцелюлозні** – розчини нітроцелюлози в ацетоні. Вони швидко висихають, але мають погану адгезію до металу та малу нагрівостійкість.
- **масляні** – до них відносяться ті, що мають висихаючі масла (лляне чи синтетичне).

Компаунди – це суміші смол, бітуму та воску. Використовуються для просочення та заливки елементів РЕА (трансформаторів, блоків, котушок і т.

д.). При цьому досягається захист елементів від дії атмосфери, підвищуються електроізоляційні властивості, покращується відвід тепла, збільшується механічна міцність.

Волокнисті матеріали – складаються з частинок подовженої форми-волокон. Мають високу механічну міцність, легко оброблюються, дешеві. Для них характерна невисока електрична міцність та теплопровідність. Головний недолік – гігроскопічність. До волокнистих матеріалів відносяться конденсаторний папір, електрокартон, текстильні ізоляційні матеріали.

Використовуються в конденсаторах, конструкційних елементах, для виготовлення ізоляції проводів та шнурів.

Матеріали для друкованих плат

Матеріали для друкованих плат (ДП) – це слоїсті пластики, на які наклеєна тонка (18, 30 або 50 мкм) мідна фольга. Основні типи матеріалів наведені в табл.1.3 та табл.1.4.

Таблиця.1.3

Матеріали для друкованих плат

Марка	ϵ , відносних одиниць	$tg\delta$, відносних одиниць	ρ , Ом·м	$E_{проб}$, МВ/м	Область застосування
Гетинакс фольгований ГФ- 1-11	5	0,035	10^{10}	15	РЕА широкого призначення
Склотекстоліт фольгований СФ- 1	8	0,05	10^{13}	13	Плати зі збільшеною стабільністю
Склотекстоліт для мікро електроніки ФДМЭ-1	4	0,025	10^{10}	10	Багатошарові плати для обчислювальної техніки
Фторопласт фольгований ФФ-4	2,1	0,0002	10^{17}	25	Плати НВЧ діапазону
Поліетилен фольгований ПЭФ-1	2,2	0,0005	10^{15}	45	Плати НВЧ діапазону

Таблиця.1.4

Параметри найбільш розповсюджених закордонних матеріалів для ДП

Позначення	Склад	Діелектрична стала, ϵ	Відн. вартість	Примітка
FR2	папір і фенольна смола	4,7	0,73	
FR3	папір і епоксидна смола	4,9	0,85	
FR4	фольгований епоксидний склотекстоліт	4,7		Це найбільше розповсюджений матеріал для ДП. Температура викори-стання цього матеріалу 120 - 130°C.
FR5	Те ж, що й FR4 із зменшеним діаметром скловолкна	4,6	1,4	Це склотекстоліт подібний FR4, але температура використання 140 - 170°C.
CEM1	папір із епоксидною смолою, на яку напресовані листи склотканини	4,7	0,95	Застосовується для односторонніх ДП.
CEM3	склотекстоліт, облицьований із двох сторін FR4	5,2	0,95	CEM3 найбільш схожий на FR4. Матеріал легко свердлиться й штампується. Це повна заміна FR4.

Переваги та недоліки друкованого монтажу***Друкований монтаж має такі переваги:***

- а) можливість механізації складальних і перевірочних робіт;
- б) значна механічна міцність монтажу;
- в) підвищена вібростійкість;
- г) усунення помилок у монтажі;
- д) висока щільність монтажу та зменшення габаритів апаратури;

е) високий ступінь ідентичності блоків при складанні.

До числа недоліків друкованого монтажу відносять:

а) труднощі ремонту і заміни окремих деталей і вузлів;

б) паяння деталей при друкованому монтажі важко автоматизувати, тому що паяння пов'язане з небажаним нагрівом усього блока, деталей і вузлів; при цьому виникає небезпека пошкодження ізоляції провідників та радіокомпонентів;

в) паяння пов'язане з використанням дефіцитних кольорових низькоплавких металів;

г) при паянні виділяються токсичні речовини, що можуть негативно вплинути на здоров'я монтажника при тривалій його роботі.

Поверхневий монтаж (*surface mount technology, SMT*) — технологія виготовлення електронних пристроїв, в якій компоненти встановлюються безпосередньо на поверхню ДП. Компоненти для поверхневого монтажу називаються SMD (*surface mount device*). Цей метод виготовлення друкованих вузлів значною мірою замінив технологію наскрізного монтажу, в якому вивідні компоненти монтується на друкованій платі за допомогою отворів у ній.

ЕРЕ спроектовані таким чином, щоб зменшити контактні площадки або виводи, які б могли припаюватись безпосередньо до поверхні друкованої плати. У порівнянні з традиційними, плати для поверхневого монтажу мають підвищену щільність розміщення електронних елементів, менші відстані між провідниковими елементами та контактними площадками. Компоненти для поверхневого монтажу (SMD) найчастіше мають невелику вагу і розмір, а також меншу ціну. Така технологія зарекомендувала себе у підвищенні автоматизації виробництва і збільшенні продуктивності.

Основні переваги SMT перед методом наскрізного монтажу:

- Зниження маси і розмірів друкованих вузлів за рахунок відсутності виводів у компонентів або їх меншої довжини, а також збільшення

щільності компоновання і трасування, зменшення розмірів самої елементної бази та зменшення кроку виводів.

- Поліпшення електричних характеристик: за рахунок зменшення довжини виводів і більш щільного компоновання елементів значно поліпшується якість передачі слабких і високочастотних сигналів, знижується паразитна ємність та індуктивність.
- Можливість розміщення деталей по обидві сторони друкованої плати.
- Менша кількість отворів, які необхідно виконати у платі.
- Істотне зниження собівартості серійних виробів за рахунок використання засобів автоматизації.

Недоліки:

- Підвищені вимоги до якості проектування топології друкованих плат
- Підвищені вимоги до точності температури паяння та її залежності від часу, оскільки при груповому паянні нагріванню піддається весь компонент.
- Жорстка зв'язка безвивідних компонентів і матеріалу друкованих плат, які мають різні коефіцієнти теплового розширення, що призводить при впливі в процесі експлуатації великих перепадів температур до виникнення механічних напруг і руйнування елементів конструкції.
- Високі вимоги до якості й умов зберігання технологічних матеріалів.

Рідкі кристали – рідини, які знаходяться в проміжному стані між кристалом та рідиною і мають анізотропні властивості. Це органічні з'єднання, молекули яких мають подовжену або паличкову форму. Структура РК легко змінюється при зовнішніх впливах (магнітне, електричне поля, температура, тиск). Використовуються в індикаторних пристроях пасивного типу (РК - індикатори, панелі).

До неорганічних діелектриків відносяться:

- неорганічне та напівпровідникове **скло** (для виготовлення колб електровакуумних ламп та посуду для нагрівання рідин, конденсатори,

- фотоеlementи, плівкових резистори, для вирівнювання напруг на скляних балонах електровакуумних приладів);
- склокераміка (**ситали**) (для виготовлення ізоляторів з низькими втратами на ВЧ та високих температурах, для ГІС);
 - **кераміка** (для конденсаторів та установчих деталей);
 - **слюдяні** матеріали (для виготовлення електроізоляційних шайб, ізоляторів для електровакуумних приладів, в конденсаторах високої якості);
 - **двоокис кремнію** (в мікроелектроніці).

Для нас найбільш цікавіші є:

Плівки SiO₂ – використовуються в мікроелектроніці для одержання між шарової ізоляції. Має $\epsilon = 9...12$; $\text{tg}\delta = 0,01...0,03$ (на 1кГц) $E_{\text{пробивне}} = 100...300\text{тМВ/м}$. Використовуються плівки товщиною від 0,3 до 3 мкм.

Склокераміка (ситали) – займає проміжне положення між склом та керамікою. Ситали – це скло керамічні матеріали, отримані шляхом стимуляції кристалізації скла спеціального складу, кристалізатором яких виступає Ag чи Cu, а також TiO₂, FeS. Використовуються для виготовлення ізоляторів з низькими втратами на ВЧ та високих температурах. Основні параметри ситалів приведені в табл.1.5.

Таблиця.1.5

Основні типи ситалів

Марка	ϵ , відн. одиниць	$\text{tg}\delta$ (на 10 ⁶ Гц)	ρ , Ом·м
СТ 32-1	10	$20 \cdot 10^{-4}$	10^{10}
СТ 38-1	7,35	$30 \cdot 10^{-4}$	10^{12}
СТ 50-1	8,5	$15 \cdot 10^{-4}$	10^{12}

Кераміка – основні компоненти це окисли алюмінію, кремнію, титану, цирконію, олова, магнію. Кераміка характеризується тим, що можливе отримання матеріалів з наперед заданими характеристиками шляхом зміни складу та технології виготовлення.

Кераміка – це багатофазна система, яка складається з кристалічної та скловидної фаз. Кристалічна фаза це різні хімічні з'єднання та тверді розчини цих з'єднань. Визначає основні характеристики кераміки – ϵ , $\text{tg}\delta$, ρ , механічну міцність, температурний коефіцієнт лінійного розширення. Скловидна фаза – це скло, яке зв'язує кристалічну фазу. Визначає технологічні властивості кераміки – температуру спікання, пластичність при формуванні та інше.

Радіокераміка в залежності від призначення ділиться на три типи:

- **А – ВЧ** для конденсаторів;
- **Б – НЧ** для конденсаторів;
- **В – ВЧ** для установочних деталей.

Основні характеристики кераміки:

$\epsilon = 7 \dots 200$, $\text{tg}\delta = (4 \dots 50) \cdot 10^{-4}$; $E_{\text{проб}} = 4 \dots 20$ МВ/м; діапазон робочих температур - $-60 \dots +300$ °С.

1.4. Контрольні запитання

2. Які елементи відносятьс до активних та пасивних ЕРЕ?
3. Які електронні явища використовують напівпровідникові пристрої?
4. Дайте визначення інтегральної мікросхеми.
5. В чому полягає суть комплексної мініатюризації РЕА?
6. Чим відрізняються радіоматеріали від інших матеріалів?
7. Як поділяються матеріали за електричними властивостями?
8. Назвіть головну властивість діелектриків.
9. За яким принципом діелектрики поділяються на полярні та неполярні?
Назвіть їх відмінності.
10. Назвіть особливості агрегатних станів діелектриків.
11. Назвіть неполярні ВЧ полімери та дайте їх характеристику.
12. Назвіть неполярні ВЧ полімери та дайте їх характеристику.
13. Які особливості матеріалів для друкованих плат?
14. В чому полягають переваги SMD монтажу?
15. Які діелектричні матеріали для мікроелектроніка Ви знаєте?

Лекція 2. КОНДЕНСАТОРИ

2.1. Класифікація конденсаторів

Конденсатор – це дискретний ЕРЕ, що складається із металевих обкладинок, розділених діелектриком та призначених для використання його електричної ємності.

Принцип дії конденсатора оснований на властивості накопичувати на обкладинках електричний заряд при прикладенні до них різниці потенціалів. Ємність конденсатора визначається відношенням заряду будь-якої обкладинки конденсатора до різниці потенціалів між ними $C = |q/U|$, де C [Фарада]– ємність конденсатора, q [Кулон]- заряд, U [Вольт] – різниця потенціалів. Заряд електрона – $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Конденсатори, які використовуються в РЕА, можна розділити на:

1. Конденсатори постійної ємності використовуються в різноманітних фільтрах, коливальних системах та інше. Стандартизовані. Наладжені серійний випуск всіх типів конденсаторів постійної ємності.

2. Конденсатори змінної ємності використовують для плавного настроювання коливальних контурів, регулювання ступеня зв'язку між різними ЕРЕ. Повністю не стандартизовані. Розроблюються відповідно до конкретного РЕА.

3. Підстроювальні конденсатори використовують в колах, в яких ємність повинна точно встановлюватися або регулюватися при періодичному настроюванні параметрів РЕА. Деякі типи конденсаторів стандартизовані.

Конденсатори постійної ємності

Конденсатор постійної ємності – це конденсатор, ємність якого під час експлуатації та регулювання не змінюється. Властивості конденсатора постійної ємності залежать від типу застосованого діелектрика. Він визначає

основні параметри конденсаторів: опір ізоляції, стабільність ємності, діелектричні втрати та інше.

За типом діелектрика конденсатори поділяються на:

- керамічні до 1600 В – група 10;
- керамічні більше 1600 В – група 15;
- скляні – 21;
- склокерамічні – 22;
- тонкоплівкові – 26;
- слюдяні великої потужності – 31;
- слюдяні малої потужності – 32;
- паперові до 2 кВ -40;
- паперові більше 2 кВ -41;
- паперові металізовані – 42;
- оксидні електролітичні алюмінієві – 50;
- оксидні електролітичні танталові – 51;
- об'ємнопористі – 52;
- окисно-напівпровідникові – 53;
- з повітряним діелектриком – 60;
- вакуумні – 61;
- полістирольні – 71;
- фторопластові – 72;
- поліетилентетрафталатні – 73;
- комбіновані – 75;
- лакоплівкові – 76;
- полікарбонатні – 77.

Умовне позначення:

Перший елемент – підклас конденсатора

К – постійної ємності;

КТ – підстроєні;

КП – змінної ємності.

Другий елемент – група конденсатора в залежності від типу діелектрика.

Третій елемент – порядковий номер розробки. Він визначає конструктивні особливості конденсатора.

Для старих типів конденсаторів в основі позначень бралися конструктивні, технологічні, експлуатаційні та інші особливості.

Наприклад: КД – конденсатор дисковий, ФТ – фторопластовий термостійкий, КТП – конденсатор трубчатий прохідний, КЛС – керамічний, литий секціонований, КСО – конденсатор слюдяний опресований, МБ – металопаперовий .

За призначенням:

- конденсатори загального призначення (низьковольтні, низькочастотні);
- спеціальні (високовольтні, ВЧ, імпульсні, завадоподавляючі, дозиметричні).

За способом монтажу:

- для навісного монтажу;
- для друкованого монтажу;
- для поверхневого монтажу;
- для мікромодулів;
- для інтегральних мікросхем.

За способом захисту:

- незахищені (для герметизованої апаратури);
- захищені (покриті лаком);
- з неізолюваним корпусом (не дозволяють з'єднання з корпусом та струмопровідними частинами РЕА);
- ізолювані (допускають такий контакт);
- герметизовані (робочий об'єм повністю ізолюваний).

Конденсатор змінної ємності – це конденсатор, ємність якого змінюється користувачем під час експлуатації РЕА. Керувати ємністю можна двома способами – механічним та електричним.

Конденсатори змінної ємності з механічним керування складаються з двох систем паралельних пластин, одна з яких може плавно переміщуватися а її пластини при цьому заходять в зазор між пластинами другої системи. Нерухому систему називають статором, рухому – ротором. Найбільше розповсюдження отримали конденсатори з плоскопаралельними пластинами та обертальним переміщенням ротора.

Основне призначення КЗЄ знаходять як елемент настройки діапазонних коливальних контурів. Характеризуються законом зміни ємності – функціональною характеристикою.

За цією ознакою конденсатори поділяються на:

- прямоємнісні $C = a \cdot \varphi + b$ – використовують як регулювальні та підстроювальні при малому коефіцієнті перекриття діапазону;
- прямохвильові $C = (a \cdot \varphi + b)^2$ – використовуються в основному в вимірювальній техніці;
- прямочастотні $C = 1/(a \cdot \varphi + b)^2$ – дають прямий підрахунок частоти;
- логарифмічні $C = \exp(a \cdot \varphi + b)$ – характерні постійною в межах діапазону зміною ємності;
- частотно-логіфічні $C = b \cdot \exp(a \cdot \varphi)$ – характерні постійною в межах діапазону зміною частоти в залежності від кута повороту ротора.

Підстроювальні конденсатори – це конденсатори, ємність яких під час експлуатації не змінюється, а регулюється при виробництві або налаштування РЕА. Підстроювальні конденсатори відрізняються простотою конструкції, малими розмірами та невеликим значенням максимальної ємності. Найпоширенішими є пластинчаті з повітряним чи керамічним діелектриком. У керамічних - обкладинку створює шар срібла, нанесений на кераміку в вигляді півкола.

Позначаються КТ.

Керування ємністю електричним способом відбувається за допомогою варикапів. **Варикап** – це напівпровідниковий діод ємність якого керується зворотною напругою. При зміні останньої змінюється товщина збідненого шару, відбувається перерозподіл просторових зарядів р-n переходу, внаслідок чого змінюється бар'єрна ємність переходу. (С лежить в межах від 1 до сотень пФ).

2.2. Параметри конденсаторів

1. Номінальна ємність – ємність, значення якої позначене на конденсаторі або вказане в супроводжувальній документації. Вона кодується на самому конденсаторі. Код складається з трьох або чотирьох знаків (цифри та букви). Буква з російського або латинського алфавіту позначає множник, що вказує значення ємності, та показує місце положення коми десяткового знаку.

