

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**Толюпа С.В., Дружинін В.А., Бурячок В.Л.,
Наконечний В.С., Лазаренко С.В.**

**ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛИ.
ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ
ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ**



НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

КИЇВ – 2015

Рецензенти:

Самохвалов Ю.Я. доктор технічних наук, професор, професор кафедри "Бойового застосування математичного та програмного забезпечення АСУ" Державного університету телекомунікацій.

Оксіюк О.Г. завідувач кафедрою Кібернетичної безпеки та захисту інформації факультету Інформаційних технологій Національного університету ім. Т.Г. Шевченка.

Рекомендовано Вченою радою ННІЗІ ДУТ в якості навчального посібника для студентів за напрямками підготовки "Телекомунікації", "Радіотехніка", "Інформаційна безпека" та "Комп'ютерні науки".

Протокол № 7 від 27.02.2015 р.

Толюпа С.В., Дружинін В.А., Бурячок В.Л., Наконечний В.С., Лазаренко С.В., Електроматеріали. Пасивні елементи засобів радіозв'язку та захисту інформації. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2015. – 193 с.

Це видання є навчальним посібником написаний у відповідності до курсу "Хімія та електроматеріали", "Основи схемотехніки", "Компонентна база засобів технічного захисту інформації". Матеріал, що міститься у ньому дасть можливість ознайомити студентів з основними властивостями електрорадіоматеріалів, з областю їх застосування в пасивних елементах у сучасних електронних засобах телекомунікаційних систем та мереж, засобів радіозв'язку та захисту інформації.

Навчальний посібник призначений для використання в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій, а також може застосовуватися в інших вищих та середніх спеціальних навчальних закладах за фахом телекомунікацій, радіозв'язку та захисту інформації.

ВСТУП

Написання даного посібника виникло у зв'язку з необхідністю вивчення властивостей електроматеріалів, які застосовуються в сучасній електронній апаратурі.

Вона вміщує три розділи:

- хімія;
- електротехнічні матеріали;
- радіодеталі.

Матеріал даної навчальної дисципліни необхідний для розуміння проблем сучасної радіоелектроніки, яка складається з напівпровідникової, молекулярної, квантової та вакуумної електроніки.

Напівпровідникова електроніка використовує властивості кристалічних ґрат речовин, а також переміщення та розподіл зарядів під впливом електричного поля.

Молекулярна електроніка розглядає конструкцію й виготовлення інтегральних мікросхем. При їх, виготовленні в кристал напівпровідника вводять електроактивні домішки, за допомогою яких отримують ділянки, які виконують функції транзисторів, діодів, конденсаторів та резисторів. При цьому треба строго дозувати кількість домішок та вводити їх в точно визначені місця кристалічних ґрат напівпровідника.

Квантова електроніка застосовує явища, які проходять у середині атомів та молекул речовини. Квантові генератори випромінюють електромагнітну енергію надвисоких частот з $\lambda \approx 1 \text{ мкм}$, тобто поблизу інфрачервоної області спектра. Такі генератори утворюють практично паралельні світлові пучки високої яскравості, що дозволяє концентрувати величезну енергію в невеликих об'ємах.

Вакуумна електроніка, заснована на використанні руху вільних електронів і іонів у вакуумі або в розряджених газах під впливом електричного та магнітного полів.

Розвиток усіх галузей застосування радіоелектроніки тісно пов'язаний з розробкою та застосуванням нових сучасних електроматеріалів, підвищенням рівня технології їх виготовлення, фізичних та хімічних властивостей.

Для зрозуміння ролі електроматеріалів у радіоелектроніці, як приклад, розглянемо умови, за яких можлива передача електричних сигналів по дротовій лінії зв'язку.

Це можливо, коли вона має високу провідність, а провідники – добре ізольовані один від одного та від землі.

Ці вимоги можуть бути виконані завдяки застосуванню відповідних електроматеріалів. Якість та ефективність роботи системи передачі сигналів буде залежати від якості тих матеріалів та деталей, які застосовуються.

Особливо велике значення мають електроматеріали, із яких створюється елементна база радіоелектронної апаратури, до якої входять:

інтегральні мікросхеми (ІМС), напівпровідникові прилади, електронні лампи, знакові індикатори, резистори, конденсатори, котушки індуктивності, комутаційні прилади, магнітні та п'єзоелектронні елементи і т. ін.

До матеріалів, із яких вона виготовляється, належать:

- провідники;
- напівпровідники;
- діелектрики;
- п'єзоелектрики;
- магнітні матеріали.

Провідники – це металеві матеріали з великою електропровідністю, яка обумовлена наявністю великої кількості вільних електронів. Застосовуються для електричних кабелів та проводів, виводів електронних елементів.

Напівпровідники – це матеріали, які мають меншу електропровідність, оскільки у них значно менша кількість вільних електронів. Застосовуються для виготовлення ІМС, транзисторів, тощо.

Діелектрики – це матеріали, які мають незначну електропровідність, оскільки кількість вільних електронів дуже мала. Застосовують для електричної ізоляції проводів, в конденсаторах і т. ін.

П'єзоелектрики – це діелектрики, які мають особливу властивість: п'єзоэффект. Їх застосовують у стабілізаторах частоти, коливальних контурах, фільтрах.

Магнітні матеріали – це матеріали, які мають магнітні властивості. Застосовують в осердях котушок індуктивностей, трансформаторів, дроселів, елементів пам'яті різних типів.

Як приклад застосування електроматеріалів розглянемо гібридну ІМС. Вона виготовляється на діелектричній підкладці шляхом нанесення на її поверхню провідникових, напівпровідникових та діелектричних плівок завтовшки не більше 1мкм. Усі матеріали повинні мати високу ступінь хімічної чистоти та сталості властивостей. Поверхня підкладки шліфується за 14 класом чистоти.

В сучасній обчислювальній техніці для підвищення швидкодії та інформаційної ємності застосовують пристрої на магнітних плівках. Вони виготовляють із плівок пермалю, які наносять на основу з берилієвої бронзи. Такі пристрої зберігають електричну інформацію після виключення живлення (не потребують електричної енергії у режимі зберігання).

Магнітні плівки мають малий час переключення – 10...20 нс, що забезпечує високу швидкодію.

Застосовуються також пристрої пам'яті на циліндричних магнітних доменах. Вони мають високу швидкодію, максимальну частоту до 1 мГц при щільності упаковки на кристалі до 10^6 біт/см².

РОЗДІЛ I

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОРАДІОМАТЕРІАЛІВ

В розділі «Фізичні основи побудови електрорадіоматеріалів» розглядаються основи хімічних знань: будова атомів та молекул речовини, їх хімічний склад, структури та властивості речовин, процеси їх, отримання та перетворення, хімічні зв'язки, електричні властивості молекул, залежність властивостей речовини від структури молекул, періодична система елементів і т. ін.

1. Фізико-хімічні властивості електроматеріалів електроніки

1.1. Поняття про будову атома та молекули

Будь-яка речовина складається з атомів і молекул. Згідно з планетарною моделлю атом складається з масивного ядра з позитивних зарядів і електронів, які обертаються навколо нього. Негативний заряд електронів дорівнює позитивному заряду ядра, тобто **атом в цілому нейтральний**.

В ядрі атома зосереджена майже уся його маса. Розмір атома приблизно дорівнює 10^{-10} см, ядра – 10^{-13} см. Тобто ядро приблизно в 10^5 разів менше самого атома.

Розглянемо найпростіший атом – атом гідрогену H . Він має один електрон, який обертається по колу навколо позитивно зарядженого ядра. Позитивно заряджене ядро атома гідрогену H з масою $1,67 \times 10^{-24}$ г називається **протоном** (рис. 1.1).

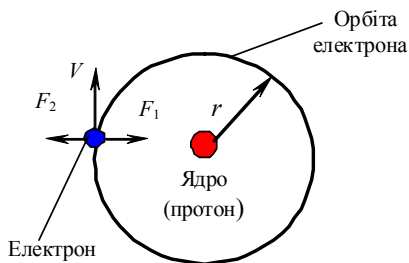


Рис. 1.1. Модель атома

Протони входять до ядер атомів різних елементів. Крім того в ядрі більшості елементів знаходяться **нейтрони**, які мають масу протона, але не мають заряду. На електрон при його русі діє сила тяжіння до ядра F_1 та відцентрова сила F_2 , які визначаються за формулами:

$$F_1 = \frac{q^2}{r^2}; F_2 = \frac{mV^2}{r},$$

де q – заряд електрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

r – радіус орбіти електрона;

m – маса електрона;

V – окружна швидкість електрона.

Умова рівноважного нейтрального стану атома відповідає рівнянню:

$$F_1 = F_2.$$

Тоді:

$$\frac{q^2}{r^2} = \frac{mV^2}{r} \quad \text{або} \quad \frac{q^2}{r} = mV^2.$$

Гідроген H відноситься до хімічних елементів.

Хімічний елемент – це вид атомів з однаковим позитивним зарядом ядра. Відомо 109 хімічних елементів, які умовно розподіляються на метали та неметали.

Атом – це найменша частка хімічного елемента, яка входить до складу молекул простих і складних речовин. Хімічні властивості атома визначаються його складом.

Молекула – це найменша частина даної речовини, яка має її хімічні властивості.

Молекули **простих речовин** складаються з атомів одного і того ж хімічного елемента. Наприклад, молекула нітрогену H_2 складається з двох атомів елемента нітрогену.

Молекули **складних речовин** (хімічних сполук) складаються з атомів різних елементів. Наприклад, молекула води складається з двох атомів гідрогену H та одного атома кисню O . Їх хімічна формула – H_2O .

Явища, при яких одні речовини перетворюються в інші з різним відносно перших складом та властивостями, називаються **хімічними**. Наприклад, ржавіння заліза, горіння, отримання металів із руд і т. ін.

Явища, при яких змінюється форма або фізичний стан речовини, називаються **фізичними**. При фізичних явищах склад речовини не змінюється, тобто не виникають нові речовини. Наприклад, згинання дроту, ковка заліза, подрібнення солі, плавлення металів, перетворення води у пар і т. ін.

Часто хімічні явища супроводжуються фізичними. Наприклад, при згорянні вугілля виділяється тепло, в акумуляторі під дією хімічних процесів виникає електричний струм.

1.2. Валентні електрони. Хімічні зв'язки атомів

Сталий стан простих речовин забезпечується поєднанням їх атомів в молекули. Це відбувається з наближенням атомів на відстань, близьку до їх радіусів. Таким чином одна з умов виникнення хімічного зв'язку – це **ущільнення** речовини.

При цьому з'являються електричні сили взаємного притягання або відштовхування атомів у залежності від властивостей електронів на зовнішніх рівнях атомів.

Таким чином, хімічний зв'язок атомів обумовлений електричними та магнітними силами взаємодії електронів та ядер.

Електрони, які приймають участь в утворенні хімічних зв'язків називаються **валентними**. Вони знаходяться в незаповнених електронних шарах атома і можуть бути не тільки електронами першого зовнішнього шару, але і другого, і третього.

Валентністю називається властивість атома даного елемента приєднувати визначену кількість атомів інших елементів.

Усі елементи за валентністю можна розподілити на три групи:

- із постійною валентністю: *H, Na, K* (одновалентні), *Ca, Ba, Ra* (двовалентні), *Al* (тривалентний);

- із змінною валентністю: карбон у складі *CO* є двовалентний, а в сполуці *CO₂* – чотиривалентний;

- в яких відсутня валентність: інертні гази – гелій *He*, неон *Ne*, аргон *Ar*, криптон *Kr*, ксенон *Xe*, радон *Rn*.

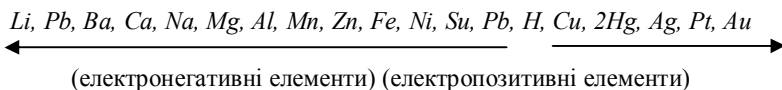
За характером з'єднань атомів між собою розрізняють такі основні види хімічного зв'язку: ковалентний, полярний, іонний, донорно – акцепторний, металевий, міжмолекулярний.

Ковалентний зв'язок – характеризується об'єднаннями електронних шарів однойменних атомів. Атоми речовин із ковалентним зв'язком об'єднуються між собою валентними електронами спільних шарів. Отримані речовини є сталими сполуками.

Іонний зв'язок – характеризується притяганням позитивних та негативних іонів. Це зв'язок металів із неметалами. В цих сполуках валентні електрони атомів металу переходять до атомів металу й зв'язок між ними утворюється за рахунок електростатичної взаємодії іонів позитивно та негативно заряджених, що утворилися.

Металевий зв'язок характеризується взаємодією позитивних іонів кристалічних ґратів металу та вільних електронів. Цей зв'язок пояснює наявність високої електропровідності металів. Атоми металу легко віддають валентні електрони, перетворюючись у позитивно заряджені іони. Легкість виходу електронів з атомів визначає хімічну активність металів.

В залежності від хімічної активності у воді метали розрізняються між собою та розміщуються в **ряді напруг** – від літію *Li* до золота *Au*.



Міжмолекулярний зв'язок характеризується наявністю сили притягання молекул речовини між собою. Цей зв'язок має визначене значення для діелектричних, механічних та інших властивостей. Особливо міцні міжмолекулярні зв'язки у полімерів: капрону, нейлону та інших.

Донорно - акцепторний зв'язок характеризується тим, що атоми деяких елементів (домішкових) віддають по одному електрону в кристалічні грати основного елемента (такі атоми зуться **донорними**) або захоплюють один електрон з основного елемента (такі атоми називаються **акцепторними**).

Донорні атоми постачають енергію в зону вільних рівнів і створюють у речовині електронну електропровідність – типу *n* (*negative*).

Акцепторні атоми утворюють вільні рівні енергії і діркову електропровідність – типу *p* (*positive*).

Домішки створюють умови напівпровідності в деяких речовинах (в елементах 4-ї групи таблиці Менделєєва). Наприклад, у **германію** *Ge* (із донорною домішкою миш'яку *As* і акцепторною – індію *In*), а також, у **кремнію** *Si* (із донорною домішкою фосфору *P* та акцепторною домішкою бромом *Br* або алюмінію *Al*).

1.3. Енергетичні рівні електронів атомів хімічних елементів

Властивості хімічних елементів багато в чому пояснюються розміщенням електронів в атомах. В будь-якому атомі існування декількох електронних орбіт (електронних шарів) із різними відстанями від ядра. Ці електронні шари інакше зуться **енергетичними рівнями**. Вони характеризують запас енергії електронів. Найменшу енергію мають електрони, які знаходяться поблизу ядра (перший енергетичний рівень). Електрони подальших рівнів будуть мати більші запаси енергії. Звичайно, електрони зовнішнього рівня матимуть найбільший запас енергії і тому вони менше пов'язані з ядром (рис. 1.2).

При прикладанні до атома енергії електрони різних шарів (рівнів) можуть переходити на більш віддалені від ядра енергетичні рівні. Електрони верхнього рівня одних атомів можуть переходити до верхніх рівнів інших атомів. В цих випадках атом іонізується. При відриві електрона атом стає позитивним іоном, після приєднання – негативним іоном.

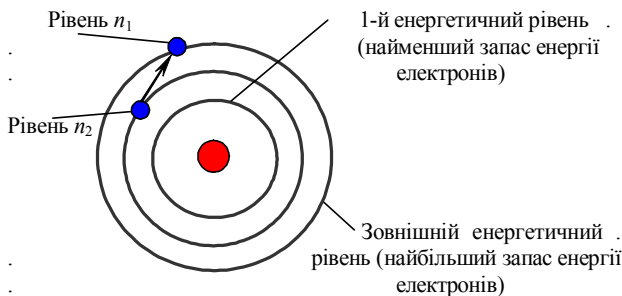


Рис. 1.2. Енергетичні рівні атома

Енергія електрона W складається із суми потенційної U та кінетичної T енергії:

$$W = U + T,$$

де

$$U = -\frac{q^2}{r}, \quad T = \frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2}{r} \quad (\text{за умови урівноваженості заряду}). \quad (1.1)$$

В атомі можливо існування електронних орбіт із довжиною кола, на якій укладається ціла кількість електронних хвиль.

Це відповідає співвідношенню:

$$mVr = \frac{nh}{2\pi},$$

де n – ціле число (номер рівняння) 1, 2, 3, ... ;

h – стала Планка, яка дорівнює $6,624 \cdot 10^{-27}$ ерг/с.

Тоді:

$$W = -\frac{1}{2} \frac{q^2}{r} = -\frac{2m\pi^2 q^4}{n^2 h^2}, \quad (1.2)$$

де знак " – " показує, що електрони віддаляються від ядра.

Переведення електрона на більш віддалену орбіту пов'язано з витратою енергії.

При переході електрона з орбіти n_2 на орбіту n_1 його енергія зміниться на величин:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{2m\pi^2 q^4}{h^2} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right).$$

Використовуючи рівняння (1.1) та (1.2), знайдемо радіус орбіти r та окружну швидкість V електрона при $n=1$ (в атомі гідрогену):

$$r = \frac{h^2}{2\pi^2 m q^2} = 0,528 \cdot 10^{-8} \text{ см,}$$

$$V = \frac{2\pi q^2}{h} = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

При поверненні електрона на колишню орбіту атом видає енергію у виді фотона, яка знаходиться з рівняння:

$$h\nu = W_1 - W_2,$$

де ν – частота коливань фотона,

W_1, W_2 – значення енергії електрона на орбіті $n=1$ та орбіті $n=2$ відповідно.

Згідно квантової механіки електрону з $V=2 \cdot 10^8$ м/см та $m=9,11 \cdot 10^{-28}$ г, відповідає довжина хвилі $\lambda = 3,5 \cdot 10^{-8}$ см. Тобто з хвилевої точки зору електрони можна уявити як хмару, яка складається з цілої кількості хвиль.

1.4. Періодичний закон Менделєєва

Це – таблиця в якій всі хімічні елементи розміщені у відповідному порядку.

Періодична таблиця вміщує 109 елементів, які розміщуються в 7 періодах та 9 групах (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Період	Група елементів (валентність)								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1	H ¹								He ²
2	Li ³	Be ⁴						F ⁹	Ne ¹⁰
3	Na ¹¹							Cl ¹⁷	Ar ¹⁸
7	Fr ⁸⁷								

Властивості простих елементів та їх сполук знаходяться у періодичній залежності від значення заряду їх атомів.

Хімічні елементи цієї таблиці позначені хімічними знаками *H, O, Al, Fe* і т. ін.

Кожний період (крім першого) починається з лужного металу, а закінчується інертним газом.

Номер групи пов'язаний з валентністю елемента (вища валентність дорівнює номеру групи). Інертні гази не мають валентності.

Кількість енергетичних рівнів (електронних шарів) атома дорівнює номеру періоду, в якому знаходиться елемент в таблиці: у атомів елементів 1-го періоду – один рівень, у 2-го періоду – два і т.д.

Кількість електронів **на зовнішньому енергетичному рівні** у атомів елементів перших трьох періодів дорівнює номеру групи. Але у нульовій групі гелій *He* має два електрони, інші атоми інертних газів – 8.

Найбільша кількість електронів на будь-якому **енергетичному рівні** визначається подвоєним квадратом номера цього рівня *n* (від ядра) (рис. 1.3) $N=2n^2$.

У відповідності до цього на першому енергетичному рівні може знаходитись не більше 2-х електронів, на другому – не більше 8, на третьому – не більше 18, на четвертому – не більше 32.

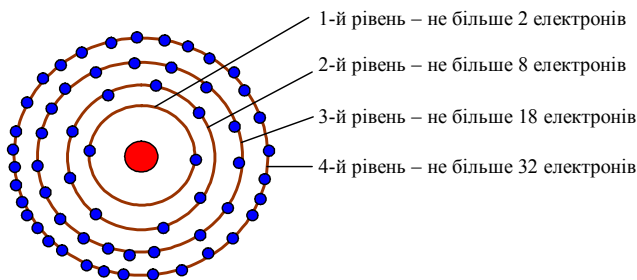


Рис. 1.3. Розподілення електронів по енергетичних рівнях атома

Як приклад розміщення елементів у таблиці розглянемо будову атомів елементів 3 періоду (рис. 1.4).

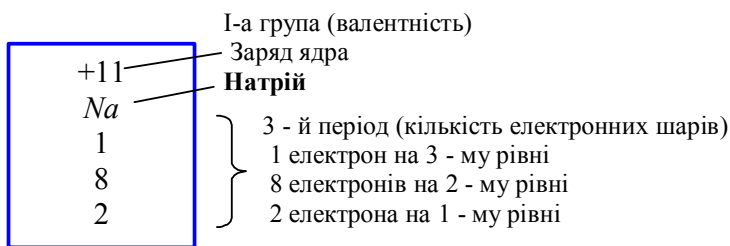


Рис. 1.4. Будова атому *Na* з 3 - го періоду таблиці Менделєєва

Перший елемент цього періоду – натрій *Na*, його номер за порядком – 11, тобто позитивний заряд ядра дорівнює +11, кількість електронів дорівнює також 11. Натрій *Na* знаходиться у 3 періоді, тому його електрони розміщуються на 3-х рівнях. На зовнішньому рівні обертається один електрон, тому елемент знаходиться в першій групі і є одновалентним.

Будову атома натрію Na можна зобразити схемою – (+11), 2, 8, 1, тобто: +11 – заряд ядра, три енергетичні рівні (1-й два електрони, 2-й – вісім, 3-й – один).

В атомах наступних елементів 3-го періоду (від Na до Ar) іде поступове заповнення електронами зовнішнього рівня до 8-го і відповідно зростає валентність.

Будову останнього елемента 3-го періоду аргону Ar можна записати так: (+18) 2, 8, 8.

Більше ніж 8-м електронів на зовнішньому енергетичному рівні розміститись не можуть. Тому, починаючи з елемента калію K додається ще один рівень. Тоді будову атома калію можна записати так: (+19) 2, 8, 8, 1.

1.5. Енергетичні спектри

Як було зазначено вище, ізольований атом характеризується набором енергетичних рівнів (дискретним **енергетичним спектром**).

Речовина, яка є сукупністю атомів, має енергетичний спектр атомів (набір дискретних рівнів) у виді **енергетичних зон** (неперервні енергетичні спектри).

Виникнення енергетичних зон можна пояснити таким чином. Нехай деяка кількість N_A однакових атомів входить до кристалічних ґрат. З наближенням один до одного атоми починають взаємодіяти, їх енергетичний стан змінюється, виникає **розщеплення рівнів в зоні**. Замість одного рівня у окремого атома з'являється N_A рівнів у всій сукупності атомів.

При розщепленні рівнів виникають три енергетичні зони – **валентна зона** (ВЗ), **зона провідності** (ЗП) та **заборонена зона** (ЗЗ). Зони відрізняються значенням рівнів енергії. В деяких випадках зони можуть перекриватися.

Валентна зона – це верхня енергетична зона, в якій знаходяться валентні електрони.

Зона провідності – є зоною дозволених значень енергії електронів провідності.

Якщо між валентною зоною та зоною провідності існує енергетичний зазор, то він відповідає **зоні заборонених** значень енергії. В цій зоні не існує електронів.

Відповідно із шириною забороненої зони ΔW_z та пов'язаною з нею електропровідністю, речовини розподіляють на (рис. 1.5):

- провідники, для яких $\Delta W_{z3}=0$ eВ;
- напівпровідники з $\Delta W_{z3}<3$ eВ;
- діелектрики з $\Delta W_{z3}>3$ eВ.

Велика електропровідність провідників обумовлена наявністю великої кількості вільних (у межах кристала) електронів. Згідно із зонною теорією, ці

електрони знаходяться в зоні провідності, де вони можуть займати дискретні, але дуже близько розміщені рівні таким чином, що додавання електрону незначної енергії приведе до його переходу в межах цієї зони на більш високі рівні (рис. 1.6а).

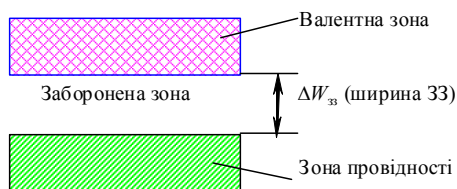


Рис. 1.5. Енергетичні зони речовини

переходить у зону провідності, де поводить себе так, як і у металах. На місці електрона, який вийшов із ВЗ, виникає дірка. Рух дірки пов'язаний з переходом електронів на вакантні зв'язки, тобто на дозволені рівні у валентній зоні.

В напівпровідниках і діелектриках (ізоляторах) на розрив зв'язку електронів з атомами необхідно витратити досить велику енергію, що відповідає наявності забороненої зони завтовшки ΔW_z (рис.1.6б).

При розриві зв'язку електрон стає вільним, тобто

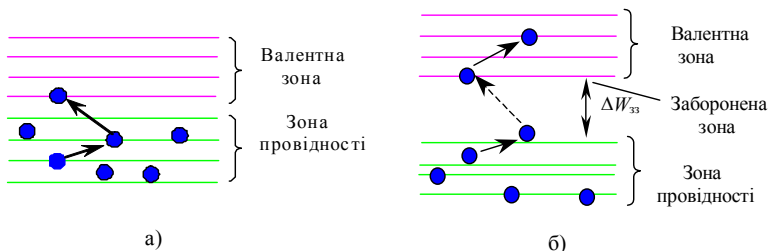


Рис. 1.6. Енергетичні рівні:

а) провідника; б) напівпровідника та діелектрика

При отриманні енергії зовні електрон переходить із нижнього рівня на вищий, а дірка з високого рівня на низький. Тобто вісь енергії для дірок спрямована донизу.

1.6. Агрегатні стани речовини

Речовини за в'язкістю й упорядкованістю їх, іонів або молекул можуть мати три агрегатних стани:

- твердий;
- рідинний;
- газоподібний.

Твердий стан характеризується трьома ознаками:

- пружністю, або здатністю миттєво повертати попередню форму після зняття зовнішніх сил;
- кристалічною структурою;
- стрибкоподібною зміною характеристик при плавленні.

При повільному розплавленні і спеціальному вирощуванні отримують **монокристали**.

При середній швидкості охолодження – **полікристали**.

При швидкому охолодженні – речовини з **аморфною структурою**.

За природою сил хімічного зв'язку кристалічні тверді речовини розподіляють на 4-типи:

- метали та сплави (відрізняються високою електропровідністю, металічним блиском, ковкістю);
- іонні кристали (*NaCl*, *KCl*) – електронейтральні, прозорі, їх електропровідність зростає з температурою);
- валентні кристали (алмаз, германій, карборунд та інші) – в їх кристалічних ґратах кількість електронів, які оточують кожен атом ґратів, дорівнює його валентності;
- молекулярні кристали (йод, нарядін – це слабо зв'язані агрегати молекул із низькою температурою плавлення).

Рідинний стан характеризується визначеним об'ємом і не має своєї форми. Молекули знаходяться на близькій відстані, на якій сили взаємодії й притягання молекул значно більші ніж у газоподібному стані. Цим обумовлена наявність сил поверхневого натягання рідини, а також мала їх стискаємість.

Крім звичайних рідин з ізотропною структурою, зустрічаються анізотропні рідини, або рідинні кристали, які характеризуються деякою орієнтованістю молекул.

Газоподібний стан молекул найбільш неупорядкований та структурно не сталий. Гази не мають постійного об'єму, здатні розширюватись та займати увесь об'єм, в якому вони знаходяться. З газоподібних станів найбільш розповсюдженим є **плазмовий стан**.

Плазма – це іонізований газ з вільних електронів і іонів, які мають інтенсивний тепловий рух. Особливістю плазми є те, що на неї впливає магнітне поле: змінюється щільність, напрям руху.

Існує два роди плазми:

- **ізотермічна** – виникає при високій температурі, достатньої для потужної термічної іонізації;
- **газорозрядна**, яка утворюється при електричних розрядах у газах.

Ізотермічна плазма може існувати довго. Вона існує в зірках, має температуру до 1 млн. градусів, відіграє велику роль у космічних процесах. Вона сильно розряджена, прозора.

Газорозрядна плазма є сталою тільки при наявності в газі електричного поля, яке прискорює електрони. Вона характеризується великою швидкістю електронів і високою температурою.

Характерною властивістю плазми є виникнення у неї електромагнітних коливань у широкому діапазоні частот. Вона має високу електропровідність.

У природних умовах плазма виникає при спалаху блискавки, у полярних сійвах, у розряджених шарах іоносфери.

Контрольні питання для самоперевірки

1. Поясніть модель будови атома речовини.
2. В чому заключається умова рівноважного стану атома?
3. Що таке хімічний елемент, атом, молекула?
4. В чому різниця між хімічними та фізичними явищами речовин?
5. Як розподіляються елементи в залежності від валентності?
6. Які існують основні види хімічного зв'язку?
7. Який принцип розміщення електронів атому по енергетичних рівнях?
8. Як розподіляються речовини в залежності від розміщення енергетичних зон?
9. Дайте характеристику агрегатного стану речовин.

РОЗДІЛ II

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

В розділі «Електротехнічні матеріали» даються поняття про фізико-хімічні, електричні, механічні властивості провідників, напівпровідників, діелектриків і магнітних матеріалів та їх застосування. Під електротехнічними матеріалами прийнято вважати матеріали, які володіють особливими властивостями по відношенню до електричного, магнітного та електромагнітного поля. По поведінці в електричному полі всі речовини діляться на провідники, напівпровідники та діелектрики. Формальними признаками такого розподілу являється величина питомого опору, знак температурного коефіцієнта питомого опору та тип електропровідності. Границі значень цих характеристик (умовно) для різних груп речовин приведені в таблиці.

Речовина	Питомий опір, Ом·м	Знак температурного коефіцієнта питомого опору	Електропровідність
Провідники	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁵	позитивний	електронна
Напівпровідники	10 ⁻⁶ – 10 ⁸	від'ємний	електронна
Діелектрики	більше 10 ⁸	від'ємний	іонна та електронна

В зв'язку зі складними умовами експлуатації апаратури до матеріалів, із яких виготовляють радіодеталі та елементи з'єднання пред'являються дуже жорсткі вимоги. Тому раціональне використання великої кількості матеріалів та деталей в електричних та радіоелектронних пристроях повинно базуватися на ясному розумінні процесів, які протікають в електроматеріалах при дії на них електромагнітних полів. Тому перший розділ підручника присвячений розгляду основних характеристик матеріалів, які використовуються при виготовленні та ремонті радіоапаратури.

2.1. Провідникові матеріали

2.1.1. Особливості провідникових матеріалів та їх класифікація

До **провідникових матеріалів**, в основному, належать метали та їх сплави. Їх загальна властивість – висока провідність завдяки наявності в кристалічних ґратах великої кількості вільних електронів, які розташовані в

зоні провідності і можуть під дією незначної зовнішньої енергії вільно переміщуватись в матеріалі.

Основними характеристиками провідникових матеріалів являються:

- питома провідність або питомий опір;
- температурний коефіцієнт питомого опору;
- питома теплопровідність;
- контактна різниця потенціалів і термо – ЕРС;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення;
- механічні характеристики.

Питомий опір в Ом·мм²/м для провідника з постійним поперечним перерізом можна визначити за формулою:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L},$$

де R – опір зразка, Ом;

S – площа поперечного перерізу, мм²;

L – довжина зразка, м.

Діапазон зміни питомого опору для металевих провідників становить приблизно від 0,0016 до 10 мкОм·м.

З формули питомого опору можна визначити опір провідника:

$$R = \rho \frac{L}{S}.$$

Температурний коефіцієнт опору. При зміні температури число вільних електронів у металевому провіднику залишається незмінним, але зменшується довжина вільного пробігу за рахунок підсилення коливань вузлів кристалічної решітки. Таким чином із збільшенням температури питомий опір металів та їх, сплавів зростає.

Залежність питомого опору міді від температури показана на рис. 2.1. Скачок на графіку відповідає температурі плавлення.

Визначаючи для граничного інтервалу через лінійну залежність, отримаємо:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha_p t),$$

де ρ_t – питомий опір у кінці температурного інтервалу;

ρ_0 – питомий опір на початку температурного інтервалу;

α_p – середній температурний коефіцієнт питомого опору.

Для ряду провідникових матеріалів в області температур, близьких до абсолютного нуля, спостерігається явище надпровідності (рис. 2.2)

На величину питомого опору металів впливає деформація.

При пружному розтягненні або зжиманні питомий опір приблизно визначається за формулою:

$$\rho_1 = \rho (1 \pm \sigma \varphi),$$

де φ – коефіцієнт механічного напруження, $\text{м}^2/\text{Н}$;
 σ – механічне напруження в перерізі зразка $\text{Н}/\text{м}^2$.

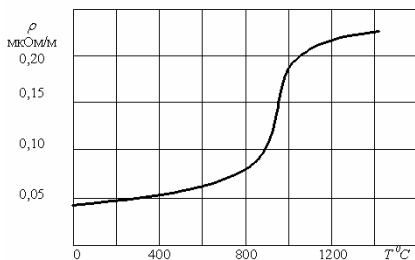


Рис. 2.1. Залежність питомого опору міді від температури

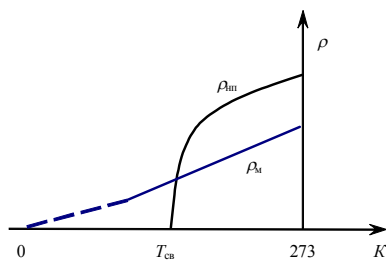


Рис. 2.2. Зміна питомої електропровідності металевих провідників в області низьких температур:
 ρ_m – звичайних металів;
 ρ_{np} – надпровідників

Зміна питомого опору пояснюється зміною амплітуди коливань вузлів кристалічної решітки: при розтягуванні амплітуда збільшується (знак “+”), при стисканні зменшується (знак “-”).

Питома електропровідність. Згідно із законом Відемана - Франца питома теплопровідність пов'язана з питомою електропровідністю залежністю

$$\frac{\lambda_T}{\rho} = \alpha T,$$

де λ_T – питома теплопровідність;
 ρ – питома електропровідність;
 α – коефіцієнт теплопровідності;
 T – температура.

З формули видно, що чим вища теплопровідність, тим вища питома електропровідність.

Контактна різниця потенціалів та термо – ЕРС. При контакті різних металів, які мають різну роботу виходу електронів із металу між ними виникає різниця потенціалів. Її значення може бути від долей до одиниць вольт. Якщо температура контактних кінців різна, то появляється термо – ЕРС:

$$U_{\text{ЕРС}} = A (T_2 - T_1).$$

Даний вираз показує, що термо – ЕРС являється функцією різниці температур.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення можна визначити за формулою:

$$\alpha_t = \frac{1}{l_t} \cdot \frac{dl}{dt}.$$

Значення цієї характеристики необхідно знати при конструюванні елементів РЕА, для того, щоб визначити надлишкову механічну напруженість у місцях спаювання та з'єднання.