П (р) – 10^{-12} Ф

Н (n) - 10^{-9} Ф

М (μ) - 10^{-6} Ф

И (m) - 10^{-3} Ф

Ф (F) - 1 Ф

Наприклад: 2,2 пФ – 2П2 (2р2); 1500пФ – 1Н5 (1n5); 0,1 мкФ – М1 (μ1); 10 мкФ – 10М (10μ).

Номінальні значення конденсаторів стандартизовані. Згідно ГОСТ 2825-67 встановлено для постійних конденсаторів наступні ряди Е6, Е12, Е24. Цифра після букви Е означає кількість градацій значень ємності в ряді, яке для визначення номінальної ємності повинно бути помножене на 10^n , де n – ціле додатне чи від'ємне число.

Ряди Е – це геометрична прогресія зі знаменником q_n , що дорівнює для рядів:

$$Е6 \quad q_6 = (10)^{1/6} = 1,47$$

$$E12 q_{12} = (10)^{1/12} = 1,21$$

$$E24 q_{24} = (10)^{1/24} = 1,1$$

Ряди E6, E12, E24 містять відповідно 3; 6; 12 та 24 номінальних значень величини в кожному десятковому інтервалі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Ряди номінальних значень

Ряд	Номінальне значення						Допуск, %
E6	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	±20
E12	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	±10
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
E24	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	±5
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	

Номінальна ємність в кожній декаді відповідає вказаним в цій таблиці числу, або помноженому чи поділеному на 10^n , де n – ціле додатне чи від'ємне число.

Фактичне значення ємності відрізняється від номінального на величину допустимого відхилення (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Допустимі відхилення від номінального значення

Відхилення, ± %	Позначення		Відхилення, , ± %	Позначення	
0,1	В	Ж	20	М	В
0,2	С	У	30	Н	Ф
0,5	Д	Д	-10...+30	О	-
1	Ф	Р	-10...+50	Т	Э
2	Г	Л	-10...+100	У	Ю
5	І	И	-20...+50	С	Б
10	К	С	-20...+80	З	А

2. Температурний коефіцієнт ємності – визначає вплив температури на значення ємності. Для більшості конденсаторів в робочому діапазоні температур ТКЄ постійне, тобто зміна ємності конденсатора від температур лінійна. Це особливо характерно для високочастотних керамічних конденсаторів. Значення ТКЄ для них наступні:

П – позитивний, Н – негативний, МП0 – нульовий.

Наприклад: П100 – $\text{ТКЄ} = +100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

МП0 - $\text{ТКЄ} = 0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

М47 - $\text{ТКЄ} = -47 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

ТКЄ лежать в межах від П100 до М2200.

Конденсатори при цьому фарбуються в відповідний колір та мають кольорову відмітку. Так наприклад конденсатори, пофарбовані в сірий колір з червоною відміткою мають ТКЄ П60, в зелений М1500.

Для конденсаторів з іншими типами діелектриків ТКЄ не нормується. Так слюдяні та полістирольні конденсатори мають $\text{ТКЄ} = -(50 \dots 200) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, полікарбонатні - $\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Для конденсаторів з нелінійною залежністю ТКЄ ідуть слідуючи позначення: Н10 ($\pm 10\%$), Н20 ($\pm 20\%$), Н30 ($\pm 30\%$), Н50 ($\pm 50\%$), Н70 (-70%), Н90 (-90%).

3. Номінальна напруга – це напруга, при якій конденсатор може працювати в заданих умовах на протязі строку служби зі збереженням параметрів в допустимих межах. Залежить від конструкції та матеріалу діелектрика.

4. $\text{tg}\delta$ – характеризує активні втрати в конденсаторах. Для керамічних ВЧ, слюдяних, полістирольних і фторопластових – $(10 \dots 15) \cdot 10^{-4}$; для полікарбонатних - $(10 \dots 25) \cdot 10^{-4}$; керамічних НЧ – $0,035 \dots 0,005$; для оксидних – $(5 \dots 35)\%$.

5. Опір ізоляції та струм витоку характеризують якість конденсатора та враховуються при розрахунках високоомних та слабкострумівих кіл.

Найбільший опір в фторопластових конденсаторах, менший в керамічних, полікарбонатних та лавсанових. Найменший в сегнетокерамічних. Для оксидних задають струм витoku, значення якого пропорційне ємності та напрузі. Найменший мають танталові конденсатори – 1...10 мкА, В алюмінієвих – 10...100 мкА.

6. Добротність конденсатора – це величина зворотна до $\text{tg}\delta - Q_C = 1/\text{tg}\delta$.

Вона характеризує відношення модуля реактивної частки опору до активної на заданій частоті $Q_C = 1/(\omega RL)$, $\omega = 2\pi f$, f – частота, на якій визначаємо втрати. Визначається в першу чергу параметрами діелектрика конденсатора. Крім того на величину втрат велике значення має волога та температура. При підвищенні частоти, температури та вологи втрати ростуть.

7. Власна індуктивність. Крім ємності конденсатор має індуктивність, яка складається з:

- індуктивності самого конденсатора (робочого елемента);
- індуктивності внутрішніх та зовнішніх з'єднувальних провідників.

Індуктивність самого конденсатора залежить від розмірів та конструкції робочого елемента, його розміщення відносно корпусу, способу з'єднання обкладинок з виводами. Чим менші розміри конденсатора та коротші і товщі його виводи тим менша власна індуктивність конденсатора. Величина індуктивності мала і має приблизно такі значення:

- для ВЧ слюдяних конденсаторів – 0,1 нГн;
- для оксидних – 1...40 нГн;
- для паперових – 10...100 нГн.

Еквівалентна схема конденсатора складається з власної ємності, опору втрат та паразитної індуктивності: C, R, L .

Індуктивний опір частково компенсує ємнісний. Це призводить до зменшення повного опору конденсатора, що еквівалентно збільшенню його ємності. Із рівності повних опорів реального та еквівалентного конденсаторів $Z_e = 1/\omega C_e$ та $Z_p = 1/\omega C - \omega L$ знаходимо

$$C_e \approx C/(1 - \omega^2 CL).$$

Наявність індуктивності збільшує еквівалентну ємність, приводить до сильної залежності її від частоти та визиває виникнення резонансних явищ, що порушує нормальне функціонування конденсатора. Резонансна частота визначається виразом

$$f_0 = 1/2\pi(LC)^{1/2}.$$

При резонансі опір цього кола мінімальний і рівний активному опору втрат. На інших частотах комплексний опір конденсатора має реактивний характер: на більш низьких - ємнісний, на більш високих – індуктивний.

Використання конденсатора можливе лише на частотах нижчих резонансної, на яких він має ємнісний опір. Необхідно, щоб максимальна робоча частота була в 2...5 раз нижча резонансної частоти.

Для зниження індуктивності необхідно зменшувати розміри конденсаторів, виготовляти його виводи не з дроту а з стрічки та робити їх якомога коротшими. Деякі види конденсаторів призначених для НВЧ взагалі не мають виводів а оснащені металізованими торцями, якими вони безпосередньо припаюються до плати. Максимальна робоча частота для деяких типів конденсаторів наведена в табл.2.3.

Таблиця 2.3

Паразитна індуктивність та максимальна робоча частота деяких типів конденсаторів

Тип конденсатора	L , нГн	$f_{\text{макс}}$, МГц
Слюдяний	0,1...100	1...250
Керамічний	1...10	50...3000
Паперовий	10...100	5...10
Змінної ємності повітряний	6...60	50...350

Як бачимо конденсатори великої ємності, наприклад паперові, працюють на низьких частотах. Із-за індуктивності стандартний паперовий конденсатор на частоті 50 МГц має опір 35 Ом, а тому не може бути використаний як

блокуючий. Малогабаритний керамічний конденсатор має опір 1 Ом Тому для забезпечення нормальної роботи блокуючого конденсатора в широкому діапазоні частот паралельно паперовому великої ємності рекомендується під'єднувати керамічний або слюдяний конденсатор.

2.3. Конструкції конденсаторів

Конденсатори можуть бути:

- **пакетної конструкції** – характерна для слюдяних, склоемалевих, склокерамічних конденсаторів;
- **трубчатої** – характерна для керамічних;
- **дискової** – характерна для деяких постійних керамічних конденсаторів та підстроювальних;
- **литої секціонованої** – для керамічних конденсаторів КЛС (керамічні литі секціоновані), КЛГ (керамічні литі герметизовані);
- **рулонної** – плівкові, електролітичні конденсатори сухого типу;
- **електролітичної** – між двома стрічками електродів прокладений просочений електролітом папір;
- **багато пластинчатої** – характерна для конденсаторів змінної ємності.

Високочастотні конденсатори постійної ємності

ВЧ конденсатори (керамічні, слюдяні, склоемалеві, склокерамічні та склянні) мають малу паразитну індуктивність, невеликі втрати в діелектрику, високу стабільність температурну ($10^{-5} 1/0C$), точність (до $\pm 2\%$), малі габарити та масу.

Використовуються в схемах генераторів та підсилювачів ПЧ, ВЧ та НВЧ діапазонів. Найбільш точні та стабільні конденсатори використовуються як контурні, інші - роздільні фільтрові та термокомпенсуючі в ВЧ колах. Номінальна ємність лежить в межах 1...1000 пФ, хоча і є конденсатори ємністю до 1 мкФ. Основні параметри деяких типів конденсаторів наведені в табл. 2.4.

Конденсатори: КЛГ, КМ-6, К10-17– широкого призначення. Конденсатори К10-17 виготовляються двох типів в опресованих компаундованих оболочках з гнучкими виводами для РЕА тропічного призначення і з металізованими виводами – для поверхневого монтажу та мікросхем. Конденсатори К10-26, К10-42 – використовуються для термостабільних кіл і теж випускаються в двох варіантах. К22-4 - склокерамічні використовуються в мікросхемах з високими технічними параметрами замість конденсаторів К10-9, К10-17.

Таблиця 2.4

Характеристики деяких ВЧ конденсаторів постійної ємності

Тип	Ємність	Відхилення С, %	ТКЄ·10 ⁶ , 1/°С	Номінальна напруга, В	Інтервал t ⁰ , °С
КЛГ	18...30000 пФ	5;10;20; -20+80	-47...-1500 Н	70...250	-60...+155
КМ-6	120пФ...2,2 мкФ	5;10;20; -20+50;- 20+80	+33...-1500 Н	22...50	-60...+155
КТ	1...10000 пФ	5;10;20; -20+50;- 20+80	+100...- 1300 Н	80...750	-60...+85
К10-17	2,2пФ...0,33 мкФ	5;10;20; -20+50;- 20+80	+33...-1500 Н	25	-60...+155
К10-26	1,2...274 пФ	1,0	0...±30	50	-60...+85
К10-42	22 пФ...3,3 мкФ	5;10;20	-47	50	-60...+155
К22-4	56пФ...0,01 мкФ	10;20	-50...200	10	-60...+70

Низькочастотні конденсатори постійної ємності

Використовуються в колах постійної, пульсуючої та змінної напруги НЧ як фільтрові, блокуючі та роздільні конденсатори великої ємності. До них відносяться – паперові, металопаперові, плівкові, електролітичні та оксидно-напівпровідникові конденсатори. Основні характеристики конденсаторів наведені в табл. 2.5 та табл. 2.6.

Конденсатори К42П-5 - паперові і призначені для роботи в РЕА, що експлуатується в відносно легких умовах, К71-4 – полістирольні та мають достатньо високу робочу напругу, К75-24 – комбіновані та мають високу робочу напругу.

Таблиця 2.5

Характеристики деяких паперових та плівкових конденсаторів

Тип	Ємність, мкФ	Відхилення С, %	ТКЕ·10 ⁶ , 1/°С	Ном. напруга, В	Інтервал t ⁰ , °С
К42П-5	0,01...1	10	Н	35	-60...+50
К71-4	0,01...10	2;5;10;20	Н	160...250	-60...+85
К75-24	0,01...10	5;10;20	Н	400...1600	-60...+125

Таблиця 2.6

Характеристики деяких електролітичних та оксидно-напівпровідникових конденсаторів

Тип	Ємність, мкФ	Відхилення С, %	ТКЕ·10 ⁶ , 1/°С	Ном. напруга, В	Інтервал t ⁰ , °С
К50-29 (Al)	1...4700 мкФ	-20+50	Н	6,3...400	-60...+85
К53-4 (Nb)	0,47...100	10;20;30	Н	6...20	-60...+85
К53-16 (окс)	4,7...100	-20+50	Н	6...20	-60...+125

Електролітичні та оксидно-напівпровідникові конденсатори мають високу питому ємність. Недоліками є нестабільність параметрів, залежність ємності від температури, особливо низької, обмежений діапазон частот, уніполярність (властивість працювати лише при відповідному прикладенні напруги). Їх використовують в фільтрах, як перехідні в підсилювачах та генераторах НЧ. В якості електролітів використовують концентровані розчини кислот та лугів. В оксидно-напівпровідникових – оксид марганцю MnO₂. К53-16 – використовуються для поверхневого монтажу та для ГПС.

Особливості, які треба враховувати при використанні конденсаторів:

- Наявність власної ЕРС в електролітичних та оксидно-напівпровідникових конденсаторах (до 1В);

- Нестабільність ЕРС – шуми при використанні їх як прохідних;
- Скачки струму витоку при підключенні напруги до конденсатору;
- Нестабільність опору ізоляції та контактів при малих робочих напругах (не брати великий запас по напрузі);
- Необхідність тренування після довгого збереження електролітичних та оксидно-напівпровідникових конденсаторів;
- Можливість зміни ємності скачком в часі для слюдяних та керамічних конденсаторів.

Конденсатори спеціального призначення

В особливу групу керамічних конденсаторів відносяться вариконди та варікапи.

Вариконди – це конденсатори із діелектриком виконаним з сегнетокераміки, діелектрична проникність якої залежить від прикладеної напруги. Ємність при зміні напруги від одного до десятків вольт може змінюватися від номінального значення до 10 і більше раз (від сотні пФ до десятків нФ). Використовуються в пристроях автоматичного регулювання, стабілізаторах напруги та інше. Недоліком їх є значні втрати ($\operatorname{tg}\delta = 0,1$) та залежність параметрів від температури (50...80%).

Змінювати відстань між обкладинками конденсатора можна електричним способом в ємностях на основі р-п переходів. При зміні запираючої напруги U змінюється ширина р-п переходу в відповідності до виразу

$$d = 0,8(U+0,83)^{1/2} .$$

При цьому ємність р-п переходу

$$C = 128S/(U+0,83)^{1/2},$$

де S – площа переходу. Такі конденсатори називаються варікапами.

Варікап – це напівпровідниковий прилад, ємність якого керується зворотною напругою. Добротність варікапів лежить в межах 50...100. Температурний коефіцієнт ємності $\alpha_C = (100...200) \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$. Ємність варікапів

зменшується від десятків-сотень пФ до одиниць пФ зі збільшенням напруги від 3 до 35 В.

Завдяки малим розмірам, високій добротності, стабільності та достатньо широкому діапазону зміни ємності варікапи знайшли широке застосування для настроювання контурів та фільтрів як елемент управління частотою.

Плівкові конденсатори для ГС та ІС

Плівкові конденсатори складаються з:

- нижньої обкладинки (виготовляється напиленням та фотолітографією);
- діелектричної плівки (виготовляється напиленням через маску);
- верхньої обкладинки (виготовляється напиленням через маску).

Розрахунок ємності конденсатора зводиться до визначення його площі, під якою розуміють площу перекриття нижньої обкладинки з верхньою.

Площа розраховується за формулою:

$$S [\text{см}] = C/C_0;$$

де C - задана ємність конденсатора [пф]; C_0 - питома ємність [пф/см], $C_0=0.0885\varepsilon/d$; d [см].

Ємність конденсатора залежить від типу діелектрика. Найчастіше використовується SiO_2 - $C_0 \approx 15000$ пф/см² ($\varepsilon=5\dots 6$); трьохсерниста сульма Sb_2S_3 $C_0 \approx 20000$ пф/см² ($\varepsilon=18\dots 21$). Як обкладинки використовують тонкі плівки Al (товщина декілька мкм). Використання в плівкових конденсаторах з SiO_2 золота не дозволяється із-за утворення “пурпурної чуми”, яка визиває розрушення контактів.

Діапазон номінальних значень ємностей конденсаторів 10...10000 нФ.

Провідникові елементи та контактні площини виготовляються з золота, срібла, нікелю, алюмінію.

Для отримання необхідної адгезії напиляють підшарок ванадію, ніхрому чи марганцю.

Основні характеристики матеріалу обкладинок конденсатора (товщини шарів, опір тонкої плівки):

Другий тип конденсаторів (плівкові) в зв'язку з поганою сумісністю напівпровідникової та гібридної технологій в ІС використовується достатньо рідко. Ці конденсатори за конструкцією аналогічні до плівкових конденсаторів для ГІС.

2.4. SMD - компоненти

Компоненти SMD випускаються різних розмірів і в різних типах корпусів:

- двоконтактні:
 - прямокутні пасивні компоненти (резистори і конденсатори):
 - $0,4 \times 0,2$ мм (дюймовий типорозмір — 01005);
 - $0,6 \times 0,3$ мм (0201);
 - $1,0 \times 0,5$ мм (0402);
 - $1,6 \times 0,8$ мм (0603);
 - $2,0 \times 1,25$ мм (0805);
 - $3,2 \times 1,6$ мм (1206);
 - $3,2 \times 2,5$ мм (1210);
 - $4,5 \times 3,2$ мм (1812);
 - $4,5 \times 6,4$ мм (1825);
 - $5,6 \times 5,0$ мм (2220);
 - $5,6 \times 6,3$ мм (2225);
 - танталові конденсатори:
 - тип А (EIA 3216-18) — $3,2 \times 1,6 \times 1,6$ мм;
 - тип В (EIA 3528-21) — $3,5 \times 2,8 \times 1,9$ мм;
 - тип С (EIA 6032-28) — $6,0 \times 3,2 \times 2,2$ мм;
 - тип D (EIA 7343-31) — $7,3 \times 4,3 \times 2,4$ мм;
 - тип Е (EIA 7343-43) — $7,3 \times 4,3 \times 4,1$ мм;
 - діоди:
 - SOD-323 — $1,7 \times 1,25 \times 0,95$ мм;

- SOD-123 — $3,68 \times 1,17 \times 1,60$ мм;
- 3-и контактні транзистори:
 - SOT-23 — $3 \times 1,75 \times 1,3$ мм;
 - SOT-223 — $6,7 \times 3,7 \times 1,8$ мм;
 - DPAK (TO-252) — корпус, розроблений Motorola для розміщення напівпровідникових приладів з великим енергоспоживанням (3- і п'ятиконтактні варіанти);
 - D2PAK (TO-263) — корпус, аналогічний DPAK, але більший по розміру; приблизно TO220 для SMD-монтажа (3-, 5-, 6-, 7- або восьмививідні варіанти);
 - D3PAK (TO-268) — корпус, аналогічний D2PAK, але ще більший по розміру;
- з чотирма виводами і більше:
 - виводи в дві лінії по боках:
 - IC в корпусі (SOIC), розмір між виводами 1,27 мм;
 - TSOP — тонкий SOIC (тонкіший за SOIC по висоті), між виводами 0,5 мм;
 - SSOP — ущільнений SOIC, між виводами 0,65 мм;
 - TSSOP — тонкий ущільнений SOIC, між виводами 0,65 мм;
 - QSOP — розмір в чверть SOIC, між виводами 0,635 мм;
 - VSOP — QSOP ще меншого розміру, між виводами 0,4; 0,5 або 0,65 мм;
 - виводи в 4 лінії по боках:
 - PLCC, CLCC — IC в пластиковому або керамічному корпусі з виводами, загнутими під корпус літерою J, між виводами 1,27 мм;
 - QFP — прямокутний корпус IC різних розмірів;
 - LQFP — низькопрофільний QFP (1,4 мм висотою, різних розмірів);
 - PQFP — пластиковий QFP, 44 або більше виводів;

- CQFP — керамічний QFP, схожий з PQFP;
- TQFP — тонкіший за QFP;
- QFN — QFP без виводів з радіатором;
- масив виводів:
 - BGA — масив кульок з квадратним або прямокутним обрисом масиву виводів, зазвичай з кроком 1,27 мм;
 - LFBGA — низкопрофільний FBGA, квадратний або прямокутний масив, кульки припою з кроком 0,8 мм;
 - CGA — корпус з выводами з тугоплавкого припою;
 - CCGA — керамічний CGA;
 - μ BGA (мікро-BGA) — масив кульок з кроком менше 1 мм;
 - FCBGA — масив кульок на підкладці, до якої припаяний сам кристал з теплорозподільником, на відміну від PBGA ;
 - LLP — корпус без виводів.

2.5. Контрольні питання

1. В чому полягає принцип дії конденсатора?
2. На які типи поділяються конденсатори?
3. Конденсатори постійної ємності. Поділ за типом діелектрика.
4. В чому полягають особливості конденсаторів змінної ємності?
5. Якими параметрами характеризуються конденсатори?
6. Ряди номінальної ємності конденсаторів.
7. Які конструкції конденсаторів Ви знаєте?
8. В чому полягають особливості використання ВЧ та НЧ конденсаторів?
9. Як побудовані плівкові конденсатори для ГІС?
10. В чому полягають особливості конденсаторів для ІС?

Лекція 3. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

3.1. Класифікація провідникових матеріалів

Провідникові матеріали (тверді тіла, рідини та при відповідних умовах гази) – це матеріали, що мають питомий електричний опір менший 10^{-4} Ом·м та призначені для комутації, контактуванню, накопичення зарядів та регулювання і розподілу енергії в електричних колах.

До **твердих провідників** відносяться всі метали та напівметали (така модифікація вуглецю як графіт, миш'як, сурма та вісмут). Серед металічних провідників є матеріали, що мають високу провідність, та матеріали з високим опором. Метали з високою провідністю використовують для виготовлення проводів, обмоток трансформаторів, хвильоводів, контактних доріжок та площин. Матеріали з високим опором використовуються в електронагрівальних пристроях, виготовлення ниток накалювання в лампах, резисторів та інше.

До **рідких провідників** відносяться розплавлені метали та електроліти. Як правило, температура плавлення металів висока, за винятком ртуті, у якої вона складає -39 °С. Тому за нормальних умов в якості рідкого провідникового матеріалу може використовуватися лише ртуть.

Механізм протікання струму по металам в твердому та рідкому станах обумовлений рухом вільних електронів. Тому їх називають провідниками з електронною провідністю (провідники першого роду).

Електролітами (провідниками другого роду) є розчини (в основному водні) кислот, лугів та солей а також розплави їх іонних з'єднань. Проходження струму через них зв'язано з переносом разом з електричними зарядами іонів, в результаті чого склад електроліту постійно змінюється, а на електродах виділяються продукти електролізу.

Всі гази та пари металів при низьких напруженостях електричного поля непровідні. Однак якщо напруженість електричного поля вище критичного значення, що забезпечує іонізацію, газ становиться провідником з електронною

та іонною провідністю. Сильно іонізований газ при рівності кількості електронів та позитивних іонів представляє собою рівноважне провідникове середовище – плазму.

Основні властивості та характеристики

До основних характеристик провідникових матеріалів відносяться:

1. Питома провідність або питомий опір.
2. Температурний коефіцієнт питомого опору.
3. Питома теплопровідність.
4. Контактна різниця потенціалів та термоелектрорушійна сила.
5. Межа міцності при розтязі та відносне подовження при розриві.

В основному нам ці величини відомі. Розглянемо деякі їх особливості цікаві з точки зору радистів.

Відомо, що опір прямолінійного провідника змінному струмові більше чим його опір постійному струмові із-за явища поверхневого ефекту (скін-ефекту). Суть цього явища полягає в тому, що при проходженні змінного струму утворюється магнітне поле, під дією якого виникає в провідникові індукційний струм. Взаємодія цього струму з основним викликає перерозподіл струму по перерізу провідника так, що густина струму в зовнішній частині перерізу виростає, а в внутрішній зменшується. З збільшенням частоти струм сильніше відтісняється на поверхню, займаючи все менший шар. На ВЧ струм по внутрішніх шарах майже не протікає. Глибина проникнення струму χ [мм] визначається виразом:

$$\chi = 0,5(\rho/f)^{1/2},$$

де ρ – питомий опір провідника, Ом·мм²/м, f – частота, МГц.

Опір провідника змінному струмові дорівнює:

$$R = \rho \cdot l / S_e,$$

де l – довжина провідника [м], S_e – переріз еквівалентного шару, що дорівнює добутку глибини проникнення на периметр перерізу [мм²].

Опір провідникової поверхні визначиться як

$$R = R_s \cdot l/b,$$

де R_s – питомий поверхневий опір, який являє собою опір, що створюється струмові квадратним елементом площею $1 \times 1 \text{ см}^2$, l – довжина провідникової поверхні, b – ширина цієї ж поверхні. На дуже високих частотах глибина проникнення складає одиниці мкм. Тому різні нерівності провідникової поверхні, що виникли в результаті механічної обробки, подовжують шлях струму та викликають збільшення опору.

При з'єднанні двох різних металів між ними виникає різниця потенціалів. Причина контактної різниці потенціалів - в різних значеннях роботи виходу електронів із металів, а також в тому, що кількість вільних електронів в різних металах не однакова. Контактна різниця потенціалів визначається, як

$$U_{AB} = U_B - U_A + (kT/e) \cdot \ln(n_A/n_B),$$

де U_B , U_A – електрохімічні потенціали матеріалів, що контактують, k – постійна Больцмана, T – температура, e – заряд електрона, n_A та n_B – концентрації електронів в металах А та В. Для різних матеріалів U_{AB} може лежати від десятих часток до декількох вольтів. Якщо температура спаїв однакова, то сумарна різниця потенціалів в замкненому колі дорівнює одиниці. Але коли один з спаїв має температуру T_1 а інший T_2 , то виникає термо ЕРС.

$$U = U_{AB} + U_{AB} = (k(T_1 - T_2)/e) \cdot \ln(n_A/n_B) = f(T).$$

В РЕА при контактуванні інших металів з міддю необхідно вибирати їх з якомога меншою термо ЕРС (мідь - мідні сплави, мідь – залізо).

Останні фізичні та механічні характеристики загально відомі і не потребують спеціальних пояснень.

Метали та сплави в РЕА

В РЕА метали виконують різні функції:

- **електричні**, які мають заданну електропровідність та використовуються для створення провідників та резисторів
- **конструкційні**, які використовуються для виготовлення різних конструкцій (шасі, корпусів та інш.). Вони використовують такі

властивості як міцність, пластичність, теплостійкість та інше. До конструкційних матеріалів відносять:

- алюміній та його сплави (дюралюміні (Al+Mg), силуміни (Al+Si));
- мідні сплави (бронза (Cu+Sn,Si,Al), латунь (Cu+Zn,Sn,Fe));
- сталі (Fe+C);
- титан (Ti).

Крім того існують метали, що виконують інші функції. До них відносяться:

- припої;
- адгезійні матеріали;
- захисні покриття.

Припої – сплави металів, що використовуються для з'єднання елементів паянням.

Найбільш відомі олов'яно-свинцеві припої. Вони поділяються за температурою плавлення на:

- м'які ($T_{пл} < 300^{\circ}C$) – олов'яно-свинцеві (ПОС); олов'яно-свинцеві з домішкою кадмію, сурми, міді (ПОСК, ПОСС, ПОСМ); індієво-срібні (ПСрІн);
- тверді ($T_{пл} < 300^{\circ}C$), які характеризуються підвищеною механічною міцністю та використовуються для пайки конструкційних елементів. Це – мідно-цинкові (ПМц) та срібні (ПСр) припої.

В склад м'яких припоїв, які використовуються для паяння друкованих плат, входить свинець, що є токсичним важким металом. Людський організм легко адсорбує свинець. Це призводить до враження мозку, нервової та репродуктивної систем людини.

Тому в багатьох країнах світу після 2000 року прийняли заборону про використання свинцевих припоїв. Так безсвинцевими (Lead-Free) відповідно до вимог директиви в галузі електротехніки та електроніки прийнятої європейським парламентом RoHS2002/95/EC (Restriction of Hazardous

Substances) вважаються електронні збірки та компоненти, якщо рівень свинцю, ртуті та кадмію в сировині та кінцевому продукті менше 0,1 %, кадмію – 0,01 %. Виключення є лише для продукції військового та аерокосмічного призначення, а також електронно-променевої трубок та деяких інших виробів, наприклад в керамічних частинах п'єзоелектронних компонент. Для заміни олов'яно-свинцевих припоїв є припій Sn95.5Ag3.8Cu0.7 (температура плавлення 217 °C), який придатний для пайки оплавленням та пайки хвилею. В загалом сплави для безсвинцевої технології мають температуру плавлення від 210 °C до 234 °C (проти 183 °C для свинцевих). Більш висока температура (на 30 °C) процесу паяння може привести до ушкодження як ЕРЕ так и плати.

Це вимагає нових технологій пайки, випуску термостійких корпусів для ІМС, розробки нових ЕРЕ стійких до підвищених температур та додаткових затрат на заміну частини технологічного обладнання, навчання та перепідготовку інженерно-технічного персоналу.

Адгезійні метали використовуються в мікроелектроніці як підшарки для значного підвищення адгезії міді та золота до основи мікросхеми. Це – хром, титан, нікель, ванадій.

Захисні покриття – використовуються для утворення на поверхні металевих конструкцій тонких плівок, які не піддаються або слабо піддаються зовнішньому кліматичному впливові. Це – цинк, олово, нікель, хром. Крім того на ВЧ та НВЧ (гранична частота 300 МГц...110 ГГц) захисні покриття зовнішніх та внутрішніх провідників коаксіальних та полоскових з'єднувачів із-за явища скін-ефекту зменшують затухання в лінії передачі.

Класифікація провідникових матеріалів

Провідникові матеріали в залежності від призначення поділяють на:

- матеріали високої провідності;
- матеріали високого питомого опору;
- надпровідникові матеріали;
- припої.

Таблиця 3.1.

Склад та основні характеристики покриттів радіочастотних з'єднувачів

Покриття	Склад, %	Товщина, мкм	Зносостійкість	Корозійна стійкість	Паяємість
Никель	Ni 99,9	1...10	**	*	х
Золото	Au/Ni 0,3	0,1...1,5	*	***	***
Срібло	Ag 99,9	2...10	-	**	**
Біла бронза	Cu 55, Sn 25-30, Zn 15-20	1...4	*	*	х
AuroDur	Au, Ni	Au 0,15; Ni 2...3,5	**	**	х

* - висока, ** - дуже висока, *** - найвища, х – не рекомендовано

3.2. Матеріали високої провідності

Матеріали високої провідності повинні мати низький питомий опір та стабільність параметрів.

Для матеріалів друкованих плат та мікроелектроніки крім цього необхідно:

- високу адгезію до діелектриків, кремнію та діоксиду кремнію;
- можливість отримувати омичні та випрямні контакти з кремнієм.

До найбільш розповсюджених матеріалів високої провідності, що використовуються в РЕА треба віднести: алюміній, золото, мідь, срібло.

Алюміній ($\rho_v = 2,65 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) – пластичний діамагнетик, на повітрі окислюється з утворенням тонкої плівки. Використовується для виготовлення силових та обмоточних проводів, провідникових елементів в мікроелектроніці.

Золото ($\rho_v = 2,25 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) – хімічно інертний діамагнетик з високою пластичністю. Використовується для позолочення струмопровідних частин провідників та контактних площин, особливо тих, що працюють на НВЧ; мікропровід та провідникові плівки в мікроелектроніці.

Мідь ($\rho_v = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) – діаманетик з високою електропровідністю та пластичністю. Використовується для виготовлення провідників в друкованому монтажі, дротів, струмопровідних деталей та конструкцій.

Срібло ($\rho_v = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) – на повітрі не окислюється, розчиняється в азоній та концентрованих сірчаній кислотах. Використовується для антикорозійного покриття, збільшення електропровідності, поліпшення паяння, входить до складу припоїв та контактних матеріалів.

Контактол ($\rho_v = (0,5 \dots 200) \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) – матеріал на основі порошків срібла, свинцю, нікелю та високомолекулярних з'єднувальних речовин (епоксидні та фенолформальдегідні смоли). Використовується для електропровідного склеювання металевих поверхонь.

Характеристики провідників для друкованих плат

Провідники з **тонкої мідної фольги** мають товщину **18, 30 або 50 мкм**. Вони мають опір, величина якого мало відрізняється від опору об'ємного мідного провідника того ж перерізу (для провідників мідної фольги). Опір провідників, отриманих електролітичним осадженням має майже в три рази більший опір.

Друкований провідник має сильно розгалужену поверхню, яка забезпечує хороший тепловий контакт з діелектричною основою та навколишнім середовищем. Тому вони в порівнянні з об'ємними допускають значно більші питомі струми (до 60 А/мм^2 в порівнянні з 15 А/мм^2 для об'ємних).

Величина адгезії друкованих провідників з платою залежить від матеріалу діелектрика, методу виготовлення плати та температурних впливів в процесі збірки та експлуатації. Найкраща для друкованих плат із склотекстоліту.