Класифікація технічних провідникових матеріалів приведена на рис. 2.3.

Ці матеріали широко застосовуються у моткових та кабельних виробках і як елементи конструкції виробів радіоелектроніки.

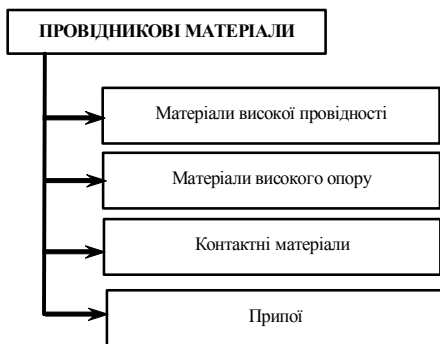


Рис. 2.3. Класифікація провідникових матеріалів

Розглянемо властивості деяких провідникових матеріалів та виробів із них.

2.2. Провідникові матеріали високої провідності

До цих матеріалів належать: метали – срібло *Ag*, мідь *Cu*, алюміній *Al*, свинець *Pb*, олово *Sn* та сплави – латунь, бронза, сталь, а також графіт.

Розглянемо властивості деяких матеріалів та місця їх застосування.

Срібло *Ag* – білий, блискучий матеріал, стійкий проти окислення при нормальній температурі. Срібло має серед металів найнижчий питомий опір $\rho = 0,016$ мкОм·м. Густина його $10,5$ г/см³, а температура плавлення 960°C . Зі срібла виготовляють не зовсім точні контакти та обкладки змінних конденсаторів. Їм покривають внутрішні частини хвильоводів для отримання шару високої провідності.

Мідь *Cu*. Її властивості залежать від способу термічної обробки. Тверда мідь (без термообробки) має велику міцність та великий питомий опір, м'яка мідь (після термообробки) має менші питомий опір та міцність. Її густина $8,9$

г/см², температура плавлення 1083⁰С, питомий опір $\rho = 0,017241$ мкОм·м. Технічна мідь може бути тверда (маркується МТ) та м'яка (ММ). Властивості м'якого та твердого мідного дроту приведені в таблиці 2.1

Мідь застосовується для електричних проводів, плат друкованого монтажу і т. ін.

Таблиця 2.1

Властивості	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності при розтягуванні (не менше), Н/м ²	$(36 - 39) \cdot 10^7$	$(26 - 28) \cdot 10^7$	$(16 - 17) \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^7$
Відносне подовження перед розривом (не менше), %	0,5 – 2,5	18 – 35	1,5 – 2	10 – 18
Питомий опір (не більше), мкОм·м	0,0179 – 0,0182	0,01754	0,0295	0,0286

Алюміній Al. Займає третє місце серед провідникових матеріалів за питомим опором $\rho = 0,286$ мкОм·м. Густина його 2,7 г/см², а температура плавлення 6600С. М'який та легкий метал. З алюмінію виготовляють електричні проводи, фольгу, конденсаторну фольгу, екрани котушок індуктивності і т. ін. Його сплави – дюралюміній, силумін – більш тверді за алюміній і застосовуються як конструкційний матеріал. Алюміній випускається двох типів – твердий (АТ) та м'який

Золото – метал жовтого кольору, який має температуру плавлення 1063⁰С, густину 19,3 г/см², питомий опір $\rho = 0,024$ мкОм·м. Золото використовується як контактний матеріал, матеріал для корозійно – стійких покриттів резонаторів, внутрішніх частин хвиль оводів, електродів фотоелементів, захисних покриттів та провідників струму в інтегральних мікросхемах.

Олово Sn. Має найнижчу температуру плавлення ($T_{пл} = 230^{\circ}\text{C}$). Входить до складу припоїв, які застосовуються для спаювання проводів та деталей.

Латунь. Це сплав міді *Cu*, цинку *Zn*, свинцю *Pb*. Латунь більш м'яка за мідь. З неї виготовляються осі, контакти, монтажні “пелюстки”, болти та гайки, виводи резисторів, конденсаторів, транзисторів і т. ін.

Бронза. Це сплав міді *Cu*, олова *Sn*, марганцю *Mn*, алюмінію *Al*, фосфору *P*, берилію *Be*, нікелю *Ni* і інших металів. В цьому сплаві міді більш, ніж в латуні. Вона відрізняється великою твердістю.

Особливо тверді такі сплави :

– фосфориста бронза (*Cu*, 6-7% *Sn*, 0,5% *P*) ;

- олов'яниста бронза ($Cu, 10\% Sn$) ;
- алюмінієва бронза ($Cu, 6...8\% Al$) ;
- берилієва бронза ($Cu, 2\% Be; 0,5\% Ni$) ;

Застосовується для виготовлення контактів, які ковзають та пружинять струмопровідних пружин, наприклад у реле.

Сталь. Це сплав заліза Fe та вуглецю C . Має високу механічну міцність, але сильно піддається корозії (ржавінню). Для захисту від корозії поверхню виробів із сталі покривають захисним покриттям з іншого металу (нікелювання, цинкування, кадміювання). Зі сталі виготовляють гвинти, гайки, осі, втулки, шпильки, шасі, каркаси, стійки.

Графіт застосовується для виготовлення щіток колекторів електричних

Області застосування матеріалів високої провідності. Проводи та кабелі.

Обмотувальні та монтажні проводи. Обмотувальні проводи виготовляють із провідникових матеріалів із **малим опором** – обмотки котушок індуктивності, трансформаторів, реле, електричних машин та з **великим опором** – дротяні резистори, спіралі електронагрівальних приладів і т. ін. Поверхня обмотувальних проводів покривається емальованою лакостійкою ізоляцією для того, щоб не було замкнення між собою сусідніх витків.

Обмотувальні проводи з малим питомим опором. Ці проводи крім емальованої ізоляції можуть мати ще додаткову волокнисту ізоляцію з шовку, бавовни, з шовку та капрону в один або в два шари.

Типи найбільш поширених обмотувальних проводів наведено в табл. 2.2. На високих частотах у котушках індуктивності застосовують провід, який отримав назву **літцендрат**. Він складається з пучка тонких мідних емальованих проводів, який обмотаний волокнистою ізоляцією.

Таблиця 2.2

Тип	Вид ізоляції	Діаметр, мм
ОПЭЛ	Емаль лакостійка	0,06 – 2,54
ПЭВ	Емаль вініфлексова	0,08 – 2,57
ПЭЛШО (ПЭЛШД)	Емаль лакостійка та шовкова пряжа в один або в два шари відповідно	0,14 – 1,74
ПЭЛБО (ПЭЛБД)	Емаль лакостійка та бавовняна пряжа в один або в два шари відповідно	0,55 – 2,35
ПБО (ПБД)	Бавовняна пряжа в один або два шари відповідно	0,31 – 5,5
ПСД	Скловолокно у два шари	0,55 – 5,58

Як відомо, струм високих частот проходить по поверхні проводу (явище поверхневого ефекту). Загальна поверхня пучка проводів більша, ніж поверхня одного проводу такого ж діаметра, тому опір літцендрата менший, ніж звичайного. Це зменшує втрати енергії.

До літцендратів відносяться: ЛЭШО, ЛЭЩД – це літцендрат з емальованою ізоляцією жил, ізольований шовковою ізоляцією в один шар або у два шари відповідно (\varnothing 0,32 – 3,8 мм);

ЛЭПКО – літцендрат з емальованою ізоляцією жил, ізольований поліамідним шовком та капроном в один шар.

ЛЭЛО – літцендрат з емальованою ізоляцією жил, ізольований лавсаном в один шар.

Обмотувальні проводи з великим питомим опором.

Існують такі основні марки проводів:

ПЭММ – емальований манганіновий м'який – для опорів з високою термостабільністю;

ПЭК – емальований константановий;

ПЭВНХ – емальований з високоміцною емаллю, ніхромовий.

Монтажні проводи. Використовуються для електричних з'єднань між виводами радіодеталей та блоків і т. ін.

Застосовують жорсткі одножильні та гнучкі проводи, а також багатожильні (свиток мідних тонких жил). Монтажні проводи мають поліхлорвініловану, гумову, бавовняну, шовкову, скловолоконну, фторопластову ізоляції.

Деякі проводи мають металеві “панчохи”, які виконують роль металевих екранів. Це сплетіння тонких мідних лужених проводів.

Частіше застосовують такі марки монтажних проводів:

МГВ – монтажний гнучкий у поліхлорвінілової ізоляції;

МГВЭ – це МГВ з екраном;

МГВЛ – це МГВ із бавовняної пряжі, лакований;

МГВЛЭ – це МГВЛ з екраном;

МШВ – монтажний одножильний у шовкової та поліхлорвінілової ізоляції (\varnothing 0,8 – 2,7 мм);

МГШВ – монтажний гнучкий із шовковою та поліхлорвініловою ізоляцією (\varnothing 1,0 – 2,9 мм);

МГТФЭ – монтажний гнучкий фторопластовий в екрані;

МГВСЛ – монтажний гнучкий багатожильний з поліхлорвініловою ізоляцією, лакований в оплетені зі скловолокна (\varnothing 2,2 – 2,6 мм);

МГВСЛЭ – це МГВСЛ із мідним екранним оплетенням (\varnothing 2,2 – 2,6 мм);

ПВЭ – провід монтажний з однією жилою та поліхлорвініловою ізоляцією;

ПМБГ – провід монтажний з бавовняною пряжею в поліхлорвінілової

ізоляції, гнучкий ($\varnothing 2,0 - 2,6$ мм);

МР – монтажний провід з однією жилою у гумовій ізоляції.

Силові кабелі. Силові кабелі використовуються для передачі та розподілення енергії при постійному та змінному струмі. Силовий кабель складається зі струмопровідящих жил, ізоляції, оболонки та захисного покрову. Основним матеріалом для виготовлення струмопровідящих жил служить м'яка мідь або алюміній. Для збільшення гнучкості виготовляють багатопроволочні струмопровідящі жили.

В якості ізоляції застосовують резину, паперову просочену стрічку або синтетичні плівки. Кабелі з паперовою ізоляцією крім ізоляції окремих жил мають спільну ізоляцію, яка накладається на скручені ізольовані жили. Поверх цього шару для захисту від вологи накладається свинцева або алюмінієва оболонка, а для деяких типів кабелів – гнучка резинова або полівінілхлоридна оболонка. Кабелі з резиновою ізоляцією випускаються на мінімальну напругу: 660 В постійного струму; 3,6 та 10 кВ змінного струму. Номінальний перетин жили – 1 – 500 мм².

Радіочастотні кабелі. Застосовуються на високих частотах для з'єднання антени з приймачем або передавачем, для міжблочного з'єднання, а також у пристроях узгодження.

Частіше всього застосовується коаксіальний кабель типу РК (радіокабель). Його конструкцію в розрізі приведено на рис. 2.4.

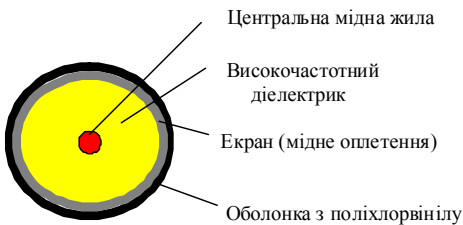


Рис. 2.4. Конструкція кабелю типу РК

Прикладом радіочастотного кабелю є кабель РК - 75 - 4 - 13.

Його питомий опір $\rho = 75$ Ом. Застосовують також і двопровідний високочастотний кабель типу РД (радіочастотний подвійний). Зустрічаються також і стрічковий кабель КАТВ (кабель антенний телевізійний подвійний

плоский з поліхлорвініловою ізоляцією). Його питомий опір $\rho = 300$ Ом.

Характеристика кабелю кручена пара.

Кабель *кручена пара* в якості середовища передачі використовується в усіх сучасних мережевих технологіях. Уніфікація пасивних елементів мережі на витій парі стала основою для концепції побудови структурованих кабельних систем, незалежних від мережевих технологій.

Кручена пара (Twisted Pair) TP – суттєво відрізняється від просто паралельних проводів. При скручуванні знижується ємкісний та індуктивний зв'язок між провідниками. А значний відрізок такого кабелю для зовнішніх полів є симетричним, що знижує його чутливість до наводок і зовнішнім випромінюванням. **Кабель кручена пара** – містить дві чи чотири звитих пар провідників, які знаходяться в ізоляційній захисній оболонці.

Види крученої пари :

1) неекранована кручена пара:

– **UTP** – *Unshielded Twisted Pair* – неекранована кручена пара (рис. 1.5, а): 1 – провідник в ізоляції, 2 – захисна ізолююча оболонка;

– **FTP** – *Foiled Twisted Pair* – кручені пари, поміщені в загальний екран із фольги – 3 (рис. 1.5, б), уздовж всього кабелю розташована неізольована проволочка – 4, яка служить для підключення до заземлення або інших екрануючих пристроїв;

– **SFTP** – *Shielded Foil Twisted Pair* – загальний екран складається з фольги і оплітки – 5 (рис. 1.5, в);

2) екранована кручена пара (рис. 2.5, г): **STP** – класична екранована кручена пара, кожна пара цього кабелю поміщена в окремий екран з фольги, а всі пари – в плетений екран; також до цього типу кабелю відноситься кабель **PiMF** (*Pair in Metal Foil*) та **SSTP** (*Shielded Screened Twisted Pair*).

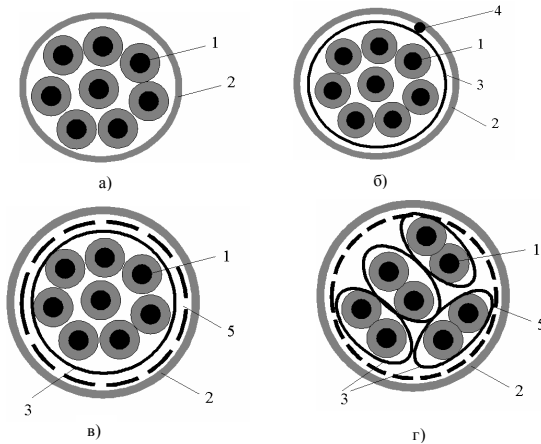


Рис. 2.5. Різновиди крученої пари

Основні характеристики крученої пари:

1. Імпеданс. Кабель кручена пара може мати різні номінали імпедансу. Стандарт *EIA/TIA* – 568A визначає два значення – 100 і 150 *Ом*, стандарти *ISO* і *EN 50173* додають ще й 120 *Ом*. Імпеданс кабелю, що застосовується, повинен відповідати імпедансу обладнання, що з ним з'єднується. Для цього, за необхідності, використовують хвильові адаптери.

Такий узгоджувач являє собою невеликий пасивний пристрій, найчастіше за все – узгоджувальний трансформатор. Такі „перехідники” мають назву *Balun*.

2. Кількість пар провідників. Найбільше розповсюдження отримали кабелі з числом пар 2 і 4. Існують і подвійні конструкції – два кабелі по дві

чи чотири пари поміщені в суміжні ізолювані оболонки. В загальну оболонку можуть бути поміщені й кабелі *STP* та *UTP*. З багатопарних популярні 25-парні, а також збірки по 6 шт. 4-парних. Кабелі з великим числом пар: 50, 10 – застосовуються лише в телефонних мережах, так як виготовлення багатопарних кабелів високої якості задача дуже складна.

3. Крок скрутки. Кожна пара кабелю має свій крок скрутки, що відрізняється від сусідніх. Чим менший крок скрутки, тим менше перехресні перешкоди, але більше погонне затухання і час розповсюдження сигналу. Цим забезпечується зниження взаємної індуктивності та ємності проводів, а як наслідок – зниження перехресних наводок. Кабелі різних виробників в шагом скрутки розрізняються : 14 – 32 мм.

Оскільки від кроку скрутки залежать хвильові характеристики пари: швидкість розповсюдження, імпеданс, затухання, – тому пари в кабелі не ідентичні. Кожна пара у відрізці кабелю має свою „електричну довжину”, що визначається через час розповсюдження сигналу й номінальну (для даного кабелю) швидкість розповсюдження хвилі. „Електрична довжина” пари буде відрізнятися від „механічної”, виміряної рулеткою.

4. Величина поперечного перерізу провідника. За калібром – перерізом провідників – кабелі маркуються у відповідності зі стандартом *AWG* – American Wire Gauge – американські калібри проводів. В основному застосовуються провідники: 26 *AWG* – 0,13 мм (137 Ом/км); 24 *AWG* – 0,2 ÷ 0,28 мм (60 ÷ 88 Ом/км); 22 *AWG* – 0,33 ÷ 0,44 мм (39 ÷ 52 Ом/км).

5. Тип провідника. За конструкцією провідники в кабелі можуть бути жорсткими одножильними – *solid*, чи гнучкими багатожильними – *stranded* чи *flex*, які складаються з 5 – 7 тонких металевих проволочок. Кабель з одножильними провідниками має кращі й більш стабільні характеристики. Його застосовують для стаціонарної проводки. Багатожильний кабель використовують в якості комутаційних шнурів – *патчкордів* (*patch cord*).

6. Категорія. Категорія крученої пари визначає частотний діапазон, в якому застосування кабелю є ефективним. На теперішній час існує сім категорій крученої пари.

2.3. Провідникові матеріали з великим питомим опором

До цих матеріалів належать: **метали** – вольфрам *W*, молібден *Mo* та **сплави** – манганін, константант, ніхром, нікелін, фехраль, хромаль і т. ін.

Вони відрізняються високою температурою плавлення та високим питомим опором. Найбільшу температуру плавлення ($T_{пл} = 3370$ °C), має вольфрам *W*, а найбільший питомий опір має константант $\rho = 0,49$ мкОм·м.

. Розглянемо властивості та області застосування деяких провідників із великим ρ .

Молибден. Є найважливішим конструкційним матеріалом для виготовлення анодів, сіток, катодів, держаків, ниток розжарювання електровакуумних приладів.

Вольфрам застосовується для виготовлення ниток розжарювання ламп освітлення.

Манганін. Це сплав Cu 86%, Mg 12%, Ni 2%. Його опір R має малу залежність від температури, застосовується для виготовлення додаткових резисторів і шунтів вимірювальних приладів.

Ніхром. Це сплав Ni 67%; Cr 15%; Fe 16%; Mg 1,5%. Має $T_{пл}$ – до 1000 °С.

Фехраль. Це сплав Fe 82%; Cr 15%; Al 3%. $T_{пл}$ – до 1000 °С.

Хромаль. Це сплав Fe 65%; Cr 30%; Al 5%. Має $T_{пл}$ – до 1000 °С.

Константан. Це сплав Cu 60%; Mg 12%; Ni 2% і ін. Його опір незначно змінюється при зміні температури. Має $T_{пл}$ – до 500 °С.

Нікелін. Це сплав Cu та Ni . Застосовується для резисторів до $T_{пл} = 200$ °С. Властивості деяких матеріалів високо опору приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Найменування сплаву	Густина $\times 10^3$, кг/м ³	Лінійний опір ρ , мкОм·м	TK_{ρ} , град ⁻¹	Термо – ЕРС відносно міді, мкВ/град	Мак. робоча темпер.	Відносне подовж. перед розривом, %
Манганін	8,4	0,42–	$(5-30) \cdot 10^{-6}$	1 – 2	100 – 200	15 – 30
Константан	8,9	0,48	$(5-25) \cdot 10^{-6}$	40 – 50	450 – 500	20 – 40
Ніхром марки Х15Н60	8,2 – 8,3	0,52 1,0–1,2	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	—	1100	25 – 30 —
Ніхром марки Х20Н80	7,1 – 7,5	1,0–1,1	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	—	—	—
Хромаль марки Х13Ю4	7,1 – 7,5	1,2–1,35	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	—	850	20

Ніхром, фехраль, хромаль константант, нікелін застосовуються для резисторів, реостатів та обмоток нагрівальних приладів.

2.4. Контактні матеріали

В радіоапаратурі використовують різні системи контактів: зажимні, зварні, ковзні, розривні.

Найбільше застосування знайшли розривні контакти, які працюють у тяжких умовах. Ці матеріали при замиканні та розмиканні контактів

підлягають руйнівній дії ерозії та корозії, а також механічному зносу.

Класифікація контактних матеріалів.

В контактах використовуються дві групи матеріалів. При малих та середніх струмах та напругах контакти підвергаються мостиковій ерозії, дії короткої дуги з “тонким” переносом або плазменної дуги з “грубим” переносом металу. Такі контакти відносяться до малопотужних і для них в основному застосовують **металеві сплави** типу твердих розчинів. При великих струмах та напругах контакти досліджують головним чином, на термічну дію дуги, яка супроводжується випарюванням та розбризкуванням металу. Такі контакти являються потужними і для них застосовуються не сплави, а **металокераміку**, яка складається з не зплавляючихся між собою легкоплавкого та тугоплавкого компонентів.

Основні властивості деяких контактних сплавів та металокераміки приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4.

Марка	Склад	Густина $D, \text{г/см}^3$	$\rho_{\text{Ом}}$ $\cdot \text{мм}^2/\text{м}$	Твердість $H_B, \text{кг/мм}^2$
СПЛАВИ				
ПтИ-10	Платино-іридій	21,6	0,215	92
ЗлС24Пт6	Золото-срібло-платина	17,1	0,168	59
СН-30	Срібло-нікель	9,3	0,032	60
Ск22Н1	Срібло-кадмій-нікель	9,5	0,060	60
МЕТАЛОКЕРАМІКА				
СОК12	Срібло-окись кадмія	9,0	0,027	45
СОМ-10	Срібло-окись міді	9,2	0,025	50
СВ-30	Срібло-вольфрам	12,0	0,023	70
СГ-3	Срібло-графіт	8,7	0,024	27
СН29Г3	Срібло-нікель-графіт	8,7	0,030	45
МВ50	Мідь-вольфрам	12,0	0,040	140
МГ-5	Мідь-графіт	6,0	0,047	15

Контактні сплави.

В склад таких сплавів входять більшою частиною благородні метали в зв'язку з їх, стійкістю до окислення. Але із-за їх, низької температури плавлення приходить для сильно навантажених контактів застосовувати сплави тугоплавких металів. Для прикладу розглянемо деякі сплави.

Золото-нікелеві сплави відрізняються високою твердістю, стійкістю до ерозії та до зварювання. Недоліком сплаву являється схильність до окислення при потужній дузі.

Сплав золота з цирконієм, крім вказаних переваг ще має стійкість до окислення.

Срібно-паладієві сплави мають високу температуру плавлення (1330°C), стійкі до ерозії і вдвоє твердіші срібла. Ці сплави мають захисні властивості проти створення сульфідної плівки, яка з'являється на сріблі при наявності парів сірки.

Срібно-кадмієві сплави мають цінну особливість, яка заключається в тому, що під дією електричної дуги походить утворення окису кадмія. Розкладається при високій температурі з виділенням газоподібних продуктів, окис кадмію сприяє гасінню дуги. Недоліком сплаву є низька температура плавлення.

Платино-іридієві сплави стійкі до корозії, характеризуються підвищеною стійкістю до ерозії та до зварювання. Високою твердістю та тугоплавкістю відрізняються також сплави платини з рутенієм і осмієм.

Вольфрамо-молібденові сплави володіють стійкістю до ерозії, до механічного зносу та зварювання. Однак нагріті дугою контакти на повітрі швидко покриваються шаром окислу, і потрібно високий контактний тиск здатний зруйнувати оксидну плівку. Контактні сплави застосовуються для контактів реле, вібраційних регуляторів напруги, віброперетворювачів та низьковольтних вимикачів малої потужності.

Контактна металокераміка. При великих струмах і напругах контакти, піддаючись термічній дії дуги, швидко руйнуються; контакти із сплавів нерідко приварюються один до одного і виявляються недостатньо зносостійкими. Тому такі контакти, як правило, виготовляють із металокераміки. Вона представляє собою механічну суміш двох фаз – тугоплавкий з відносно низькою провідністю та легкоплавкою з високою провідністю. Якщо під впливом дуги друга фаза переходить в рідкий стан, то витікання її не відбувається, так як вона утримується в порах тугоплавкої фази капілярними силами. Металокераміку отримують спіканням суміші металевих порошків. Широко застосовуються металокерамічні матеріали на основі срібла в сполученні з другими металами та різними окислами. Металокераміка срібло-нікель мало піддана ерозії, володіє пластичністю та стійкістю контактної опору. Металокераміку срібло-нікель цілеспрямовано застосовувати в сильно індуктивних ланцюгах, коли струми при комутаціях можуть досягати десятикратної величини по відношенню до робочих. Допускається одне зрацювання контактів за секунду. При струмах 30-300 А застосовують металокераміку СОК-12. У випадку потужних систем, де можливе зварювання, а також корозії контактів застосовують металокераміку срібло-вольфрам із-за високої стійкості вольфраму до зварювання.

Матеріали для ковзних матеріалів. Матеріали для ковзних матеріалів можна розділити на електровуглецеві та металеві (пружинні).

Електровуглецеві контактні матеріали. Такі матеріали використовують для електрощіток. Щітки виготовляють із вуглецевих речовин (графіт, кокс, сажа), зв'язки (камяновугільна та синтетичні смоли) і

просочувальних матеріалів. Часто використовують також порошкоподібні метали для підвищення провідності щіток (мідь із добавкою олова, свинцю, срібла).

Вуглецеві матеріали попередньо прокалюють (крім сажі та графіту) для видалення летучих компонентів. Після змішування з металевим порошком і зв'язкою пресують заготовки з яких вирізають щітки. Для придання міцності щітки зпікають у не окисленій атмосфері при 900-1300° С. Окремі сорти щіток піддають графітизації (крім графітових) при 2500-3000° С в не окисленій атмосфері для переводу коксу та сажі в графіт видалення домішок. Заключною операцією являється просочування щіток смолами або восками для підвищення вологостійкості та зниження коефіцієнта тертя. Підвищення механічної міцності та провідності досягається просочуванням щіток розплавленими металами.

Основними характеристиками щіток слугують:

- питомий опір;
- допустима густина струму;
- допустима окружна швидкість;
- питомий тиск;
- падіння напруги.

Випускають графітові, вугільно-графітові, металографітові та електрографітизовані щітки. Вугільно-графітові та графітні щітки допускають невисоку густину струму (до 11 А/мм²) і окружну швидкість до 25 м/сек. Вони відрізняються м'якістю і застосовуються в машинах невеликої потужності. Електрографітизовані щітки піддаються графітизації в електричних печах. Маючи високу стійкість до випарювання, ці щітки допускають високу окружну швидкість до 45 м/сек. Щітки застосовують у машинах середньої та великої потужності.

Металографітні щітки містять порошкоподібну мідь (до 90 %), тому вони мають низький питомий опір до 0,2 Ом·мм²/м і допускають високу густину струму до 20 А/мм². для них можлива окружна швидкість до 35 м/сек. Питомий тиск для всіх щіток складає 200-300 Г/см², а падіння напруги в щіточному контакті при номінальному струмі складає 2 – 3 В при коефіцієнті тертя не більше 0,3.

Пружинні контактні матеріали. В якості таких матеріалів застосовують в основному кадмієву та кадмієво-оловянисту бронзи, які володіють високою міцністю, твердістю та пружними властивостями.

Пружинні контакти використовуються в електричних генераторах, електродвигунах, в автотрансформаторах із регулюванням під навантаженням. В електричних машинах застосовують, в основному, електровугільні щітки, в потенціометрах, перемикачах та в інших елементах радіоапаратури – пружинні струмознімачі з металевих сплавів.

2.5. Припої

Припої служать для гальванічного з'єднання електропроводу та виводів радіодеталей. Застосовуються припої, які є матеріалами високої провідності.

Припої можуть бути:

- **низькотемпературні** ($T_{\text{пл}} < 145^{\circ}\text{C}$);
- **легкоплавкі** ($145^{\circ} < T_{\text{пл}} \leq 450^{\circ}\text{C}$);
- **середньоплавкі** ($T_{\text{пл}} = 500 \div 1100^{\circ}\text{C}$);
- **високоплавкі** ($T_{\text{пл}} = 1150 \div 1850^{\circ}\text{C}$);
- **тугоплавкі** ($T_{\text{пл}} > 1850^{\circ}\text{C}$).

Вони є сплавами деяких металів. Усі припої повинні мати хорошу рідинотекучість, малий інтервал температурної кристалізації, високу механічну міцність та корозійну стійкість, а також малий питомий опір.

Легкоплавкі припої є сплавами олова та свинцю або олова та кадмію.

Найчастіше з легкоплавких припоїв застосовуються такі:

ПОС – 40 (припій з олова та свинцю). Складається з *Sn* 40% олова, *Su* 2% сурми та свинцю *Pb*. $T_{\text{пл}} = 235^{\circ}\text{C}$.

ПОС – 61 Має *Sn* 61% олова, *Su* 0,8% сурми та свинцю *Pb*. $T_{\text{пл}} = 190^{\circ}\text{C}$.

ПОСК – 50 (припій з олова та свинцю й кадмію). Має *Sn* 50% олова, *Cd* 18% кадмію; *Pb* 32% свинцю. $T_{\text{пл}} = 145^{\circ}\text{C}$.

Тугоплавкі припої виготовляють на основі міді *Cu* та свинцю *Pb*. $T_{\text{пл}} > 450^{\circ}\text{C}$.

При пайці необхідно убити з поверхні деталей, які паяють, окисли. Для цього застосовують флюси. Вони відрізняються за хімічною активністю і можуть бути кислотні (хлористий цинк, борна кислота, бура) або безкислотні (каніфоль, ЛПІ).

Контрольні питання для самоперевірки

1. Які матеріали відносяться до провідникових і як вони характеризуються?
2. Якими основними параметрами характеризуються провідникові матеріали?
3. Що таке температурний коефіцієнт опору?
4. Які провідникові матеріали відносяться до матеріалів із малим та великим питомим опором?
5. Дайте характеристику обмотувальним та монтажним проводам.
6. Що таке припої та де вони використовуються?

РОЗДІЛ ІІІ

ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

3.1. Загальні відомості про діелектричні матеріали, їх електричні параметри

Діелектрики в радіотехніці знайшли розповсюдження, як ізолятори в електричних проводах, радіодеталях і як конструкційні матеріали в різних пристроях. Наприклад, для ізоляції обмотувальних проводів та кабелів, для каркасів котушок індуктивності, підкладок гібридних інтегральних мікросхем і т. ін.

Властивості діелектриків характеризуються їх параметрами:

- діелектричною проникністю ε ;
- електропровідністю G ;
- діелектричними втратами $R_{\text{в}}$;
- електричною міцністю $E_{\text{пр}}$;
- температурним коефіцієнтом діелектричної проникності TK_{ε} .

3.1.1. Поляризація діелектриків

Якщо до діелектрика прикладається зовнішнє електричне поле, то він **поляризується**. Сенс поляризації – в оборотному зміщенні зарядів при відповідній орієнтації молекул діелектрика.

В результаті поляризації виникає електричне поле, направлене проти зовнішнього поля.

В діелектриках в залежності від їх структури можуть виникати слідуючі види поляризації: електронна, іонна, іонно – релаксаційна, дипольно – релаксаційна, електронно – релаксаційна, пружно – дипольна, структурна, ядерного зміщення, спонтанна, залишкова.

Електронна поляризація представляє собою пружне зміщення й деформацію електронних оболонок атомів та іонів. Процес поляризації протікає майже миттєво (10^{-15} с). Такі діелектрики використовуються на всіх частотах включаючи і надвисокі частоти.

Електронна поляризація спостерігається у всіх видах діелектриків і не зв'язана з утратою енергії. Тепловий рух молекул на величині електронної поляризації не відображається.

Іонна поляризація зумовлена зміщенням пружного зв'язаних іонів і характерна для твердих діелектриків з іонною будовою. Величина поляризації з підвищенням температури збільшується в результаті ослаблення пружних сил, діючих між іонами, із-за збільшення відстані між іонами при тепловому розширенні. Іонна поляризація відноситься до

миттєвих і не залежить від частоти.

Іонно-релаксаційна поляризація (ІРП) спостерігається в неорганічному склі та в деяких кристалічних неорганічних речовинах із негустою скупченістю іонів. В них слабо зв'язані іони під дією зовнішнього електричного поля отримують допоміжні перекидання в направленні поля. Поляризація цього типу має сповільнений характер. Діелектрики з ІРП на високих частотах не застосовуються.

Дипольно-релаксаційна (ДРП) поляризація визначається поворотом і орієнтацією диполів у направленні поля і зв'язана з тепловим рухом часток. Дипольні молекули, які знаходяться в хаотичному тепловому русі, частинно орієнтуються під дією поля, що являється причиною поляризації діелектрика. Якщо зняти зовнішнє електричне поле поляризація зникає.

Час ДРП рівняється $10^{-10} - 10^{-2}$ с. Цей вид поляризації спостерігається у всіх поляризованих речовинах.

Електронно-релаксаційна поляризація (ЕРП) зумовлена граничним переміщенням збуджених тепловою енергією електронів. Вона характерна для діелектриків з електронною електропровідністю, наприклад, двоокису титану з домішками іонів ніобію, кальцію.

Пружно-дипольна поляризація (ПДП) спостерігається у дипольних молекул у деяких кристалах, в яких дипольні молекули закріплені і можуть повертатися тільки на невеликий кут. Величина діелектричної проникності при такій поляризації має невелике значення.

Структурна поляризація зумовлена наявністю в технічних діелектриках провідящих та напівпровідящих включень, а також шарів з різною провідністю. Ця поляризація проявляється при дуже низьких частотах і пов'язана зі значним розсіюванням електричної енергії.

Поляризація ядерного зміщення виникає за рахунок зміщення ядер в атомах і молекулах під дією електричного поля. Цей вид поляризації відноситься до миттєвої поляризації і не залежить від частоти та температури.

Спонтанна поляризація нелінійно залежить від величини напруженості електричного поля і характеризується явно вираженим максимумом при певній температурі. Цей вид поляризації супроводжується значним розсіюванням енергії. Він характерний для сегнетоелектриків.

Залишкова поляризація характеризується тривалим зберіганням поляризаційного стану в діелектрику після зняття зовнішнього поля. Діелектрики цього типу (електрети) здатні при відсутності зовнішнього поля створювати електричне поле в навколишньому середовищі. Електрети можуть використовуватися як джерела електричної енергії.