Металізація в ІС

Після того, як на кремнієвій основі ІС виготовленні схемні елементи (транзистори, резистори і т.д.) їх потрібно з'єднати між собою. Матеріалом для з'єднань служить алюміній, бо він має

- малий питомий опір ($2,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см), для тонких плівок питомий поверхневий опір складає: $R_s=0,05$ Ом/□, де Ом/□ – спеціальний параметр, що характеризує провідникові властивості тонких плівок. Це опір квадратної ділянки тонкої плівки, розділений на її товщину;
- добру адгезію до SiO₂ ;
- можливість отримання зварних з'єднань з алюмінієвим та золотим дротом;
- малу корозію та дешевизну.

Недолік – неможливість високотемпературної обробки після його нанесення (при $t^{\circ} > 500^{\circ}\text{C}$ відбувається взаємна дифузія Si та Al, та температурна міграція атомів алюмінію на поверхні кремнію).

Алюмінієва плівка має товщину 1 мкм, ширина провідних доріжок в залежності від технології виготовлення від 1 до 10 мкм. Контактні площини мають розміри 100×100 мкм. До них приєднуються зовнішні виводи.

Для усунення недоліків алюмінію іноді використовують тугоплавкі метали (вольфрам, молібден і тантал). Для них $R_s=0,1 \div 0,2$ Ом/□. Перевагами таких плівок є відсутність електроміграції та дифузії в кремнії, висока однорідність. Недолік – технологічні складності при нанесенні.

Обмотувальні проводи

Провід (дріт) – виріб з металу або сплаву, здобутий його протягуванням. Дроти використовують під час виконання монтажних або намотувальних робіт для забезпечення мінімального електричного опору між ЕРЕ РЕА. В основному використовують мідні дроти з емалевою ізоляцією товщиною від 0,05 мм до 2,5 мм. Характеристиками обмотувальних дротів є еластичність емалевої ізоляції, стійкість до теплових ударів, опір до стирання та пробивна напруга для двох шарів скручених проводів.

Практичне значення мають дроти з високоміцною емалевою ізоляцією на основі вініфлекса (ПЭВ-1 та ПЭВ-2) та поліуретана (ПЭВТЛ-1 та ПЭВТЛ-2). Останні відрізняються підвищеною нагрівостійкістю. При розплавленні в

процесі пайки ця ізоляція служить флюсом. Тому їх можна паяти без попередньої зачистки.

Монтажні проводи

Монтажний мідний провід виготовляють одножильним та багатожильним. 6...10 значень діаметра в залежності від типу ізоляції з діапазоном перерізу від 0,1 до 2,5 мм². В провідниках використовуються жили перерізом 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5 мм². Ізоляцією є синтетичні матеріали: поліетилен (провід ВД) і полівінілхлорид (ПМВ, ПГВ) (найчастіше в комбінації з волокнистими матеріалами – бавовняною пряжею чи шовком), фторопласт (МГТФ) та кремнійорганічна гума (РКГМ). В залежності від типу проводу вони можуть використовуватися в різних умовах експлуатації (від -60 до +250 °С).

3.3. Матеріали високого питомого опору.

Матеріали високого питомого опору – це матеріали, проходження струму в яких призводить до енергетичних втрат. Вони використовуються для перерозподілу струмів та напруг в електричних колах.

Матеріали високого опору використовуються для виготовлення резисторів. Тому вимоги до матеріалів дуже різноманітні і для створення резисторів використовуються десятки різних матеріалів, кожен з яких має свої специфічні переваги та недоліки.

Для виготовлення резисторів необхідно мати матеріали, що дозволяють створювати опори від 1 до 10⁹ Ом. Крім того ці опори повинні бути стабільні, тобто мати мінімальні оборотний (температурний) та необоротний (старіння) дрейфи питомого опору.

До матеріалів високого опору відносять: манганін, константан, ніхром, фехраль, сплави МЛТ, кермет, металосиліциди та вуглець.

Манганін ($\rho_v = (4,2...4,8) \cdot 10^{-5}$ Ом·м, ТКР = $(5...30) \cdot 10^{-6}$ 1/°C, $T_{пл} = 960$ °C) – сплав міді (85...89%), нікелю (2...3%), марганцю (11...13%). Характеризується низьким ТКР та малою термоЕРС при контакті з міддю.

З манганіну виготовляють провід діаметром \varnothing 0,02...6 мм та стрічки товщиною 0,01...1 мм та шириною до 270 мм. Виготовляють також обмоточні проводи з емалевою (ПЭВММ – м'який манганін, ПЭВМТ – твердий манганін) та шовковою ізоляцією (ПШДММ та ПШДМТ), які використовують для створення резисторів високого класу точності.

Константан ($\rho_v = (4,8...5,6) \cdot 10^{-5}$ Ом·м, ТКР = $(0...6) \cdot 10^{-5}$ 1/°C) – сплав міді (50...59%), нікелю (39...40%) та марганцю (1...2%). В багатьох складах константану ТКР майже не змінюється з температурою. Недоліком є значна термо-ЕРС (40...50 мкВ/°C) в парі з міддю, що обмежує його використання в резисторах але дозволяє створювати термопари. Для термопар використовують ізольовану константанову проволочку в спаї з міддю. Використовується також для нагрівальних приладів, що працюють при температурі до 450 °C ($T_{пл} = 1260$ °C).

Ніхром ($\rho_v = (1,0...1,4) \cdot 10^{-6}$ Ом·м, ТКР = $(1...2) \cdot 10^{-4}$ 1/°C) – сплав нікелю (55..78%), хрому (15...23%), марганцю (1,5%). Сплав – жаростійкий, що пояснюється значною стійкістю до окислювання при високих температурах (гранично допустима робоча температура 1000...1200 °C. Використовується для нагрівальних елементів, для виготовлення мікропроводів \varnothing 0,01...0,4 мм та в мікроелектроніці для виготовлення плівкових резисторів.

Сплав МЛТ ($\rho_v = (1,0...3,0) \cdot 10^{-4}$ Ом·м, ТКР = $7 \cdot 10^{-4}$ 1/°C) – сплав кремнію (43,6 %), хрому (17,6%), заліза (14,1 %), вольфраму (24,7 %) крім цього в його склад входять алюміній та хром – менше 1%. Характеризується високою хімічною стійкістю та стабільністю параметрів. Сплав випускають в вигляді порошку сірого кольору та використовують для виготовлення метало плівкових резисторів різного призначення.

Кермет ($R_S = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}/\square$, $\text{TKP} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) – метало діелектрична композиція з благородних та тугоплавких матеріалів (Ag, Au, W) та діелектриків (SiO, Ta₂O₃, WO₂, SiO₂ та інші) з неорганічною зв'язувальною речовиною (скло, кераміка). Використовується для виготовлення резисторів НВЧ навантажень а також для виготовлення товсто плівкових резисторів в мікроелектроніці.

Металосиліциди ($\rho_v = (5 \dots 35,0) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\text{TKP} = (5 \dots 25) \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) – сплави металів (Cr, Nb, Si) з кремнієм. Використовуються для виготовлення тонкоплівкових резисторів з $R_S = 0,05 \dots 3,0 \cdot 10^3 \text{ Ом}/\square$.

Вуглець ($\rho_v = (1 \dots 1,2) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\text{TKP} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) – хімічний елемент, який використовується при виробництві резисторів. В якості сировини для виробництва електровугільних виробів використовують сажу та графіт. Сажа отримується піролітичним (термічне розкладення газоподібних вуглеводів (метан, бензин...) без доступу кисню) способом. Для отримання деталей роздрібнена маса зі зв'язкою (різні смоли або скло) спікається в відповідних формах. Для поліпшення характеристик (TKP) використовують боровуглицеві плівки (C₃H₇)₃B або (C₄H₉)₃B, які використовуються як плівкові резистори та входять в склад резисторів МЛТ.

Напівпровідникові резистивні матеріали

Напівпровідники – велика група матеріалів з електронною провідністю, значення якої лежить між провідністю провідників і діелектриків. Завдяки високому питомому опору напівпровідники можуть використовуватися як резистивні матеріали. Однак для них характерна висока температурна нестабільність, тому вони використовуються в основному як датчики температур в системах теплового контролю та регулювання. Таким матеріалом є оксид олова SnO₂. В залежності від призначення його легують CoO – терморезистори, In₂O₃ – прозорі електропровідні плівки, Sb₂O₃ (оксид сурми) – резистори з підвищеним робочим температурним діапазоном до 800...900 °C.

Плівкові резистивні матеріали для ГІС

Плівкові резистинні матеріали є двох груп: матеріали для товстоплівкових резисторів та матеріали для тонкоплівкових резисторів.

Для товстоплівкових резисторів використовуються пасти, в яких наповнювачем є срібно кадмієвий сплав та порошок з сплаву МЛТ, зв'язкою – скло або смоли. Регулювання питомого опору відбувається зміною відношення струмопровідної та діелектричної фаз в пасті та ступенем окислення паладію при нанесенні.

Для тонкоплівкових використовують хром, ніхром, сплав МЛТ, метало-силіциди. Основні характеристики плівкових резисторів наведені в табл.3.2.

Таблиця 3.2

Основні характеристики плівкових резисторів.

Тип резистора	R_s , Ом/□	$R_{ном}$, кОм	ТКР, 10^6 1/°C
Напівпровідниковий	2,5...300	1...20	0,5...25
Тонкоплівковий	$(0,4...10) \cdot 10^3$	1...50	± 100
Товстоплівковий	$(50...10) \cdot 10^4$	1...1000	± 250

Надпровідникові матеріали – матеріали опір яких стрибком спадає до нуля в разі охолодження до критичної температури. Її значення залежить від напруженості магнітного поля, яке створюють зовнішнім джерелом, або від струму, що протікає у провіднику. В разі досягнення значення цього поля надпровідник може перейти провідниковий стан стрибком. До надпровідників відносяться – свинець, олово, індій, ніобій та телур. Використовуються як тонкі плівки в кріоелектроніці.

3.4. Контрольні запитання

1. Які види провідникових матеріалів Ви знаєте?
2. В чому полягають специфічні властивості провідникових матеріалів для РЕА?
3. Поверхневий ефект а провідниках. Що це?
4. Припої, безсвинцеві припої. Що це?
5. Які провідникові матеріали Ви знаєте і для чого вони застосовуються?

6. В чому полягають особливості провідникових матеріалів для друкованих плат та ІС?
7. Назвіть основні матеріали високого питомого опору та дайте їх характеристику?

Лекція 4. РЕЗИСТОРИ

4.1. Класифікація резисторів

Резистори постійного та змінного опору

Резистор - дискретний ЕРЕ на основі провідника з визначеним активним опором. Принцип дії резисторів оснований на використанні властивостей матеріалів створювати опір струмові, що протікає по них.

За характером зміни опору розрізняють на резистори постійного, змінного опору, підстроювальні та спеціальні.

Резистори постійного опору – резистори, опір яких під час експлуатації та регулювання не змінюється. Використовуються як навантаження підсилювальних каскадів, в фільтрах кіл живлення та подільників напруги, добав очних опорів та шунтів вимірювальних приладів та інше. В складних РЕА кількість резисторів може сягати до декілька тисяч. Тому основні типи резисторів стандартизовані і є виробами масового виробництва.

Резистори змінного опору – резистори, опір яких регулюються під час експлуатації. Такий резистор має додатковий третій вивід, з'єднаний з рухомих контактом, який можна плавно переміщувати вздовж струмопровідного елемента. Використовуються для плавного регулювання підсилення, рівнів напруг та інше. Багато резисторів змінного опору стандартизовані та є виробами масового виробництва.

Резистори підстроювальні – це резистори, опір яких має змінюватися при заводських регулюваннях та залишатися постійним в процесі експлуатації. Призначені для точної установки значення опору при разовому чи періодичному регулюванню. Підстроювальні резистори – це спрощений варіант резисторів змінного опору, який розрахований на незначну кількість циклів настроювання (до 10^3 циклів) та мають стопор.

Спеціальні резистори – резистори, опір яких змінюється під дією зовнішніх чинників. До них відносяться:

Варистори – напівпровідникові резистори, опір яких зменшується при збільшенні підведеної напруги. Використовуються в стабілізаторах та обмежувачах напруги.

Фоторезистори – опір залежать від освітлення. Використовуються як датчики освітленості в системах автоматики та телеметрії. У парі зі світлодіодом фоторезистор утворює оптрон – прилад, в якому конструктивно пов'язані між собою джерело та приймач світла оптичним каналом.

Тензорезистори – резистори, опір яких змінюється при механічних деформаціях. Виготовляються з фольги чи дроту, що приклеюється на гнучку основу, або у вигляді напівпровідникових пластин чи плівок. Використовуються в різних датчиках механічних величин (переміщення, тиску таке інше).

Терморезистори – резистори, які мають значну залежність опору від температури, найчастіше це нелінійна залежність. Поділяються на термістори (ТКР – негативний) та позистори (ТКР – позитивний). Використовуються як датчики температури в вимірювальних приладах та колах термостабілізації.

Класифікація резисторів

Всі резистори в залежності від типу резистивного матеріалу діляться на:

- **недротяні** – резистивний елемент виконаний з композитних матеріалів, тонких плівок та інше.
- **дротяні** – резистивний елемент виготовлено з проволочки (дроту) із сплаву з високим питомим опором.

За призначенням:

- **загального призначення** – призначені для використання в електричних колах, які не потребують специфічних властивостей та параметрів.
- **спеціального призначення** – мають специфічні властивості та параметри, наприклад: прецизійні, високочастотні, високомегаомні, високовольтні.

За експлуатаційними характеристиками:

- термо- та вологостійкі;
- вібро- та удароміцні;
- високонадійні та інші.

4.2. Позначення резисторів

Резистор, що виготовляються промисловістю мають три види позначень.

В найстарішому позначенні резисторів постійного опору використовувалося три букви:

- перша – вид провідникової частини резистивного елемента (У – вуглеродисті, К – композиційні, М – металоплівкові, П – дротяні);
- друга – вид захисту (Л – лаковані, Г – герметичні, Э – емальовані та інше);
- третя – особливі властивості резистора або його призначення (Т – теплостійкі, П – прецизійні, В – високовольтні).

Наприклад – МЛТ – металоплівкові, лаковані, термостійкі; БЛП – боровуглицеві, лаковані, прецизійні, КИМ – композиційний, ізольований, малогабаритний.

В відповідності до ГОСТ 13453-68 з **1968 по 1980 роки** було введено наступне позначення резисторів:

- перший індекс – позначає тип резистора (С – постійні, СП – змінні, СТ – текрморезистори, СН – варистори);
- другий (цифра) – позначає матеріал:
 - 1 – недротяні поверхневі, вуглецеві та боровуглецеві;
 - 2 – недротяні поверхневі, металоплівкові та металооксидні;
 - 3 – недротяні поверхневі, композиційні;
 - 4 – недротяні об'ємні, композиційні;
 - 5 – дротяні;
 - 6 – резистори НВЧ.

- третій індекс позначає конструкційний варіант виконання резисторів однієї групи.

Наприклад, С5-5 – постійний дротяний резистор 5-го варіанту виконання.

З 1980 року діє така система позначень, яка складається теж з трьох елементів:

- перший індекс позначає тип резистора (Р – резистори постійні, РП – резистори змінні, ТР – терморезистори з відємним ТКР, ТРП – терморезистори з додатнім ТКР, ВР – варистор постійний, ВРП – варистор змінний).

- другий індекс позначає тип матеріалу:

1 – недротяні;

2 – дротяні.

Для терморезисторів та варисторів тип матеріалу не позначається, а іде лише порядковий номер розробки.

Наприклад, ТР-7 – терморезистор з від’ємним ТКР з порядковим номером розробки 7.

- третій індекс – це порядковий номер розробки конкретного типу резистораю

Наприклад, Р1-26 – постійний недротяний резистор з порядковим номером 26.

В конструкторській документації крім того надаються наступні параметри: номінальний опір, номінальна потужність, допуск на опір, для змінних резисторів – вид функціональної характеристики. Надається також номер ГОСТА чи ТУ.

Наприклад, Резистор С4-0,25 30 Ом \pm 10% ОЖО. 467.030 ТУ або СПЗ-23а-1Вт 470 кОм \pm 30% -А ОЖО. 468.148 ТУ.

Для мініатюрних резисторів прийнята кодована система позначень (ГОСТ 11076-64). Номінальний опір позначається умовно:

Ом – R, Е або без букви; кОм – К; МОм – М, ГОм – G, ТОм – Т.

Ставиться буква на місці коми. Наприклад, 5К6 – 5,6 кОм; 1Г2 – 1,2 ГОм.

Допуск кодується буквою, що ставиться після коду номінального значення: $\pm 20\%$ - М; $\pm 10\%$ - К; $\pm 5\%$ - J; $\pm 2\%$ - G; $\pm 1\%$ - F; $\pm 0,5\%$ - D; $\pm 0,25\%$ - С; $\pm 0,1\%$ - В. Наприклад, 4К7М – резистор номінальним опором 4,7 кОм з допуском $\pm 20\%$.

Резистори імпортного виробництва мають свої позначення, які можна подивитися на Інтернетресурсах.

4.3. Основні параметри резисторів

1. Номінальний опір та допуск.

Номінальний опір – це електричний опір, значення якого позначено на резисторі або вказано в нормативній документації і є вихідним для розрахунку відхилень від цього значення.

Номінальні опори резисторів стандартизовані: для постійних резисторів згідно ГОСТ 2825-67 встановлено шість рядів номінальних значень – Е6; Е12; Е24; Е96; Е124 з допуском відхилення $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ для рядів Е6; Е12; Е24 та менше $\pm 5\%$ для рядів Е96; Е124, для змінних згідно ГОСТ 10318-80 встановлений ряд Е6 з допуском відхилення $\pm 20\%$.

2. **Номінальна потужність** – це найбільша потужність, яку може розсіяти резистор в заданих умовах на протязі гарантованого строку служби при збереженні параметрів в заданих межах. Згідно ГОСТам 24013-80 та 10318-80 конкретні значення потужностей наступні: 0,01; 0,025; 0,05; 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 3; 3; 4; 5; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 250; 500 Вт.

3. **Допустима робоча напруга** не повинна перевищувати напругу , розраховану виходячи із номінальної потужності та номінального опору $U_{\max} = \sqrt{P_H R_H}$. Для великих номінальних значень опору ця напруга може досягати таких пробивних значень. Тому для кожного типу резистора, з встановлюється своя робоча напруга. Ця величина задається для нормальних умов експлуатації і залежить від довжини резистора l , його конструкції та тиску середовища p , що

його оточує $U = 300\sqrt{pl}$. Сучасні резистори допускають роботу при зниженому тиску до 666,6 Па (5 мм рт. ст.), що відповідає висоті 30 км.

3. Температурний коефіцієнт опору – характеризує відносну зміну опору резистора при зміні температури оточуючого середовища на 1 °С.

$$TKR = \Delta R / (R_0 \Delta t),$$

де ΔR – абсолютна зміна опору резистора, $\Delta t = t - t_0$, R_0 – опір резистора при нормальній температурі. Чим менший ТКР тим краща температурна стабільність. Для резисторів загального призначення $TKR = \pm(10\dots2000) \cdot 10^{-6}$ 1/°С, для прецизійних - $TKR = \pm(1\dots100) \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

4. Шуми резисторів.

Розрізняють власні шуми та шуми ковзання (для змінних резисторів).

Власні шуми складаються з теплових та струмових шумів.

Теплові шуми виникають під дією руху електронів в струмопровідному шарі (броунівський рух), що призводить до випадкових мікрозмін опору резистора. Теплові шуми з ростом температури ростуть.

Вимірюються теплові шуми діючим значення ЕРС шумів і виражаються в мікровольтях на вольт прикладеної напруги $U_{ш} = \sqrt{4kTR\Delta F}$, де k – постійна Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – температура, К, R – опір, Ом, ΔF – смуга частот, в межах якої визначається шумова напруга, найчастіше це 5 кГц. На практиці користуються формулою $U_{ш} = \frac{1}{8} \sqrt{R\Delta F}$, $U_{ш}$ виражено в мкВ, R в кОм, ΔF в кГц.

Теплові шуми резисторів, особливо високоомних, можуть бути вищими за шуми підсилювальних приладів і суттєво впливати на чутливість РЕА.

Струмові шуми – виникають в резисторах з зернистою структурою – вуглецевих та композиційних. Проходження струму носить випадковий характер що найбільш вірогідно там, де в даний момент найбільший дотик зерен. Рівень шумів $D = E_{ш}/U$ це відношення діючого значення випадкової складової напруги шуму $E_{ш}$ до постійної напруги U , прикладеної до резистора.

Зі збільшенням прикладеної напруги струмові шуми ростуть. Значення ЕРС шумів для більшості недротяних резисторів лежать в межах від 0,1 дл 10 мкВ/В, крім лакоплівкових та об'ємних композиційних. Для них – (100...200) мкВ/В. Дротяні резистори мають лише теплові шуми, які на порядок менші від струмових.

Шуми ковзання властиві змінним резисторам. Виникають в динамічному режимі при русі рухомого контакту по резистивному елементу. Призводять до появи шерехів та трісків. Рівень шумів значно вищий власних і може досягати 100...1000 мкВ/В.

Функціональна характеристика характеризує залежність опору змінного резистора від положення рухомого контакту. Найбільш розповсюджені залежності А – лінійна, Б - логарифмічна, В – зворотна логарифмічна.

5. Частотні властивості резисторів. Залежність повного опору резистора від частоти визначається наявністю ємності та індуктивності, розподілених по довжині резистивного елемента (паразитні елементи), діелектричними втратами в каркасі та покриттях. Тому повний опір має комплексний характер та змінюється з частотою.

Дротяні резистори мають великі значення власних ємності та індуктивності, тому їх реактивність проявляється вже на частотах в декілька кГц, тому вони є низькочастотними. Величина паразитних параметрів залежить від способу намотки, числа витків, форми та конструкції резистора.

Недротяні мають значно менші значення. Тому вони можуть використовуватися на частотах до 0,1...10 ГГц. Індуктивність резистивного елемента залежить від його форми та розмірів: вона тим більша, чим довший резистор та менший його діаметр. Для резистора циліндричної форми з суцільним резистивним шаром при $l = (3...5)D$ розподілена індуктивність приблизно дорівнює 3 нГн на 1 см довжини резистора. Спиральна нарізка збільшує її і 10...100 раз. Тому ВЧ резистори, до яких пред'являють високі

вимоги, не мають звичайних круглих виводів а впаюються безпосередньо в друковану плату або під'єднуються до елементів ГІС.

Чим довше резистор та менше його діаметр, тим нижче діелектрична проникність каркасу та покриття, а отже менше паразитна ємність. Для типових резисторів вона складає 0,05...0,15 пФ на 1 см довжини резистора.

Еквівалентна схема резистора складається з $C_{вх}$, $C_{вих}$ – ємності виводів, $R_{із}$ – опір ізоляції, L_R – загальна еквівалентна індуктивність виводів та резистора, R_K – опір контактів, R_R – опір резистивного елементу, C_R – еквівалентна ємність резистора.

Опір такого резистора $R = (R_R + R_K)/(R_R + R_R + R_{із})$. Це складне коло, що має резонансні властивості.

При деяких умовах можливий резонанс на частотах більших 100 МГц.

6. Вплив електричного навантаження.

При електричному навантаженні виникають як зворотні, так і незворотні зміни опору резистора.

В недротяних резисторах із-за зернистої структури резистивного елементу виникає нерівномірний нагрів місць зіткнення окремих мікро частин, під дією яких змінюється величина перехідного опору. При малих навантаженнях – це зворотній процес, при великих - відбувається спікання частинок і зміни становляться незворотними.

Зворотні зміни опору під дією навантаження оцінюють коефіцієнтом навантаження, тобто відношенням зміни опору під дією навантаження до номінальної потужності резистора. $K_n = 0...1,0$. Найчастіше всього $K_n = 0,1...0,6$.

7. Надійність – властивість елемента зберігати свої параметри в установлених межах при різних впливах на нього (механічні, температурні, коефіцієнти навантаження та інше). Майже четверть всіх відмов РЕА відбувається із-за відмов резисторів. Експериментально встановлено, що 50%

відмов відбувається із-за порушення контакту виводів з резистини елементом, 40% - перегорання, 10% - недопустимої зміни опору.

4.4. Конструктивні типи резисторів

Резистори поділяються на дротяні та недротяні.

Дротяні виготовляються намотуванням дроту з високоомного матеріалу на ізольовані термостійкі основи. Ці резистори забезпечують велику потужність, точність та малий рівень шумів. Недоліки: значна паразитна індуктивність, що обмежує їх частотний діапазон на рівні $10^3 \dots 10^4$ Гц.

Недротяні поділяються на тонкоплівкові та об'ємні.

Тонкоплівкові – в них провідна плівка з вуглецю, борорганічних з'єднань, композитів або металевих сплавів наноситься на зовнішню поверхню циліндричної основи з кераміки. На обидва кінці стержня насаджені латунні ковпачки з коаксіальними виводами. Для захисту від зовнішнього середовища резистор покритий гідрофобною (водовідштовхуючою) фарбою. Для низькоомних - шар суцільний, для високоомних – з нарізкою.

Об'ємні виготовляються з композиційних матеріалів, в яких резистивний елемент є сумішшю провідних та ізолювальних компонентів. Резистор це стержень з провідної композиції з дротяними аксіальними виводами, які запресовані в склоемалевій оболонці.

Змінні недротяні резистори круглої форми – це струмопровідний елемент нанесений на підковоподібну гетинаксову пластинку, по якій рухається контакт закріплений на осі. Такі резистори можуть бути як плівкові, так і композиційні.

Резистори для ГІС мають наступні конструкції:

- **Постійний нитковий резистор** – стержень зі скловолокна з нанесеними на його поверхню тонкими шарами сплавів олова або

струмопровідної композиції. Такі резистори приклеюються до контактних площин струмопровідним клеєм.

- **Постійний тонкоплівковий резистор** – це напилений через спеціальну маску на ситалову основу провідниковий матеріал в вигляді смужки чи меандру. Для захисту від окислення резистори покривають шаром моно оксиду кремнію або гідрофобним лаком.
- **Постійний товстоплівковий резистор** за конструкцією схожий на тонкоплівковий, але виготовляється трафаретним друком з наступною термічною обробкою.

Постійні резистори для поверхневого монтажу аналогічні за конструкцією до конденсаторів поверхневого монтажу та виготовляються 7 типоміналів розміру від 0,3x0,6 мм до 3,2x6,35 мм на номінальні потужності 0,05; 0,062; 0,1; 0,125; 0,25; 0,75; 1,0 Вт. Товщина – 0,3...0,55 мм. Випускаються ряди номінальних значень E6; E12; E24; E48; E96. Випускаються чіпи резисторних збірок по 2; 4; 8 резисторів з діапазоном опорів від 10 Ом до 1 МОм потужністю 0,062 Вт. Робоча напруга – 50 В

Інтегральні резистори для напівпровідникових ІС поділяються на резистори, виготовлені в напівпровідникових шарах, наприклад, дифузійні, які формуються шляхом дифузії різних домішок в напівпровідник, та тонкоплівкові.

Дифузійні резистори (рис.2.1 та рис.2.2) – виготовляються в процесі створення базових та емітерних областей транзисторів дифузією домішок.

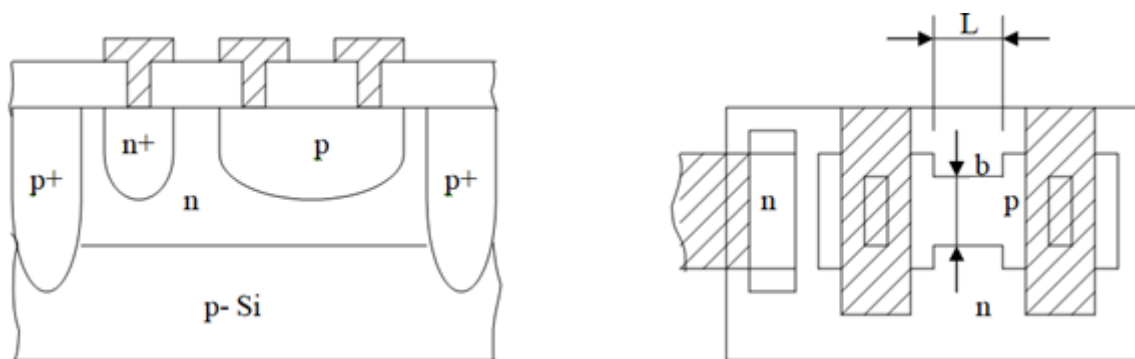


Рис.2.1 та рис.2.2. Резистори для ІС

Опір резистора визначається як $R=R_S(L/b)$, де R_S – питомий поверхневий опір р-шару. $R_S = 100...300$ Ом/□, довжина обмежена: L – міліметри, $b = 10...20$ мкм, $R_{\max} \sim 20$ кОм. Для змійкових R_{\max} до 50 кОм.

$$\text{TKR} - 0.15...0.3\% / \text{C};$$

$$\delta_R - (15...20\%) R_{\text{номін}}.$$

Тонкоплівкові резистори – аналогічні резисторам ГС, але плівки наносяться на поверхню діоксиду кремнію. Виготовляються з танталу та кермету. Потребують допоміжних технологічних операцій, але іноді при виробництві комбінованих мікросхем їх виготовлення економічно доцільне, тому що вони мають хороші електричні характеристики.

Резистори загального призначення

Використовуються як ЕРЕ РЕА середньої точності (5...20%) і мають номінальні значення від 1 Ом до 10 МОм. Робочі напруги до сотень вольт. Діапазон потужностей – 0,125...2 Вт та вище. Частотний діапазон до 10...100 МГц. Використовуються в РЕА широкого призначення, а також в колах до яких не ставиться високих вимог щодо точності, стабільності та високо частотності. Використовуються як анодні та колекторні навантаження, опори зміщення в колах емітера, бази та інше.

До них відносяться постійні резистори:

- боровуглецеві резистори – гр.С1 та ВС,
- металоплівкові – гр.С2 та МЛТ,ОМЛТ, МТ,
- композиційні – гр.С3, С4 та ТВО (тепловодостійкі об'ємні),
- дротяні – гр. С5 та ПЭ, ПЭВ, ПЭВР.

Змінні резистори:

- СП2 – плівкові металооксидні,
- СП3 – плівкові композиційні,
- СП4 – об'ємні композиційні.

Високомегаомні. До цієї групи відносяться резистори з опором від 10^7 до 10^{12} Ом. Використовуються композиційні плівкові резистори СЗ-10, СЗ-13, СЗ-14. Використовуються в дозиметричній та метрологічній апаратурі.

Прецизійні резистори використовуються як тонко плівкові метало діелектричні так і металооксидні резистори. Вони мають допуск $\pm (0,1...1)\%$. До них відносяться резистори С2-1, С2-13, С2-14, С2-19. При порівнянні з резисторами загального призначення мають при однаковій потужності більші габарити, що полегшує тепловий режим та підвищує стабільність провідникового шару.

Високочастотні використовуються як навантаження в НВЧ трактах. Їх опір мало залежить від частоти. Виготовляються без виводів в вигляді стержнів, шайб і т.д. Номінальні значення 1 Ом...10 кОм. Це резистори:

- з металодіелектричним шаром С2-10, С2-34,
- з металооксидним шаром МОМ,
- тонкоплівкові металізовані С6-1, С6-2, С6-3.

Високовольтні – резистори розраховані на роботу до 15 кВ. Є плівкові композиційні резистори марок С2-5, СЗ-6, СЗ-9, СЗ-12.

4.5. Контрольні запитання

1. Принцип дії та призначення резисторів?
2. Класифікація резисторів.
3. Як позначаються резистори?
4. Які існують ряди номінального опору резисторів? Як вони пов'язані з допуском на номінальний опір?
5. Які характеристики резисторів Ви ще знаєте?
6. Назвіть відомі Вам типи резисторів.
7. В чому полягають особливості резисторів для ГІС та ІС?
8. Позначення різних типів резисторів.

Лекція 5. ІНДУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ

5.1. Класифікація котушок індуктивності

Котушки індуктивності – намотуваний або друкований ЕРЕ з індуктивним характером опору $Z_L \approx X_L = j\omega L$. Котушки індуктивності виконуються в вигляд обмоток і призначені для концентрації електромагнітного поля. Котушки індуктивності використовують на частотах від десятків кГц до сотень МГц.

За призначенням поділяються:

- **контурні** – ті котушки, які разом з конденсатором утворюють коливальні контури;
- **зв'язку** – служать елементами зв'язку між каскадами;
- **варіометри** – котушки зі зміною індуктивності в процесі роботи;
- **дроселі ВЧ** – служать для зменшення струму ВЧ, що проходить по колам зі збереженням можливості проходження струмів НЧ та постійного.

За конструктивними ознаками:

- каркасні;
- без каркасні;
- без осердя;
- с осердям.

Осердя використовується для регулювання значення індуктивності. Є осердя:

- **немагнітні** (мідь, латунь, алюміній) використовуються на частотах вище 20 МГц. За звичай це різьбові або гладкі циліндричні деталі;
- **магнітні** (магнітодіелектрики – карбонільне залізо, альсифер або ферити НЧ, СЧ ВЧ НВЧ ($\mu \approx 2000, 100, 10$)).

5.2. Магнітні матеріали

Магнітні речовини – це речовини, які мають магнітну проникність μ більшу одиниці. Вони відносяться до магнетиків – речовин, для яких $\mu \gg 1$ та залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. До них відносяться: залізо, нікель, кобальт та їх сплави, сплави хрому та марганцю, більшість з'єднань типу $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ферити) та інше. Вони оцінюються магнітними характеристиками.