Деформаційна поляризація, яка характеризується пружним зміщенням зарядів у діелектрику, що не приводить до помітних втрат енергії (притаманна органічним діелектрикам).

Релаксаційна поляризація, яка характеризується значним зміщенням зарядів, на протязі певного часу та супроводжується відносно великими втратами енергії, притаманна неорганічним діелектрикам.

Велика кількість технічних діелектриків володіють одночасно декількома видами поляризації.

3.1.2. Параметри діелектричних матеріалів

Діелектрична проникність та її температурний коефіцієнт

Здатність діелектрика поляризуватися в електричному полі характеризує його **діелектрична проникність ε** .

Діелектрична проникність – це величина, яка показує, у скільки разів збільшується ємність повітряного конденсатора, якщо простір між його обкладками заповнити замість повітря даним діелектриком і визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{C_1}{C_0},$$

де C_1 – ємність конденсатора з даним діелектриком;

C_0 – ємність повітряного конденсатора.

Таким чином, властивість будь-якого діелектричного матеріалу порівнюють із властивістю повітря. Кращі конденсатори мають велику ε .

Діелектрична проникність залежить від температури і визначається температурним коефіцієнтом діелектричної проникності TK_ε , яка характеризується відносною змінною проникністю при зміні температури на 1°C .

Температура, при якій діелектрична проникність максимальна, називається **температурою Кюрі**.

Електропровідність діелектриків.

Ідеальний діелектрик не має електропровідності. Електропровідність у діелектрику виникає тоді, коли він має вільні або слабо пов'язані заряди (іони), які переміщуються під дією електричного поля E , приводячи до виникнення електричного струму.

Електропровідність – це здатність діелектрика проводити електричний струм. В діелектриках необхідно розрізняти два види провідності: об'ємну та поверхневу, згідно струму витоку через товщину діелектрика або по його поверхні.

Для порівняльної оцінки твердих діелектриків по відношенню їх об'ємної та поверхневої електропровідності користуються значеннями питомого об'ємного та питомого поверхневого опору.

Струм електропровідності називається струмом витоку $I_{\text{вит}}$. Він визначається опором ізоляції $R_{\text{із}}$ за формулою:

$$I_{\text{внт}} = \frac{U}{R_{\text{із}}}.$$

Тоді $R_{\text{із}} = \frac{d}{S}$, де d – товщина діелектрика (м); S – площа бокової поверхні (м²).

Питомий об'ємний опір ρ_V численно дорівнює опору куба з ребром в 1 м², мислено вирізаного із досліджуемого матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба.

В випадку плоского зразка матеріалу при однорідному полі питомий об'ємний опір в Ом-м можна визначити за формулою:

$$\rho_V = R \frac{S}{h},$$

де R – об'ємний опір зразка, Ом;

S – площа поперечного перерізу електрода, м²;

h – товщина зразка, м.

Питомий поверхневий опір ρ_S численно дорівнює опору квадрата, мислено виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні сторони цього квадрата (рис. 3.1).

Питомий поверхневий опір в Ом можна визначити за формулою:

$$\rho_S = R_S \frac{l}{d},$$

де R_S – поверхневий опір зразка між паралельно поставленими електродами;

l – ширина електродів;

d – відстань між електродами (див. рис. 3.1).

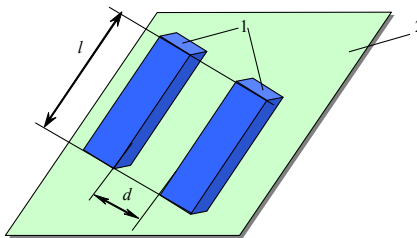


Рис. 3.1. Розміщення електродів (1) на поверхні зразка (2) із діелектрика при вимірюванні ρ_S

За питомим опором ρ_V , ρ_S визначається питомі провідності γ_V, γ_S .

Повна провідність твердого діелектрика складається з об'ємної та поверхневої провідностей:

$$\gamma = \gamma_V + \gamma_S.$$

Електропровідність діелектриків зумовлюється станом речовини:

газоподібним, рідким або твердим, а також залежить від температури й вологості навколишнього середовища.

Діелектричні втрати

Енергетичні втрати в діелектрику пов'язані з наявністю струмів витоку, уповільнення поляризаційних процесів іонізації газових крапель, зміни орієнтації дипольних молекул, які приводять до тертя та деформації атомів.

Усі фактори втрат можна звести до дії активного опору ізоляції $R_{із}$.

Енергетичні втрати діелектрика через наявність опору $R_{із}$ приводять до його нагріву й розсіювання тепла в оточуюче середовище.

Якість діелектрика при змінній напрузі характеризують **питомими втратами, кутом діелектричних втрат або тангенсом кута діелектричних втрат**.

В ідеальному діелектрику кут δ дорівнює нулю. Чим більше потужність розсіювання, тим більший кут діелектричних втрат.

Діелектричні втрати можна розділити на чотири основні види:

- діелектричні втрати, зумовлені поляризацією;
- діелектричні втрати наскрізної провідності;
- діелектричні втрати, зумовлені неоднорідністю структури;
- іонізаційні діелектричні втрати.

Величину діелектричних втрат в ізоляційному матеріалі можна характеризувати величиною реактивної складової потужності розсіювання, віднесеної до одиниці об'єму, а також тангенсом кута діелектричних втрат.

Кутом діелектричних втрат δ називається кут, доповнюючий до 90° кут зсуву фаз між струмом та напругою в ємнісному колі. Чим більша потужність, що розсіюється в діелектрику, яка переходить в тепло, тим менший кут зсуву фаз φ і тим більший кут діелектричних втрат δ і його функція $tg\delta$ (рис. 3.2).

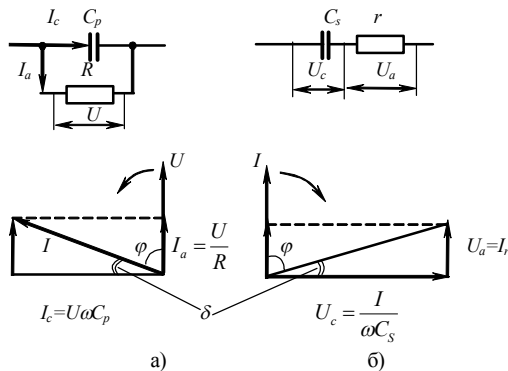


Рис. 3.2. Паралельна (а) та послідовна (б) еквівалентні схеми діелектрика з втратами та векторними діаграмами до них

З векторної діаграми отримаємо:
для паралельної схеми

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R};$$

для послідовної схеми

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_S r.$$

Величину потужності, яка розсіюється можна визначити за формулою:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta.$$

Із данної формули видно, що діелектричні втрати мають серйозні значення для діелектриків, які використовуються в високовольтній апаратурі, високочастотних пристроях, так як величина діелектричних втрат пропорційна квадрату прикладеної до діелектрика напруги та частоти струму.

Електрична міцність

Характеризує здатність діелектрика витримувати без пробую велику електричну напругу.

Ізоляційні властивості діелектрика, який знаходиться в електричному полі, втрачаються якщо напруженість поля перевищить критичне значення, після якої виникає **пробій**. Під пробоем діелектрика розуміють процес утворення в ньому каналу великої провідності.

Напруга, за якою порушується міцність ізоляції діелектрика і виникає його пробій називається **напругою пробую** ($U_{\text{пр}}$).

Напруженість поля, за якою виникає пробій діелектрика, називається **електричною міцністю ізоляції** ($E_{\text{пр}}$):

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d},$$

де d – товщина діелектрика.

Частіше виникають електричний та електротепловий пробій.

Електричний пробій обумовлюється, головним чином, ударною іонізацією атомів кристалічних ґрат вільними електронами провідності. Вони прискорюються зовнішнім електричним полем та віддають надлишок енергії валентним електронам, які відриваючись від атому, стають вільними і, розганяючись електричним полем, в свою чергу, звільняють нові електрони. Виникає лавиноподібне нарощування процесу, яке і приводить до пробую.

Електротепловий пробій обумовлюється стрімким зростанням провідності та втрат у діелектрику при зростанні температури. При цьому порушується рівновага між тепловою потужністю підведеною до діелектрика та відведеною в оточуюче середовище. Це приводить до збільшення струму витоку, тобто до ще більшого зростання температури діелектрика і його руйнування – плавлення, обвуглення або випаровування.

3.1.3. Експлуатаційні якості діелектриків

Вологостійкість – це здатність діелектрика до надійної експлуатації при знаходженні в атмосфері з високою вологістю. Вода, як сильно полярний діелектрик із низьким питомим опором, при проникненні в матеріал збільшує діелектричну проникність та втрати, різко понижає поверхневий та об'ємний опір, а також зменшує величину пробивної напруги.

Вологопроникність – властивість матеріалу пропускати пари води при наявності різниці тиску з двох сторін матеріалу. Кількість вологи (M у кілограмах), яка проходить за час t (с) через ділянку поверхні S (m^2) шару матеріалу товщиною h (м) під дією різниці тиску водяних парів P_1 та P_2 (Па) із двох сторін шару, дорівнює:

$$M = \Pi \frac{(P_1 - P_2)S}{h} \cdot t,$$

де Π – коефіцієнт питомої вологопроникності.

Гігроскопічність (або вологопоглинання) – це здатність ізоляційного матеріалу вбирати в себе вологу з навколишнього середовища.

На гігроскопічність та вологопроникність матеріалу значний вплив оказують хімічний склад та структура матеріалу.

При тривалій експлуатації радіоелектронної апаратури в умовах високої вологості відбувається різке пониження електричних, механічних та фізико-хімічних властивостей ізоляційних матеріалів.

Нагрівостійкість – це властивість електротехнічних матеріалів та виробів із них витримувати вплив підвищеної температури на протязі часу, який порівнюється з терміном нормальної експлуатації виробу, а також в випадках різких змін температури без порушення та недопустимого погіршення важливих властивостей.

Матеріали, які застосовуються для ізоляції електротехнічних пристроїв, основується на їх нагрівостійкості, на практиці розподіляють на класи нагрівостійкості, де для кожного класу встановлюється певна максимальна робоча температура.

Теплопровідність – здатність матеріалу пропускати тепло.

Рівняння процесу передачі тепла через тіло з повним тепловим опором R_T при різниці температур гарячій та холодній поверхнях ΔT має вигляд:

$$P = \frac{\Delta T}{R_T},$$

де P – потужність теплового потоку, Вт.

Тепловий опір тіла визначається за формулою:

$$R_T = \rho_T \frac{h}{S},$$

де ρ_T – питомий тепловий опір, м⁰С/Вт;

h – товщина ізоляції, м;

S – площа поперечного перетину ділянки ізоляції, м².

Хімічна стійкість – характеристика стійкості діелектрика при дії на нього кислоти, лугу, солі та газів.

Радіаційна стійкість – це ступінь збереження електричних, механічних та інших властивостей після дії на матеріали корпускулярних або хвильових радіаційних випромінювань високої енергії, а також природної радіації.

Енергія випромінювання (Вт/кг), попадаючи на поверхню матеріалу, зменшується по мірі проникнення в глибину за законом:

$$P_X = P_0 e^{-\mu x},$$

де P_0 – потужність фізичної дози в повітрі біля поверхні матеріалу;

μ – ефективний коефіцієнт ослаблення випромінювання в матеріалі;

x – глибина.

Ефективний коефіцієнт послаблення для простих речовин визначається за формулою:

$$\mu = K\lambda^2 Z\rho,$$

де K – коефіцієнт пропорційності;

λ – довжина хвилі випромінювання;

ρ – густина;

Z – номер елемента в таблиці Менделєєва.

Радіаційна стійкість враховується при використанні матеріалів в зоні сильної дії випромінювання, а також в умовах природної радіації.

3.1.4. Класифікація діелектриків

Класифікація електроізоляційних матеріалів можлива за різними ознаками (рис. 3.3).

Основними з них являються:

- **за призначенням** діелектрики діляться на діелектричні, ізоляційні, конструкційні, покриттєві та клеючі матеріали;

- **за структурою** діелектрики діляться на аморфні та кристалічні;

- **за ступенем дисоціації** – на гетерополярні та гомеополярні;

- **за агрегатним станом** діелектрики бувають тверді, рідкі та газоподібні;

- **за хімічною природою** діелектрики діляться на органічні (з'єднання вуглецю з водородом, азотом, кислородом та деякими іншими елементами), елементоорганічні (крім перекислених вище елементів містять атоми кремнію, магнію, алюмінію, титану) та неорганічні (представляють собою іонні сполуки);

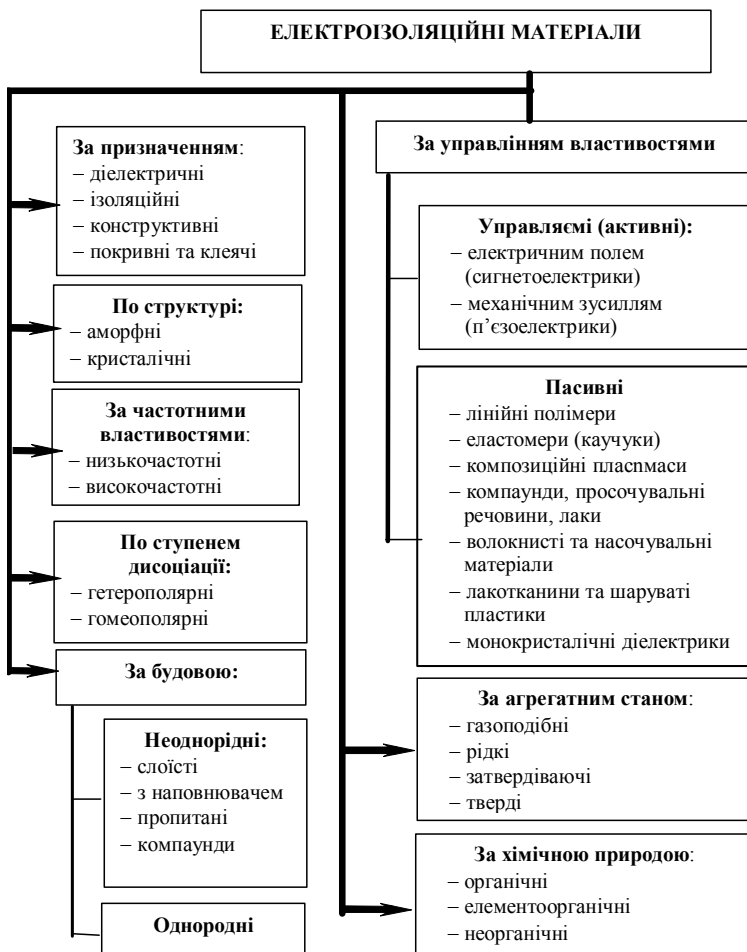


Рис. 3.3. Класифікація діелектриків

- **за ступенем поляризації** діелектрики діляться на полярні, молекули яких завжди мають деякий електричний момент, який відрізняється від нуля, і не полярні, молекули яких отримують “індуктивний” електричний момент тільки при дії зовнішнього електричного поля;

- **за частотними властивостями** – низькочастотні та високочастотні;

- **за будовою діелектрики** бувають однорідні та неоднорідні (слоїсті, із наповнювачем, компаунди);

- **за управлінням властивостями** діелектрики поділяються на активні (управляемі) та пасивні. Активні діелектрики можуть змінювати свої

електричні властивості під дією різних факторів. До них належать: сегнетоелектрики, діелектрична проникність яких сильно змінюється при зміні напруженості електричного поля та температури; п'єзоелектрики, які генерують електричні заряди під дією механічних напруг і, навпаки, змінюють свої розміри під дією електричного поля. Пасивні діелектрики практично не змінюють своїх властивостей під дією різних зовнішніх факторів.

За походженням діелектрики розподіляються на дві великі групи – органічні та неорганічні.

3.2. Органічні діелектрики

До них відносяться речовини, або їх суміші:

- тваринного походження (шовк, віск);
- рослинного походження (папір, гума, каніфоль, мастила, лаки, смоли);
- штучні та синтетичні продукти (полістирол, поліхлорвініл та ін.).

Розглянемо деякі органічні діелектрики.

Папір. Виготовляється шляхом переробки деревини. Застосовується для ізоляції обмоток трансформаторів і дроселів, в конденсаторах, проводів багатожильних кабелів.

Електрокартон (пресшпан). Виготовляється з пресованого паперу, просоченого парафіном або лаком. Застосовується для каркасів трансформаторів та дроселів, котушок реле та ізоляційних прокладок на постійному струмі та низькій частоті.

Лакотканина. Виготовляється з бавовно - паперових, шовкових та скляних тканин, просочених лаком у вигляді полотен. Застосовується для ізоляції навиток трансформаторів та дроселів або виготовлення трубок для ізоляції виводів. Має великі втрати – $tg\delta = 0,1$.

Гетинакс. Це шарувата пластмаса на основі паперу. Виготовляється у вигляді листів. Застосовується як конструкційний матеріал для панелей, планок, прокладок, каркасів котушок індуктивності, дроселів та реле на постійному струмі та низькій частоті.

Текстоліт. Це шарувата пластмаса на основі текстилю. З нього виготовляються кулачки, прокладки, каркаси котушок індуктивності та дроселів.

Склотекстоліт. Це шарувата пластмаса на основі склотекстилю. Має високі діелектричні властивості і застосовується для плат друкованого монтажу і як конструкційний матеріал придатний для роботи на високих частотах.

Ебоніт. Виготовляється з каучуку. Застосовується як конструкційний матеріал на низькій частоті. Його властивості швидко змінюються в часі.

Карболіт. Це пластмаса, яка виготовляється на основі композицій

волокнистих та порошкових органічних речовин на основі смоли. Крихкий. Для роботи на високих частотах непридатний. З нього, наприклад, виготовляється кришка котушки запалювання автодвигуна.

Органічне скло (плексиглас). Це прозорий скловидний полімер деяких речовин. Частіше застосовується для виготовлення шкел, лінз, для засклення вікон наземного, водного та повітряного транспорту. Для ізоляції застосовується рідко. Має низьку температуру плавлення ($-60\dots+100^\circ\text{C}$).

Полістирол. Це прозора скловидна пластмаса. Має високі електроізоляційні властивості. Застосовується для виготовлення каркасів високочастотних контурних котушок, ручок, клавишів. Плівковий полістирол застосовується для ізоляції жил високочастотних кабелів, ізоляційних плат, як діелектрик у конденсаторах, для діелектричних антен, надвисокочастотних хвильоводів, для упаковки продуктів харчування. Недоліком полістиролу є низька теплостійкість ($+60\dots80^\circ\text{C}$).

Поліхлорвініл. Це еластичний матеріал, який виготовляється у вигляді листів, стрічок, трубок. Застосовується для ізоляції монтажних проводів. Має високу електричну міцність, однак низьку термостійкість.

Поліетилен. Це еластичний напівпрозорий матеріал, який має високі електроізоляційні якості, але низьку теплостійкість – до 70°C . Застосовується для каркасів контурних котушок та ізоляції високочастотних кабелів.

Капрон. Це поліамідна смола, яка має високі ізоляційні властивості. З нього виготовляються нитки, плівки, листи, втулки, монтажні планки і т. ін.

Фторопласт. Матеріал білого кольору з високими електроізоляційними та тепловими властивостями, малими втратами (теплостійкість – до 300°C ; $t_{gb} = 0,002$), має велику механічну міцність, не змочується водою, але має невелику діелектричну проникність ε . Застосовується для виготовлення пліткових конденсаторів та як ізолятор у високочастотних кабелях.

3.3. Неорганічні діелектрики

Відрізняються вогнестійкістю, твердістю. До них належать: слюда, кварц, скло, склоемаль, кераміка.

Розглянемо деякі з них.

Слюда. Має найбільшу електричну міцність. Застосовуються два різновиди слюди – мусковіт та флігопіт.

Мусковіт – безколірний та прозорий діелектрик із високими електроізоляційними якостями. Застосовується в конденсаторах для ізоляції електродів всередині електронних ламп у вигляді пластин з отворами крізь які проходять електроди, а також для ізоляції пластин якоря електромоторів.

Флігопіт – малопрозорий, відносно м'який, світло-коричневого, янтарного, золотистого або зеленого кольору. Застосовується для ізоляції в електронагрівальних приладах.

До слюдяних діелектриків відноситься і **мікалекс**, який отримується після спресовування порошку слюди з борною кислотою та суриком. З мікалексу виготовляють ізолятори потужної високочастотної апаратури.

Електричні та фізичні параметри слюди наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Параметр	Мусковіт	Флігопіт
Питома вага	2,3...3	2,78...2,85
Максимальна температура, °С	500...600	900...1000
Діелектрична проникність	6...7	5...6
Діелектричні втрати при $f = 1$ МГц	(0,1...0,3)·10	(1...5)·10
Питомий опір, Ом.м	(0,1...1)·10	(0,1...1)·10

Електрокераміка. Це тверда речовина, яка отримується при термічній обробці суміші різних мінералів, основною складовою яких є природні глинисті речовини (глини, каоліни), а також кварц, польовий шпат, тальк та ін. Електрокераміка є найбільш якісним діелектриком. Вона стійка до впливу вологи та хімічних речовин, має найбільшу теплостійкість. Всі електрокерамічні матеріали розподіляються на ізоляторні, конденсаторні та сегнетокерамічні.

До ізоляторної кераміки відносяться радіофарфор, ультрафарфор.

Радіофарфор та **ультрафарфор** застосовуються для каркасів котушок індуктивності короткохвильового та надкороткохвильового діапазону, ізоляторів, лампових панелей, плат перемикачів, основи недротових резисторів, корпусів інтегральних мікросхем.

Стеатит – радіокераміка, яка застосовується як конструктивний діелектрик. З нього виготовляються, наприклад, осі змінних конденсаторів та ін.

Конденсаторні керамічні матеріали отримуються після термічної обробки двоокису титану (TiO_2), окисей MgO , CuO , ZnO , B_2O . Такі матеріали мають великі значення діелектричної проникності ($\epsilon = 16...250$) та невеликий і негативний її температурний коефіцієнт. До цих матеріалів відносяться **тіконд** та **термоконд**.

З цих матеріалів виготовляють термостабільні та керамічні конденсатори.

Сегнетокераміка має велику діелектричну проникність ($\epsilon = 1000...4500$), яка в області температур нижче точки Кюрі значно залежить від напруженності електричного поля. Крім того, сегнетокерамічні матеріали мають також **п'єзоелектричні** властивості, тому вони входять до групи п'єзоелектричних матеріалів.

3.4. П'єзоелектричні матеріали

П'єзоелектричні матеріали належать до окремої групи діелектриків. Особливістю є наявність в них **п'єзоєфекту**, тобто поява електричних зарядів різних знаків на протилежних боках пластин з п'єзоелектрика, якщо до них прикласти механічні зусилля (прямий п'єзоєфект) або здатності пластини з п'єзоелектрика змінювати свої розміри, якщо до них прикласти електричну напругу (зворотний п'єзоєфект). До п'єзоелектричних матеріалів належать: кварц, турмалін, сегнетова сіль, фосфат амонію, титанат барію.

Кварц – природний кристал, який відрізняється високими механічними та ізоляційними якостями, хімічно сталий, негігроскопічний, високостабільний. Застосовується для стабілізації частоти генераторів та в електричних фільтрах та контурах.

Турмалін – природний кристал, який має більший ніж кварц п'єзоелектричний ефект, негігроскопічний, має невелику температурну залежність, але велику вартість. Застосовується у фільтрах особливо високих частот.

Сегнетова сіль – штучний кристал із дуже великим п'єзоєфектом, але застосування його обмежено через малу механічну міцність, велику гігроскопічність та низьку робочу температуру (до 40...45° С). Застосовується у п'єзозімографіях та звукознімачах.

Фосфат амонію – штучний кристал, який має великий п'єзоєфект та відносно малу гігроскопічність, працює до температури (80...90° С) і має більшу механічну міцність ніж сегнетова сіль. Застосовується в електричних фільтрах, звукознімачах та інших пристроях.

Титанат барію – керамічний п'єзоелектрик, який має великий п'єзоєфект та велику механічну міцність, негігроскопічний, має малу температурну залежність, велику діелектричну проникність (до 3000), яка сильно залежить від напруженості електричного поля та температури. Застосовується у звукознімачах, стабілізаторах напруги, діелектричних підсилювачах та інших пристроях.

Фторопласт. Матеріал білого кольору з високими електроізоляційними та тепловими властивостями, малими втратами (теплостійкість – до +300° С; $tg\delta = 0,002$), має велику механічну міцність, не змочується водою, але має невелику діелектричну проникність ϵ . Застосовується для виготовлення плівкових конденсаторів та як ізолятор у високочастотних кабелях.

3.5. Рідинні кристали

Рідинні кристали (РК) являють собою органічне з'єднання, що знаходиться у стані між твердим (кристалічним) та ізотропно-рідинним. Молекули таких з'єднань мають видовжену форму. Між ними діють бокові та

кінцеві зв'язки. На кінцях молекул знаходяться атоми з великими амплітудами коливань, тому кінцеві зв'язки стають слабкішими за бокові і молекула під впливом електричного або магнітного полів та температури стають спроможними орієнтуватися відповідним чином. Показники заломлення променів світла за напрямками довгих осей молекул та перпендикулярного значно відрізняються. За типом орієнтації молекул, їх структурою, властивостями та застосуванням розрізняють два класи рідинних кристалів: **холестерики** (реагують на температуру) та **нематики** (реагують на електричне поле).

Холестерики мають шарову структуру. В кожному шарі молекули розміщуються паралельно одна одній, але повернуті відносно молекул попереднього шару. Ця структура розкладає світло, що падає, у спектр кольорів, як дифракційна решітка. Для кожної температури під відповідним кутом видно свій колір. Із зміною температури, змінюється кут орієнтації молекул та колір світіння. Ця властивість холестериків, дозволяє застосувати їх для вимірювання температури, тиску і т. ін.

Нематики мають впорядковану структуру орієнтації молекул. Вона порушується під дією електричного поля через виникнення мікроскопічних вихорів, що руйнують прозорість кристалу. Цей ефект застосовують в індикаторах на рідинних кристалах.

Рідинно-кристалічні індикатори (РКІ) відносяться до пасивних індикаторів. Самі РКІ світло не випромінюють, тому для їх роботи необхідно мати джерело прохідного, або відбитого світла. Конструктивно РКІ складається з двох прозорих скляних пластин 1, 2 (рис. 3.4) на внутрішній поверхні яких наносяться електроди 3, 4 (прозорі електропровідні плівки). Рідинний кристал 2 розміщується між електродами. На верхній скляній пластинці розміщені електроди (сегменти) бажаної форми, на які подається напруга управління. Відстань між електродами – 5...20 мкм. Іноді між пластинками розміщують два поляризатори.

Індикатор, який працює у відбитому світлі, має нижній електрод 4 із великим коефіцієнтом відбиття (рис. 3.4а). Джерелом світла є природне освітлення. Чим воно більше, тим світіння яскравіше.

В умовах низького освітлення застосовуються РКІ, які працюють у прохідному світлі (рис. 3.4б) і мають прозорі електроди. Під нижньою скляною пластиною розміщені джерело світла 5 та матово - чорний екран 6 як джерело світла застосовуються лампи розжарювання потужністю біля 0,5 Вт. Колір та яскравість світіння індикатора залежить від кольору та яскравості джерела світла. При подачі напруги на електроди прозорість РКІ під ними порушується і в прохідному світлі відображається необхідний знак.

Електрооптичні ефекти в рідинних кристалах пов'язані з рухом речовини – **динамічне розсіяння (ДР)**, з поворотом молекул в електричному полі – **твіст - ефектом (ТЕ)** і ефектом **гість – хазяїн (ГХ)** а також з визначенням

напруженості електричного поля.

У РКІ, робота якого базується на динамічному розсіюванні, при електричному полі, напруженістю біля 5 кВ/см (приблизно 30 В), в рідинно-кристалічній плівці молекули переорієнтуються, виникає турбулентність та сильне оптичне розсіювання. Прозора речовина при відсутності поля стає непрозорою. У такому РКІ, який працює на відбиття, нижній електрод є дзеркалом, на поверхні якого при подачі напруги з'являються ділянки молочно-білого кольору, що за формою відповідають конфігурації верхнього електрода.

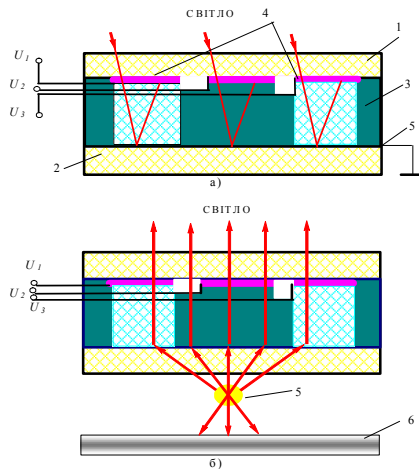


Рис. 3.4. Конструкції РКІ
а) – для відбитого світла; б) – для прохідного світла

РКІ на базі ТЕ виготовляються як на відбиття, так і на прохід. У РКІ, які працюють на відбиття, між скляними пластинами розміщують два взаємоперпендикулярних поляризатори, які повертають площину поляризації світла на кут 90° . На кут 90° повертає площину поляризації світла і рідинний кристал (РК), який знаходиться між пластинами. У результаті світло, проходячи крізь РК, відбивається від нижчої пластини, а на екрані індикатора бачимо сірий фон. З подачею напруги управління на електроди виникає електричне поле, яке змінює на кут 90° орієнтацію молекул, а значить і площину поляризації. Це веде до затемнення ділянок РК, на які діє електричне поле. На екрані індикатора відображаються темні знаки на сірому фоні.

У РКІ, на базі ТЕ які працюють на прохід, поляризатори встановлені так, щоб їх площини поляризації були взаємопаралельні. Індикатор не пропускає світло при відсутності електричного поля і пропускає при його

появі.

Твіст - ефект широко застосовується в одиноких, буквено - цифрових та матричних індикаторах там, де енергоспоживання є вирішальним: в електронних наручних годинниках, мікрокалькуляторах з автономним живленням, в портативних багатофункціональних вимірювальних приладах, для переносних радіоприймачів, магнітофонів і т. ін. Такі індикатори працюють на частотах 1...10кГц при низькій напрузі (одиниці вольт) управління.

У РКІ на базі ефекту ГХ у рідинно-кристалічній речовині (“хазяїн”) розчинено фарбник (“гість”). Рідинний кристал взаємодіє з молекулами фарбника. При відсутності електричного поля рідинно-кристалічний “хазяїн” завдяки поглинання світлової енергії набуває характерного для фарбника “гостя” забарвлення. Під дією електричного поля рідинний кристал стає безколірним. Застосовуються і такі речовини “гостя” та “хазяїна”, в яких забарвлення відбувається під дією електричного поля. Такі індикатори ефективно працюють в умовах великого освітлення. Колір зображення може бути будь-який. Для збудження РКІ напруженість поля, у якому розміщена рідинно-кристалічна речовина, повинна бути вища за критичну. При цьому відбувається розкручування спіральної структури речовини, крок спіралі прямує до нескінченності, молекули шикуються вздовж лінії міцності, з'являється прозорість.

Критична напруженість поля відповідає пороговій напрузі:

$$U_{\text{пор}} = \pi \sqrt{\frac{4\pi k}{\epsilon}},$$

де k – модуль пружності рідинного кристалу,

ϵ – модуль діелектричної сталості.

У РКІ з великою кількістю елементів відображення, кожний з них має свій вивід. При великій кількості елементів вони об'єднуються в ряди та стовпці (матричні РКІ). У кожного елемента матриці один вивід з'єднують з шиною рядків, другий – із шиною стовпців.

До **електричних характеристик** РКІ відносять залежність струму споживання $I_{\text{сп}}$ від напруги управління U_y , її частоти f , температури T , а також залежність коефіцієнта контрасту K від U_y :

$$I_{\text{сп}} = f(U_y), \quad K = f(U_y), \quad I = f(T), \quad I = I(f).$$

Вони дозволяють вибрати необхідний режим роботи індикатора.

До основних, **електричних параметрів** РКІ відносять:

- напругу живлення $U_{\text{дж}}$;
- коефіцієнт контрасту K ;
- напругу управління $U_y = 4 \dots 30 \text{ В}$;
- частоту напруги управління f ;

- час включення $t_{\text{вкл}} = 150 \dots 800 \text{ мс}$;
- час виключення $t_{\text{викл}}$;
- струм споживання $I_{\text{сп}}$ – до 1 мА ;
- порогову напругу $U_{\text{пор}}$;
- термін служби – до 50 тис. год

Час включення знаходиться як час, протягом якого контрастність досягає 90% сталого значення, а час виключення – як час зменшення контрастності від 90% до 100% сталого значення. Час включення обернено пропорційний квадрату товщини шару рідинних кристалів. Для скорочення часу вимкнення через кілька мілісекунд після зняття напруги управління подається короткий імпульс відносно великої амплітуди. При цьому прискорюється процес нейтралізації іонів, накопичених у рідинному кристалі за час дії імпульсу управління, дипольні моменти молекул РК орієнтуються паралельно вектору напруженості електричного поля, розсіяння світла швидко закінчується. Другим засобом зменшення часу вимкнення є подача змінної напруги з частотою $10 \dots 40 \text{ кГц}$ за кілька мілісекунд після зняття напруги управління. При цьому час вимкнення скорочується до 10 мс .

Термін служби РКІ – обмежений тим що з часом погіршується контраст між активними та пасивними зонами, порушується орієнтація молекул, зростає час перемикання. Швидкість деградаційних процесів пов'язана з наявністю постійної складової напруги збудження, яка призводить до електролізу РК, завдяки чому виділяється газ і утворюються бульбашки. Електроди поступово втрачають свою прозорість, а сегменти свою видимість у відсутності напруги збудження. Порушується герметичність, зростає струм споживання.

До **переваг РКІ** відносять: невелику напругу живлення, низьке енергоспоживання (одиниці мкВт/см^2), безкордонність розмірів знаків та інформаційного поля, наявність ефективної індикації в умовах великого зовнішнього освітлення, а також можливість конструктивно-технологічного сполучення з інтегральними схемами управління, просте виготовлення, плоска форма, велика тривалість безперервної роботи.

Недоліками РКІ є: невеликі яскравість та швидкодія, малий коефіцієнт мультиплексування, обмеженість температурного діапазону, необхідність підсвітлювання.