Абсолютна магнітна проникність – відношення магнітної індукції B до напруженості магнітного поля H в заданій точці кривої намагнічування (рис.5.1) $\mu_a = B/H$ (Гн/м), де B – індукція, Тл, H – напруженість поля, А/м.

Відносна магнітна проникність μ – це відношення μ_a до магнітної сталюї, яка характеризує магнітне поле в вакуумі ($\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м).

Температурний коефіцієнт магнітної проникності дозволяє оцінити вплив температури на магнітні властивості матеріалу.

Початкова крива намагнічування та петля гістрезису (рис.2.3) пов'язують індукцію магнітного поля в матеріалі з напруженістю магнітного поля. Характеризуються: μ_0 – початковою магнітною проникністю ($H \rightarrow 0$), $\mu_{\text{макс}}$ – максимальною (точка максимальної крутості), B_r – залишковою магнітною індукцією ($H = 0, B = \epsilon$), H_c – коерцитивною силою ($B = 0, H = \epsilon$).

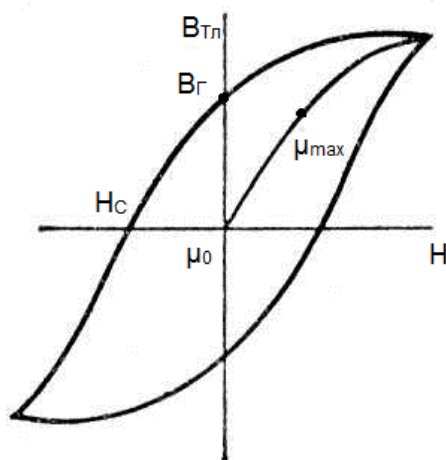


Рис.5.1. Початкова крива намагнічування та петля гістрезису.

Магнітодіелектрики – це феромагнітний матеріал, в якому використовують частинки карбонільного заліза (Р-10, 20,100), альсиферу - сплаву алюмінію (5...13%), кремнію (9...10%) та заліза (ТК-90, ВЧ-32) та пермалою. Ізоляційно зв'язуючою речовиною є фенол формальдегідні смоли, полістирол, скло. Виготовляються осердя циліндричної форми, кільцеві та броньові і використовуються на частотах до 100 МГц.

Ферити – це феромагнітна кераміка з незначною електропровідністю. Великий питомий опір (в $10^6...10^{11}$ раз більший ніж в заліза)(малі втрати на вихрові струми) дозволяють їм працювати на частотах 100 МГц та вище.

За властивостями ферити можна розділити на наступні групи:

- магнітом'які ферити НЧ та ВЧ діапазону (НН – нікель-цинкові, НМ – марганець-цинкові, ВЧ – літій-цинкові високочастотні);
- ферити НВЧ (СЧ - надвисокочастотні);
- ферити з прямокутної петлею гістерезисну (ВТ);
- магнітотверді ферити.

Розглянемо основні характеристики деяких типів магнітом'яких феритів (табл.5.1).

Таблиця 5.1

Характеристики феритів

Марка	μ	H_c , А/м	ρ , Ом·м	Гранична частота, МГц
6000НМ	6000	12	0,1	0,01
1000НМ	1000	80	0,5	1,6
1000НН	1000	32	100	1,4
200НН	200	160	1000	3
150ВЧ	150	640	10^6	25
10ВЧ1	10	560	10^8	250

Ферити НВЧ використовуються в приладах, яким відповідає довжина хвилі від 1 м до 1 мм. Вони використовуються в високочастотних трансформаторах, для управління потоками енергії для перемикування цих потоків, управління

рівнем та поглинання. Використовуються в фазообертачах, фільтрах, циркуляторах НВЧ діапазону та інше.

Осердя за конструктивними ознаками поділяються циліндричні (гладкі, різьбові), кільцеві, броневі.

Діюча (ефективна) магнітна проникність осердя менша від магнітної проникності матеріалу, з якого вони зроблені, і залежить:

- конфігурації осердя
- від взаємного розміщення котушки та осердя.

Значення $\mu_{\text{еф}}$ для тороїдальних осердь $\mu_{\text{еф}} = \mu$, для броньового - $\mu_{\text{еф}} < \mu$, для циліндричного - $\mu_{\text{еф}} = (0,01 \dots 0,05)\mu$.

За типом намотки поділяються:

- одношарові (суцільні або з кроком)
- багатошарові
- циліндричні
- плоскі тороїдальні

Крім того котушки індуктивності поділяються на:

- екрановані
- неекрановані

Котушки індуктивності – не стандартизовані вироби, тому в кожному конкретному випадку їх розраховують за заданими параметрами.

5.3. Параметри котушок індуктивності

Ними є номінальне значення індуктивності, допуск, добротність, ТКІ, власна ємність.

1. **Номінальне значення** індуктивності котушок залежно від частоти та призначення може становити частки мкГн – десятки мГн. Індуктивність дроселів ВЧ – десятки мГн.

Номінальне значення залежить від діапазону частоти та конструктивних особливостей котушки. Розрахунок проводять за графоаналітичним методом,

який описаний в книзі: Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. М.: – Энергия. 1977. – 656 с. Крім того існує велика кількість комп'ютерних програм для розрахунку, які можна легко знайти в Інтернеті.

Розглянемо розрахунок одношарової котушки. Для неї:

$$L = L_0 DN^2 \cdot 10^{-3} \text{ мкГн},$$

де L_0 – поправочний коефіцієнт, який залежить від відношення l/D довжини до діаметру намотки, N – кількість витків.

Якщо в котушку ввести магнітне осердя, то $L = \mu_0 L$, μ_0 – діюча магнітна проникність. Введення осердя дозволяє підстроювати значення індуктивності в межах $\pm(15...20)\%$.

Екрани зменшують паразитний зв'язок між каскадами РЕА. Вони виготовляються в вигляді металічних ковпаків круглої або прямокутної форми і одягаються на котушки. Суть екранування полягає в створенні електромагнітного поля зворотного напрямку за рахунок вихрових струмів в поверхневому шарі екрану. Це електромагнітне екранування.

Індуктивність екранованої котушки

$$L_e = L(1 - \eta(D/D_e)^3),$$

де L – індуктивність неекранованої котушки, η – параметр, який залежить від співвідношення довжини та діаметру котушки, D – діаметр котушки, D_e – діаметр екрану.

2. Добротність – це безрозмірна величина, що дорівнює відношенню накопиченої реактивної енергії до середньої за період коливань потужності втрат або для індуктивності $Q = \omega L/R$, де R – опір втрат в котушці.

$$R = R_f + R_d + R_e + R_o + R_{\text{бл}} + R_{\text{пов}},$$

де R_f – опір дроту ВЧ, R_d – опір втрат в діелектрику каркасу, R_e – опір, що вносить екран, R_o – опір втрат в осерді, $R_{\text{бл}}$ – опір втрат із-за ефекту близькості (витісненню струму ВЧ поля до сторони, що лежить біля каркасу), $R_{\text{пов}}$ – опір втрат із-за поверхневого ефекту (витісненню ВЧ струму на поверхню дроту).

Слід сказати, зі збільшенням діаметру проводу $R_{\text{пов}}$ – опір втрат із-за поверхневого ефекту зменшується а $R_{\text{бл}}$ – опір втрат із-за ефекту близькості зростає, тому є оптимальне значення діаметру проводу, що забезпечить максимальну добротність котушки індуктивності $Q = \omega L/R$.

Добротність катушок лежить в межах 30...300.

3. Температурна стабільність визначається зміною її індуктивності або добротності під дією температури. Залежить від матеріалу конструкції котушки та технології її виготовлення. Так для одношарової котушки з полістироловим каркасом $\text{TKI} = (50...100) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Для багатошарової з феритовим чи карбонільним осердям $\text{TKI} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Для гарячої намотки на керамічному каркасі - $\text{TKI} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

4. Власна ємність – ємність між витками через повітря, каркас, дріт. Залежить від типу намотки:

- одношарова з кроком – 0,1...1 пФ,
- одношарова суцільна – 3...5 пФ,
- багатошарова – 20...30 пФ.

Для зменшення використовують спеціальну намотку „Універсаль”. Для неї $C_0 = 5...9 \text{ пФ}$.

5.4. Види катушок індуктивності

Катушки зв'язку

Використовують для індуктивного зв'язку між окремими колами та каскадами. Такий зв'язок дозволяє розділити кола за змінним та постійним струмом. Основними параметрами катушок зв'язку є:

- індуктивність;
- коефіцієнт зв'язку. Визначається як $k = M / \sqrt{(L_1 \cdot L_2)}$, де L_1, L_2 – індуктивності зв'язаних катушок, M – взаємна індуктивність між ними.

Варіометр

Побудований на зміні коефіцієнту зв'язку між двома котушками при їх обертанні чи поступальному русі. Коефіцієнт перекриття варіометра $k = L_{\max} / L_{\min}$ лежить в межах 4...6. В варіометрах з феритовим осердям це значення може сягати до 100 при $\mu \approx 1000$.

Дроселі високої частоти

Дросель ВЧ вмикається в коло струму ВЧ для збільшення його опору. Постійний струм або струм НЧ при цьому не змінюється. Використовуються в колах фільтрації живлення підсилювачів ВЧ. Конструктивно виконуються у вигляді одно або багатопарової обмотки намотаних на феритове осердя. На частотах вище власного резонансу не використовуються.

Друкована котушка

Має вигляд багатовиткової спіралі, виконаної способом друку на діелектричній платі. Ширину провідника вибирають в межах 0,5...1,0 мм, форму – круглу, квадратну або овальну. Мають добру повторюваність, але малу індуктивність (одиниці мкГн) та низькі добротність та стабільність параметрів.

Індуктивні елементи інтегральних схем

Індуктивні елементи інтегральних схем побудовані на схемотехнічній емітації на основі активних RC- кіл – гіратори.

Гіратор (рис.5.2) – це чотиріполюсник, що інвертує ємність в індуктивність. Транзистор включений в схему з СЕ та обхвачений зворотнім зв'язком, що дає фазовий зсув напруги на базі VT відносно колектора на -90 (град). Колекторний струм в одній фазі з базовим струмом, тобто відстає від напруги, тобто опір $Z_{\text{вих}}$ носить індуктивний характер. $Q < 4$.

Недоліком його є необхідність введення додаткових елементів, та необхідність допоміжних джерел живлення.

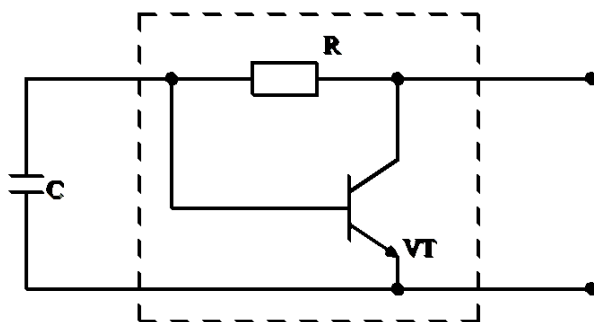


Рис.5.2. Схема гіратора

Еквівалентна схема котушки індуктивності.

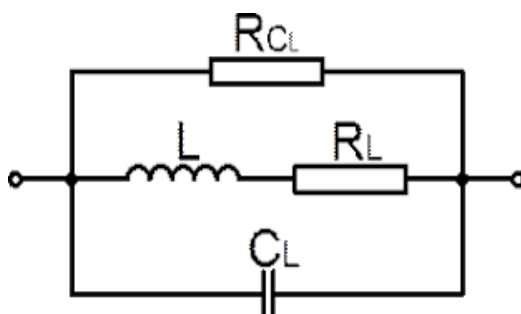


Рис.5.3. Еквівалентна схема котушки індуктивності

Еквівалентна схема (рис.5.3) складається з L - індуктивності, C_L – власної, паразитної ємності, R_L – опору втрат, R_{CL} – опору ізоляції.

5.5. Трансформатори та дроселі

Трансформатор – це електромагнітний, статичний (без рухомих частин) пристрій, що перетворює змінну напругу без зміни потужності. В основі роботи лежить явище електромагнітної індукції, яке полягає в виникненні ЕРС в провідниковому контурі при зміні магнітного потоку, що його пронизує.

Трансформатори служать для:

- підвищення або пониження напруг,
- узгодження опорів електричних кіл,
- розділу кіл джерела та навантаження за постійним струмом,
- зміни стану електричного коло відносно землі.

Дросель – це електромагнітні пристрої, які використовуються в електричних колах як індуктивні опори в фільтрах живлення, низькочастотних фільтрах а також в різних стабілізаторах та регуляторах. Мають різні опори для постійної та змінної складових струму.

Фізичні основи функціонування трансформаторів.

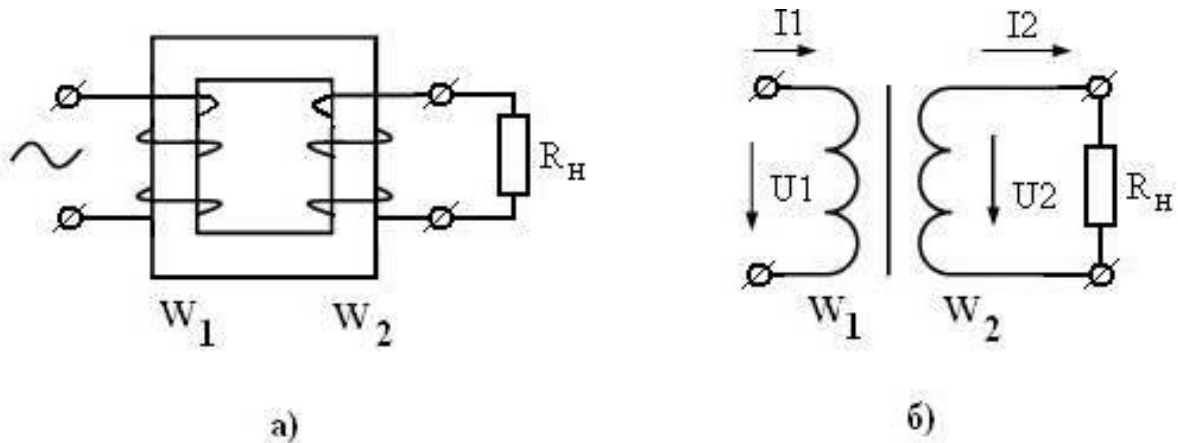


Рис.5.4. Конструкція а) та схема б) трансформатора

Конструкція та схеми трансформатора показані на рис.5.4.

Робота трансформатора основана на зв'язку кіл через магнітний потік. При ввімкненні в первинну обмотку трансформатора, яка містить W_1 витків, джерела ЕРС e_1 в ній протікає струм i_1 та виникає магнітний потік Φ_1 , який створює ЕРС e_2 в вторинній обмотці, і через навантаження протікає струм i_2 . За законом Фарадея, можемо записати:

$$e_2 = u_2 = -W d\Phi/dt, \quad -u_1 = e_1 = -Wd\Phi/dt.$$

Звідси $e_2 = -u_1 n$, де $n = W_2/W_1$ - коефіцієнт трансформації. Для синусоїдальної напруги та амплітудних значень можна записати

$$E_2 = U_2 W_2/W_1 = U_1 n.$$

ЕРС вторинної обмотки знаходиться в протифазі до первинної. Вважаючи, що трансформатор передає лише потужність та нехтуючи магнітними потоками розсіяння, маємо $I_2 = I_1 W_1/W_2 = I_1/n$. Таким чином

ідеальний трансформатор дозволяє отримати необхідну напругу в вторинній обмотці, узгодити напругу і струм первинного кола з опором навантаження.

Основні елементи конструкції трансформатора

З принципу дії трансформатора витікає, що він повинен мати магнітопровід та обмотки.

Магнітопровід (магнітне осердя) – осердя з магнітопровідного матеріалу, як правило, замкнене вздовж шляху магнітного потоку, спільного для всіх обмоток трансформатора. Потрібно для збільшення магнітного потоку, яким передається енергія. Магнітний матеріал повинен мати малі втрати, значну магнітну провідність (високе значення μ) та велику індукцію насичення. Виготовляється з таких матеріалів.

Електротехнічна сталь – сплав заліза з кремнієм (до 5%), який використовується в пристроях, що працюють у змінних магнітних полях НЧ. Введення кремнію поліпшує магнітні властивості і знижує електропровідність, що веде до зменшення втрат на вихрові струми, які виникають під час роботи в змінних магнітних полях. В трансформаторах та дроселях використовується як магнітне осердя в вигляді пакетів електрично ізольованих пластин товщиною 0,08...1,5 мм або витих стрічкових осердь. За способом прокату поділяється на холодно- та гарячекатану сталь.