Контрольні питання для самоперевірки

1. Які матеріали відносяться до діелектриків?
2. Якими основними параметрами характеризуються діелектричні матеріали?
3. Які види поляризації виникають у діелектрику при дії на нього зовнішнього електричного поля?
4. Чим зумовлені діелектричні втрати в ізоляційних матеріалах?
5. Якими основними експлуатаційними якостями характеризуються діелектрики?
6. Як класифікуються діелектричні матеріали?
7. Які матеріали відносяться до органічних діелектриків?
8. Які матеріали відносяться до неорганічних діелектриків?
9. Що представляють собою рідинно-кристалічні індикатори? Їх недоліки та переваги.

РОЗДІЛ IV

НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

4.1. Загальні відомості про напівпровідники

До напівпровідників відносяться речовини, які за електричними властивостями займають проміжне місце між провідниками і діелектриками.

Питома електропровідність напівпровідників $\sigma = 10^2 \dots 10^8$ См/м (у діелектриків $\sigma < 10^{-12}$ См/м, у металів $\sigma = 10^3 \dots 10^4$ См/м).

Другою характерною прикметою напівпровідників є сильна залежність їх електропровідності від температури, концентрації домішок, від впливу світлового та іонізуючого випромінювання, а також від інших енергетичних впливів. Відзначні ознаки напівпровідників порівняно з провідниками і діелектриками зумовлені відмінністю в механізмі їх електричної провідності.

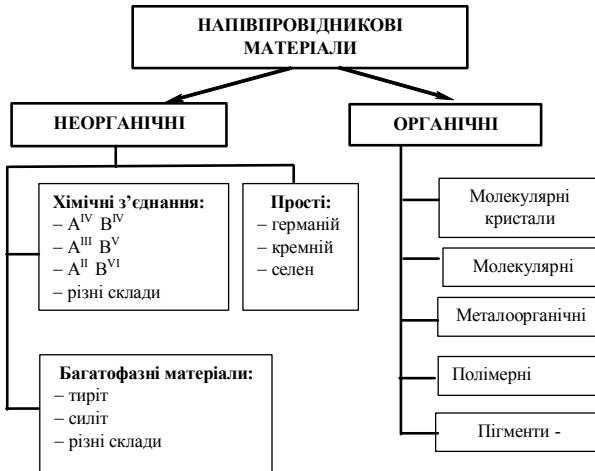


Рис. 4.1. Класифікація напівпровідникових матеріалів

Відомо, що електропровідність металів, які є добрими провідниками електричного струму, зумовлена валентними електронами, які обертаються навколо ядер на зовнішніх оболонках. Внаслідок значного перекриття зовнішніх оболонок сусідніх атомів металу ці атоми можуть вільно обмінюватися валентними електронами. Іншими словами, в металах валентні електрони можуть вільно переміщуватися між атомами. Такі електрони називають **вільними**.

В створенні електричного струму можуть приймати участь лише рухомі носії електричних зарядів. Тому електропровідність речовини тим більша,

чим більше в одиниці об'єму цієї речовини знаходиться рухомих носіїв електричних зарядів. В металах практично всі валентні електрони (які є носіями елементарного негативного заряду) являються вільними, що і забезпечує високу електропровідність металів.

Більшість напівпровідників, які широко використовуються в радіоелектроніці, відносяться до кристалічних тіл, атоми яких утворюють просторову решітку. Взаємне притягання атомів, що утворюють кристалічну решітку, здійснюється за рахунок ковалентного зв'язку, тобто загальної пари валентних електронів, які обертаються на одній орбіті навколо цих атомів. Згідно принципу Паулі загальну орбіту можуть мати лише два електрони з різними спінами і тому число ковалентних зв'язків атома визначається його валентністю.

Кожній орбіті відповідає своя енергія електрона. Електрон в атомі має лише деякі цілком визначені значення енергії, які створюють сукупність дискретних рівнів енергії атома.

В процесі створення кристалічної решітки між атомами виникає сильна взаємодія, яка приводить до розщеплення енергетичних рівнів, зайнятих електронами атомів.

Сукупність енергетичних рівнів, які виникають при зближенні атомів, називається **енергетичною зоною**. Кожна зона має N підрівнів, тобто кількість підрівнів визначається числом взаємодіючих атомів. Дозволені енергетичні зони відділені одна від одної **забороненими зонами**. Заборонені зони об'єднують рівні енергії, які не можуть приймати електрони атомів даної речовини.

Оскільки ширина дозволених зон в твердому тілі не перевищує декілька електрон-вольт (eV), а в 1 см^3 знаходиться до 10^{22} атомів, то різниця між рівнями складає 10 eV. Таким чином, в межах дозволеної зони можна одержати практично безперервний спектр енергетичних рівнів.

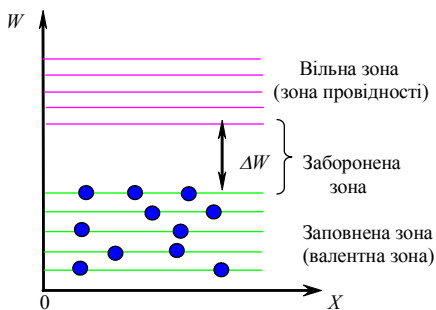


Рис. 4.2. Зонна структура кристалу

Верхня дозволена зона, в якій при абсолютному нулі температури всі енергетичні рівні зайняті, називається **заповненою** або **валентною зоною**. Дозволена зона, в якій при $T = 0 \text{ К}$ електрони відсутні, називається **вільною зоною** (рис. 4.2).

Ширина забороненої зони являється важливим параметром, який визначає властивості твердого тіла. Речовини, в яких ширина

забороненої зони $\Delta W \leq 3 \text{ eV}$, відносяться до напівпровідників, а в яких $\Delta W > 3 \text{ eV}$ – до діелектриків. У металів заборонена зона відсутня.

4.1.1. Напівпровідники з власною електропровідністю

В сучасній напівпровідниковій електроніці широке розповсюдження одержали германій *Ge* і кремній *Si* – елементи четвертої групи періодичної системи. При кімнатній температурі частина електронів набуває енергію, достатню для розриву ковалентного зв'язку (рис. 4.3а). При цьому в валентній зоні з'являється вільний енергетичний рівень (рис. 4.3б). Звільнення електрона з ковалентного зв'язку супроводжується появою в системі двох електронно-зв'язаних атомів одиничного позитивного заряду, який одержав назву **дірки**.

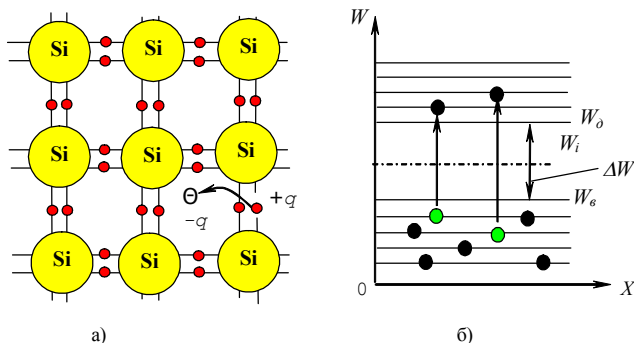


Рис. 4.3. Схема кристалічної решітки та енергетична діаграма напівпровідника з власною електропровідністю

Розрив ковалентного зв'язку на енергетичній діаграмі характеризується появою в валентній зоні вільного енергетичного рівня (див. рис. 4.3б). На цей вільний енергетичний рівень може перейти електрон з сусіднього ковалентного зв'язку. При такому переміщенні перший вільний енергетичний рівень заповнюється, але з'являється інший енергетичний рівень, тобто заповнення дірки електронем з сусіднього ковалентного зв'язку можна представити як переміщення дірки. Таким чином, дірку можна вважати рухомих вільних носієм елементарного позитивного заряду. Процес створення пар "електрон – дірка" називають **генерацією** вільних носіїв заряду. Очевидно, що кількість їх тим більша, чим вище температура і менша ширина забороненої зони.

Водночас з процесом генерації відбувається процес рекомбінації носіїв, при якому електрон відновлює ковалентний зв'язок. При тепловій рівновазі процеси генерації і рекомбінації носіїв заряду компенсують один одного. При даній температурі установлюється визначена концентрація електронів в зоні провідності і рівна їй концентрація дірок в валентній зоні.

З курсу фізики відомо, що

$$n_i = A_n \exp \frac{W_\Phi - W_D}{k T} \quad \text{та} \quad p_i = A_p \exp \frac{W_B - W_\Phi}{k T}, \quad (4.1)$$

де W_D – енергія, відповідна "дну" зони провідності;

W_B – енергія, відповідна "стелі" валентної зони;

A_p, A_n – коефіцієнти пропорціональності;

W_Φ – рівень Фермі, відповідний рівню енергії, імовірність появи електрона на якому дорівнює 0,5;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура.

Можна вважати, що в хімічно чистих напівпровідниках рівень Фермі співпадає з серединою забороненої зони W_i , а також $A_n = A_p = A$. Тоді можна записати:

$$p_i = n_i = A \exp \left(\frac{\Delta W}{2k T} \right). \quad (4.2)$$

З виразу (4.2) видно, що в чистому напівпровіднику концентрації носіїв заряду залежать від ширини забороненої зони і при підвищенні температури зростають приблизно за експоненціальним законом (температурні зміни A відіграють незначну роль).

4.1.2. Напівпровідник з електронною електропровідністю

При введенні в чотиривалентний напівпровідник домішкових п'ятивалентних атомів (фосфору P , сурми Sb), атоми домішок заміщують основні атоми в вузлах кристалічної решітки (рис. 4.4а). Чотири електрони атома домішки вступають в зв'язок з чотирима валентними електронами сусідніх атомів основного напівпровідника. П'ятий валентний електрон виявляється майже не зв'язаним зі своїм атомом і при одержанні додаткової незначної енергії, яка зветься **енергією активації**, відривається від атома і стає вільним. Домішки, які збільшують число вільних електронів, називають **донорними** або просто **донорами**. Енергія активації донора ΔW_D значно менша енергії, яка відповідає ширині забороненої зони, і тому енергетичні рівні електронів донорів повинні розміщуватися в забороненій зоні близько "дна" зони провідності (див. рис. 4.4б).

Атоми п'ятивалентних домішок, які "загубили" по одному електрону, перетворюються в позитивні іони. На відміну від дірок позитивні іони міцно зв'язані з кристалічною решіткою основного напівпровідника, є нерухомими позитивними зарядами і тому не можуть приймати безпосередньої участі в створенні електричного струму в напівпровіднику.

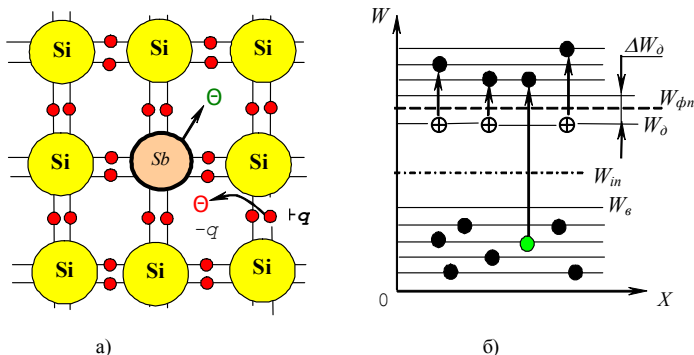


Рис. 4.4. Схема кристалічної решітки та енергетична діаграма напівпровідника з електронною електропровідністю

Незначна енергія активації домішок ΔW , яка дорівнює 0,16 eВ для кремнію і 0,01...0,13 eВ для германію, вже при кімнатній температурі приводить до повної іонізації п'ятивалентних атомів домішок і появи в зоні провідності вільних електронів.

Оскільки в цьому випадку поява вільних електронів не супроводжується одночасним збільшенням дірок в валентній зоні, то в такому напівпровіднику концентрація електронів виявляється значно вищою концентрації дірок. Дірки в такому напівпровіднику утворюються лише в результаті розриву ковалентних зв'язків між атомами основної речовини.

Напівпровідники, в яких концентрація вільних електронів в зоні провідності перевищує концентрацію дірок в валентній зоні, називаються напівпровідниками з електронною електропровідністю або **напівпровідниками n-типу**.

Рухомі носії заряду, яких в напівпровіднику більшість, називають **основними**. Відповідні ті носії, яких в напівпровіднику менше, називають **неосновними** для даного типу напівпровідника. В напівпровіднику n-типу основними носіями заряду є електрони, а неосновними – дірки. В стані теплової рівноваги в такому напівпровіднику концентрації вільних електронів (n_{n_0}) і дірок (p_{p_0}) визначаються співвідношеннями:

$$n_{n_0} = A_n \exp \frac{W_{\phi n} - W_D}{k T}; \quad (4.3)$$

$$p_{p_0} = A_n \exp \frac{W_B - W_{\phi n}}{k T}. \quad (4.4)$$

Маючи на увазі співвідношення (4.1), ці вирази можна представити в такому вигляді:

$$n_{n_0} = n_i \exp \frac{W_{\phi n} - W_{in}}{k T}; \quad (4.5)$$

$$p_{n_0} = n_i \exp \frac{W_{in} - W_{\phi n}}{k T}. \quad (4.6)$$

Якщо вважати, що при кімнатній температурі всі атоми донорних домішок іонізовані ($n_{n_0} = N_D$; $p_{n_0} \approx 0$), то на основі виразу (4.5) можна записати:

$$W_{\phi n} = W_{in} + k T \ln \frac{N_D}{n_i}, \quad (4.7)$$

де N_D – концентрація донорних атомів в напівпровіднику.

Із співвідношення (4.7) видно, що в напівпровіднику n -типу рівень Фермі розміщується в верхній половині забороненої зони і тим ближче до зони провідності, чим більша концентрація донорів. При збільшенні температури рівень Фермі зміщується до середини забороненої зони за рахунок іонізації основних атомів напівпровідника.

4.1.3. Напівпровідники з дірковою електропровідністю

Якщо в кристалі чотирьохвалентного елемента частина атомів заміщена атомами трьохвалентного елемента (галія Ga , індій In), то для створення чотирьох ковалентних зв'язків у домішкового атома не вистачає одного електрона (рис. 4.5, а). Цей електрон можна одержати від атома основного елемента напівпровідника за рахунок розриву ковалентного зв'язку. Розрив зв'язку веде до появи дірки, тому що супроводжується створенням вільного рівня в валентній зоні. Домішки, які захоплюють електрони з валентної зони, називають **акцепторними** або **акцепторами**. Енергія активації акцепторів ΔW_A складає для германія 0,01...0,012 еВ і для кремнію 0,04...0,16 еВ, що значно менше ширини забороненої зони бездомішкового напівпровідника. Саме тому енергетичні рівні домішкових атомів розміщуються поблизу валентної зони (рис. 4.5 б).

Завдяки малому значенню енергії активації акцепторів вже при кімнатній температурі електрони з валентної зони переходять на рівні акцепторів. Ці електрони, перетворюючи домішкові атоми в негативні іони, втрачають свою здатність переміщуватися по кристалічній решітці і не можуть брати участь у створенні електричного струму.

За рахунок іонізації атомів початкового матеріалу з валентної зони частина електронів потрапляє в зону провідності. Проте електронів в зоні провідності значно менше, ніж дірок у валентній зоні.

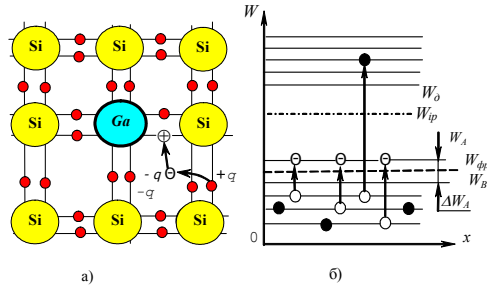


Рис. 4.5. Схема кристалічної решітки та енергетична діаграма напівпровідника з дірковою електропровідністю

Тому дірки в таких напівпровідниках є **основними**, а електрони – **неосновними рухомими носіями заряду**. Такі напівпровідники носять назву **напівпровідників із дірковою електропровідністю** або **напівпровідників p -типу**. В стані теплової рівноваги концентрація дірок в напівпровіднику p -типу p_{p_0} і вільних електронів n_{p_0} визначається з співвідношень:

$$p_{p_0} = n_i \exp \frac{W_{ip} - W_{\Phi p}}{k T}; \quad (4.8)$$

$$n_{p_0} = n_i \exp \frac{W_{\Phi p} - W_{ip}}{k T}. \quad (4.9)$$

Якщо вважати, що при кімнатній температурі всі акцепторні атоми іонізовані, тобто $p_{p_0} = N_A$, $n_{p_0} \approx 0$, то на основі виразу (4.8) можна записати:

$$W_{\Phi p} = W_{ip} - kT \ln \frac{N_A}{n_i}, \quad (4.10)$$

де N_A – концентрація акцепторних атомів у напівпровіднику.

Співвідношення (4.10) показує, що рівень Ферма у напівпровіднику p -типу розміщується в нижній половині забороненої зони, тому що $N_A \gg n_i$, і при підвищенні температури зміщується до середини забороненої зони за рахунок іонізації атомів основного напівпровідника.

Крім того, на основі рівнянь (4.5) – (4.9) можна записати таке важливе співвідношення:

$$n_{p_0} p_{p_0} = p_{p_0} n_{p_0} = n_i^2, \quad (4.11)$$

яке свідчить, що введення в напівпровідник домішок веде до збільшення концентрації одних носіїв заряду і пропорційного зменшення концентрації інших носіїв заряду за рахунок збільшення імовірності їх рекомбінації.

4.2. Струми в напівпровідниках. Дрейфовий струм

В напівпровідниках вільні електрони і дірки знаходяться в стані хаотичного руху. Тому, якщо вибрати довільний переріз у середині об'єму напівпровідника і підрахувати число носіїв заряду, які проходять через цей переріз за одиницю часу зліва направо і справа наліво, то значення цих чисел виявляються однаковими. Це означає, що електричний струм у цьому об'ємі напівпровідника відсутній.

Якщо напівпровідник внести в електричне поле з напруженістю E , то на хаотичний рух носіїв заряду накладається складова направленого руху. Направлений рух носіїв заряду в електричному полі зумовлює появу струму, який називається **дрейфовим**. Внаслідок зіткнення носіїв заряду з атомами кристалічної решітки їх рух у напрямі дії електричного поля має переривчастий характер і характеризується **рухомістю** μ . Рухомість дорівнює середній швидкості (\bar{v}), яку набувають носії заряду в напрямі дії електричного поля з напруженістю $E = 1$ В/м, тобто $\mu = \frac{\bar{v}}{E}$.

Рухомість носіїв заряду залежить від механізму їх розсіювання в кристалічній решітці. Дослідження показують, що рухомість електронів μ_n і дірок μ_p різні ($\mu_n > \mu_p$) і залежить від температури і концентрації домішок. Збільшення температури приводить до зменшення рухомості, що зумовлено зростанням числа зіткнень носіїв заряду в одиницю часу.

Густина струму в напівпровіднику, зумовленого дрейфом вільних електронів під дією зовнішнього електричного поля із середньою швидкістю \bar{v}_n , визначається виразом $j_n = qn\bar{v}_n$.

Переміщення (дрейф) дірок в валентній зоні із середньою швидкістю \bar{v}_p створює в напівпровіднику дірковий струм, густина якого визначається виразом $j_p = qp\bar{v}_p$.

Отже, повна густина струму в напівпровіднику включає в себе електронну j_n і діркову j_p складові і дорівнює їх сумі:

$$j = j_n + j_p = q(n\bar{v}_n + p\bar{v}_p), \quad (4.12)$$

де n і p відповідно концентрації електронів і дірок.

При підстановці у вираз для густини струму значення середньої швидкості електронів і дірок (4.12) маємо:

$$j = q(n\mu_n + p\mu_p)E. \quad (4.13)$$

Вираз (1.13) є не що інше, як закон Ома, записаний у диференціальній формі:

$$j = \sigma E. \quad (4.14)$$

Порівняння двох останніх виразів свідчить, що питома електропровідність напівпровідника визначається співвідношеннями $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) = \sigma_n + \sigma_p$.

В напівпровіднику з власною електропровідністю концентрація електронів дорівнює концентрації дірок ($n_i = p_i$) і його питома електропровідність визначається виразом $\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p) = qp_i(\mu_n + \mu_p)$.

В напівпровіднику n -типу $n_{n_0} \gg p_{n_0}$ і його питома електропровідність із достатнім ступенем точності може бути визначена виразом $\sigma \approx \sigma_n = q\mu_n n_{n_0}$.

В напівпровіднику p -типу $p_{p_0} \gg n_{p_0}$, і питома електропровідність такого напівпровідника дорівнює $\sigma \approx \sigma_p = q\mu_p p_{p_0}$.

В області високих температур концентрація електронів і дірок значно збільшується внаслідок розриву ковалентних зв'язків і, незважаючи на зменшення їх рухомості, електропровідність напівпровідника зростає по експоненціальному закону.

Дифузійний струм.

Причиною спрямованого руху носіїв заряду крім електричного поля може бути нерівномірність їх концентрація.

Нехай у напівпровіднику концентрації електронів $n(x)$ і дірок $p(x)$ є функціями координати x . Це приводить до дифузійного руху дірок і електронів із області з більшою їх концентрацією в область з меншою концентрацією.

Дифузійний рух носіїв заряду зумовлює протікання дифузійного струму електронів і дірок, густини яких визначаються співвідношеннями:

$$j_n = qD_n \frac{dn(x)}{dx}; \quad (4.15)$$

$$j_p = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}, \quad (4.16)$$

де $\frac{dn(x)}{dx}$ та $\frac{dp(x)}{dx}$ – градієнти концентрацій електронів і дірок відповідно;

D_n і D_p – коефіцієнти дифузії електронів і дірок відповідно.

Градієнт концентрації характеризує ступінь нерівномірності розподілу носіїв заряду (електронів і дірок) в напівпровіднику вздовж якого-небудь вибраного напрямку (в даному випадку вздовж осі x). Коефіцієнти дифузії показують число носіїв заряду, що перетинають в одиницю часу одиничну площадку, перпендикулярну вибраному напрямку, при величині градієнта

концентрації в цьому напрямку, яка дорівнює одиниці. Коефіцієнти дифузії зв'язані з рухомістю носіїв заряду співвідношеннями Ейнштейна:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n, \quad D_p = \frac{kT}{q} \mu_p. \quad (4.17)$$

Знак "мінус" в виразі (4.16) означає протилежне направлення електричних струмів в напівпровіднику при дифузійному русі електронів і дірок в сторону зменшення їх концентрацій.

Якщо в напівпровіднику існують і електричне поле, і градієнт концентрації носіїв, то струм, що протікає, буде мати дрейфову та дифузійну складові. В такому разі густини струмів розраховуються за такими виразами:

$$j_n = q_n \mu_n E + q D_n \frac{dn(x)}{dx}, \quad (4.18)$$

$$j_p = q_p \mu_p E - q D_p \frac{dp(x)}{dx}. \quad (4.19)$$

4.3. Рекомбінація носіїв заряду та час їх життя

Як відомо, в напівпровіднику внаслідок теплового збудження електронів здійснюється генерація пар "електрон – дірка" та іонізація атомів домішки, які приводять до збагачення напівпровідника рухомими носіями заряду. Поряд з процесом генерації носіїв заряду в напівпровіднику існує і зворотний процес – **рекомбінація**, зв'язаний з переходом електрона з зони провідності в валентну зону і який приводить до зникнення двох рухомих носіїв заряду – електрона і дірки. В стані термодинамічної рівноваги відбувається безперервний обмін електронами між рівнями валентної зони, зони провідності і домішковими рівнями. При цьому установлюється концентрація носіїв заряду, яка називається **рівноважною**.

Крім теплового збудження, яке приводить до виникнення рівноважної концентрації зарядів, рівномірно розподілених за об'ємом напівпровідника, збагачення напівпровідника електронами і дірками може здійснюватися його освітлюванням, опромінюванням потоком заряджених частинок, введенням їх через контакт (інжекцією) і таке інше.

Енергія збудника в цьому випадку передається безпосередньо носіями заряду і теплова енергія кристалічної решітки залишається практично незмінною. Отже, надмірні носії заряду не знаходяться в тепловій рівновазі з решіткою і тому називаються **нерівноважними**. На відміну від рівноважних вони можуть нерівномірно розподілятися по об'єму напівпровідника.

Після закінчення дії збудника за рахунок рекомбінації електронів і дірок концентрація надмірних носіїв швидко спадає і досягає рівноважної величини.

Механізми рекомбінації, які приводять до відновлення порушеної термодинамічної рівноваги, можуть бути розділені на три основних типи: пряма рекомбінація, рекомбінація через центри захоплення, поверхнева рекомбінація.

Пряма рекомбінація здійснюється шляхом переходу електрона з зони провідності на вільний рівень (дірку) валентної зони (рис. 4.6а). В цьому випадку енергія, яка звільнюється, дорівнює ΔW , або виділяється у вигляді кванта електромагнітної енергії (фотона), або перетворюється в енергію теплових коливань решітки (фотони). Згідно з цим рекомбінація називається **випромінюючою** або **невипромінюючою**.

Рекомбінація через центри захвату полягає в наступному. В забороненій зоні напівпровідників можуть з'являтися локальні енергетичні рівні, які утворюються домішковими атомами і різними дефектами кристалічної решітки.

Локальні рівні можуть бути глибокими (розміщуються близько середини забороненої зони) і мілкими (розміщуються близько межі валентної зони або зони провідності).

На локальний рівень з зони провідності може переходити електрон. Цей електрон може або повернутися в зону провідності, або перейти в валентну зону. Останню подію можна розглядати як захоплення дірки заповненим локальним рівнем, тобто як рекомбінацію електрона і дірки (рис. 4.6б).

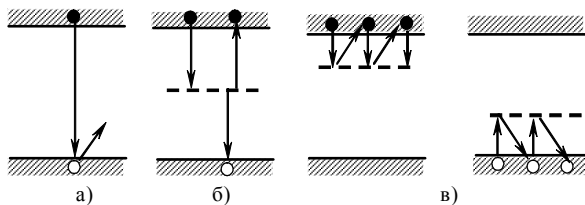


Рис. 4.6. Пояснення рекомбінації носіїв зарядів

Очевидно, що повернення електрона в зону провідності ніякого значення в процесі рекомбінації не має. Захват заповненим локальним рівнем дірки приводить до рекомбінації через центр захвату. Імовірність зустрічі дірки з "нерухомим" електроном, розташованим на глибинному локальному рівні, значно вища імовірності зустрічі її з рухомим електроном. Саме тому глибинний локальний рівень є ефективним центром рекомбінації.

Якщо локальний рівень розміщується поблизу зони провідності, то імовірність перекинення електрона, захопленого локальним рівнем, в зону провідності значно перевищує імовірність захоплення дірки, отже, такі рівні не впливають на процеси рекомбінації. Аналогічні явища спостерігаються в

відношенні дірок на локальних рівнях, розміщених поблизу "стелі" валентної зони (рис. 4.6, в). Такі локальні рівні називають **центрами прилипання**.

Поверхнева рекомбінація зумовлена появою в напівпровіднику додаткових "пасток" внаслідок осадження на його поверхні сторонніх молекул і механічного оброблення поверхні (шліфування, полірування та ін.). Дія таких "пасток" подібна дії розглянутих вище центрів захвату, які приводять до рекомбінації електронно-діркових пар.

При виникненні надмірної концентрації носіїв зарядів в напівпровіднику змінюється концентрація як основних, так і неосновних носіїв зарядів. Зміну концентрації основних носіїв контролювати важко, тому що надмірна концентрація, яка виникла, складає дуже малий відсоток високої рівноважної концентрації основних носіїв. Концентрація неосновних носіїв зарядів в напівпровіднику значно менша концентрації основних носіїв і тому надмірна концентрація неосновних носіїв, яка виникла, значно більше впливає на зміну концентрації цих носіїв.

Якщо надмірна концентрація носіїв мала порівняно з їх рівноважною концентрацією, то можна вважати, що швидкість рекомбінації в об'ємі напівпровідника надмірних нерівноважних носіїв (наприклад, дірок в напівпровіднику n -типу) пропорційна надмірній концентрації цих носіїв, тобто

$$\frac{d(p_n - p_{n_0})}{dt} = -a(p_n - p_{n_0})$$

або

$$d(p_n - p_{n_0}) = -a(p_n - p_{n_0})dt, \quad (4.20)$$

де p_n – нерівноважна концентрація дірок в напівпровіднику n -типу;

a – коефіцієнт пропорціональності, який залежить від типу напівпровідника.

Знак "мінус" в виразі (4.20) вказує на зменшення надмірної концентрації з часом.

Інтегрування виразу (4.20) приводить до рівняння:

$$\ln(p_n - p_{n_0}) = -at + C.$$

Якщо в момент припинення дії джерела збудження ($t = 0$) нерівноважна концентрація досягла деякого значення, то постійна інтегрування $C = \ln(p_{n_1} - p_{n_0})$. Отже, закон зміни концентрації нерівноважних носіїв має вигляд:

$$p_n - p_{n_0} = (p_{n_1} - p_{n_0}) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right), \quad (4.21)$$

де $\tau_p = 1/a$ – час життя нерівноважних дірок.

З виразу (4.21) видно, що за час існування концентрація нерівноважних носіїв зменшується в e раз.

Співвідношення (4.21) дозволяє визначити швидкість рекомбінації нерівноважних носіїв в об'ємі напівпровідника:

$$\frac{dp_n}{dt} = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}. \quad (4.22)$$

Аналогічно для нерівноважних електронів можна визначити швидкість рекомбінації в напівпровіднику p -типу:

$$\frac{dn_p}{dt} = -\frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}, \quad (4.23)$$

де τ_n – час існування нерівноважних електронів.

4.4. Рівняння неперервності

В елементарному об'ємі кристала концентрація носіїв заряду визначається швидкістю їх втікання і витікання з об'єму під дією електричного поля і дифузії.

Розглянемо одномірний випадок (рис. 4.7), коли в напівпровіднику p -типу існує позитивний градієнт концентрації електронів, тобто $\frac{dn_p(x)}{dx} > 0$, і діє електричне поле E в напрямку x .

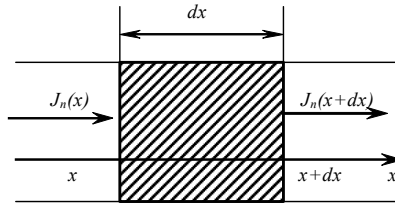


Рис. 4.7. До виводу рівняння неперервності

Виділимо в напівпровіднику елементарний об'єм dx з площею поперечного перерізу в 1 см^2 . Позначимо потік електронів, що втікають в об'єм через $J_n(x)$, а що витікають – через $J_n(x+dx)$. Концентрація електронів в цьому об'ємі в момент часу t дорівнює $n_p(x,t)$, а в момент часу $t + dt$ дорівнює $n_p(x, t + dt)$.

Тоді повна зміна числа електронів в об'ємі dx за час dt буде дорівнювати:

$$n_p(x, t + dt) - n_p(x, t) = \frac{dn_p}{dt} dt \cdot dx. \quad (4.24)$$

Якщо вважати, що генерація носіїв заряду в об'ємі, яка зумовлена зовнішніми причинами, відсутня, то зміна числа електронів в цьому об'ємі зумовлена рекомбінацією носіїв заряду і різницею кількості електронів, що втікають і витікають з об'єму за рахунок дифузії і дрейфу.

Внаслідок рекомбінації, згідно рівнянню (4.23) концентрація електронів за час dt зменшується на величину $-\frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} dt \cdot dx$. За цей же час dt внаслідок різниці потоків, що втікає $J_n(x)$ і витікає $J_n(x+dx)$, число електронів додатково змінюється на величину:

$$[J_n(x) - J_n(x + dx)] dt = -\frac{dJ_n}{dx} dx \cdot dt.$$

Повна зміна числа електронів в об'ємі dx за час dt складе:

$$\frac{dn_p}{dt} dt \cdot dx = \left(-\frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} - \frac{dJ_n}{dx}\right) dx \cdot dt,$$

або

$$\frac{dn_p}{dt} = -\frac{dJ_n}{dx} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}. \quad (4.25)$$

Потік електронів J_n можна виразити через густину електричного струму, якщо використати вираз (4.18).

Тоді

$$J_n = -\frac{j_n}{q} = -n_p \mu_n E - D_n \frac{dn_p(x)}{dx} \quad (4.26)$$

і рівняння (1.25) прийме вигляд

$$\frac{dn_p}{dt} = D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + E \mu_n \frac{dn_p}{dx} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}. \quad (4.27)$$

Аналогічно можна одержати рівняння для нерівноважних дірок

$$\frac{dp_n}{dt} = D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - E \mu_p \frac{dp_n}{dx} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}. \quad (4.28)$$

Співвідношення (4.27) та (4.28) називають **рівняннями неперервності**. Ці рівняння установлюють зв'язок між зміною концентрації носіїв в елементарному об'ємі напівпровідника і струмом, який протікає через об'єм. В усталеному (стаціонарному) режимі концентрації електронів і дірок не змінюються з часом (n_p і $p_n = \text{const}$) і рівняння неперервності приймають вигляд:

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + E \mu_n \frac{dn_p}{dx} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0, \quad (4.29)$$

$$D_p \frac{d^2 n_p}{dx^2} - E \mu_p \frac{dp_n}{dx} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0. \quad (4.30)$$

Ці рівняння показують, що в стаціонарних умовах потік частинок, що витікають з елементарного об'єму напівпровідника, дорівнює числу частинок, які ввійшли в нього, за винятком числа частинок, які рекомбінували в цьому об'ємі. Рівняння неперервності досить часто використовується для дослідження багатьох властивостей напівпровідникових приладів.

Контрольні питання для самоперевірки

1. Які речовини відносяться до напівпровідникових матеріалів?
2. Як класифікуються напівпровідникові матеріали?
3. Що таке напівпровідник із власною електропровідністю?
4. Як утворюються напівпровідники з електронною електропровідністю?
5. Що таке напівпровідники p - типу та їх будова?
6. Чим зумовлена поява дрейфового струму в напівпровідниках?
7. В чому заключається фізика виникнення дифузійного струму?
8. Поясніть принцип рекомбінації зарядів. Які існують види рекомбінації?

РОЗДІЛ V

МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

5.1. Магнітні матеріали, їх класифікація та застосування

Магнітні (ферромагнітні) матеріали застосовуються для виготовлення елементів радіоелектронної апаратури. Вони виконують самостійну функцію або є частиною конструкції окремих радіодеталей та вузлів.

В залежності від призначення магнітні матеріали застосовуються для виготовлення:

- осердя котушок індуктивності, трансформаторів та дроселів;
- елементів пам'яті, пристроїв обчислювальної техніки, автоматики та зв'язку;
- магнітопроводів реле, вимірювальних приладів, магнітних голівок магнітофонів, магнітних антен і т. ін.

Класифікація магнітних матеріалів приведена на рис. 5.1.

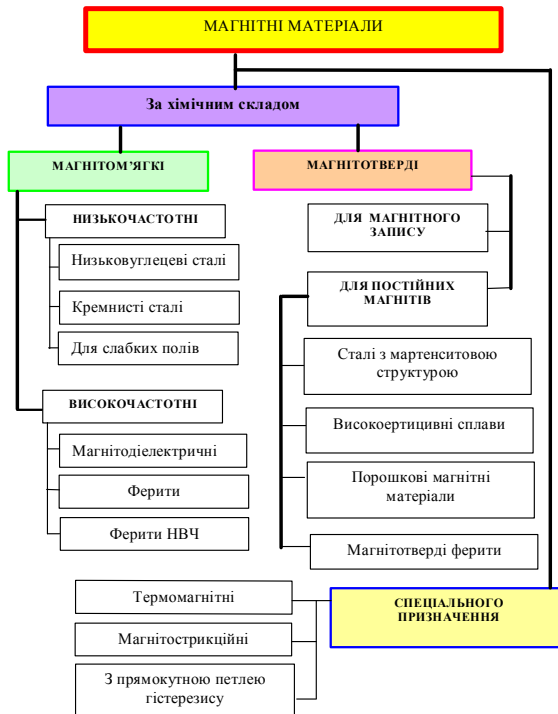


Рис. 5.1. Класифікація магнітних матеріалів

5.2. Параметри та характеристики магнітних матеріалів

До основних параметрів магнітних матеріалів відносяться:

- магнітна індукція насичення B_m ;
- залишкова магнітна індукція B_r ;
- коерцитивна сила (напруженість магнітного поля) H_c ;
- магнітна проникливість μ ;
- температурний коефіцієнт магнітної проникливості $\text{TK}\mu$;
- відносний коефіцієнт магнітної проникливості α_μ ;
- часова стабільність магнітної проникливості γ ;
- добротність Q ;
- діапазон робочих частот Δf ;
- максимальна частота $f_{\text{макс}}$.

Частину цих параметрів можна знайти з кривої (петлі) гістерезиса $B=f(H)$, яка отримується, якщо магнітні матеріали намагнічувати полем із напруженістю H , вимірюючи його магнітну індукцію B (рис. 5.2).

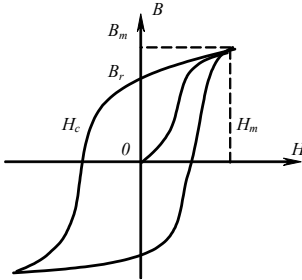


Рис. 5.2. Петля гістерезису феромагнетика

З кривої гістерезиса можна знайти індукцію насичення B_m , як максимальне значення індукції; залишкову індукцію B_r , як значення магнітної індукції при $H = 0$; коерцитивну силу H_c , як значення напруженості при $B = 0$.

Форма петлі гістерезиса визначається коефіцієнтом прямокутності:

$$K_{\text{пр}} = \frac{B_r}{B_m}.$$

Магнітна проникливість μ визначає здатність матеріалу намагнічуватись під дією зовнішнього поля.

Розрізняють статичну, початкову, максимальну, відносну, ефективну, диференціальну, імпульсну та зворотну магнітну проникливість.

Статична магнітна проникливість знаходиться за формулою:

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Можливо вирахувати μ для кожної точки петлі гістерезису та побудувати графік залежності $\mu=f(H)$ (рис. 5.3).

З графіка $\mu=f(H)$ знаходять початкову магнітну проникливість μ_n при $H=0$ та максимальну проникливість $\mu_{\text{макс}}$.

Ефективна магнітна проникливість $\mu_{\text{еф}}$ знаходиться відношенням амплітудного значення індукції в матеріалі до амплітудного значення напруженості поля:

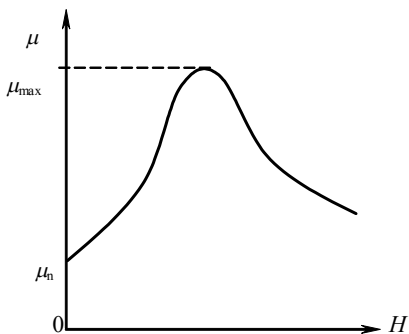


Рис. 5.3. Залежність статичної магнітної проникливості від напруженості поля

$$\mu_{\text{еф}} = \frac{B_T}{H_T}.$$

Властивості магнітного матеріалу залежать від здатності магнітних доменів утримуватись паралельно один одному. Якщо температура зростає, то зростає і швидкість руху атомів і при температурі вище точки Кюрі (T_K) вектори магнітних моментів змінюють свій напрям, що приводить до зникнення феромагнітних властивостей матеріалу.

Залежність початкової магнітної проникливості від температури показано на рис. 5.4. При зростанні температури магнітна проникливість збільшується до температури T_K і далі стрімко спадає.

Кількісно залежність $\mu=f(T)$ визначається температурним коефіцієнтом магнітної проникливості:

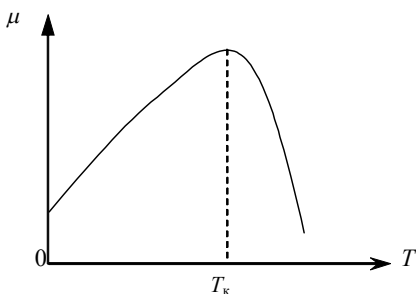


Рис. 5.4. Залежність початкової магнітної проникливості від температури

$$TK\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu \Delta T},$$

або відносним температурним коефіцієнтом:

$$a_\mu = \frac{TK\mu}{\mu} = \frac{\Delta\mu}{\mu^2 \Delta T}.$$

При намагнічуванні феромагнетиків зовнішнім полем витрачається енергія, яка виділяється у вигляді тепла. Ця енергія обумовлює втрати на гістерезис, на

вихрові струми та на магнітну в'язкість.

Втрати на гістерезис обумовлені зміною орієнтованості магнітних доменів. Вони визначаються площею статичної петлі гістерезису.

Втрати на вихрові струми обумовлені тим, що ці струми направлені проти струмів намагнічування і тому зменшують загальне магнітне поле.

Втрати на магнітну в'язкість виникають в змішаних полях та пов'язані з тим, що зміна індукції відносно зміни напруженості магнітного поля виникає з затримкою у часі.

Для оцінки втрат у магнітному осерді використовують поняття кута втрат ($tg\delta$), де кут δ є додатковим кутом між струмом і напругою. Він складається з трьох кутів, із якими пов'язані втрати – на гістерезис δ_r , на

вихрові струми δ_y та на магнітну в'язкість δ_M

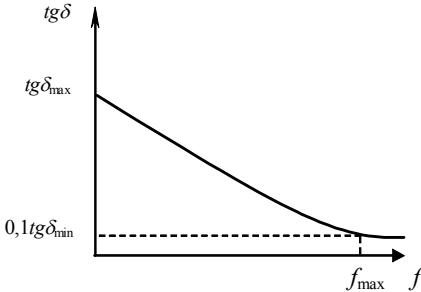
$$\delta = \delta_r + \delta_y + \delta_M.$$

Втрати в осерді іноді оцінюються і добротністю Q .

Використовують і відносний показник кута втрат $\text{tg}\delta_0 = \frac{\text{tg}\delta}{\mu}$.

Часова стабільність магнітної проникності знаходиться за формулою:

$$\gamma = \frac{\Delta\mu_n}{\mu_n},$$



де $\Delta\mu_n$ — відхилення початкової магнітної проникності μ_n за часом.

Максимальна робоча частота знаходиться за графіком $\text{tg}\delta = \varphi(f)$ на рівні $0,1 \text{ tg}\delta_{\text{max}}$ (рис. 5.5.)

За формою петлі гістерезиса магнітні матеріали розподіляються на магнітом'які та магнітотверді.

За хімічним складом — на металеві, ферити та магнітодіелектрики.

5.3. Властивості магнітних матеріалів за формою петлі гістерезису

Магнітом'які матеріали мають вузьку петлю гістерезиса, малі втрати та коерцитивну напруженість $H_c \leq 2E$, велику магнітну проникність, здатність намагнічуватись навіть у слабких полях (рис. 5.6).

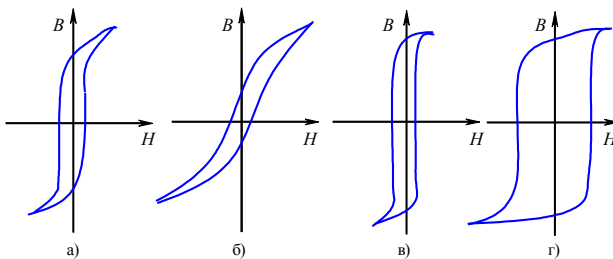


Рис. 5.6. Форма петлі гістерезису для різних матеріалів:
а, б, в — магнітом'яких; г — магнітотвердих

Вони розрізняються за значенням коефіцієнта прямокутності:

- при $K_n < 0,5$ - магнітна проникність мало залежить від напруженості поля. Такі магнітні матеріали застосовуються для осердей котушок, індуктивність яких не повинна змінюватись при зміні амплітуди робочого

струму;

- при $K_n = 0,5 \dots 0,8$ їх застосовують для осердей дроселів, трансформаторів, реле;

- при $K_n > 0,8$ - в пристроях пам'яті та переключення, автоматичі та обчислювальній техніці.

Магнітотверді матеріали мають широку петлю гістерезису та велику коерцитивну напруженість $H_c \geq 50\text{є}$.

Їх розподіляють за формою петлі гістерезису:

- із пологою петлею – мають малу залежність $\mu=f(H)$, застосовуються для виготовлення магнітних стрічок у системах відтворення звукових та відеосигналів;

- із крутою петлею – застосовуються для виготовлення постійних магнітів гучномовців, мікрофонів, малопотужних електродвигунів.

5.4. Властивості магнітних матеріалів за хімічним складом

5.4.1. Магнітом'які магнітні матеріали

До магнітом'яких магнітних матеріалів відносяться:

- технічно чисте залізо;
- трансформаторна сталь;
- кремениста електротехнічна сталь;
- залізонікелева сталь (пермалой);
- інші сплави (наприклад альсіфери).

Технічно чисте залізо (зміст карбона не більше 0,04 %) має великі магнітну проникність та індукцію насичення, малі коерцитивну силу та питомий опір (великі втрати на вихрові струми).

Параметри та області застосування магнітом'яких магнітних матеріалів наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Назва матеріалу	Параметр		Області застосування
	$\mu_{\text{макс}}$	$H_{c\text{є}}$	
Низькокарбонна електротехнічна сталь	4500	1,2	В магнітопроводах на частоті до 1 кГц
Електротехнічне залізо	15000	0,86	Як сировина для феромагнітних сплавів
Карбонільне залізо	20000	0,08	В магнітних ланцюгах телефонів, реле, осердей, та екранів котушок індуктивнос-ті до 5 кГц

Кремниста електромеханічна сталь (зміст кремнію Si до 4,5%) має велику магнітну проникність ($\mu_{\max}=10000$), питомий опір $\rho=[0,1+0,12\%(Si)]\cdot 0,0001$ Ом/см, малу коерцитивну силу ($H_c=0,57e$).

З карбонільного заліза виготовляють броньові (рис. 5.7) та циліндричні осердя (різьбові, стержневі, трубчаті) (рис. 5.8).

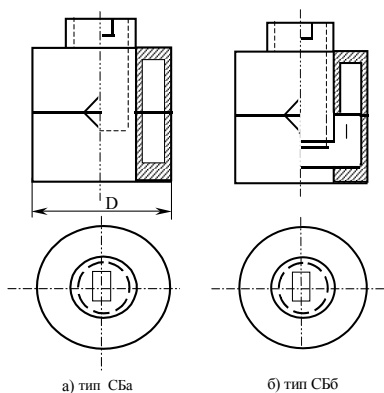


Рис. 5.7. Броньовані осердя з карбонільного заліза

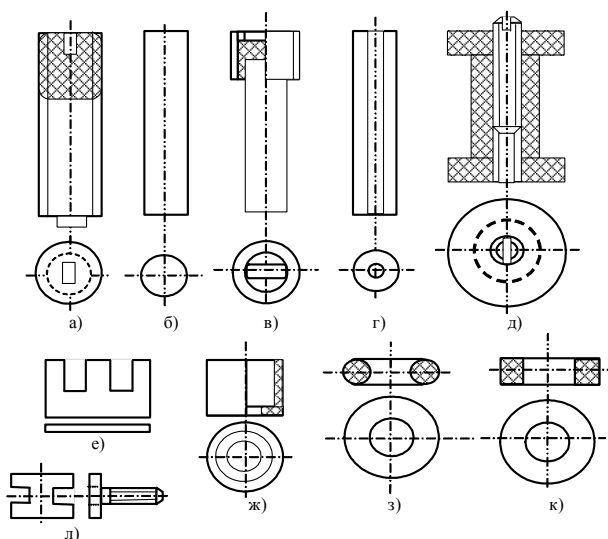


Рис. 5.8. Основні типи форм осердей із високочастотних феромагнетиків:
 а) циліндричний з різьбою; б) циліндричний гладкий; в) циліндричний з різьбовою втулкою; г) трубчатий; д) котушечний; е) Ш - подібний;
 ж) чашечний; з) тороїдальний; к) кільцевий; л) Н - подібний

Осердя з карбонільного заліза застосовується на частотах до 5 кГц в якості осердь (стрічкових та листових) трансформаторів, дроселів та магнітопроводів електричних машин.

До позначення кременистих сталей входить літера Е та число, перша цифра якого вказує на зміст кремнію Si , друга – на властивості.

Наприклад: Е44 – кремениста електромеханічна сталь з 4% Si та зниженими втратами на частоті 50 Гц.

Броньоване осердя з карбонільного заліза застосовується для зміни властивостей та параметрів котушок індуктивності.

Броньовані осердя мають невелике зовнішнє поле розсіювання, тому збільшують індуктивність котушки та дозволяють регулювати індуктивність у межах 10...30% циліндричними налагоджувачами, але збільшують власну ємність (між осердям і обмоткою).

Броньові осердя можуть бути із замкнутим або розімкнутим магнітним ланцюгом. Вони складаються з двох чашок (гладкою або різьбовою) і налагоджувача.

Розімкнутий магнітний ланцюг (із повітряним зазором) зменшує залежність параметрів котушок індуктивності від частоти та напруженості магнітного поля.

Позначення осердя складається з літер СБ (сердечник броньовий), цифри розміру зовнішнього діаметра в мм та літери – “а”, якщо магнітний ланцюг замкнутий або “б”, якщо магнітний ланцюг розімкнутий.

Приклад: СБ-5а – осердя броньоване з зовнішнім діаметром 5 мм, з замкнутим магнітним ланцюгом.

З листів трансформаторної сталі Е300, Е350 виготовляється осердя типу ШЛ або ШЛМ, які застосовуються у малопотужних трансформаторах та дроселях до 1 кВт.

Осердя типу ШЛ (ШЛМ) має чотири П - подібні окремі частини. Кожна частина складається зі склеєних окремих стрічок, які мають відшліфовану поверхню стику. Тому після складання осердя силового трансформатора зазори будуть практично відсутніми.

Стрічкова сталь має більш значення максимальної магнітної індукції, ніж та сталь, із якої штампують пластини магнітопроводів типу Ш та ШУ. Тому трансформатори на них мають більш потужності і меншу кількість витків ніж трансформатори на штампованих пластинах при однакових напругах та габаритах осердя.

Приклад умовного призначення осердя зі стрічкової сталі ШЛМ8×8. Перша цифра (8) відповідає товщині середнього стержня (а), на якому розміщена обмотка, друга цифра (8) відповідає товщині стрічки (в), з якої виготовлено осердя.

Залізонікелеві сплави (пермалой) мають велику магнітну проникність при відносно малих магнітних полях, велику індукцію насичення B_m та малу

коерцитивну силу H_c . Пермалої можуть бути високонікелєвими та низьконікелєвими.

Параметри та області застосування пермалоїв наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Типи пермалою	Зміст Ni , %	Параметри			Області застосування
		μ_{\max}	H_c , ерстед	B_{ns} , Гаус	
Низько-нікелєві	40...60	15000	0,04	10000	Стрічкові та листові осердя міжкаскадних та малогабаритних силових та імпульсних трансформаторів, дроселів, реле та котушок індуктивності (до одиниць МГц)
		
		60000	0,07	13000	
Високо-нікелєві	70...80	60000	0,01	До 75000	Стрічкові та листові осердя малопотужних трансформаторів, дроселів, реле, мікротелефонних слухавок, магнітних екранів, в пристроях автоматики
			
		300000	0,06		

Для покращення властивостей пермалої легують:

- молібденом Mo та хромом Cr – для підвищення питомого опору та магнітної проникливості;

- міддю Cu для температурної стабільності;

- кремнієм Si та марганцем Mn – для підвищення питомого опору.

Умовне позначення пермалоїв складається з числа та літери. Число вказує на відсоток нікелю Ni , а літера на тип домішкових елементів:

К – кобальт, М – марганець, Х – хром, С – кремній, Д – мідь.

Наприклад: 45% К – пермалой з 45% Ni з домішкою кобальту.

Альсифер є сплавом заліза Fe із кремнієм Si та алюмінієм Al . Він має високі магнітні властивості ($\mu_{\max} = 100000$; $H_c = 0,02e$). Застосовується для магнітних екранів, корпусів апаратури, кільцевого осердя трансформаторів та дроселів до 100 кГц.

Кільцеві осердя не мають поля розсіювання, силової лінії

електромагнітного поля замикаються всередині осердя. Кільцеві осердя не мають повітряного зазору, тому їх параметри значно залежать від частоти та напруженості поля. Якщо частота збільшується, то знижуються добротність.

Кільцеві осердя, які виготовляють з альфиферу, мають тороїдальний перетин (рис. 5.9). На їх бік наноситься знак маркування у вигляді однієї або двох кольорових стрічок.

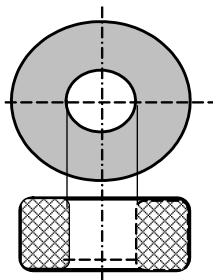


Рис. 5.9. Тороїдальне осердя з альфиферу

інших металів. Це призводить до покращення властивостей початкового матеріалу (значно підвищується магнітна проникність μ та питомий опір).

Початкова магнітна проникність μ_n феритів знаходиться в широкому діапазоні; вони мають великий питомий опір $\rho=10^8$ Ом-см, тому втрати на вихрові струми малі, а робоча частота велика; часова стабільність магнітної проникності фериту знаходиться у межах $\gamma = (0,5...0,75)\%$, відносний температурний коефіцієнт магнітної проникності приймає значення до $\alpha_\mu = +30 \cdot 10^{-6}$.

Ферити мають значну залежність від температури. Робочу температуру обирають ту, що відвідає значенню μ_n яке складає 80% від номінального (при 20 °С).

З феритів виготовляються осердя – магнітом'які, магнітотверді, магнітострикційні, з прямокутною петлею гістерезису, надвисокочастотного діапазону, головки магнітні, сфери із монокристала, пристрої пам'яті.

Магнітом'які феритові осердя мають вузьку петлю гістерезису, малу коерцитивну напруженість поля, великий питомий опір, який забезпечує малі вихрові струми і тому можливість роботи на високих частотах; низьку температуру Кюрі (-100...+150 °С), що призводить до значної температурної залежності їх магнітних властивостей.

Параметри осердя з магнітом'яких феритів знаходяться у таких межах:

- початкова магнітна проникність $\mu_n=5...10000$;
- коерцитивна напруженість поля $H_c=0,1...20e$;
- відносний тангенс кута втрат в діапазоні до 0,1 МГц і $H=0,1e$;
- коефіцієнт прямокутності $K_n = 0,5...0,8$.

Магнітом'які феритові осердя розподіляють на марганець-цинкові та

нікель-цинкові.

Марганець – цинкові осердя мають велику початкову магнітну проникливість μ_n .

Нікель – цинкові осердя мають початкову магнітну проникливість μ_n меншу, ніж марганець-цинкові, але більшу граничну частоту.

Властивості магнітом'яких феритових осердь наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Тип осердя	Склад	Параметри		Області застосування
		μ_n	$f_{гр}$, МГц	
Марганець – цинкові	MnO , ZnO , Fe_2O_3	1000 ... 6000	0,2...1	Осердя широкосмугових трансформаторів, низькочастотних котушок індуктивності та дроселів апаратури прово-дого зв'язку
		1000 ... 2000		
Нікель – цинкові	NiO , ZnO , Fe_2O_3	200 ... 600	1...3	Осердя котушок індуктивнос-ті, дроселів, трансформаторів
		50 ... 200	50...100	Осердя магнітних підсилювачів, варіометри, високочастотних котушок індуктивності, дроселів та трансформаторів

Рекомендовані частотні діапазони застосування осердя з магнітом'яких феритів в залежності від їх хімічного складу наведено на рис. 5.10.

Нікель - цинкові ферити застосовувати на частоті нижче 0,5...1 МГц недоречно, оскільки вони мають великий тангенс кута втрат $\tan \delta$. Для них точка Кюрі знижується з зростанням температури тим більше, чим більше μ_n (рис. 5.11).

До позначень магнітом'яких феритових осердь входять такі елементи:

- літера М;
- число – номінальне значення початкової магнітної проникності μ_n ;
- літера – частотний діапазон (Н – низькочастотний, В –

високочастотний);

- літера – особливості застосування (С – для сильних полів, І – для імпульсних полів, П – для перенастроювання частоти);

- число – номер за порядком.

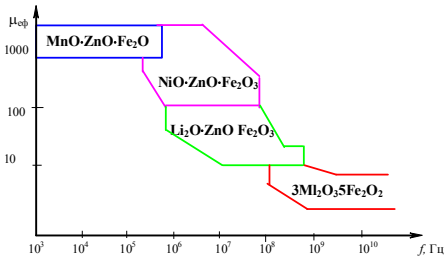


Рис. 5.10. Рекомендуємі частотні діапазони застосування магнітом'яких феритів в залежності від їх складу

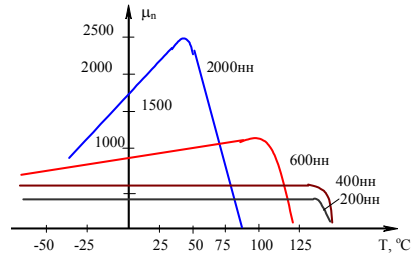


Рис. 5.11. Графік залежності $\mu_n = f(T)$ нікель - цинкових феритів

Приклади: М3000НМ - 6 – ферит із $\mu_n = 3000$, низькочастотний, марганець – цинковий для слабких магнітних полів. 3 номером за порядком 6.

М2500НМС2 - 8 – ферит з $\mu_n = 2500$, низькочастотний, марганець – цинковий для сильних магнітних полів з параметром групи 2, із номером за порядком 8.

М200ВНП - 12 – ферит з $\mu_n = 200$, високочастотний, нікель – цинковий для перенас-троювання частоти, із номером за порядком 12.

5.4.2. Магнітотверді магнітні матеріали

До магнітотвердих матеріалів відносяться:

- карбонова сталь;
- вольфрамова та хромова сталь;
- кобальтова сталь;
- оксидно - барієві магніти;
- альні, альнісі, альніко, магніко.

Отримують їх із заліза Fe , легованого домішками після термічної обробки.

Ці матеріали мають велику коерцитивну силу H_c , що забезпечує велику максимальну енергію магнітного поля.

Феритові осердя (магніти), які виготовлені на основі магнітотвердих матеріалів мають велику магнітну енергію та велику напруженість магнітного поля H_c (до 2500е).

Петля гістерезису, в таких матеріалів, може бути пологою або крутою.

Магніти з пологою петлею гістерезису мають малу залежність μ від H і застосовуються для виготовлення магнітних стрічок систем магнітного запису та відтворення звукових і відеосигналів, а також в електромеханічних фільтрах.

Магніти з крутою петлею гістерезису застосовуються для виготовлення постійних магнітів, телефонної апаратури, побутових мікрохвильових пічок, систем відхилення в телевізорах, головок стирання відеомагнітофонів, динамічних гучномовців, акустичних перетворювачів, збудження електричних двигунів постійного струму, магнітострикційних та електромеханічних фільтрів.

Склад та властивості магнітотвердих матеріалів наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Назва магнітотвердих матеріалів	Склад	Властивості
Карбонова сталь	Fe, до 1,7% Si	Підвищена крихкість, не допускає перегрівання
Вольфрамова та хромова сталь	FeW, FeCr	Великі магнітні властивості, легко обробляється
Кобальтова сталь	40% Fe; 7% W ₀	Стала до температурних впливів, допускає перегинання
Оксидно барієві магніти	FeO ₃ BaO	Мають велику коерцитивну силу H _c , сталі проти розмагнічування, невелика вартість
Альні	Fe, Al, Ni	Велика коерцитивна сила H _c .
Альнісі	Fe, Al, Ni, Si	
Альніко	Fe, Al, Ni, Co, Cu	
Магніко	Fe, Mg, Ni, Co, Cu (після термічної обробки)	

Основними параметрами магнітотвердих матеріалів є:

- максимальне значення добутку магнітної індукції та напруженості магнітного поля $(B \cdot H)_{\text{макс}}$;

- залишкова магнітна індукція B_r ;

- коерцитивна сила з індукції B_c ;

- коерцитивна сила з напруженості H_c .

Магніти виготовляються на основі барію (Ba) і можуть бути анізотропні

(БА) і ізотропні (БІ). Анізотропні ферити зберігають орієнтацію часток феромагнетика і не бояться вібрацій, ударів, стійкі до впливу зовнішніх магнітних полів.

До позначень магнітотвердих феритів входять:

- літера М;

- число – доданок $(B \cdot H)_{\text{макс}}$;

- літера – матеріал фериту (СА – стронцієвий анізотропний, БА – барієвий анізотропний, С – стронцієво-барієвий);

- число – коерцитивна сила намагнічування;

- число – номер за порядком.

Приклад: М28СА250 - 4: ферит $(B \cdot H)_{\text{макс}} = 28$ кДж/м², стронцієвий анізотропний, з коерцитивною силою 250 кА/м, з номером за порядком – 4.

5.5. Спеціальні магнітні матеріали

До спеціальних магнітних матеріалів відносяться: матеріали з прямокутною петлею гістерезису (ППГ), магнітострикційні матеріали та термомагнітні матеріали.

Матеріали з прямокутною петлею гістерезису – це матеріали зі специфічною формою петлі гістерезису, яка близька за формою до прямокутної.

Крім спільних магнітних характеристик вони характеризуються наступними:

коефіцієнт прямокутності – представляє собою відношення залишкової індукції B_r до максимальної $B_{\text{макс}}$:

$$K_{\text{КП}} = \frac{B_r}{B_{\text{макс}}};$$

коефіцієнт переключення S_q – численно рівний кількості електроенергії, яка проходить через одиницю товщини сердечника і яка необхідна перемагнічування його із одного стану в інший; інколи вимірюється за напруженістю поля;

малий час перемагнічування;

висока температурна стабільність.

До магнітних матеріалів з ППГ відносяться деякі залізо - нікелієві та залізо - нікелієві - кобальтові сплави. Використовуються в виді стрічки товщиною 20 – 500 мкм.

Магнітні матеріали з ППГ використовуються в лічильно – обчислювальній техніці для передачі та зберігання дискретної інформації.

Магнітострикційні матеріали – це матеріали з різко вираженим ефектом магнітострикції. Широке застосування в якості магнітострикційних

матеріалів отримали нікель, нікель - кобальтові сплави, альсифер, ферити (кобальтовий та літєвий).

Матеріал використовується для виготовлення магніострикційних вібраторів для гідролокаторів, приладів ультразвукової дефектоскопії.

Термомагнітні матеріали – матеріали для компенсації температурної похибки, яка визвана зміною індукції постійних магнітів або електричного опору провoda.

В якості таких матеріалів використовуються сплави на основі $Ni - Cu$, $Fe - Ni$, $Fe - Ni - Cr$. Для них характерне різке зниження магнітної проникності з ростом температури біля точки Кюрі.

Контрольні питання для самоперевірки

1. Як класифікуються магнітні матеріали?
2. Якими основними параметрами характеризуються магнітні матеріали?
3. Що таке магнітна проникність і які її види ви знаєте?
4. Як впливає форма петлі гістерезису на властивості магнітних матеріалів?
5. Дайте характеристику магнітом'яких матеріалів.
6. Що таке ферити та які осердя з них виготовляють?
7. Як впливає частотний діапазон на феритові осердя в залежності від їх хімічного складу?
8. Якими основними параметрами характеризуються магніти?

РОЗДІЛ VI

КОМПОНЕНТНА БАЗА ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

В розділі «Компонентна база засобів радіозв'язку та захисту інформації» вивчаються властивості резисторів, конденсаторів і котушок індуктивності та їх застосування в пристроях радіозв'язку та системах захисту інформації.

6.1. Резистори

Резистори являються одними з основних пасивних елементів радіоелектронної апаратури. Тому вивчення основних параметрів, властивостей та типів резисторів являється необхідним для розуміння процесів, які проходять в електричних колах.

Призначення, конструкція та класифікація резисторів.

На базі деяких електроматеріалів виготовляються **резистори**, які є найрозповсюдженими радіодеталлями в пристроях радіоелектроніки.

В резисторах використовують їх опір. Опір резистора R залежить від властивостей резистивного матеріалу та його геометричних параметрів. Наприклад, для дрютяного резистора

$$R = \rho \frac{\ell}{S},$$

де ρ – питомий опір резистивного матеріалу;
 S – площа перерізу резистивного матеріалу;
 ℓ – довжина резистивного матеріалу.

Опір вимірюється в Омх або кратних йому одиницях.

Опір в 1 Ом має провідник, через який при напрузі в 1 В проходить струм в 1 А.

Головна функція резисторів – регулювання та розподіл енергії між електричними ланцюгами та їх елементами, а також створення відповідних співвідношень між струмом та напругою на заданому елементі.

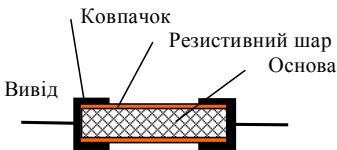


Рис. 6.1. Типова конструкція плівкового резистора постійного опору

Конструкцію резистора постійного опору зображено на рис. 6.1.

На діелектричній основі (частіше всього циліндричній) розміщується струмопровідний шар резистивного матеріалу. З обох боків основи щільно, для забезпечення надійного контакту, закріплюють ковпачки з виводами. З

метою збільшення опору на струмопровідному шарі резистора роблять спіральну канавку. При цьому резистивний шар "подовжується" – витягується у стрічку. Для захисту від зовнішніх впливів резистор фарбується або покривається лаком.

Основу резистора виготовляють з кераміки, скла, пластмаси та інших діелектричних матеріалів, які мають мале значення діелектричних утрат, велику міцність та теплостійкість.

Виводи резисторів виготовляються у виді стрічок, дротів, "пелюсток", контактних поясів із латуні, яка покривається нікелем або сріблом. Високочастотні резистори та резистори для автоматичного монтажу мають по краях резистивного шару контактні площадки.

Резистори класифікуються за різними ознаками (рис. 6.2):

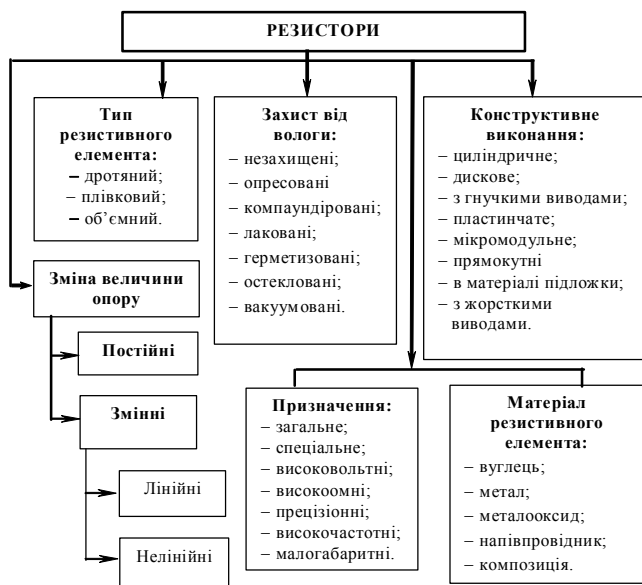


Рис. 6.2. Класифікація резисторів

За можливістю регулювання значення опору в процесі експлуатації резистори розподіляють на постійні та змінні.

За призначенням – на резистори загального застосування, прецизійні, високочастотні, високовольтні, високомегаомні.

За резистивним матеріалом – на дротяні та недротяні.

За потужністю розсіювання – на потужні та малопотужні.

За типом вольт-амперної характеристики $I = f(U)$ – лінійні – А та нелінійні – Б, В (рис. 6.3).

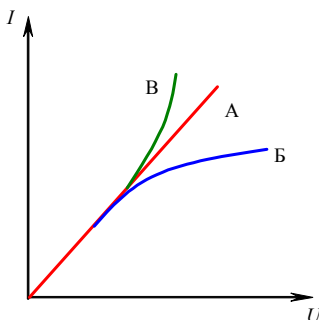


Рис. 6.3. Вольт - амперна характеристика резисторів

До нелінійних відносяться: варистор, терморезистор і магніторезистор.

За конструкцією – дискретні та набори резисторів (у корпусах інтегральних мікросхем).

6.2. Основні параметри постійних резисторів

Властивості резисторів визначаються їх параметрами:

- номінальний опір;
- допуск;
- номінальна потужність розсіювання;
- температурний коефіцієнт опору;
- рівень власних шумів;
- повний опір.

Допуск характеризує відхилення фактичного опору резистора від номіналу. Це відхилення пов'язано з похибками (погрішностями) виготовлення резистора.