Основні характеристики сталей наведені в табл.5.3.

Таблиця 5.3.

Основні характеристики трансформаторних сталей

Кількість кремнію, %	Характер прокату	Початкове значення μ	Максимальне значення μ	Коерцитивна сила, А/м
4,0	Гарячекатана	300...400	6000...8000	31...33
3,8	Холоднокатана	600...900	2000...35000	9,5...14

В гарячекатаній сталі магнітні властивості ізотропні, в холоднокатаній – можуть бути як ізотропні так і анізотропні.

Застосовують для виготовлення магнітопроводів генераторів, трансформаторів, дроселів, реле.

Пермалой – пластичні залізно-нікелеві сплави з високою пластичністю, тому легко прокатуються в стрічки товщиною до 1 мкм. Для поліпшення властивостей додають молибден, хром, нікель, мідь. Мають: Початкове значення μ – 2000...15000, Максимальне значення μ – 70000...200000, Коерцитивну силу, А/м – 2...10. Чутливі до механічних деформацій при обробці, тому деталі відпалюють в вакуумі при 900...1100 °С.

Використовують для виготовлення проміжних малогабаритних трансформаторів НЧ, малогабаритних силових трансформаторів, дроселів, деталей магнітних кіл, що працюють при підвищених індукціях без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням.

Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід виготовляють **зі стрічки або з ізолюваних одна від одної пластин**. Форма осердя визначає форму трансформатора. Використовуються:

- броньові (Ш – подібні),
- стрижневі,
- тороїдальні осердя складені як з пластин так і виті стрічкові.

Броньові з однією багатообмотковою котушкою, розташованою на центральному стрижні, прості та дешеві. Стрижневі з двома котушками забезпечують мале поле розсіювання, краще охолодження, тому використовуються в трансформаторах підвищеної потужності. Це кращі тороїдальні але технологія виготовлення їх достатньо складна.

В якості матеріалів осердя використовуються електротехнічні сталі:

- Для пластинчатих магнітопроводів – гарячекатані сталі Э31, Э32, Э41, Э42, холоднокатанні Э310, Э320, Э330, Э330А, Э3100, Э3200,
- Для стрічкових – холоднокатана рулонна сталь за ГОСТ 9925-61.

На практиці найбільше застосування для малопотужних трансформаторів та дроселів знайшли сталі Э42 та Э320 товщиною 0,35 мм (на частоті 50Гц), Э44

товщиною 0,2 (на частоті 400 Гц), Э340 товщиною 0,15 мм та Э350 товщиною 0,08 мм (на частоті 400 Гц).

Значно рідше використовуються залізонікелеві сплави такі як 50Р, 80НХС та інші. Використовуються для виготовлення трансформаторів та дроселів, які працюють при підвищених індукціях без підмагнічування чи з невеликим підмагніченням. Виска вартість та складна технологія виготовлення обмежують їх застосування.

Обмотки трансформаторів та дроселів.

Наступним елементом конструкції є обмотка. За конструктивним виконанням вони поділяють на циліндричні та галетні.

При циліндричній обмотці дріт намотують по всій ширині каркасу внавал (виконується хаотично по всій ширині каркасу) або правильними рядами виток до витка до заповнення шару обмотки (рядова).

Якщо шари ізолювати прокладками а витки фіксувати клеєм, то каркас можна замінити дешевою гільзою. Використовується при масовому виробництві.

Галетна конструкція має секції, кожна з яких займає певну частину повної висоти обмотки. Це дає можливість підвищити електричну міцність і зменшити власну ємність.

Діаметри дротів вибирають з умов допустимої густини струму в дроті.

Для трансформаторів живлення допустима густина струму складає для частоти 50 Гц- 2,0...2,5 А/мм², для 400 Гц – 5 А/мм², для 1000 Гц – 5...10 А/мм². Для сигнальних та імпульсних трансформаторі, в яких тепловий режим не критичний, з умови малої величини відношення r_{Σ}/R_n , що визначає ККД та спад напруги на навантаженні.

Еквівалентна схема та основні параметри трансформатора

Еквівалентна схема (рис.5.5) складається з L_0 – індуктивності первинної обмотки, що визначається спільним магнітним потоком, L_{S1} – індуктивності розсіювання первинної обмотки, що визначається потоком розсіювання цієї

обмотки, який не перетинає витки вторинної обмотки, $L_{s2}' = L_{s2}/n^2$ - індуктивності розсіювання вторинної обмотки приведена до первинної, r_1 - активного опору проводів первинної обмотки, $r_2' = r_2/n$ - активного опору проводів вторинної обмотки, приведений до первинної. Враховується також $R_H' = R_2/n^2$ - опір навантаження, приведений до первинної обмотки, C_0 - паразитна ємність трансформатора, що складається з власної ємності, ємності монтажу та інших паразитних ємностей. Крім цих характеристик до основних параметрів відноситься коефіцієнт трансформації $n = W_2/W_1$, який визначає рівні напруг.

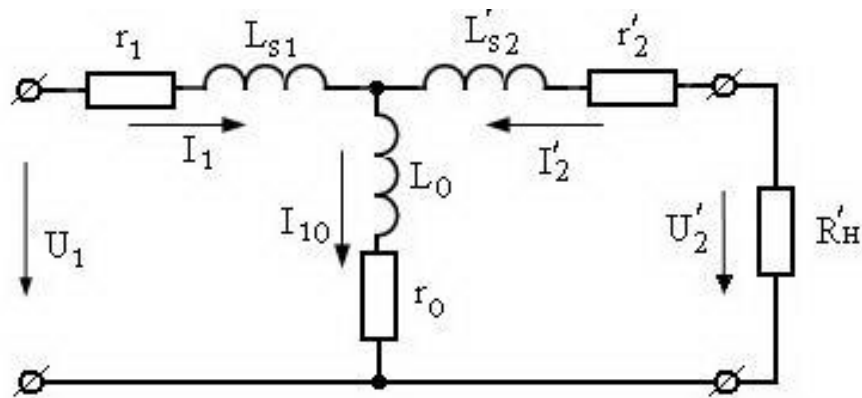


Рис.5.5. Еквівалентна схема трансформатора.

За еквівалентною схемою можна розрахувати АЧХ та ФЧХ трансформатора.

Конструкції НЧ дроселів

НЧ дроселі призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги та входять в склад LC фільтрів. Опір дроселя постійному струмові малий, а змінному $Z = 2\pi fL$, складає десятки кОм. Дроселі НЧ виготовляють на таких же магнітопроводах, що і трансформатори. Наявність в колі постійного підмагнічення вимагає введення немагнітного зазору в магнітну систему дроселя. Змінюючи величину немагнітного зазору ми змінюємо нахил основної

кривої намагнічення і можемо знайти такий зазор, при якому μ має максимальне значення при заданному постійному струмові.

5.6. Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії індуктивних елементів?
2. Які типи котушок індуктивності Ви знаєте?
3. Назвіть особливості різних типів котушок індуктивності.
4. Магнітні осердя. Для чого вони використовуються?
5. Назвіть основні матеріали для осердь котушок індуктивності.
6. В чому полягає суть екранування котушок?
7. Які параметри котушок індуктивності Ви знаєте?
8. Від чого залежить індуктивність котушки?
9. Для чого використовуються трансформатори?
10. В чому полягає принцип дії трансформатора?
11. Яка конструкція трансформатора?
12. В чому полягають особливості дроселів НЧ?

Лекція 6. КОНТАКТНІ ТА КОМУТАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ

6.1. Класифікація контактних та комутаційних пристроїв

Контактні пристрої – елементи РЕА, в яких забезпечується протікання струму в результаті механічного з'єднання чи зіткнення двох металевих деталей та переривання протікання струму в результаті роз'єднання або усунення зіткнення цих деталей. Тобто в контактних пристроях здійснюється електричний контакт.

Контактні пристрої виконують в РЕА різні функції. Класифікуємо їх. За основу класифікації візьмемо принцип роботи контактної пари:

1. **Нероз'ємні** – призначені для постійного з'єднання або дуже рідкого роз'єднання електричного кола (зажині або накручені контактні пари). Нероз'ємні з'єднання здійснюються також пайкою та сваркою.

2. **Роз'ємні** – призначені для періодичного з'єднання-роз'єднання обезструмленого електричного кола (роз'єми, з'єднувачі, лампові панелі).

3. **Ковзаючі** – призначені для утворення постійного контакту між деталями, які переміщуються одна відносно іншої (повзунки реостатів, резисторів змінного опору то що).

4. **Розривні** – призначені для періодичного замикання та розмикання електричних кіл з струмом (вимикачі, перемикачі, реле, магніто керовані контакти – геркони).

В залежності від використання контактні пристрої можна поділити на з'єднувачі та перемикачі.

В залежності від частоти, на якій працюють пристрої, їх можна поділити на низькочастотні, високочастотні та надвисокочастотні.

В залежності від напруги: низьковольтні та високовольтні.

За потужністю поділяються:

- Малопотужні – призначені для роботи в електричних колах з напругою до 200 В та струмами до 1 А.

- Середньої потужності – напруга до 1000 В, струм до 2...3 А.
- Підвищеної потужності – для напруг вище 1 кВ та струмів більше 1 А.

За способом управління: з ручним управлінням (перемикачі), з електромагнітним управлінням (реле).

6.2. Основні параметри і характеристики

Якщо електричне перемикання кіл не супроводжується їх механічним роз'єднанням, то перемикальний пристрій може бути виконаний як в механічному варіанті так і в електронному.

Електронний перемикач не є окремим ЕРЕ. Він містить електронний комутатор (ключ) і схему керування з відповідними кнопками. При невеликій кількості кнопок (до 10) як правило кількість кнопок відповідає кількості положень, при більшій кількості - використовують дві кнопки, на збільшення та зменшення номера положення (каналу) з обов'язковою візуальною індикацією номера положення.

Комутатори – це пристрої, за допомогою яких сигнали, що поступають від декількох джерел об'єднуються в одній лінії, та після відповідної обробки можуть бути направлені на різні виконуючі пристрої.

Загальна система зв'язку джерел та приймачів сигналу через комутатор може бути зображена наступним чином (рис.6.1):

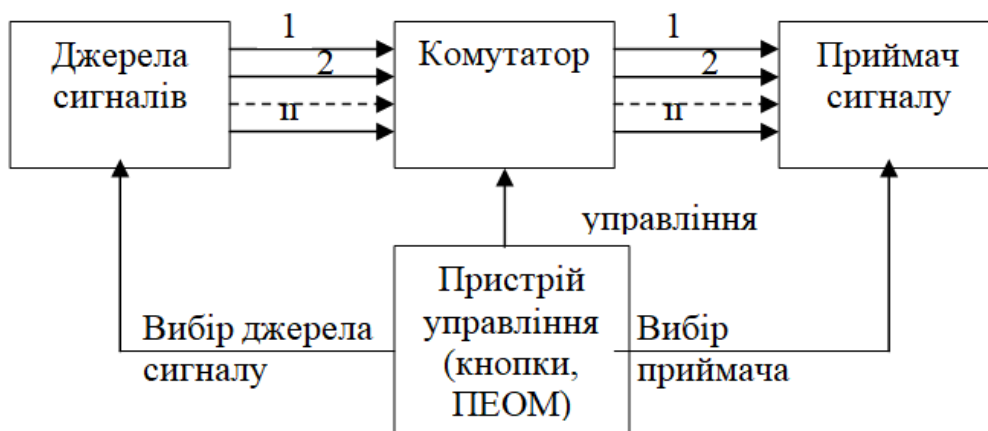


Рис.6.1. Структурна схема комутатора

Комутатор складається з певним чином з'єднаних між собою електронних ключів, виконаних на діодах чи транзисторах.

Пристрій управління механічний або цифровий, який діє по раніше встановленій програмі, або під управлінням мікропроцесорів або мікро ЕОМ.

Спрощені еквівалентні схеми ключів наступні (рис.6.2, рис.6.3):

а) замкнений ключ (рис.6.2)

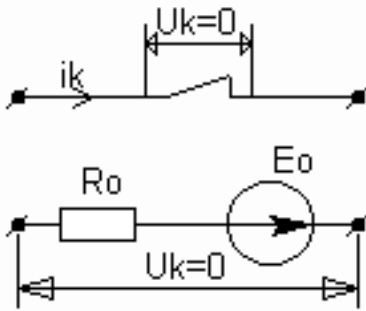


Рис. 6.2

Має деякий внутрішній опір R_0 , який не є постійним, а залежить від струму який тече через ключ. Послідовно з джерелом діє джерело залишкової напруги E_0 , яке теж залежить від струму.

б) розімкнений ключ (рис. 6.3)

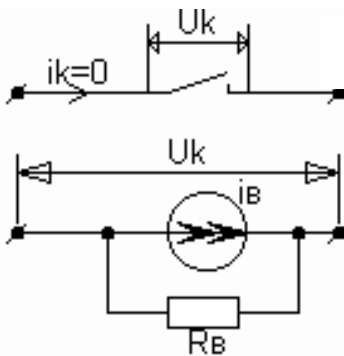


Рис. 6.3

Можна замінити опором витоку R_B та джерелом току витоку i_b , які теж можуть залежати від напруги на розімкненому ключі.

В динамічних моделях в схему включаються різні паразитні ємності та індуктивності.

Основні параметри контактних та комутаційних пристроїв наступні:

1. **Перехідний (контактний) опір**, який залежить від матеріалу контактів та стану їх поверхні. Чим більший тиск та менш окислені контакти, тим менший перехідний опір (0,01...0,03 Ом). Він залежить також від форми, чистоти обробки, температури, вологості, характеру руху контактів, значення струмів та напруг.

2. **Ємність між контактами** визначається їх перекриттям по площі, віддалю між ними, типом діелектрика, на якому закріплені контакти. Ємність ВЧ перемикачів повинна бути на більше 1...2 пФ.

3. **Опір ізоляції** між контактами визначає їх електричну міцність. Чим більший тим краще для перемикача.

4. **Потужність контактів** визначається добутком допустимого струму при замиканні контактів на максимально допустиму напругу при їх розмиканні.

5. **Час спрацювання** контактів – $10^{-1} \dots 10^{-2}$ с.

6. **Строк служби** контактів – число перемикань перемикача до виходу з ладу (від 10^4 до 10^6 раз).

6.3. Механічний перемикач

Механічний перемикач – контактний комутаційний пристрій з механічним керуванням.

До них відносяться:

Кнопка має одне стабільне положення завдяки пружинному пристрою та керування натискного типу.

Тумблер має два стабільних положення і керування перекидного типу.

Перемикач барабанний – поворотного типу з рухливими з рухомими планками-секціями, розташованими на поверхні барабану паралельно його осі.

Перемикач галетний – поворотного типу з контактами розташованими по колу на фарфорових або пластмасових дисках-галетах, розміщених перпендикулярно до осі.

Перемикач клавішний (кнопковий) – з лінійним переміщенням рухомих контактів і плоскопаралельним розміщенням контактних груп, які встановлюються безпосередньо на друкованих платах, що значно зменшує довжину з'єднувальних провідників. Має найкращі комутаційні можливості та високу надійність, оскільки перемикання контактів в кожній секції незалежне.

6.4. Реле

Реле здійснює механічне перемикання контактів в виконавчому органі завдяки перетворенню електричної енергії в механічну в керувальному органі. Є багато типів реле: електромагнітні, теплові, електронні та інші. В РЕА найбільше розповсюдження отримали електромагнітні реле, які складаються з контактних пар, якоря, обмотки, осердя та конструктивних елементів, необхідних для створення єдиної конструкції.

Класифікація електромагнітних реле.

За видом струму керування:

- Постійного струму,
- Змінного струму.

За часом спрацювання та відпускання:

- Надшвидкодійними (до 5 мс),
- Швидкодійними (5...50 мс),
- Нормальними (≈ 150 мс),
- Сповільненими (0,2...1с).

За потужністю, що комутується:

- малої – до 50 Вт,
- середньої – 50...500 Вт,
- великої – понад 500Вт.

За споживчою потужністю кола керування:

- Високочутливі – до 0,01 Вт,
- Чутливі – до 0,1 Вт,
- Нормальні – понад 0,1 Вт.

За типом та кількістю контактних груп:

- На замикання,
- На розмикання,
- На перемикання.

В залежності від наявності додаткового поля:

- Нейтральні – спрацьовують тільки при наявності струму в обмотці.
- Поляризовані – мають якір, розміщений між контактними пластинами, який при спрацюванні реле переміщується в той чи інший бік, в залежності від напрямку протікання струму в обмотці.

За конструктивним оформленням реле можуть бути:

- Електромагнітними – з якорем поворотного або втяжного типу.
- Герконовими виконаними в вигляді циліндричного каркасу, в середині якого розміщений скляний наповнений інертним газом балон з запаяними в ньому аксіальними виводами з тонкими пружними контактами із феромагнітного матеріалу.