Допуск або клас точності – це максимальна різниця між фактичним опором резистора, який вимірюється за допомогою вимірювальних приладів, і номіналом у відсотках відносно номіналу

$$\Delta = \pm \frac{R_{\text{ф}} - R_{\text{ном}}}{R_{\text{ном}}} \cdot 100\% .$$

Допуски стандартизовані. Їх значення частіше всього знаходяться в межах від $\pm 0,1\%$ до $\pm 20\%$ і маркується на корпусі резистора цифрами або літерами (табл. 6.1).

Наприклад: **K475G** – резистор постійного опору з номінальним значенням 475 Ом та допустимим відхиленням фактичного опору від номінального $\pm 2\%$;

100EI – резистор постійного опору з номінальним значенням 100 Ом та допуском $\pm 5\%$.

Кількість значень опорів резисторів в ряду номіналів залежить від допуску. Чим менший допуск, тим більше номіналів і навпаки.

Таблиця 6.1

Кодове позначення допустимого відхилення фактичного значення опору від номінального в процентах

Допустиме відхилення в %	Кодове позначення	Допустиме відхилення в %	Кодове позначення	Допустиме відхилення в %	Кодове позначення
± 0,001	E	± 0,25	C	± 30	N [Φ]
± 0,002	L	± 0,5	D [Д]	-10 ÷ +30	Q
± 0,005	R	± 1	F [P]	-10 ÷ +50	T [Э]
± 0,01	P	± 2	G [Л]	-10 ÷ +100	Y [Ю]
± 0,02	U	± 5	I [J], [И]	-20 ÷ +50	S [Б]
± 0,05	X	± 10	K [C]	-20 ÷ +80	Z [A]
± 0,1	B [Ж]	± 20	M [B]	-10 ÷ +100	- [Я]

Номінальний опір резистора (номінал) $R_{\text{ном}}$ – це значення електричного опору, яке маркується на його корпусі. Він вимірюється в Омах або кратних йому одиницях: кіломах – кОм (10^3 Ом), мегамах – МОм (10^6 Ом), гигамах – ГОм (10^9 Ом), террамах ТОм (10^{12} Ом) та знаходиться в межах від 0,1 Ома до 1 ТОма.

Значення номінальних опорів резисторів установлюються шкалами номіналів, які позначаються кодами E6, E12, E24, E48, E96, E192.

Кожна шкала є дискретним рядом послідовних чисел, які зростають (табл. 6.2). Число в позначенні шкали відповідає кількості номіналів у ряду.

Для того, щоб знайти всі значення номінальних опорів резисторів, треба кожне число ряду помножити на 10^n , де n – ціле позитивне або негативне число.

Номінальна потужність розсіювання. Електрична енергія, що надходить до резистора, перетворюється в ньому в теплову та розсіюється. Найбільша потужність, яку може розсіювати резистор в заданих умовах на протязі гарантійного терміну служби при збереженні параметрів в установлених межах називають **номінальною потужністю розсіювання** $P_{\text{ном}}$.

Фактична потужність розсіювання резистора залежить від температури середовища оточування та електричного навантаження, тобто від температури нагріву корпусу резистора.

Шкали та ряди номінальних опорів резистора

Шкала	E24	E12	E6	E3
Р я д	1,0	1,0	1,0	1,0
	1,1			
	1,2	1,2		
	1,3			
	1,5	1,5	1,5	
	1,6			
	1,8	1,8		
	2,0			
	2,2	2,2	2,2	2,2
	2,4			
	2,7	2,7		
	3,0			
	3,3	3,3	3,3	
	3,6			
	3,9	3,9		
	4,3			
	4,7	4,7	4,7	4,7
	5,1			
	5,6	5,6		
6,2				
6,8	6,8	6,8		
7,5				
8,2	8,2			
9,1				
Допуск	±5%	±10%	±20%	±30%

Для кожного типу резистора в довідниках наводять графік залежності нормованої допустимої потужності розсіяння $\frac{P}{P_{\text{ном}}}$ від температури (рис. 6.4).

Цей графік дозволяє обрати електричне навантаження для заданої температури резистора.

Стандартом встановлюються такі градації номінальної потужності: 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5; 8; 10; 16; 20; 25; 40; 50; 75; 100 Вт. Найчастіше зустрічаються резистори з номінальними потужностями 0,125; 0,25; 0,5; 1 та 2Вт.

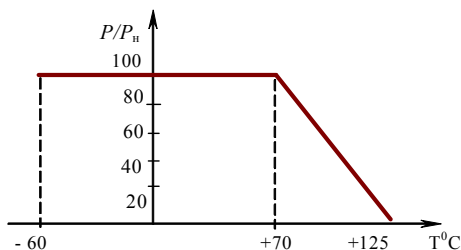


Рис. 6.4. Залежність допустимої потужності розсіювання металоплівкового резистора постійного опору від температури

На принципових електричних схемах резистор позначається прямокутником, в середині якого знаходиться риска, яка вказує на номінальну потужність (рис. 6.5)

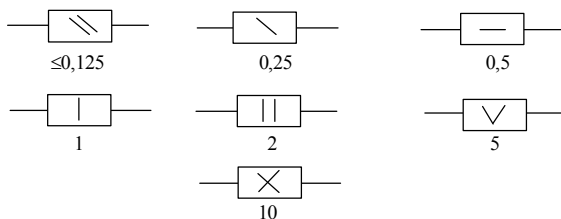


Рис. 6.5. Умовне графічне позначення величини допустимої потужності розсіювання (Вт)

Максимальна робоча напруга. Для кожного типу резистора з урахуванням його конструкції, розмірів, застосованих матеріалів та забезпечення тривалої працездатності встановлюється значення робочої напруги, перевищувати яке не можна. Це найбільша напруга, яка обмежується тепловими процесами у струмопровідному шарі резистора та електричною міцністю його ізоляції.

Найбільша робоча напруга обмежується значеннями номінального опору резистора $R_{\text{ном}}$ та його номінальною потужністю розсіювання $R_{\text{ном}}$.

Температурний коефіцієнт опору. Зміна температури резистора приводить до зміни його опору. Для кількісної оцінки цієї зміни застосовують **температурний коефіцієнт опору (ТКО)**.

ТКО – це відносна зміна опору резистора при зміні температури на 1°C .

$$\text{ТКО} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta R}{R_1 \cdot \Delta T}, 1/^{\circ}\text{C},$$

де $\Delta R = R_2 - R_1$ – абсолютна зміна опору при зміні температури від нормальної $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$ до допустимої T_2 ; $\Delta T = T_2 - T_1$ – абсолютна зміна температури.

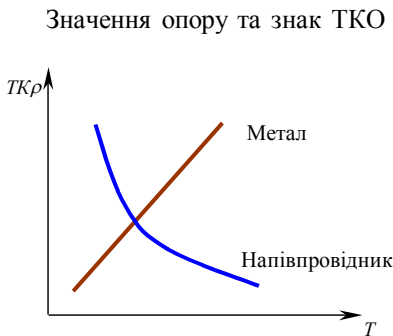


Рис. 6.6. Характер температурної залежності металу та напівпровідника

Значення опору та знак ТКО резистора визначаються головним чином, температурною залежністю опору резистивного матеріалу $TK\rho$ та матеріалу основи. На рис. 6.6. показана температурна залежність опору металу та напівпровідника.

Чим менший ТКО, тим кращу температурну стабільність має резистор. Найбільш поширені типи резисторів мають ТКО в межах $(10...2000) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Крайні значення $TKO = (1...10) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ у прецизійних резисторів, які мають високу

стабільність.

Рівень власних шумів. В кристалічних ґратах речовин електрони рухаються хаотично. Швидкість їх руху визначається температурою. Тепловий хаотичний рух електронів приводить до появи на виводах резистора випадкових змін різниці потенціалів – **флуктуації напруги**. Вони називаються **тепловими шумами** і визначаються квадратом напруги (формула Найквіста):

$$U^2 = 4kTR\Delta f,$$

де k – стала Больцмана,

T – абсолютна температура,

R – електричний опір,

Δf – смуга частот.

При проходженні струмів через резистор крім теплових шумів виникають також шуми, які називають **струмовими**. Вони обумовлені зміною контактного опору між зернами структури резистивного матеріалу, а також флуктуаціями поверхневої провідності. Ці шуми більш характерні для недротових резисторів. Вони більші за теплові, їх спектр частот неперервний. Струмові шуми оцінюються відносною електрорушійною силою шумів $E_{ш}$, тобто відношенням значення змінної складової напруги шумів E у мікрвольтах до прикладеної постійної напруги U_0 у вольтах:

$$E_{ш} = \frac{E}{U_0}, E_{ш}=0,1...15 \text{ мкВ/В.}$$

Шуми резистора обмежують чутливість електронних приладів та створюють завади відтворення сигналу.

Таким чином власні шуми резисторів $U_{ш}$ складаються з двох складових: теплових та струмових шумів.

ЕРС шумів резисторів прийнято вимірювати на частоті 50 – 500 Гц при

розсіюванні допустимої потужності. Недротяні резистори за величиною ЕРС шуму діляться на дві групи:

група А – $E_{ш} \leq 1$ мкВ/В;

група В – $E_{ш} > 1$ мкВ/В;

Найменший рівень шумів мають прецизійні резистори (менше 1 мкВ/В)

Повний опір. При роботі резистора на високих частотах з'являються його власні ємність C_R та індуктивність L_R .

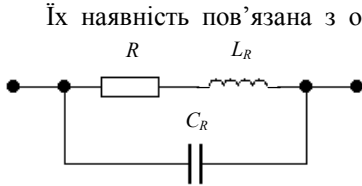


Рис. 6.7. Еквівалентна схема заміщення резистора на високій частоті

Їх наявність пов'язана з особливостями конструкції резистора: власна ємність виникає тому, що резистор має ковпачки, між якими розміщується діелектрична основа, а власна індуктивність пов'язана з наявністю дротяних виводів.

Схему заміщення резистора на високій частоті зображено на рис. 6.7.

Повний комплексний опір резистора

можна записати так:

$$Z = \frac{(R + j\omega L_R) \cdot \frac{1}{j\omega C_R}}{R + j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R}}$$

Після перетворень отримуємо:

$$Z = \frac{R}{(1 + \omega^2 L_R C_R)^2 + \omega^2 L_R^2 C_R^2} + j\omega \frac{L_R - C_R R^2 - \omega^2 L_R^2 C_R}{(1 + \omega^2 L_R C_R)^2 + \omega^2 L_R^2 C_R^2} = R_{\text{еф}}(\omega) + jX_{\text{еф}}(\omega)$$

Таким чином, повний опір резистора можна представити двома складовими – активною $R_{\text{еф}}(\omega)$ та реактивною $jX_{\text{еф}}(\omega)$, де значення $R_{\text{еф}}(\omega)$ та $jX_{\text{еф}}(\omega)$ – є ефективними, активним та реактивним опором резистора на заданій частоті. З формули випливає, що вплив реактивної складової на повний опір резистора зменшується з ростом частоти. Це приведе до обмеження частотного діапазону застосування резисторів.

Дротяні резистори працюють на частотах до 100 кГц, недротяні до 40 ГГц.

6.3. Основні характеристики та параметри змінних резисторів

Резистивний шар змінного резистора розміщується на його нерухомій частині (статорі). По ньому переміщується контактна група (ротор) (рис. 6.8).

При русі ротора опір між рухомим контактом і виводами резистивного

шару змінюється.

Змінні резистори призначені для регулювання напруги та струму або підстроювання опору в електронних пристроях. Вони можуть бути дротяними або недротяними, одинарними або подвійними, з вмикачем або без нього, призначеними для об'ємного та друкованого монтажу.

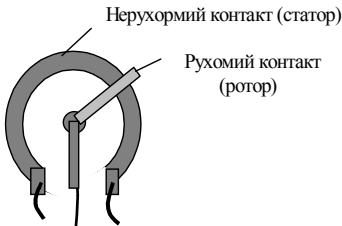


Рис. 6.8. Конструкція змінного резистора

Наприклад: СПЗ-4а – резистор змінний з тонкого композиційного шару, з номером розробки – 4 для одинарного об'ємного монтажу.

Основною характеристикою змінних резисторів є **функціональна характеристика** (рис. 6.9). Це залежність опору або вихідної напруги (струму) від переміщення (кута повороту) рухомої системи:

$$\frac{R}{R_{\Pi}} = f\left(\frac{\alpha}{\alpha_{\Pi}}\right),$$

де α та R – кут повороту рухомої системи і відповідний йому опір резистора; α_{Π} та R_{Π} – повний кут повороту рухомої системи та повний опір резистора.

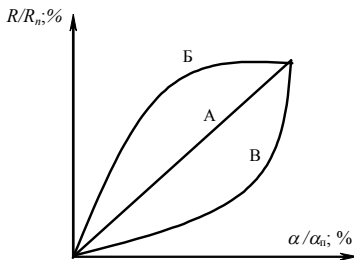


Рис. 6.9. Функціональні характеристики змінних резисторів

Резистори випускаються з трьома видами функціональних характеристик:

- А – з лінійною $R = r_0 + \varphi R_{\max}$; Б – із логарифмічною $R = r_0 e^{K\varphi}$;
- В – із зворотно-логічнійною $R = R_{\max}(1 - e^{-K\varphi})$.

Вибір типу резистора для застосування залежить від задач, для яких призначений резистор.

Резистори типу А застосовуються для регулювання режиму в пристроях, типу Б – у регуляторах гучності, типу В – у регуляторах тембру.

Найбільш кращу точність відтворення необхідної функціональної характеристики мають **потенціометри**.

До **специфічних параметрів змінних резисторів** належать:

- межі зміни опору;
- максимальний кут повороту рухомої системи;
- шуми руху;
- сталість до зносу.

Шуми руху виникають у вигляді напруг завад на виводах при

переміщенні рухомої системи по резистивному шару. У прийमाчах ці шуми приводять до шорхання та трісків. Рівень шумів руху досягає 100 мкВ.

В пристроях електроніки застосовуються дві схеми підключення змінного резистора R на резистор навантаження R_H : **потенціометрична** (рис. 6.10 а) та **реостатна** (рис. 6.10 б). Вибір схеми підключення залежить від того, що необхідно регулювати – струм чи напругу. Реостатна схема застосовується для регулювання струму, потенціометрична – для регулювання напруги.

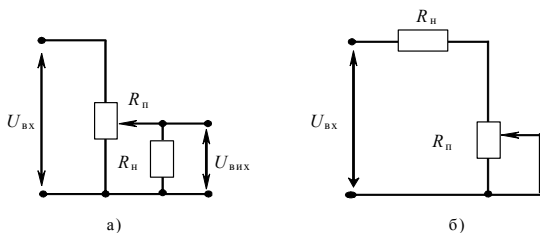


Рис. 6.10. Схеми включення змінних резисторів

6.4. Маркування резисторів та їх застосування. Кодова і кольорова маркіровка резисторів. Кодоване позначення номінального опору, допуску і приклади позначення

Кодоване позначення номінальних опорів резисторів складається з трьох або чотирьох знаків, що включають дві цифри і буква або три цифри і буква. Буква коду є множником, що позначає опір в омах і визначає положення коми десяткового знаку. Кодоване позначення відхилення від номінального значення, що допускається, складається з букви латинського алфавіту (табл. 6.3).

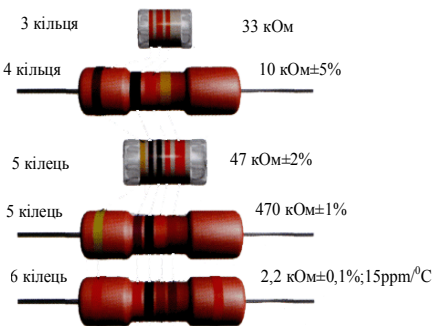


Рис. 6.11. Маркіровка вітчизняних резисторів

Кольорова маркіровка наноситься у вигляді чотирьох або п'яти кольорових кілець. Кожному кольору відповідає певне цифрове значення (табл. 6.4). У резисторів з чотирма кольоровими кільцями перше і друге кільця позначають величину опору в омах, третє кільце - множник, на який необхідно помножити номінальну величину опору, а четверте кільце визначає величину допуску у відсотках (рис. 6.11).

Таблиця 6.3

Опір		Допуск		Приклади позначення	
Множник	Код	Допуск, %	Код	Повне позначення	Код
1	K(E)	±0,1	B(Ж)	3,9 Ом±5%	3R9J
		±0,25	C(Y)	215 Ом±2%	215RG
10 ³	K(K)	±0,5	D(Д)	1 кОм±5%	1KOJ
		±1	F(P)	12,4 кОм±1%	12K4F
10 ⁶	M(M)	±2	G(Л)	10 кОм±5%	10KJ
		±5	J(И)	100 кОм±5	M10J
10 ⁹	G(Г)	±10	K(С)	2,2 МОм±10%	2M2K
		±20	M(B)	6,8 ГОм±20%	6G8M
10 ¹²	T(T)	±30	N(Ф)	1 ТОм±20%	1ТОм

Прімітка: У дужках вказано старе позначення.

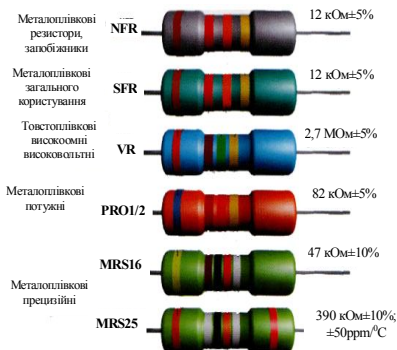
Таблиця 6.4

Кольорова маркіровка номінального опору і допуску вітчизняних резисторів

Колір знаку	Номінальний опір, Ом				Допуск, %	ТКО [ppm/°C]
	Перша цифра	Друга цифра	Третя цифра	Множник		
Срібний				10 ⁻²	±10	
Золотистий				10 ⁻¹	±5	
Чорний		0	0	1		
Коричневий	1	1	1	10	±1	100
Красний	2	2	2	10 ²	±2	50
Помаранчевий	3	3	3	10 ³		15
Жовтий	4	4	4	10 ⁴		25
Зелений	5	5	5	10 ⁵	0,5	
Голубий	6	6	6	10 ⁶	±0,25	10
Фіолетовий	7	7	7	10 ⁷	±0,1	5
Сірий	8	8	8	10 ⁸	±0,05	
Білий	9	9	9	10 ⁹		1

Кольорова маркіровка фірми "philips".

Маркіровка здійснюється 4,5 або 6 кольоровими смугами, що несуть інформацію про номінал, допуск і температурний коефіцієнт опору (ТКС) відповідно (табл. 6.5). Додаткову інформацію несе колір корпусу резистора і взаємне розташування смуг.



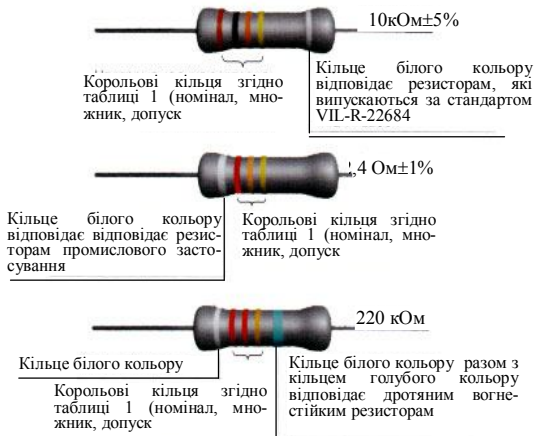
Таблиця 6.5

Колір знаку	Номінальний опір, Ом				Допуск, %	ТКС [ppm/°C]
	Перша цифра	Друга цифра	Третя цифра	Множник		
Срібний				10^{-2}	±10	
Золотистий				10^{-1}	±5	
Чорний		0	0	1		
Коричневий	1	1	1	10	±1	100
Червоний	2	2	2	10^2	±2	50
Помаранчевий	3	3	3	10^3		15
Жовтий	4	4	4	10^4		25
Зелений	5	5	5	10^5	0,5	
Голубий	6	6	6	10^6	±0,25	
Фіолетовий	7	7	7	10^7	±0,1	
Сірий	8	8	8	10^8		
Білий	9	9	9			

Нестандартна кольорова маркіровка.

Крім стандартної кольорової маркіровки багато фірм застосовують нестандартну (внутрішньофірмову) маркіровку. Нестандартна маркіровка застосовується для відмінності, наприклад, резисторів, виготовлених по стандартах MIL, від стандартів промислового і побутового призначення, вказує на вогнестійкість і так далі (рис. 6.12).

A. Маркіровка фірми Corning Glass Work (CGW)



B. Маркіровка фірми Panasonic



Рис. 6.12. Нестандартна кольорова маркіровка.

Кодова маркіровка вітчизняних резисторів

Відповідно до ГОСТ 11076-69 і вимогам 62 і 115-2 ІЕС перші 3 або 4 символи несуть інформацію про номінал резистора, що визначається по базовому значенню з рядів E3...E192 і множник. Останній символ несе інформацію про допуск, тобто клас точності резистора. Вимоги ГОСТ і ІЕС практично співпадають з ще одним стандартом BS1852 (British Standart) (рис. 6.13).

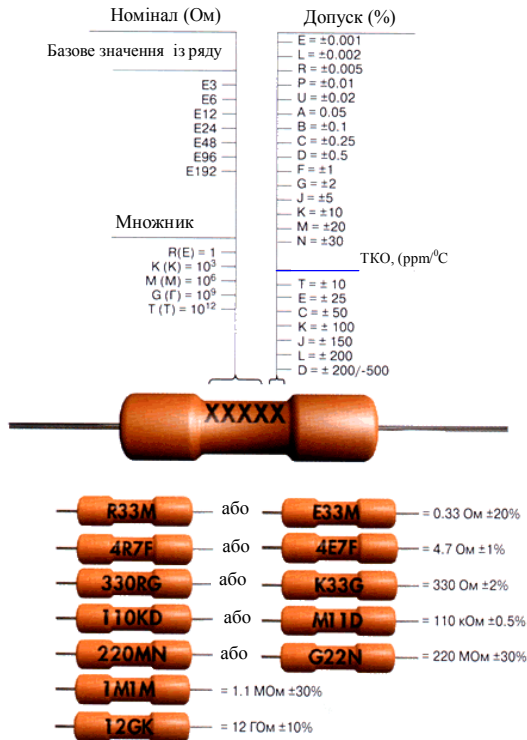


Рис. 6.13. Кодова маркіровка

Крім рядка, що визначає номінал і допуск резистора, може наноситься додаткова інформація про тип резистора, його номінальну потужність і дату випуску (рис. 6.14).



Рис. 6.14. Додаткова інформація про тип резистора.

Перемички і резистори з "нульовим" опором.

Багато фірм випускають як плавкі вставки або перемички (спеціальні дроти) Jumper Wire з нормованим опором і діаметром (0,6 мм, 0,8 мм) і резистори з "нульовим" опором. Резистори виконуються в стандартному циліндричному корпусі з гнучкими выводами (Zero-Ohm) або в стандартному корпусі для поверхневого монтажу (Jumper Chip). Реальні значення опору таких резисторів лежать в діапазоні одиниць або десятків міліом ($\sim 0,005 \dots 0,05$ Ом). У циліндричних корпусах маркіровка здійснюється чорним кільцем посередині, в корпусах для поверхневого монтажу (0603, 0805, 1206...) маркіровка зазвичай відсутня або наноситься код "000" (можливо "0") (рис. 6.15).

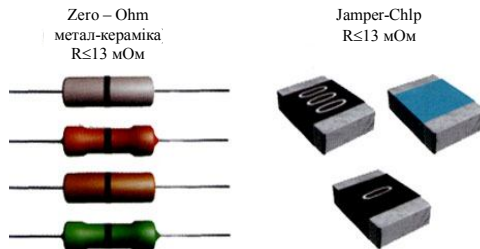


Рис. 6.15. Перемички і резистори з нульовим опором.

Кодова маркіровка прецизійних високо стабільних резисторів фірми "panasonic".

Кодова маркіровка прецизійних високостабільних резисторів фірми "panasonic" представлена на рис. 6.16.

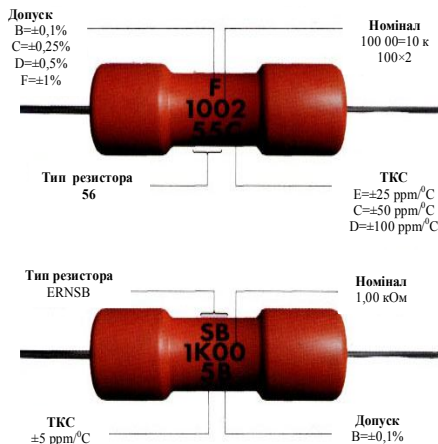


Рис. 6.16. Кодова маркіровка фірми "PANASONIC"

Кодова маркіровка фірми "PHILIPS".

Фірма "PHILIPS" кодує номінал резисторів відповідно до загальноприйнятих стандартів, тобто перші дві або три цифри указують номінальну Ом, а остання - кількість нулів (множник) (табл. 6.6). Залежно від точності резистора номінал кодується у вигляді 3 або 4 символів. Відмінності від стандартного кодування можуть полягати в трактуванні цифр 7,8 і 9 в останньому символі.

Таблиця 6.6

Останній символ	Номінал резистора	Останній символ	Номінал резистора
1	100...976 Ом	7	0,1...0,976 Ом
2	1...9,76 кОм	8	1...9,76 Ом
3	10...97,6 кОм	9	10...97,6 Ом
4	100...976 кОм	0	0 Ом
5	1...9,76 МОм	R	1...91 Ом
6	10...68 МОм		

Буква R виконує роль десяткової коми або, вона стоїть в кінці, указує на діапазон. Одиначний символ "0" указує на резистор з нульовим опором (Zero-Ohm) (рис. 6.17).

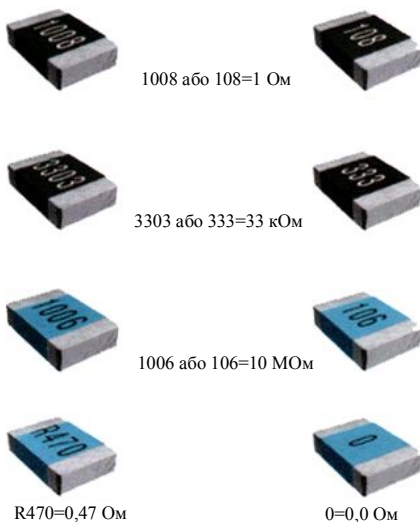


Рис. 6.17. Кодова маркіровка фірми "PHILIPS"

Таким чином, якщо на резисторі ви побачите код 107 — це не 10 з сім'ю нулями (100 МОм), а всього лише 0,1 Ом.

Кодова маркіровка фірми «BOURNS».

Перші дві цифри вказують значення в Ом, остання - кількість нулів. Розповсюджується на резистори з ряду E-24, допусками 1 і 5%, типорозмірами 0603, 0805 і 1206 (рис. 6.18).

Перші три цифри вказують значення в Ом, остання - кількість нулів. Розповсюджується на резистори з ряду E-96, допуском 1%, типорозмірами 0805 і 1206. Буква R грає роль десяткової коми (рис. 6.19).

Перші два символи - цифри, вказують значення опору в Ом, узяті з нижчеприведеної таблиці 4, останній символ - буква, що вказує значення множника: S=10⁻²; R=10⁻¹; A=1; B=10; C=10²; D=10³; E=10⁴; F=10⁵. Розповсюджується на резистори з ряду E-96, допуском 1%. типорозмером 0603 (рис. 6.20).



$$103=10\ 000=10\ \text{кОм}$$



$$442R=442\ 00=44,2\ \text{кОм}$$

Рис. 6.18. Маркіровка 3 цифрами

Рис. 6.19. Маркіровка 4 цифрами



$$10C=124\times 10^2=12,4\ \text{кОм}$$

Рис. 6.20. Маркіровка 3 символами

Позначення резисторів зарубіжних фірм.

Єдина структура умовних позначень резисторів за кордоном відсутня. Вона довільно встановлюється фірмами-виготівниками. У основу позначення постійних резисторів покладений буквено-цифровий (або цифровий) код, яким позначають тип, значення основних параметрів (номінальна потужність, ТКО, номінальний опір, допуск) і вид упаковки.

Для резисторів спеціального призначення (MIL, що виготовляються по стандартах) умовне позначення формується таким чином:

ПЕРШИЙ ЕЛЕМЕНТ - позначає серію резистора, згідно таблиці 6.7.

ДРУГИЙ, ТРЕТІЙ, ЧЕТВЕРТИЙ І П'ЯТИЙ ЕЛЕМЕНТ - цифровий код, що позначає номінальний опір.

ШОСТИЙ ЕЛЕМЕНТ - буквенний код, яким позначається рівень надійності резисторів протягом 1000 часів.

Таблиця 6.7

Серія	Найменування резисторів	№ стандарту
RL	Стандартні металоплівкові резистори (допуск $\pm 2\%$, $\pm 5\%$)	MIL-R-22684
RN	Металоплівкові прецизійні резистори	MIL-R-10509
RE	Дротяні потужні резистори з алюмінієвим радіатором	MIL-R-18546
RNC	Металоплівкові резистори з рівнем надійності "S"	MIL-R-55182
RLR	Металоплівкові резистори з рівнем надійності "P"	MIL-R-39017
RB	Дротяні прецизійні резистори мініатюрні і субмініатюрні	MIL-R-93
RBR	Дротяні прецизійні резистори з рівнем надійності "R"	MIL-R-39005
RW	Дротяні потужні резистори для поверхневого монтажу	MIL-R-26
RNR RNN	Металоплівкові прецизійні резистори з герметичним ущільненням	MIL-R-55182
RCR	Вуглецеві композиційні резистори	MIL-R-39008
M55342	Товстоплівкові кристали резисторів з рівнем надійності "R"	MIL-R-55342

Код	M	P	R	S
Рівень надійності (число відмов в %)	1	0,1	0,01	0,001

Позначенням номінального опору є код з чотирьох цифр, перші три з яких указують величину номінала опору в Омах, а остання - число подальших нулів. Для резисторів з допуском більше 10% код складається з трьох цифр, в якому значущими є перші дві. Деякі фірми указують номінальний опір, закодований відповідно до МЕК № 62, 63:

Для прикладу розглянемо умовне позначення постійних резисторів фірми Philips :

ПЕРШИЙ ЕЛЕМЕНТ - тип (клас) резистора: *AC, ACL (Cemented Wirewound Nonisolated)* – потужні, керамічні, дротяні, *CR (Carbon Resistor)* – вуглецеві, плівкові, *EH (Power Wirewound Isolated)* - потужні, опорні,

дротяні. *MPR (Metal film precision Resistor)* - металоплівкові прецизійні, *MR (Vetal film Resistor)* - металоплівкові, *NPR (Fussible)* – запобіжні, металоплівкові, *PR (Power metal film Resistor)* – потужні, металоплівкові, *RC (Chip Resistor)* - безкорпусні (кристали), *SFR (Standart film Resistor)* - стандартні плівкові, *VR (High- ohmic Voltage Resistor)* - високовольтні, *WR (Enamelled Wirewound Isolated Resistor)* - потужні емальовані плівкові;

Опір	код	Опір	код	Опір	код	Опір	код
0,1 Ом	R10	47 Ом	47R	4,7 кОм	4K7	220 кОм	M22
0,15 Ом	R15	68 Ом	68R	6,8 кОм	6K8	330 кОм	M33
0,22 Ом	R22	100 Ом	100R	10 кОм	10K	470 кОм	M47
0,33 Ом	R33	150 Ом	150R	15 кОм	15K	680 кОм	M68
4,7 Ом	4R7	220 Ом	220R	22 кОм	22K	1,0 Мом	1M0
6,8 Ом	6R8	330 Ом	330R	33 кОм	33K	1,5 Мом	1M5
10 Ом	10R	1 кОм	1K0	47 кОм	47K	2,2 Мом	2M2
15 Ом	15R	1,5 кОм	1K5	68 кОм	68K	3,3 Мом	3M3
22 Ом	22R	2,2 кОм	2K2	100 кОм	M10	4,7 Мом	4M7
33 Ом	33R	3,3 кОм	3K3	150 кОм	M15	6,8Мом	6M8

ДРУГИЙ ЕЛЕМЕНТ - максимальний діаметр корпусу (окрім класу RC): 06 — 0,6 мм; 08 — 0,8 мм; 16—1,6 мм; 21 — 2,1 мм; 24 або 25 — 2,5 мм; 30—3 мм; 31 або 34 — 3,1 мм; 37 або 39 — 3,7 мм; 52 або 54 — 5,2 мм; 68 або 74 — 6,8 мм.

ПРИМІТКА: Для класів AC, ACL і EH цифри позначають допустиму потужність розсіяння: 01 - 1 Вт; 02 - 2 Вт; 03-3 Вт; 04 - 4 Вт; 05 - 5 Вт; 07—7 Вт; 09-9 Вт; 10 - 10 Вт; 15 - 15 Вт; 17 - 17 Вт; 20 - 20 Вт.

ТРЕТІЙ ЕЛЕМЕНТ - кодується буквеними символами і позначає конструктивне виконання контактних виводів і матеріал покриття контактів. Позначення номінального опору, залежно від типу резистора, може бути представлено:

- кодом з чотирьох (або три) цифр, в якому перші три (або дві) є значущими, а остання позначає число подальших нулів;
- кодом відповідно до стандарту МЕК № 62;
- колірним кодом відповідно до Публікації МЕК № 63.

Деякі фірми застосовують кольорове кодування для відмінності резисторів, що виготовляються по стандартах *MIL*, від резисторів промислового і побутового призначення або позначення ТКО для відмінності дротяних резисторів від постійних.

Кольорова відмінність корпусів резисторів, що випускаються

Колір корпусу	Тип резистора
Світло-коричневий	CR16, CR25, CR37, CR52, CR68
Світло-зелений	SFR16, SFR25, SFR30
Сірий	NFR25, NFR30
Зелений	MR16, MR25, MR30, MR52, MR24E(C), MR34E(C), MR54E(C), MR74E(C), MPR24, MPR34, AC04, AC05, AC07, AC10, AC15, AC20, ACL01, ACL02, ACL03
Ясно-блакитний	VR25, VR37, VR68
Червоний	PR37, PR52
Коричневий	WRO167E, WRO842E, WRO825E, WRO865E

Маркіровка smd-резисторів.

«Резистори» нульового опору (перемички на платі) кодуються однією цифрою «0».

Більша кількість знаків позначає:

Кодування 3 або 4 цифрами

ABC позначає $AB \times 10^C$ Ом, наприклад 102 — це 10×10^2 Ом = 1 кОм

ABCD позначає $ABC \times 10^D$ Ом, точність 1% (ряд E96)

наприклад 1002 — це 100×10^2 Ом = 10 кОм

Кодування цифра-цифра-буква (JIS-C-5201)

Ряд, допуск 1%.

Мантиса t значення опору кодується 2 цифрами (див. таблицю), ступінь при 10 кодується буквою.

Приклади: 09R = 12,1 Ом; 80E = 6,65 Мом; все 1%.

- S = 10^{-2}
- R або X = 10^{-1}
- A = 100 = 1
- B = 10
- C = 10^2
- D = 10^3

- $E = 10^4$
- $F = 10^5$

код	т	код	т	код	т	код	т	код	т	код	т
01	100	17	147	33	215	49	316	65	464	81	681
02	102	18	150	34	221	50	324	66	475	82	698
03	105	19	154	35	226	51	332	67	487	83	715
04	107	20	158	36	232	52	340	68	499	84	732
05	110	21	162	37	237	53	348	69	511	85	750
06	113	22	165	38	243	54	357	70	523	86	768
07	115	23	169	39	249	55	365	71	536	87	787
08	118	24	174	40	255	56	374	72	549	88	806
09	121	25	178	41	261	57	383	73	562	89	825
10	124	26	182	42	267	58	392	74	576	90	845
11	127	27	187	43	274	59	402	75	590	91	866
12	130	28	191	44	280	60	412	76	604	92	887
13	133	29	196	45	287	61	422	77	619	93	909
14	137	30	200	46	294	62	432	78	634	94	931
15	140	31	205	47	301	63	442	79	649	95	953
16	143	32	210	48	309	64	453	80	665	96	976

Приклад кольорового маркування резистора $R_{ном} = 4,7 \text{ кОм} \pm 5\%$ наведено на рис. 6.21.

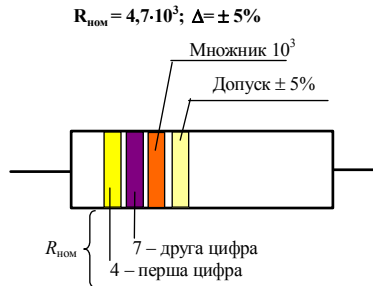


Рис. 6.21. Приклад кольорового маркування резистора

Резистори постійного опору відносяться до елементів підвищеної надійності: середня інтенсивність їх відмов дорівнює 10^6 1/год.

Резистори змінного опору мають середню інтенсивність відмов на порядок меншу.

Найбільш частим видом відмов резисторів є перегорання резистивного шару, обрив виводів в місці кріплення, зміна величини опору вище допустимої, у резисторів змінного опору – механічний знос рухомих частин.

Гарантійний ресурс резисторів загального застосування 5 – 10 тис. год., термін зберігання – до 11 років в складських умовах, або 3 роки – в польових умовах.

Термін зберігання резисторів обмежується допустимим відхиленням їх опору за визначений проміжок часу. В кінці терміна зберігання зміна опору резистора не повинна перевищувати $\pm 9\%$.

Система повних умовних позначень резисторів складається з таких елементів:

1-й елемент (одна або дві літери) – позначає підклас резистора (R – резистор постійний, RP – резистор змінний, RP – набір резисторів, B – блоки резисторів).

2-й елемент (цифра) – позначає групу резисторів за матеріалом резистивного шару (1 – недротові, 2 – дротові та металофольгові)

3-й елемент (цифра), через дефіс, позначає реєстраційний номер .

Наприклад: RP1-46 – резистор змінний, недротовий з реєстраційним номером 46.

До системи умовних позначень наборів резисторів входять такі елементи:

1-й елемент – літери RP;

2-й елемент – (цифра) – варіант конструктивного виконання;

3-й елемент – (число) – номер за порядком розробки;

4-й елемент – (цифра) – типова схема побудови набору.

Повне умовне позначення резисторів змінного опору показано на рис. 6.22, резисторів постійного опору – на рис. 6.23.

Зустрічаються резистори із застарілими позначеннями, в яких:

1-й елемент: SP – резистор змінний; S – резистор постійний;

2-й елемент (цифра), яка вказує на вид резистивного матеріалу:

1 – тонкошарові з карбону та із суміші бору та карбону;

2 – тонкошарові металодіелектричні та металоокисні;

3 – композиційні плівкові;

4 – композиційні об'ємні;

5 – дротяні;

6 – тонкошарові металізовані.

3-й елемент, через дефіс – реєстраційний номер типа резистора.

Наприклад: S2-33 – резистор постійний, тонкошаровий, металоплівковий з реєстраційним номером 33.

4-й елемент – вказує на номінальну потужність розсіювання, Вт;

5-й елемент – номінальний опір, Ом;

6-й елемент – допуск, вказується в процентах;

7-й елемент – якщо $\Delta \leq \pm 1\%$, то резистор вважається прецизійним (як правило, це дротяні резистори) і цей елемент вказує на температурний

коефіцієнт опору $A = 0,001\% \text{ } ^\circ\text{C}$ або $B = 0,002\% \text{ } ^\circ\text{C}$;
 якщо $\Delta > \pm 1\%$, то вказується група по шумах A, B ;
8-й елемент – вказує на варіант кліматичного виготовлення.

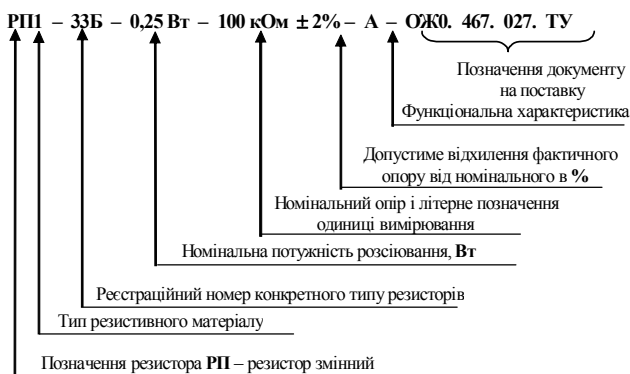


Рис. 6.22. Повне умовне позначення резисторів змінного опору

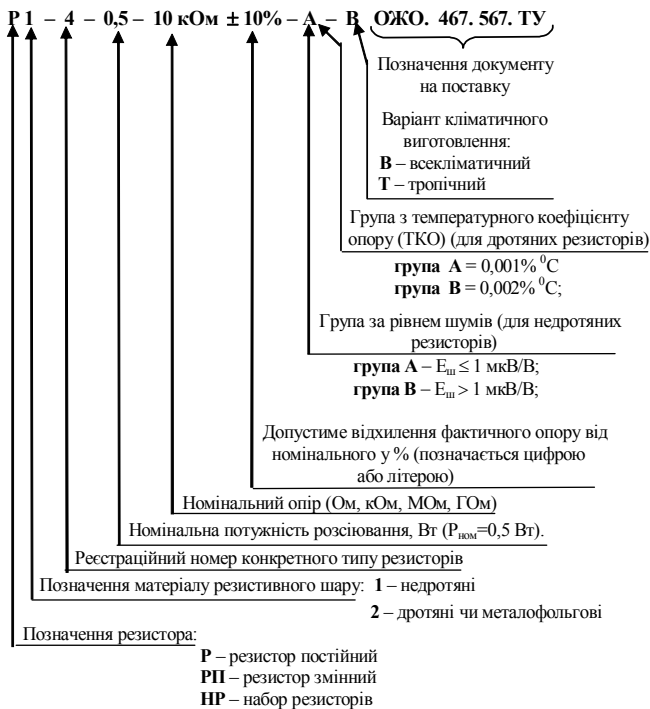


Рис. 6.23. Повне умовне позначення резисторів постійного опору

Враховуючи те, що корпус резистора має малі розміри і відобразити повне умовне позначення маркування неможливо, тому вводять скорочене умовне позначення, куди входить: тип резистора, величина номінального опору та величина допустимого відхилення фактичного опору від номінального, а якщо дозволяють розміри, то вказується і величина номінальної потужності розсіювання (рис. 6.24).



Рис. 6.24. Скорочене умовне позначення резисторів

Часто ще зустрічаються **старі позначення резисторів**, де вказується тип, вид захисту резистивного елементу, та особливі властивості резисторів.

Перша літера – вид резистивного елементу – **У** – вуглецеві

К – композиційні

М – металоплівкові

Б – боровуглецеві

Друга літера – вид захисту резистивного елементу – **Л** – лаковий

Г – герметичний

Е – емальований

І – ізований

В – вакуумний

Третя літера – особливі властивості – **Т** – термостійкий

П – прецизійний

В – високоомний

О – об'ємний

Н – низькоомний

Наприклад:

МЛТ – 0,5 – 300 кОм ± 5 – А – резистор постійного опору, металоплівковий, лакований, термостійкий, допустима потужність розсіювання 0,5

Вт, номінальний опір – 300 кОм, допустиме відхилення фактичного опору від номінального – ± 5 , група з шуму А – менше 1 мкВ/В;

ПЭВТ – 10 – 47 кОм $\pm 10\%$ – резистор постійного опору, дротяний, емальований, вологостійкий, термостійкий, допустима потужність розсіювання 10 Вт, номінальний опір 47 кОм, допуск $\pm 10\%$;

УЛИ – 0,125 – 5кБИ – резистор постійного опору, вуглецевий, лакований, вимірювальний, допустима потужність розсіювання 0,125 Вт, номінальний опір 5,6 кОм, допуск $\pm 5\%$;

ТВО – теплостійкий, вологостійкий, об'ємний;

МОН – металоокисний низькоомний резистор;

ОМЛТ – особливо стійкий до механічної дії, металоплівковий, лакований, термостійкий резистор.

6.5. Основні типи резисторів

Резистори, які застосовуються в радіоелектронній апаратурі, можна розділити на наступні групи: недротяні постійні та змінні резистори, дротяні постійні та змінні резистори. Основні типи резисторів представлені на рис. 6.25.

Недротяні постійні резистори. Це найбільш числена група резисторів, яка включає в себе, як резистори загального призначення, так і спеціальні.

Вуглецеві резистори. Резистивний елемент представляє собою плівку вуглецю, яка нанесена на базовий елемент. Частіше всього базовий елемент виготовляється з кераміки і може бути суцільним або трубчатим. Плівку вуглецю отримують розкладанням гептану (C_7H_{16}) у вакуумі або інертному газі при температурі 920 – 1030 °С. Максимальна робоча температура не перевищує 150 °С.

Для захисту від вологи резистори покриваються двома шарами емалі.

Вуглецеві резистори характеризуються високою стабільністю та малою залежністю повного опору від частоти.

Металоплівкові та металоокисні резистори мають резистивний елемент, який виготовлений в виді тонкої плівки (0,1 – 0,3 мкм) із спеціальних сплавів або металоокисних матеріалів (кермети, селіцити). Плівка наноситься методом вакуумнапилення на керамічну заготовку циліндричної форми. Найбільша робоча температура резистивної плівки 200 °С, ТКО не перевищує $\pm 2000 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Композиційні резистори мають резистивний елемент плівкового або об'ємного типу виготовлений зі спеціальної композиції, яка складається із провідячого, зв'язуючого та наповнюючого компонентів). В якості провідячого компонента використовують вуглець (графіт або сажу), окиси металів, карбід хрому, в якості зв'язуючого – терморективні смоли, кремнійорганічні з'єднання, скло і т. ін. Недоліком композиційних

резисторних елементів являється надвисока залежність величини опору від прикладеної напруги та частоти, значний рівень особистих шумів.



Рис. 6.25. Основні типи резисторів

Недротяні змінні резистори. Це основний тип змінних резисторів для РЕА. Резистивний елемент резистора може бути виготовлений у виді плівки або об'ємним. В першому випадку резистивна плівка наноситься на

гетинаксову скобу. Змінюючи товщину резистивної плівки за периметром скоби, можна отримати необхідну функціональну характеристику резистора. В другому випадку маса композиції запресовується в керамічну основу резистора. Резистори з об'ємним резистивним елементом мають меншу густину струму, кращі умови відводу тепла та надвисоку вологостійкість.

Дротяні резистори. У резисторів цього типу резистивний елемент виготовляється зі спеціального високоомного дроту. Для дротяних резисторів характерні висока точність, стабільність, термовологостійкість та дуже повільне старіння. Недоліком дротяних резисторів являється їх відносно невеликий частотний діапазон та значна вартість.

Дротяні резистори в основному використовуються в якості поділювачів частоти, навантажувального опору випрямачів, прецизійних опорів, змінних резисторів із спеціальною функціональною характеристикою.

Мікромодульні резистори призначені для використання в мікромодулях плоского та етажерного типів. Випускаються дротяні та недротяні мікромодульні резистори. Основними особливостями їх являються дуже малі габарити, мала потужність розсіювання, природність для монтажу в мікромініатюрній радіоелектронній апаратурі.

Крім перелічених основних типів резисторів широке застосування знайшли **набори та блоки резисторів.**

Напівпровідникові резистори.

До них відносяться резистори спеціального призначення з резистивним елементом із напівпровідникового матеріалу. До них відносяться: терморезистори, варистори, фоторезистори.

Резистори з низьким ТКО від Panasonic.

Загальний опис:

Серія **ERA6AR/6AP** . це прецизійні резистори, призначені для областей застосування, де потрібні висока точність і низький ТКО.

Серія **ERA8A** - це високонадійні чіп резистори для автомобільної електроніки на потужність 0,25Ватт. Обидві серії випускаються по ряду номінальних опорів E24.

Технічні характеристики:

Серія ERA6AR/6AP (чіп-розмір 0805) висока точність до 0,05% і низький ТКО до 10ppm/°C

Серія ERA8A (чіп-розмір 1206) потужність 0,25Ватт.

Висока термостабільність - зміна номінала опору менш ніж на 0,1% при 155 °C.

Висока влагостійкість - зміна номінала опору менш ніж на 0,1% при 85 °C і відносній вологості 85%

Застосування:

Високоточні вимірювальні прилади, аудіо устаткування і автомобільна електроніка.

Лінійка силових резисторів.

Лінійка продуктів резисторів постійного опору поповнилася моделлю CRM2512-FT. Ці компоненти – силові резистори призначені для поверхневого монтажу на друкарську плату і мають номінальну потужність в 2 Вт. Вони можуть витримувати вимоги базових тестів ІТУ-Т К.20, К.21 і К.45 в межах норми, що робить їх ідеальними для телекомунікаційних портів, з такими функціональними можливостями, як ADSL і апаратними засобами VDSL2 або для тестового устаткування.

Перші промислові резистори, виконані за технологією *Power Metal Strip*.

На відміну від стандартного пристрою типу WSL0603, WSL0603.18 є компактним резистором поверхневого монтажу з подвоєною допустимою потужністю, призначеним для високопотужних, струмочутливих застосувань в DC/DC перетворювачах, системах управління блоками живлення і іонно-літєвими батареями, VRM обчислювальних систем і телекомунікаційних систем. У автомобільних системах, резистор оптимізований для електронного управління, включаючи інформаційну електроніку для водія і клімат-контролю.

Виконані із спеціально добірних і стабілізованих матеріалів, нові резистори пропонують високий показник коефіцієнта відношення потужності до габаритів корпусу, зберігаючи чудові електричні характеристики, які забезпечує технологія *Power Metal Strip*.

WSL0603.18 дозволяє розробникам комплексного устаткування використовувати компактні друкарські плати, які у свою чергу збільшують темпи виробництва і скорочують витрати на сировині, більш того задовольняють ринковий попит на компактні і високопродуктивні кінцеві продукти.

Відмітні характеристики:

- надзвичайно низькі значення опору: 0,015 Ом до 0,1 Ом при стандартній точності номінала $\pm 0,5\%$ і $\pm 1,0\%$;
- частота: 50 МГц;
- низька індуктивність: 0.5 нГ до 5 нГ.

Новий резистор стійкий до високих температур, теплових і механічних навантажень, вологи і вібрацій. Суцільнозварна конструкція характеризується наявністю виводів, що припаюються, і наявністю резистивного елемента, виконаного з хромонікелевого або мідно-марганцевого сплаву.

Ультраточні резистори SMR3D.

SMRxDZ – це надпрецизійні фольгові ЧП резистори, що володіють найточнішими параметрами основних робочих характеристик: низький температурний коефіцієнт, висока



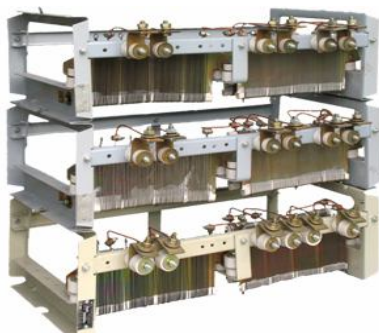
точність, висока стабільність впродовж всього терміну служби, малі шуми, слабкі термічні електромагнітні поля і незначний коефіцієнт напруги.

Один з найважливіших параметрів, що впливає на стабільність резисторів, - це температурний коефіцієнт опору (ТКО). Не дивлячись на те, що фольгові резистори самі по собі мають низький коефіцієнт, даний параметр був додатково покращуваний в **SMRxDZ** серії резисторів завдяки використанню надпрецизійної технології *Bulk Metal Z-Foil*.

Технологія *Bulk Metal Foil* була розроблена компанією **Vishay** ще в 1982 році. Результатом роботи компанії стали фольгові резистори з низьким ТКО і високою стабільністю параметрів незалежно від змін температури. По сьогоднішній день фольгові резистори перевершують всі інші резистивні компоненти по точності, стабільності і надійності.

Номинал резистора	Точність	ТКО
50 Ом - 80 кОм	±0,01%	±0,2 ppm/°C
20 Ом - 50 Ом	±0,02%	±0,2 ppm/°C
10 Ом - 20 Ом	±0,05%	±0,2 ppm/°C
5 Ом - 10 Ом	±0,1%	±0,2 ppm/°C

Технологія *Z-Foil* (2000 рік) стала новим проривом компанії **Vishay**. Вперше було досягнуте абсолютне значення ТКО $\pm 0,2 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. Чим нижче ТКО, тим краще резистор зберігає свій номінальний опір при зміні температури або самонагріванні. Назва технології походить від назви сплаву, що застосовується для виробництва резисторів.



Блоки кранів резисторів типу БК12

Блоки кранів резисторів типу БК12, призначені для запуску, гальмування, а також регулювання швидкості електродвигунів, що працюють в електроприводах вантажопідйомних кранів. Блоки резисторів мають мідні виводи, що пройшли електрохімічне лудіння, завдяки чому відрізняються максимально тривалим терміном

експлуатації, а також не схильні до корозії.

Технічні характеристики.

Блок є конструкцією відкритого виконання, що складається з двох сталевих пластин-боковин, сполучених двома планками з поперечним

стягуванням. На боковинах і поперечному стягуванні на трубчастих фарфорових ізоляторах встановлюються резистори. Максимальна кількість резисторів для блоку резисторів типу БК6 - 6 штук.

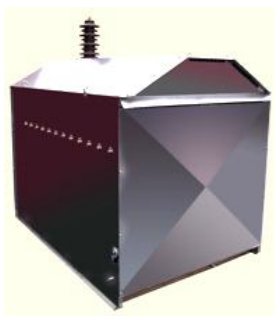
Максимальна кількість резисторів для блоку резисторів типу БК12 - 12 штук. Резистор складається із сталеві пластины-утримувача з насадженими на неї фарфоровими ребристими ізоляторами. У канавках ізолятора укладається навита в спіраль фехралевая стрічка або константановий дріт, до якого припаяні кінцеві і проміжні контактні відведення. На одній з планок, що скріплюють пластины боковини, на трубчастих фарфорових ізоляторах встановлені зовнішні контактні зажими, сполучені з кінцевими і проміжними відведеннями резисторів мідним неізольованим дротом 4 - 6 мм.

Блоки резисторів призначені для роботи в колах змінного струму напругою до 660 В, частотою 50-60 Гц і в ланцюгах постійного струму напругою до 440 В.

Допустиме перевищення температури для резистивного елементу з фехралевой стрічкою не більш 370°С, для резистивного елементу з константановим або фехралевим дротом - не більш 320°С. Допустиме перевищення температури контактних зажимів для під'єднання зовнішніх провідників не більш 80°С.

Резистори заземлення нейтралі 6-35 кВ. Резистори NER 6-35.

Резистори для заземлення нейтралі призначені для з'єднання нейтральної точки обмоток 3-35 кВ трансформатора (нейтралі мережі) із землею.



Резистори для заземлення нейтралі використовуються в електричних мережах 3-35 кВ для обмеження перенапружень при однофазних замиканнях на землю і забезпечення селективної і надійної роботи релейного захисту від однофазних замикань на землю.

Застосування резистивного заземлення нейтралі в комбінації з відключенням однофазних замикань на землю знижує пошкодження кабельних ліній (муфт), повністю виключає пошкодження трансформаторів напруги, виключає виникнення багатомісних пошкоджень ізоляції (вихід з ладу декількох високовольтних електродвигунів, кабельних ліній), виключає виникнення подвійних замикань.

Типова серія резисторів:

- номінальна напруга мережі 3, 6, 10, 15, 20, 35 кВ;
- номінальний струм від 1 до 2000 А (зокрема нестандартні значення за замовленням споживача);

- час роботи в режимі з однофазним замиканням в мережі від декількох секунд до необмежено тривалого;
- діапазон робочих температур від -60°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- виконання для зовнішньої установки;
- висота установки над рівнем моря не більше 1000 м.

Резистори для заземлення нейтралі сетей 6 кВ.

Тип резистора	Номинальний опір, Ом	Номинальна потужність, кВт	Номинальна напруга мережі, кВ	Номинальний струм резистора, А	Допустимий час протікання номінального струму, с
NER-9-1440-6	9	1440	6	400	5 (10)
NER-18-727-6	18	727	6	200	5 (10)
NER-36-363-6	36	363	6	100	5 (10)
NER-91-146-6	91	146	6	40	5 (10)
NER-300-40-6	300	40	6	11,5	тривало
NER-500-24-6	500	24	6	7	тривало
NER-700-18-6	700	18	6	5	тривало
NER-1000-12-6	1000	12	6	3,5	тривало
NER-1700-7-6	1700	7	6	2	тривало
NER-2000-7-6	2000	6	6	1,7	тривало

Резистори для заземлення нейтралі сетей 10 кВ

Тип резистора	Номинальний опір, Ом	Номинальна потужність, кВт	Номинальна напруга мережі, кВ	Номинальний струм резистора, А	Допустимий час протікання номінального струму, с
NER-14,4-2310-10	14,4	2310	10	400	5 (10)
NER-29-1160-10	29	1160	10	200	5 (10)
NER-58-580-10	58	580	10	100	5 (10)
NER-150-240-10	150	240	10	40	5 (10)
NER-500-67-10	500	67	10	11,5	тривало
NER-800-42-10	800	42	10	7	тривало
NER-1000-34-10	1000	34	10	5,8	тривало
NER-3000-12-10	3000	12	10	2	тривало

Резистори для заземлення нейтралі сетей 20 кВ

тип резистора	Номинальний опір, Ом	Номинальна потужність, кВт	Номинальна напруга мережі, кВ	Номинальний струм резистора, А	Допустимий час протікання номінального струму, з
NER-11,5-11500-20	11,5	11500	20	1000	5 (10)
NER-23-5750-20	23	5750	20	500	5 (10)
NER-58-2320-20	58	2320	20	200	5 (10)

Резистори для заземлення нейтралі сетей 35 кВ

Тип резистора	Номинальний опір, Ом	Номинальна потужність, кВт	Номинальна напруга мережі, кВ	Номинальний струм резистора, А	Допустимий час протікання номінального струму, с
NER-50-8000-35	50	8000	35	400	5 (10)
NER-100-4000-35	100	4000	35	200	5 (10)
NER-200-2000-35	200	2000	35	100	5 (10)
NER-1000-408-35	1000	408	35	20	тривало
NER-2000-204-35	2000	204	35	10	тривало
NER-3000-136-35	3000	136	35	6,7	тривало
NER-4000-102-35	4000	102	35	5	тривало
NER-8000-51-35	8000	51	35	2,5	тривало

Примечание: Можливі нестандартні виконання резисторів за замовленням користувача.

Конструкція.

Резистори для заземлення нейтралі сконструйовані для застосування на відкритому повітрі (зовнішня установка) при температурі повітря від -60°C до +40°C, з висотою над рівнем моря до 1000 м, з нормальним рівнем забруднення, зокрема в місцях з джерелами піску і пилу

Шафа резистора виготовлена з листової сталі з гарячим оцинкуванням (або неіржавіючої сталі). У шафі на опорних ізоляторах укріплені блоки

елементи опору. Охолодження резистора забезпечується за рахунок природної циркуляції повітря. Вентиляційні перфоровані отвори розташовані на двох протилежних сторонах шафи. Шафа має ступінь захисту IP23.



Прохідний ізолятор для приєднання резистора до нейтралі трансформатора розміщений на даху шафи. Прохідний ізолятор для підключення до загального заземляючого пристрою підстанції (станції) виконаний в нижній частині шафи.

Резистори для заземлення нейтралі мають вбудований трансформатор струму для підключення релейного захисту. Виводи для підключення вимірювального трансформатора струму розташовані в нижній бічній частині шафи.

Переваги резисторів NER:

- стабільність параметрів резистора протягом терміну експлуатації (робочі елементи резистора виконані з металу);
- стійкість до корозії (шафа резистора виконана з неіржавіючої сталі);
- захист персоналу від прямого доступу до струмоведучих частин (шафа із ступенем захисту IP23);
- малі габарити і маса;
- вбудований трансформатор струму для організації релейного захисту;
- вибухобезпечність і пожеаробезпечність (охолодження і ізоляція резистора повітряні, у складі резистора немає горючих матеріалів).

Резистори підстроєчні АСР з фіксацією (одноповоротні вуглецеві СА9/СА14, металокерамічні (керметні) СЕ9/СЕ14) (табл. 6.9):

- висока стабільність електричного контакту завдяки великій площі контакту;
- потенціометри поміщені в пластиковий корпус і можуть регулюватися викруткою, коліщатком або спеціальною ручкою;
- захист класу IP5 (□ило захищені);
- вироби проходять 100% контроль якості на стадії виробництва і відповідають стандарту ISO 9002;
- збільшене число допустимих циклів перебудови;
- точна фіксація вибраної настройки;
- велика кількість можливих фіксацій.

Потенціометри - змінні резистори - імпортного виробництва - RV16.

Потенціометр (змінний резистор) вуглецевий; діаметр 16 мм. Вал металевий діаметр 6 мм, довжина від 8 до 30 мм; можливі різні типи валів. Діапазон номінального опору от 0,5 кОм до 1 МОм. Функціональна

характеристика А, В, С. Потужність 0,2 Вт. Допустима напруга не більше 150 В. Для навісного та печатного монтажу. Допуск не більше $\pm 10\%$.

Таблиця 6.9

Тип	CA9	CA14	CE9	CE14
Функціональна характеристика	лінійна(А), логарифмічна (В), зворотньоюлогарифмічна(С)			
Діапазон номіналів	100 Ом ... 5 МОм (А) 1кОм ... 2,2 МОм (В, С)			
Максимальна робоча напруга (постійне)	200 В (А) 150 В (В, С)	250 В (А) 200 В (В, С)	200 В (А) 200 В (В, С)	250 В (А) 250 В (В, С)
Діапазон робочих температур	-25.+70°C		-40.+125°C	
Допуск	$\pm 20\%$ ($\pm 10\%$)* (100 Ом - 1МОм); $\pm 30\%$ (>1МОм - 5МОм)			
Температурна нестабільність	+200/-300 ppm (100 Ом - 10кОм); +200/-500 ppm (>10 кОм - 5МОм)		± 100 ppm	
Допустима кількість циклів перебудови	10.000 (більше – за домовленням)			
Зусилля рухомого елемента, що крутять, Н/см	0,4-2,0	0,5-2,5	0,4-2,0	0,5-2,5
Кут повороту (механічний)	240° \pm 5°	265° \pm 5°	240° \pm 5°	265° \pm 5°
Кут повороту (електричний)	220° \pm 20°	245° \pm 20°	220° \pm 20°	245° \pm 20°
Можлива кількість фіксацій				
	CA14/CE14		CA9/CE9	
	1,2,3,4,5,6,8,9,17,22,27...max 38 в межах 260° (можливе замовлення будь-якої кількості фіксацій)		2,3,4,6,7,10...max 20 в межах 240° (можливе замовлення будь-якої кількості фіксацій)	



Потенціометр (змінний резистор) вуглецевий; діаметр 16 мм. Вал металевий діаметр 6 мм, довжина від 8 до 30 мм; можливі різні типи валу. Діапазон опору від 0,5 кОм до 1 мОм. Функціональна характеристика А, В, С. Потужність 0,1 Вт. Для навісного та печатного монтажу. Допуск не більше $\pm 10\%$.

Потенціометр (змінний резистор) з виключачелем (1 пара на замикання), вуглецевий; діаметр 16 мм. Вал металевий діаметр 6 мм, довжина від 8 до 30

мм; можливі різні типи валів під зріз й ребристий. Діапазон опору від 0,5 кОм до 1 МОм. Функціональна характеристика В. Потужність 0,25 Вт. Допустима напруга не більше 250 В. Для навісного та печатного монтажу. Допуск не більше $\pm 10\%$. Застосовується в сенсорних пристроях.



Потенціометр (змінний резистор) здвоєний, вуглецевий; діаметр 16 мм. Вал пластмасовий діаметр 6 мм, довжина від 8 до 30 мм; можливі різні типи валу. Діапазон номінального опору від 0,5 кОм до 1 МОм. Допустима напруга не більше 50 В. Функціональна характеристика А, В, С. Потужність 0,05 Вт. Для навісного й печатного монтажу. Допуск не більше $\pm 10\%$.

Найбільше застосування знайшли потенціометри (змінні резистори) слідуючих фірм "Mika", "Tomy", "Alps". В програмі поставок тільки стандартний ряд номіналов 0,5к, 1к, 2к, 5к, 10, 20к, 50к, 100к, 200к, 250к, 500к, 1МОм.

Система позначень (кодівка) потенціометрів (змінних резисторів):

RV16XXX-B-100K-TB-DB, де **XXX** - порядковий номер потенціометра (змінного резистора) згідно технічної документації; **В** - функціональна характеристика; **100K** - номінал (значення опору); **TB** - тип валу; **DB** - довжина валу

Гальмівні переривники і гальмівні резистори. Гальмівні переривники.

При гальмуванні двигун віддає енергію назад – в частотний перетворювач (ЧП) (працює в генераторному режимі) унаслідок чого напруга на шині постійного струму підвищується. ЧП намагається зменшити напругу,



збільшуючи вихідну частоту, тим самим зменшуючи ковзання двигуна. Інтенсивність гальмування в цьому випадку залежить від втрат потужності в перетворювачі і двигуні. ЧП можна гальмувати з потужністю близько 20% від номінальної за рахунок власних втрат двигуна і перетворювача. Це зазвичай достатньо для невеликих неінерційних навантажень, тобто там, де кінетична енергія невелика або час гальмування не критичний. Якщо потрібно провести швидке гальмування, необхідно

використовувати гальмівний переривник і гальмівний резистор.

Тип зовнішнього гальмівного переривника	Потужність ЧП, до якого здійснюється підключення, кВт	Гальмівний момент %	Номінальний / максимальний струм, А	Габарити, (Ш*В*Г) мм	Вага, кг
ТП-7,5-22 (8 А)	7,5-22	150	8/40	175×128×70	3
ТП-30-55 (10 А)	30-55	150	10/75	185×147×102	4
ТП-75-110 (20 А)	75-110	150	20/100	315×218×115	4
ТП-55-110 (70 А)	55-110	150	70/150	386×218×140	8
ТП-132-200 (85 А)	132-200	150	85/200	386×218×140	8
ТП-132-200 (110 А)	132-200	150	110/200	412×245×201	12
ТП-220-285 (130 А)	220-285	150	130/300	412×245×201	12
ТП-315-400 (130 А)	315-400	150	130/400	412×245×201	12

Потужність ЧП, до якого здійснюється підключення, кВт	Тип / необхідна кількість зовнішніх гальмівних резисторів
0.75 / 1.5	400 Ω (0.250 кВт) / 1 шт
2.2	250 Ω (0.250 кВт) / 1 шт
3.7	150 Ω (0.400 кВт) / 1 шт
5.5	100 Ω (0.500 кВт) / 1 шт
7.5	75 Ω (0.800 кВт) / 1 шт
11	50 Ω (1.000 кВт) / 1 шт
15	40 Ω (1.500 кВт) / 1 шт
18.5	30 Ω (4.000 кВт) / 1 шт
22	30 Ω (4.000 кВт) / 1 шт
30	20 Ω (6.000 кВт) / 1 шт
37	16 Ω (9.000 кВт) / 1 шт
45	13.6 Ω (9.000 кВт) / 1 шт
55	20 Ω (6.000 кВт) / 2 шт
75	16 Ω (9.000 кВт) / 2 шт
93	20 Ω (6.000 кВт) / 3 шт
110	20 Ω (6.000 кВт) / 3 шт
132	20 Ω (6.000 кВт) / 4 шт
160	13.6 Ω (9.000 кВт) / 4 шт
185	13.6 Ω (9.000 кВт) / 4 шт
200	13.6 Ω (9.000 кВт) / 5 шт
220	13.6 Ω (9.000 кВт) / 5 шт
250	13.6 Ω (9.000 кВт) / 5 шт
280	13.6 Ω (9.000 кВт) / 6 шт
315	13.6 Ω (9.000 кВт) / 6 шт
350	13.6 Ω (9.000 кВт) / 7 шт
400	13.6 Ω (9.000 кВт) / 8 шт

Тормозні резистори.

Подстроечні резистори Murata.

Подстроечні резистори Murata випускаються для поверхневого і вивідного монтажу. Доступні як однооборотні, так і багатооборотні варіанти, вуглецеві і керметні. А також на вибір пропонуються різні розміри, аж до 4, 3 і навіть 2 мм.



Серія PVS1. Має пиленепроникний корпус, завдяки якому досягається стійка робота і підвищена надійність виробу, крім того, резистор має низький профіль

(висота 2,1 мм), а також позолочені контакти, що дозволяє добитися високих результатів при паянні. За рахунок застосування спеціального матеріалу резистивного шару, пристрої цієї серії витримують 1 млн робочих циклів і можуть використовуватися як датчики позиціонування.