Основними параметрами реле є: струми (напруги) спрацювання та відпускання; час спрацювання та відпускання; потужність спрацювання; строк служби; маса та габарити; експлуатаційні характеристики.

6.5. З'єднувачі

З'єднувачі (з'єднання електричне роз'ємне) – призначені для електричного з'єднання складових частин в єдиний пристрій з можливістю наступного членування відповідних частин РЕА.

Це дозволяє проводити регулювання, профілактику, заміну типових блоків РЕА. З'єднувачі складаються з двох частин: штирової (вилки) та гніздової (розетки), в ізоляційних основах яких закріплені штирі та гнізда, утворюючі контактні пари. Для надійності контакту штир або гніздо роблять підпружиненими. Гніздова частина повинна бути обов'язково з боку підведення напруги живлення. Всі конструкції мають спеціальний ключ, що унеможливорює неправильну комутацію кіл. Багато з'єднувачі мають спеціальні штирі-уловлювачі, які зменшують ймовірність поломки контактів при з'єднанні масивних блоків у шафі чи в стояку.

В залежності від використання в РЕА з'єднувачі поділяються на міжблокові та внутрішньоблокові, які з'єднують вузли всередині блоку.

Між блокові з'єднання виконуються кабелями. Фіксація з'єднання може бути різьбовою, байонетною або за допомогою клямки. З'єднання радіочастотних кабелів найчастіше всього здійснюється коаксіальними з'єднувачами з фіксаторами байонетного типу.

За родом кіл, що комутуються, поділяються на:

- Низькочастотні,
- Високочастотні,
- Низьковольтні,
- Високочастотні, спеціальні (герметичні та жаростійкі).

За типом підвідних провідників об'ємного або друкованого монтажу розрізняють пари:

- Провід-провід,
- Друкована плата-друкована плата,
- Провід- друкована плата.

Основні параметри з'єднувачів – надійність електричних контактних пар, швидкість та легкість складання, неможливість неправильного складання. Крім цього вони, як будь-які комутаційні з'єднання, повинні мати малий та стабільний перехідний опір, відповідні значення робочих напруг та струмів, частоти, високу зносостійкість, температурну стійкість, гарне спаювання з дротами та платами та інше.

6.6. Друковані плати

Основні терміни:

Друкована плата – це ізоляційна основа з друкованим монтажом або друкованою схемою.

Друкований провідник – ділянка металізованого шару, нанесеного на ізоляційну основу.

Друкований елемент – ЕРЕ, отримані нанесенням на ізоляційну основу металічного чи іншого покриття.

Друкований монтаж – система друкованих провідників, які забезпечують електричні з'єднання кола.

Друкована схема – сукупність друкованого монтажу з об'ємними дискретними ЕРЕ, установленими на платі.

Конструкція друкованих плат

Друкована плата складається з ізоляційної основи, на поверхні якої виконаний друкований монтаж. На поверхні плати розміщуються компоненти, виводи яких між собою з'єднані друкованими провідниками. В залежності від типу компонент, які використовуються (ТНТ (Throughb Hole Technology) – компоненти виводного монтажу в отвір, SMD (Surface Mount Devise) - компоненти поверхневого монтажу чи їх комбінація) висувуються різні вимоги до друкованих елементів плати.

Однак в будь-якому випадку необхідно забезпечити:

1. Раціональне розміщення елементів з урахуванням електромагнітних зв'язків та теплового режиму.
2. Мінімальну довжину електричних зв'язків.
3. Мінімальну кількість переходів з шару в шар.
4. Мінімальні паразитні зв'язки між малюнком плати та ЕРЕ.
5. По можливості рівномірне розміщення маси елементів по поверхні плати.

Всі ЕРЕ (за невеликим винятком, наприклад, електровакуумні лампи) на друкованій платі розміщуються в центрах координатної сітки. Крок координатної сітки за ГОСТ 10317-79 – 2,5; 1,25 або 0,5 мм (відповідно плати 1-го, 2-го та 3-го класів). В імпорتنій апаратурі мінімальний крок виводів може складати менше 0,3 мм. Друковані плати розроблюються з допомогою сучасних систем проектування Altium Designer, P-CAD, OrCAD, Allegro чи інших в відповідності до стандартів ГОСТ 23752-79 чи IPC-A-600F.

Основні характеристики друкованих план наступні:

- Матеріал плати – склотекстоліти вітчизняного виробництва марок СФ-1, СФ-2, ФДМЭ-1 чи імпортні марок FR1, FR2, FR3, FR4, СЕМ1, СЕМ2 та ВЧ матеріали.
- Товщина плати – 0,25...5 мм при товщинах провідників 18 мкм та 35 мкм.
- Кількість шарів - 1...24.
- Мінімальний крок виводів – 0,3 мм.
- Мінімальна ширина провідника – 0,1 мм.
- Мінімальна відстань між струмоведучими елементами – 0,1мм.
- Мінімальний розмір контактної площини – 0,4 мм.
- Мінімальний діаметр металізованого отвору - 0,2 мм.
- Поверхневий шар провідників покритий золотом з підшарком нікелю.
- Наявність захисної маски на поверхні друкованої плати.

Класифікація друкованих плат

За кількістю ізоляційних основ друковані плати поділяються на:

- Одношарові,
- Багатошарові.

Одношарові можуть бути:

- Односторонні,
- Двосторонні.

За типом отворів для провідників та міжшарових з'єднань:

- Неметалізовані.
- Металізовані.

Особливості друкованих плат НВЧ діапазону

В останні роки з масовим впровадженням апаратури GSM та GPS затребуваними становляться друковані плати, виконані із матеріалів розрахованих на роботу в діапазонах частот 1...20 ГГц (та більше). Основою

конструкцією друкованих плат НВЧ є полоскова плата (рис.6.4), матеріал якої безпосередньо приймає участь у формуванні електромагнітних коливань.

Матеріалом для виготовлення полоскових плат НВЧ діапазону є керамічні основи із НВЧ матеріалів марок ВК100-1 з односторонньою поліровкою, а для ВЧ та НЧ вузлів – керамічні шліфовані плати.

Їх товщина складає $2,00 \pm 0,05$ мм; $1,0 \pm 0,05$ мм; або $0,5 \pm 0,02$ мм. Розміри – 60 x 48 мм .

В НВЧ діапазоні частотнозадаючі елементи рідко виконують із зосереджених елементів. Це в основному елементи з розосередженими параметрами, побудовані на несиметричних полоскових лініях. В таких лініях провідникові елементи виконують не лише з'єднувальні функції, а і є частотнозадаючими елементами, які в залежності від геометрії та товщини діелектричної основи мають індуктивний, ємкісний чи активний опір.

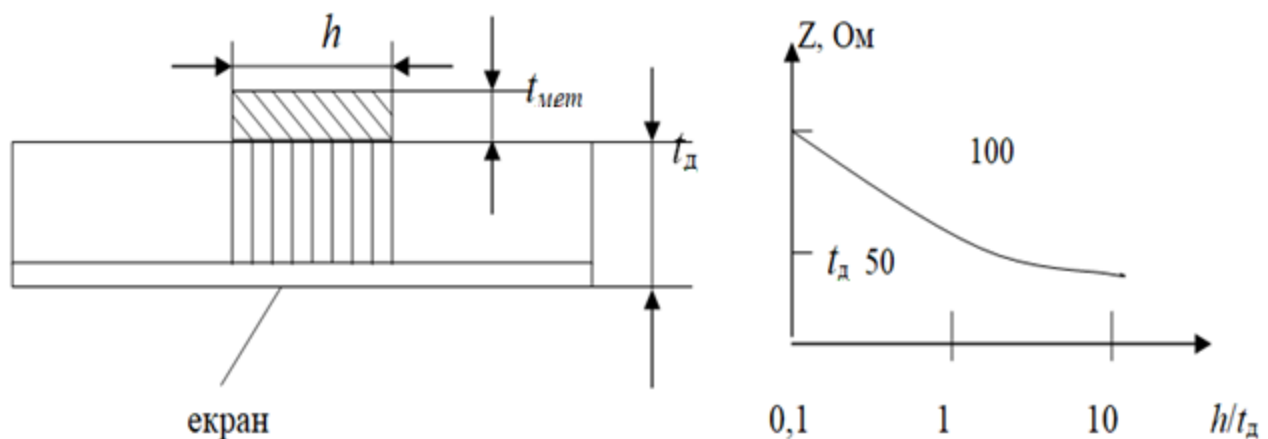


Рис.6.4. Полоскова лінія НВЧ діапазону та залежність її опору від співвідношення h/t_d

Ширина екрану повинна бути більша в 3 рази чим лінія. Енергія, що розсіюється в несиметричній лінії зосереджена в діелектриці основи між провідником та екраном, завдяки малому значенню $\epsilon_{повітря}$, яке більше ніж $\epsilon_{основи}$ матеріала основи. В таких платах зовнішній шар складається з прецизійних

провідників а другий (нижній) виконує роль землі живлення та при великих потужностях – тепловідводу.

В останні роки налагоджено виробництво багатошарових друкованих плат НВЧ діапазону з провідниками шириною 50...75 мкм при товщині провідників 20...50 мкм.

SMD – компоненти та технологія (Поверхневий монтаж)

Поверхневий монтаж – це сучасна технологія виготовлення електронних виробів на друкованих платах, а також зв'язані з нею методи конструювання друкованих плат. Технологію поверхневого монтажу називають іще ТМП (технологія монтажу на поверхню) або SMD (surface mount devise – прилад монтуємий на поверхню). Основною відмінністю її від традиційної технології монтажу деталей в отвори друкованої плати є те, що компоненти безвыводні та монтуються безпосередньо монтуються на поверхню друкованої плати. Це вимагає нової технології монтажу відмінної від традиційної.

Переваги поверхневого монтажу виявляються в наступному:

Зменшення маси та розмірів друкованих вузлів за рахунок відсутності виводів у компонентів, збільшення густини компоновки та трасування, зменшення розмірів елементної бази та кроку виводів.

Покращення електричних характеристик завдяки зменшенню шляхів проходження струму, паразитних ємностей та індуктивностей.

Покращується ремонтоздатність завдяки тому, що спрощується очистка контактних площин від припою та відпадає необхідність в прогріві припою в середині металізованого отвору. Однак це вимагає спеціалізованого інструменту та більш жорсткого витримування режимів пайки.

Деталі можна розміщувати з обох сторін плати.

Менша кількість отворів в платі (лише перехідні з шару в шар).

Підвищення технологічності в зв'язку з можливістю повної автоматизації процесу збірки.

Значне зниження собівартості серійних виробів.

Недолік поверхневого монтажу:

Підвищені вимоги до точності встановлення температури пайки. Необхідність чітко витримувати час пайки, тому що нагрівається не лише вивід а весь ЕРЕ.

Високі початкові затрати, пов'язані з складністю технологічного обладнання, його настройки.

Необхідність спеціального обладнання навіть при одиничному виробництві

Високі вимоги до якості та умов збереження технологічних матеріалів.

SMD – компоненти

Всі SMD – компоненти (КМП – компонент, що монтується на поверхню) можна розділити на:

1. **Двоконтактні** (резистори, конденсатори, діоди) – прямокутні компоненти розмірами: резистори та конденсатори - від 0,4x0,2 мм до 4,6x3,0 мм, електролітичні танталові конденсатори - від 3,2x1,6x1,6 мм до 7,3x4,3x4,1 мм, діоди SOD – 1,7x1,25x0,95 мм.

2. **Трьохконтактні** – транзистори з коротким виводами SOT - 3x1,75x1,75 мм, потужні транзистори зі зменшеними розмірами DRAK.

3. **Чотирьох та більше виводні:**

- дві лінії по бокам,
- чотири лінії по бокам
- масив виводів (крок між виводами, наприклад, може бути 1,27 або 0,8 мм).

Конструкції пасивних елементів ми розглядали в першій лекції.

SMD – технологія

Типова послідовність технологічних операцій має наступний вигляд:

1. **Нанесення паяльної пасти** на контактні площини (дозування в одиничному та мілкосерійному виробництві, трафаретний друк – в серійному та масовому). Паяльна паста – це суміш порошкоподібного припою з

органічними наповнювачами, включаючи флюс. Крім забезпечення пайки припоєм та підготовки поверхні до паяння паяльна паста служить для фіксування ЕРЕ до пайки за рахунок своїх клеючих властивостей.

2. Установка компонентів.

3. Групова пайка методом оплавлення пасти в печі. Використовується метод конвекції (нагрів гарячим потоком повітря), інфрачервоний нагрів. При одиночному виробництві та ремонті використовують індивідуальну пайку потоком нагрітого повітря чи азоту.

Типовий набір обладнання для індивідуальної пайки наступний:

1. Станція пайки гарячим повітрям призначена для:

- зняття мікросхем з контролюємим зусиллям,
- безконтактного конвекційного нагріву,
- захисту тепловідбивачами навколишніх ЕРЕ,
- відсмоктування припою вакуумно-компресорною системою,
- пайки змонтованих ЕРЕ.

2. Ручний дозатор для дозованого нанесення клею та паяльної пасти.

Для серійного виробництва:

- Автомат, напівавтомат чи ручний пристрій для трафаретного нанесення клею та пасти,
- Маніпулятор, напівавтомат чи автомат для установки компонентів (ЕРЕ знаходяться в спеціальних контейнерах чи на стрічках),
- Конвекційна піч звичайного чи конвеєрного типу для оплавлення припою та полімеризації клею.

Вся сучасна техніка (ПЕОМ, стільникові телефони, пристрої навігації фото та відео камери та інше) виготовляються за SMD – технологією.

6.7. Контрольні запитання

1. Дайте класифікацію контактних пристроїв.
2. Які комутаційні пристрої Ви знаєте?

3. Дайте характеристику основних параметрів контактних та комутаційних пристроїв.
4. Чим відрізняються механічні комутаційні пристрої від електричних?
5. Які типи реле Ви знаєте?
6. Наведіть типи та особливості з'єднувачів.
7. Назвіть особливості плат для поверхневого монтажу.
8. В чому переваги та недоліки поверхневого монтажу?
9. Які вимоги висуваються до багатошарових плат?
10. В чому полягають особливості плат НВЧ діапазону?

Список літератури

1. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник / За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники: Учебник для вузов / В.В.Пасынков, В.С.Сорокин – СПб: Из-во «Лань», 2011. – 368 с.
3. Акимов Н.Н. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник / Н.Н.Акимов, Е.П.Вашук, В.А.Прохоренко, Ю.П.Ходоренко. Мн.: Беларусь, 2005. – 591 с.
4. Грачев А.А. Поверхностный монтаж при конструировании и производстве электронной аппаратуры / А.А.Грачев, А.А.Мельник, Р.Г.Панов – К.: UCLAUT, 2003. – 428 с.
5. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. Учебное пособие для вузов / И.П.Степаненко – М.: Лаб. базовых знаний. – 2001. – 488 с.
6. Партала О.Н. Радиоконпоненты и материалы: справочник / О.Н.Партала – К.: Радиоаматор, – М.: КУБК-а, 1998. – 720 с.
7. Троцишин І.В. Фізичні основи електронних приладів: Навч. посібник / І.В.Троцишин – Хмельницький: ХДУ. – 2004. – 488 с.
8. Петров К.С. Радиоматериалы, радиоконпоненты и электроника: Учебное пособие для вузов / К.С.Петров – СПб: Питер, 2003. – 512 с.
9. Ястребов А.С. Материаловедение, электрорадиоматериалы и радиоконпоненты: [учебник] / А.С.Ястребов, М.Ю.Волокобинский, А.С.Сотенко – М.: Академия, 2011. – 154 с.
10. Резисторы: справочник / ред. И. И. Четвертков, В. М. Терехов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 527 с.
11. Конденсаторы: Справочник / Под ред. И.И.Четверткова, М.Н.Дьяконова. – М.: Радио и связь, 1993. – 392 с.

12. Кравченко Ю. С. Матеріали електронної техніки: питання та задачі. навч. посібник / Ю.С.Кравченко, Л.В.Крилик, Є.О.Смольков – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 71 с.
13. Журавльова Л.В. Електроматеріалознавство: [підруч.] / Л.В.Журавльова, В.М.Бондар. – К.: Грамота, 2006. – 312 с.
14. Сулима В.С. Електрорадіоматеріали: навчальний посібник. / В.С.Сулима. Укр. інж.-пед. акад. – Харків: УПА, 2010. – 128 с.
15. Швець Є.Я. Матеріали і компоненти електроніки: навч. посібник / Є.Я.Швець, І.Ф.Червоний, Ю.В.Головко – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 278 с.
16. Василенко І.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посібник. / І.І.Василенко, В.В.Широков, Ю.І.Василенко. – Львів: «Магнолія-2006», 2009. – 242 с.