Серія PVG5. Закрита конструкція забезпечує підвищену надійність виробу при дії зовнішнього середовища. Багатооборотна система настройки дозволяє точно виставити необхідний параметр. Випускається в двох модифікаціях (з горизонтальним і вертикальним регулюванням) і має компактні розміри корпусу.

Серія PVZ2. Має дуже малі розміри корпусу (висота 1,0 мм). Наявність позолочених виводів дозволяє досягти високої якості паяння. Струмозійомник має хрестоподібну форму, що значно полегшує процес настройки. У цій серії подстроечних опорів Murata не використовується пластикових деталей. Це дає можливість паяти резистори при вищій температурі, що дозволяє відмовитися від використання свинцовоскладових припоїв і підвищити безпеку процесу промислового виробництва.

Серія PVG3. Стійка робота цієї серії досягнута конструкторами завдяки застосуванню спеціального закритого корпусу, який захищає резистор від пилу і рідини. Широкий і глибокий отвір ротора забезпечує легкість регулювання. Крім того, серія дозволяє витримувати теплові перевантаження, що виникають при паянні.

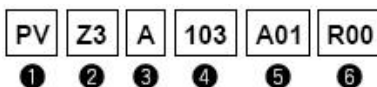
Серія PV32. Випускається в 6 різних модифікаціях, як з горизонтальним, так і з вертикальним регулюванням ротора. Діаметр корпусу - 6 мм. Серія є відмінною заміною вітчизняного резистора СПЗ-19.

Серія PVM4. Є декілька модифікацій, призначених для поверхневого монтажу. Серія є ізолюваною і має хрестоподібну форму ротора струмозійомника, що полегшує процес настройки. Розмір корпусу 4 мм.

Серія PV12. Вивідні багатооборотні керметні резистори. Мають невеликі розміри корпусу (7,6 мм). Випускаються в декількох модифікаціях з вертикальним і горизонтальним регулюванням.

Серія PV36. Багатооборотний вивідний резистор. Має закритий корпус, розмір - 9,5 мм.

Маркіровка:



1. Ідентифікатор продукту

Ідентифікатор продукту	
PV	Потенціометр

2. Серія

Код	Серія
Z2	SMD, відкритий, розмір 2 мм, вуглецевий
A2	SMD, відкритий, розмір 2 мм
Z3	SMD, відкритий, розмір 3 мм, вуглецевий
S3	SMD, відкритий, розмір 3 мм, із стопором обертання, низькопрофільний
A3	SMD, відкритий, розмір 3 мм
F2	SMD, закритий, розмір 2 мм
G3	SMD, закритий, розмір 3 мм
M4	SMD, закритий, розмір 3 мм
G5	SMD, закритий, квадратний 5 мм, 11-оборотний
01	SMD, закритий, квадратний 5 мм, 12-оборотний
C6	Вивідний, закритий, 6 мм, квадратний, однооборотний
C6	Вивідний, закритий, 6 мм, квадратний, однооборотний
32	Вивідний, закритий, 6 мм, круглий, однооборотний
34	Вивідний, закритий, 9 мм, квадратний, однооборотний
12	Вивідний, закритий, 9 мм, квадратний, однооборотний
22	Вивідний, закритий, 7 мм, круглий, 4-оборотний
23	Вивідний, закритий, 19 мм, прямокутний, 15-оборотний
36	Вивідний, закритий, 10 мм, квадратний, 25-оборотний
37	Вивідний, закритий, 6 мм, квадратний, 12-оборотний

3. Напряв регулювання/вивідної тип.

4. Повний опір.

Складається з 3 х знаків. Перший і другий знаки виражають числове значення опору в омах (Ом). Третє значення-ступінь множника 10.

5. Індивідуальна специфікація

Серія	Код	Індивідуальний код специфікації
PVA2/PVS3 /PVA3	A01	Стандартний тип
PVZ2	A01	Стандартний тип
	A04	Ультратонкий тип
	C01	Термостійкий тип
	C04	Термостійкий тип (ультратонкий тип)
PVZ3	A01	Стандартний тип (вертикальне регулювання)
	C01	Термостійкий тип (вертикальне регулювання)
	E01	Термостійкий тип (з нижнім регулюванням)
PVM4	C01	Стандартний тип
	D01	Високонадійний тип
PVF2	A11	Стандартний тип (характеристика зм. опору: логарифмічна крива)
	A41	Стандартний тип (характеристика зм. опору: логарифмічна крива)
	A81	Стандартний тип (характеристика зм. опору: логарифмічна крива)
	A51	Стандартний тип (характеристика зм. опору: крива в подвійному логарифмічному масштабі)
	A91	Стандартний тип
PV32/PV12	A01	Стандартний тип
PVG3/PVG5 /PV01/PV22 /PV23/PV34	C01	Стандартний тип
PVC6	C01	Стандартний тип
	C04	Радіальна упаковка
PV36/PV37	C01	Стандартний тип
	C31	Радіальна упаковка

6. Упаковка

Опір, Ом	Потужність, кВт	Параметри	Габарити, (Ш×В×Г) мм	Вага, кг
400	0.25			
250	0.25			
150	0.40			
100	0.50			
75	0.80			
50	1 кВт	φ80×360	390×125×185	3
40	1,5 кВт	φ80×490	520*125*185	4,5
40	2 кВт	φ80×490	520*125*185	4,5
30	4 кВт	φ80×660	690*125*185	8
20	6 кВт	φ110×640	690*148*205	11
16	9 кВт	φ110×800	850*148*205	15
13,6	9 кВт	φ110×800	850*148*205	15

6.6. Нелінійні резистори

6.6.1. Варистори

Варистори – напівпровідникові резистори, які мають різку залежність електричного опору від напруги. Умовне позначення варисторів пов'язано з їх класифікацією. Воно складається з літер ВР – для постійних резисторів або ВРП – для змінних резисторів та (через тире) – номери за порядком.

Наприклад, ВРП – 14: – варистор змінний з номером за порядком 14. Зустрічаються варистори із застарілим позначенням. Їх позначення складаються з літер СН – резистор нелінійний (варистор), перша цифра – код матеріалу резистивного шару (1 – карбід кремнію, 2 – селен); друга – тип конструкції (1,8 – стержневі, 2,6,7,10 – дискові, 3 – мікромодульні); третя – порядковий номер розробки. В кінці позначення приводиться класифікаційна напруга в вольтах.

Наприклад, СН1-6 – варистор із карбіду кремнію з номером за порядком 6.

До застарілого відноситься і позначення, де крім літер СН та цифр (коду матеріалу), входить (через тире) друга цифра – код конструкції (1,8 – стержнева, 2,6,7,10 дискова) та третя цифра (через тире) – номер за порядком і (через тире) – класифікаційна напруга в вольтах ($U_{кл}$).

Наприклад, СН1-1-1-680В – варистор із карбіду кремнію, стержневий, номер за порядком 1, $U_{кл} = 680$ В.

Вольт - амперна характеристика й параметри варисторів.

Вольт – амперна характеристика (ВАХ) варистора змінюється за законом (рис. 6.16)

$$U = AI^\beta,$$

де A – сталий коефіцієнт, який залежить від типу варистора й температури;

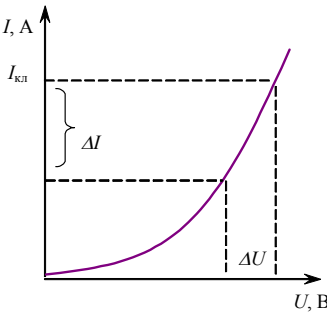


Рис. 6.26. Вольт-амперна характеристика варистора

$$\beta - \text{коефіцієнт нелінійності } \beta = \frac{R}{r},$$

де R – статичний опір;

r – динамічний опір при заданій напрузі;

I – струм.

ВАХ варистора є симетричною відносно початку координат (на рис. 6.26 наведена її права гілка).

До **основних параметрів варистора** відносяться:

$$- \text{статичний опір, } R_{\text{ст}} = \frac{U}{I};$$

$$- \text{динамічний опір, } R_{\text{дин}} = \frac{\Delta U}{\Delta I};$$

де ΔU , ΔI – прирости напруги та струму відповідно);

- коефіцієнт нелінійності

$$\beta = R_{\text{ст}} / R_{\text{дин}} \beta = \frac{R_{\text{ст}}}{R_{\text{дин}}};$$

- класифікаційна напруга $U_{\text{кл}}$ – напруга на варисторі при даному струмі $I_{\text{кл}}$ (знаходиться в межах від 2 до 20 МА);

- номінальна потужність.

Деякі параметри варистора знаходяться в визначених точках ВАХ (наприклад, для варистора СН1-1-11- 680 В опори $R_{\text{ст}}$, $R_{\text{дин}}$ та коефіцієнт нелінійності β знаходяться, якщо $U_{\text{кл}} = 680$ В і $I_{\text{ка}} = 10$ МА).

Варистори застосовуються для стабілізації напруг та струмів, обмеження напруги, захисту апаратури від високих напруг, перетворення частоти та напруги, а також для регулювання підсилення в системах автоматики, вимірвальних приладах, джерелах вторинного живлення, для підстроювання гетеродина у телевізійних прийमाках, в генераторах змінної та імпульсної пилоподібної напруги, в схемах розмагнічування кольорових кінескопів та ін.

Приклади застосування варисторів:

обмежувач амплітуди імпульсів напруги зворотного ходу променевої кадрової розгортки кінескопа, де варистор R_v (СН1-1-1-560) підключається паралельно котушкам відхилення L (рис. 6.27а);

стабілізатор напруги живлення зарядного ланцюга генератора кадрової розгортки: стабілізація його потрібна для незмінності розміру телевізійного зображення (рис. 6.27 б).

Якщо змінюється напруга на вході стабілізатора $U_{\text{вх}}$, то напруга на його виході $U_{\text{вих}}$ буде змінюватись мало. Резистори R та R_u утворюють резистивний подільник напруги. Як бачимо з ВАХ варистора, зі збільшенням напруги $U_{\text{вх}}$ струм через варистор різко збільшується. Це приводить до різкого зменшення його опору. Тому напруга $U_{\text{вих}}$ буде зменшуватись дуже мало. Якщо $U_{\text{вх}}$ зменшується, виникає зворотний процес.

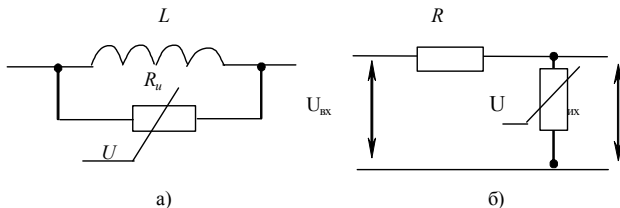


Рис. 6.27. Приклади застосування варисторів в телевізійних прийमाх:
а) обмежувач амплітуди імпульсів; б) стабілізатор напруги

Графоаналітичний розрахунок стабілізатора з варистором, якщо задані струм через варистор I_B і вхідна напруга $U_{\text{вх}}$, потребує знаходження опору гасіння R та коефіцієнті стабілізації K (рис. 6.28).

Для цього на ВАХ варистора через точку A , яка відповідає струму I_A та точку B , яка відповідає напрузі $U_{\text{вх}}$ і лежить на осі напруг, проводимо пряму лінію до перетину з віссю струмів. Вона перетинає вісь струмів у точці $U_{\text{вх}}/R$. Опустивши з точки A перпендикуляр на вісь напруги знаходимо напругу на виході стабілізатора $U_{\text{вих}}$.

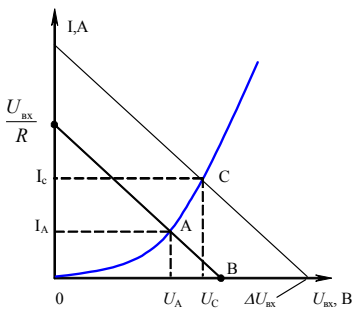


Рис. 6.28. Графоаналітичний розрахунок варисторного стабілізатора

Якщо напруга на вході стабілізатора $U_{\text{вх}}$ збільшилася на $\Delta U_{\text{вх}}$, то зміну вихідної напруги $\Delta U_{\text{вих}}$, можна знайти після проведення прямої лінії з точки $U_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{вх}}$, паралельної початковій лінії при $U_{\text{вх}}$. Ця лінія перетинає ВАХ варистора в точці C .

Опустивши з цієї точки перпендикуляри на осі I та U , отримуємо розшукуємі значення струму варистора I_C та вихідну напруги U_C . Звідси випливає, що $\Delta U_{\text{вих}} < \Delta U_{\text{вх}}$, тобто зміна напруги на виході буде менша зміни напруги на вході.

Коефіцієнт стабілізації обчислюється за відомою формулою:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вих}}} \cdot \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$$

ВАРИСТОРИ ВР-9, ВР-10, ВР-11, ВР-12.

Оксидно-напівпровідникові варистори постійні неізолювані призначені для захисту радіоелектронної апаратури від імпульсних перенапружень і перешкод різної природи, зокрема, від комутаційних перенапружень, грозових розрядів, іскропогашення на контактах. Робоча напруга від $\sim 10\text{В}$ до декількох кіловольт (послідовним набором), струм, що допускається, в імпульсі до декількох кілоампер при захисному відношенні $U_{\text{макс}}/K_{\text{л}} \sim 1,5 \dots 2,5$.

Технічні характеристики варисторів

Тип	Класифікаційна напруга, В	Допустиме відхилення, %	Допустима амплітуда імпульсного струму, А (8/20 мкс)	Допустима енергія розсіювання імпульсу, Дж (8/20 мкс)	Коефіцієнт нелінійності (не менше)	Діаметр, мм	Маса, г
ВР-9А	68...680	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$	500; 1500	2,3...44,9	25...30	19	12
ВР-9Б	68...560	$\pm 10; \pm 20$	200; 700	0,76...19,2	25	12	5
ВР-9В	68...430	$\pm 10; \pm 20$	100; 150	0,26...2,5	22...30	8	3,5
ВР-10	68...82	± 10	5000	20; 25	22	28	10
ВР-11	330...470	± 10	5000	84; 119	30	28	10
ВР-12	150...470	± 10	5000	38...119	22...30	28	20

Примітки:

1. Граничний робочий струм (постійний або змінний) залежить від варіанту, але не перевищує 0,1 мА.
2. Гранична робоча напруга: на постійному струмі - $0,8U_{\text{кл}}$; на змінному струмі - $0,65U_{\text{кл}}$.
3. Діапазон робочих температур від - 60 до +85 $^{\circ}\text{C}$.

6.6.2. Терморезистори

Терморезистори – це об’ємні напівпровідникові резистори з великим від’ємним температурним коефіцієнтом опору. Матеріалом для виготовлення терморезисторів служать різні окисли металів (*Zn, Mg, Cu, Ti, Ba*).

Конструктивне виготовлення – напівпровідникові пластини, стержні або кульки, захищені вологостійким покриттям або метало скляним герметичним корпусом.

В залежності від напівпровідникового матеріалу, який застосовується

для виготовлення, терморезистори діляться на кобальто-марганцеві (КМТ та СТ1), мідно- марганцеві (ММТ та СТ2), мідно-кобальтові (СТ3), титано-барієві, які мають позитивний температурний коефіцієнт опору (позистори СТ5 - СТ9, СТ15).

Терморезистори СТ2 - 26, СТ3 - 24 та СТ - 3 - 26 мають мікромодульне виконання (на стандартній платі), СТ3 - 24а виконаний без плати.

Терморезистори КМТ - 4, ММТ - 4 та ММТ - 3 мають два варіанта конструктивного виконання: “а” – виводи в протилежні сторони, “б” – виводи в одну сторону.

Терморезистори виготовляються методом керамічної технології. Конструктивно можуть бути оформлені в виді стержнів, пластинок, бусинок або таблеток. Змінюючи процентне відношення різних окислів, можна в широких границях регулювати величину ТКО та питомого опору.

В терморезисторах опір змінюється під впливом тепла, яке виділяється при проходженні електричного струму, або в результаті зміни температури навколишнього середовища.

Основними характеристиками терморезисторів являються:

Температурна характеристика – це залежність опору резистора від температури:

$$R = R_{\infty} e^{B/T},$$

де R_{∞} – стала, яка характеризує матеріал та розміри терморезистора;

B – коефіцієнт температурної чутливості.

Номинальний опір – це опір терморезистора при конкретній температурі навколишнього середовища.

Коефіцієнт температурної чутливості B – це показник експоненти в температурній характеристиці терморезистора. Значення цього коефіцієнта залежить від властивостей матеріала терморезистора. Для різних терморезисторів знаходиться в межах від 750 до 15 000 К.

Температурний коефіцієнт опору показує відносну зміну опору терморезистора при зміні температури на один градус (TKR).

Значення TKR при кімнатній температурі різних терморезисторів знаходиться в межах $(0,8 - 6,0) \times 10^{-2}$ град⁻¹. Статична вольт – амперна характеристика це залежність падіння напруги на терморезисторі від струму, який проходить через нього, в умовах теплової рівноваги між терморезистором та навколишнім середовищем (рис. 6.29).

При збільшенні струму опір терморезистора зменшується і лінійність статичної ВАХ порушується. При подальшому збільшенні струму зменшується напруга на терморезисторі і спостерігається падаюча ділянка ВАХ.

Терморезистори застосовуються для регулювання температури, компенсації температурних змін, стабілізації напруги і т. ін.

6.6.3. Болонетри

Напівпровідниковий болонетр складається з двох терморезисторів, які виготовлені у виді тонких плівок (товщиною не більше 10 мкм). Один із терморезисторів являється активним, так як безпосередньо підвергається дії вимірювального випромінювання; другий терморезистор служить для компенсації впливу зміни температури навколишнього середовища. Активний та компенсаційний терморезистори розміщують у герметичний корпус, який має три виводи – від активного та компенсаційного терморезисторів і від середньої точки.

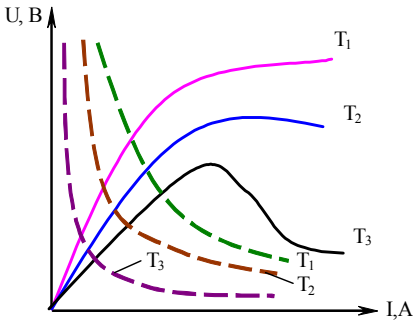


Рис. 6.29. Вид статичних вольт - амперних характеристик терморезисторів при різних температурах (сплошні лінії) та криві однакової потужності (штрихові лінії)

Болонетри характеризуються:

- опором активного терморезистора при кімнатній температурі;
- робочою напругою;
- чутливістю;
- рівнем особистих шумів.

Напівпровідникові болонетри застосовуються в різних системах орієнтації, для бесконтактного та дистанційного вимірювання температур і т. ін.

6.6.4. Фоторезистори

Фоторезистори – це напівпровідниковий пристрій, опір якого зменшується при дії на нього енергії світлового потоку.

Матеріалом для виготовлення фоторезисторів служать сульфати кадмію, селеніди кадмію та сріпний свинець.

Позначення фото резисторів різних років випуску: перший елемент – буква, яка вказує на тип приладу (ФС – фото опір); другий елемент – буква, яка вказує на матеріал чутливого елементу (А – сріпний свинець, К – сріпний кадмій, Д – селеністий кадмій); третій елемент – цифра, яка вказує тип конструктивного виконання.

Позначення нових типів фото резисторів: перший елемент – букви, які вказують тип приладу (СФ – опір фото чутливий); другий елемент – цифра,

яка вказує на матеріал чутливого елемента (2 – сірнистий кадмій, 3 – селенистий кадмій, 4 – селенистий свинець); третій елемент – цифра, яка вказує на порядковий номер розробки.

Основними характеристиками фоторезисторів являються:

Вольт – амперна характеристика – це залежність світлового струму й фотоструму (при постійній величині світлового потоку), а також темного струму від прикладеної до фоторезистора напруги.

В робочому діапазоні напруг ВАХ фоторезисторів, при різних значеннях світлового потоку, лінійні. Нелінійність ВАХ спостерігаються при малих та великих значеннях напруги.

Світлова (люкс – амперна) характеристика – це залежність фотоструму від падаючого світлового потоку або від освітлення. Фоторезистори мають нелінійну світлову характеристику.

Величина фотоструму зі збільшенням освітлення напівпровідника зростає спочатку швидко, а потім повільно. Така залежність пояснюється зміщенням квазірівнів Фермі до зони провідності в результаті збільшення надлишкової концентрації електронів.

Для світлової характеристики справедлива залежність

$$I_{\Phi} = A\Phi^x,$$

де A – коефіцієнт, який характеризує матеріал;

Φ – інтенсивність освітлення;

x – показник ступені.

Світлові характеристики деяких фоторезисторів при невеликій інтенсивності освітлення мають лінійну залежність.

Частотна характеристика – залежність фотоструму від частоти модуляції падаючого світлового потоку. При цьому спостерігається спільна закономірність – чим менше чутливість фоторезистора, тим краще його частотна характеристика. Як правило,

фоторезистори з високою чутливістю мають кращі частотні характеристики.

На рис. 6.20. показана частотна характеристика фоторезистора. Як видно з характеристики фотострум зменшується при збільшенні частоти світлового потоку.

Фоторезистори застосовуються в схемах фотоелектричної автоматики, телебаченні, звуковому кіно та інших областях.

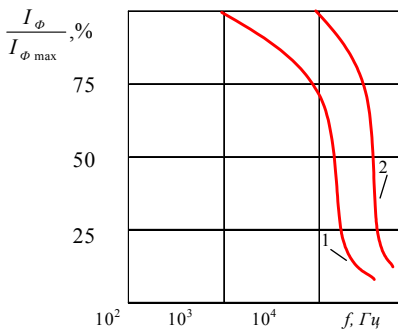


Рис. 6.20. Частотні характеристики фоторезисторів ФСА (крива 1) та СФ - 4 (крива 2)

6.6.5. Тензорезистори

Тензотранзистор – це напівпровідниковий прилад, який використовує тензочутливість напівпровідникових матеріалів.

Для тензорезисторів широке застосування знаходить кремній як n – типу, так і p – типу з питомим опором $1 - 10^{-3}$ Ом/м, легірований фосфором або бором. Тензорезистори можуть бути виготовлені з різними механічними та електричними властивостями. Наприклад, при однакових розмірах опір тензорезистора може бути 100 Ом і 50 кОм, а коефіцієнт тензочутливості – від -100 до $+200$.

Основними характеристиками тензорезисторів являються:

Деформаційна характеристика – це залежність відносної зміни опору від відносної деформації. Тензорезистори p - типу мають лінійну характеристику в межах $(-2 \div +6 \cdot 10^{-3})$ одиниць відносної деформації, а тензорезистори n – типу – при зжиманні від $4 \cdot 10^{-3}$ до 0.

Коефіцієнт тензочутливості – це величина яка характеризує зміну питомої провідності напівпровідників при заданому виді деформації і представляє собою відношення відносної зміни питомого опору напівпровідника до відносної деформації в даному напрямку.

Тензорезистори застосовуються в якості вимірювачів деформації у різних конструкціях чутливих елементів, мікрофонів та інших приладів.

Термокомпенсаційні і нормуючі резистори.

Термокомпенсаційні і нормуючі резистори призначені для застосування в первинних вимірювальних перетворювачах засобів вимірювань механічних величин для термокомпенсації і точної підгонки метрологічних характеристик.

Терморезистор ТРФ 10/ 60-Н-0,1.

Нікелевий фольговий терморезистор призначений для термокомпенсації первинних вимірювальних перетворювачів. $TKO=0,47\%/^{\circ}C$ при $20^{\circ}C$. Максимальний опір 60 Ом. Діапазон регулювання розбитий на десять секцій з номіналами: 31 Ом, 14 Ом, 7 Ом, 4,3 Ом, 2,0 Ом, 1,1 Ом, 0,5 Ом, 0,3 Ом, 0,19 Ом, 0,1 Ом. Максимальний робочий струм терморезистора, наклеєного на метал 40 мА. Габаритні розміри $10 \times 9,5$ мм.

Терморезистор ТРФ2 6/1, 3-Н-0,03.

Подвійний нікелевий фольговий терморезистор призначений для термокомпенсації НКП первинних вимірювальних перетворювачів. $TKO=0,47\%/^{\circ}c$ при $20^{\circ}C$. Максимальний опір $2 \times 1,3$ Ом.

Початковий опір кожного плеча 0,45-0,55 Ом. Максимальний приріст кожного плеча 1,3 Ом. Діапазон регулювання розбитий на шість секцій з номіналами: 0,27 Ом, 0,21 Ом, 0,15 Ом, 0,09 Ом, 0,045 Ом, 0,032 Ом. Максимальний робочий струм терморезистора, наклеєного на метал 50 мА. Габаритні розміри $12,2 \times 11,7$ мм.

Перетворювач нормуючий ПНФ1.

Подвійний нормуючий фольговий резистор призначений для балансування «нуля» тензомоста первинних вимірювальних перетворювачів. Кожне плече має 13 здвоєних секцій для підбору необхідного номінала опору. Максимальний крок регулювання в кожному плечі 4,5 Ом, мінімальний крок 0,05 Ом. Максимальний робочий струм 50 мА. Габаритні розміри 15×10 мм.

Перетворювач нормуючий ПНФ2.

Одинарний нормуючий фольговий резистор призначений для регулювання (зменшення чутливості) первинних вимірювальних перетворювачів. Резистор має 15 секцій для регулювання опору. Максимальний опір секції 23 Ом, мінімальне 0,2 Ом. Максимальний робочий струм 50 мА. Габаритні розміри 5,5×12 мм.

За технічним завданням замовника можуть бути спроектовані і виготовлені тензорезистори або термокомпенсаційні і нормуючі резистори з необхідними параметрами.

Контрольні питання для самоперевірки

1. За якими ознаками класифікуються резистори?
2. Якими основними параметрами характеризуються резистори постійного опору?
3. Як залежить опір резистора від температури і яким параметром ця залежність характеризується?
4. Якими основними та спеціальними параметрами характеризуються резистори змінного опору?
5. Які параметри резисторів входять у повне та скорочене умовне позначення резисторів?
6. Дайте характеристику основних типів резисторів.
7. На чому оснований принцип роботи варистора і якими параметрами він характеризується?
8. Які основні параметри характеризують властивості терморезистори?
9. Що таке болометри?
10. На чому оснований принцип роботи фоторезистора і якими параметрами він характеризується?

РОЗДІЛ VII

ЕЛЕКТРИЧНІ КОНДЕНСАТОРИ

Конденсатори, так як і резистори, відносяться до пасивних елементів радіоелектронної апаратури. Вони відносяться до найбільш масових елементів електричних кіл. Разом з резисторами, конденсатори складають близько 60 – 70% від усіх електрорадіоелементів, тому знання властивостей та параметрів конденсаторів являється важливим для подальшого розуміння процесів, які проходять в електричних колах.

7.1. Призначення та конструкції конденсаторів

Електричний конденсатор – це радіодеталь радіоелектронної апаратури, в якій використовують її ємність. Основним призначенням конденсатора є накопичення електричного заряду.

Конденсатори широко застосовуються в апаратурі зв'язку, управління, обчислювальної техніки, автоматики, в коливальних контурах, електричних фільтрах, розподілюючих контурах, імпульсних вузлах, в контурах інтегрування та диференціювання.

Конденсатор складається з двох металевих обкладок, між якими розміщується діелектрик (рис. 7.1).

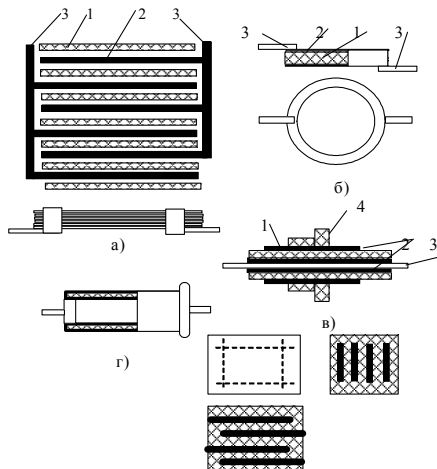


Рис. 7.1. Основні типи конструктивного виконання конденсаторів:
а - пакетний; б - дисковий; в - трубчатий спеціальний; г - трубчатий;
д - литий секційний (1 - діелектрик; 2 - обкладки; 3 - виводи;
4 - металева втулка з різьбою)

Конструкції конденсаторів різноманітні. Обкладки мають різну форму (циліндри, пластини, смуги алюмінієвої фольги, скручені в рулон та інші).

Виготовляються конденсатори з різними за формою корпусами або безкорпусні. Вони можуть бути безвиводними або мати виводи різної форми, однонаправлені та різнонаправлені. Для об'легчення пайки виводи конденсаторів покриваються нікелем, сріблом або сплавом (олово – вісмут).

Корпуси конденсаторів можуть бути металевими, пластмасовими або з епоксидної смоли, герметезовані або негерметизовані. Безкорпусні безвиводні конденсатори встановлюються в гібридні інтегральні мікросхеми. Діелектриками в конденсаторах є органічні або неорганічні матеріали, а також оксидні плівки деяких металів. Значення діелектричної проникності їх знаходяться в межах від 1 до 80000 (повітря – 1, слюда – 6...8, кераміки 12...80000, оксидних плівок – 10...46, органічних плівок та паперу – 2...6,5).

Конденсатори відрізняються між собою своєю ємністю.

Ємність C визначається відношенням нагромадженого заряду q до прикладеної напруги U :

$$C=q/U.$$

За одиницю ємності фараду (Φ) приймають ємність такого конденсатора, у якого при напрузі в 1В нагромаджується заряд в 1 кулон.

На практиці застосовуються менші одиниці, ніж фарада:

$$1\text{мк}\Phi = 10^{-6}\Phi, 1\text{н}\Phi = 10^{-9}\Phi, 1\text{п}\Phi = 10^{-12}\Phi.$$

Ємність конденсатора залежить від його конструкції та типу діелектрика.

Для найпростішого конденсатора, який складається з двох плоских металевих пластин (обкладок) однакових за розміром, між якими розташований діелектрик, ємність в фарадах знаходиться за формулою:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d},$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму ($\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-6} \Phi/\text{м}$);

ϵ – діелектрична проникність діелектрика (величина безрозмірна);

S – площа пластини, м^2 ;

d – товщина діелектрика, м .

7.2. Класифікація конденсаторів

Конденсатори класифікуються за різними ознаками (рис. 7.2)

- за можливістю регулювання ємності (постійні, змінні, та напівзмінні);
- за залежністю ємності від напруги та температури (лінійні та нелінійні);

- за матеріалом діелектрика (органічні, неорганічні, оксидні, та газоподібні);

- за областями застосування (низьковольтні, високовольтні, низькочастотні, високочастотні, імпульсні, полярні, неполярні, дозиметричні та ті, що придушують заваду та т. ін.;
- за конструктивним виготовленням (пакетні, дискові, багатопластинчаті, литі секційні, трубчаті, рулонні, резервуарні);
- за захистом від вологи (незахищені, опресовані, вакуумні, лаковані, герметичні);
- за фазовим станом діелектрика (газоподібні, рідкі, тверді);



Рис. 7.2. Класифікація конденсаторів

Ємність конденсатора змінної ємності можна змінювати при його роботі у відповідному пристрої. Управління ємністю здійснюється механічно, електричною напругою (варіконди) або температурою (термоконденсатори). Конденсатори змінної ємності застосовують для плавного настроювання коливальних контурів, в ланцюгах автоматики та т. ін.

Напівзмінні конденсатори застосовуються для регулювання ємності в невеликих межах. Їх застосовують для рівняння початкової ємності контурів, для періодичного регулювання контурів, де необхідна незначна зміна ємності.

7.3. Параметри постійних конденсаторів

До основних параметрів конденсаторів відносяться:

- номінальна ємність, $C_{\text{ном}}$;
- допуск;
- номінальна напруга, $U_{\text{ном}}$;
- температурний коефіцієнт ємності, ТКЕ;
- тангенс кута втрат $\text{tg } \delta$;
- опір ізоляції та струм витoku $R_{\text{із}}, I_{\text{вт}}$;
- повний опір, Z .

Номінальна ємність та допуск.

Номінальна ємність $C_{\text{ном}}$ є основним параметром конденсатора. Це ємність, значення якої марковано на корпусі конденсатора (або вказано в нормативній документації) в мікрофарадах (мкФ), нанофарадах (нФ) або в пікофарадах (пФ).

Номінальна ємність в повному та умовному позначенні характеризується цифрою та буквою, які вказують на одиниці вимірювання і представляють собою множник (табл. 7.1) на який необхідно перемножати числове значення ємності (табл. 7.2)

Таблиця 7.1

Буква	p (піко)	n (нано)	μ (мікро)	m (міллі)	F (одиниці фарад)
Множник	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1

Таблиця 7.2

Номінальне значення	Позначення на корпусі конденсатора	
0,1 пФ	p10	
10 пФ	10p	
100 пФ	100p	n10
590 пФ	590p	n59
1 нФ	1n0	
100 нФ	100n	μ10
1 мкФ	1μ0	
100 мкФ	100m	F10
1 мФ	1m0	
1 Ф	1F0	
10 Ф	10F	

Величина ємності конденсатора плоскої конструкції визначається виразом:

$$C = 0,0884 \frac{\varepsilon \cdot S}{d},$$

де ε – відносна діелектрична проникність діелектрика конденсатора;

S – площа обкладки, см²;

d – товщина діелектрика, см.

Для багатопластинчатих, литих секційних та пакетних ємність конденсатора визначається за формулою:

$$C = 0,0884 \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \cdot (n-1),$$

де n – число обкладок конденсатора.

Для трубчатих конденсаторів ємність розраховується за виразом:

$$C = 0,241 \frac{\varepsilon \cdot l}{\left[\lg \frac{D_2}{D_1} \right]},$$

де D_1 та D_2 – відповідно зовнішній та внутрішній діаметри трубки, см;

l – довжина обкладки по утворюючій циліндра, см.

Для конденсаторів рулонного типу ємність визначається:

$$C = 0,1768 \frac{\varepsilon \cdot b \cdot l}{d},$$

де b – ширина обкладки, см;

l – довжина обкладки на стрічці, см.

Ємність конденсатора збільшується зі зменшенням товщини діелектрика, але при цьому зменшується робоча напруга конденсатора.

Номинальні значення ємності конденсаторів, як і опорів резисторів стандартизовані та входять до рядів шкал. Частіше застосовуються шкали E3, E6, E12 та E24 (табл. 7.3).

Для того, щоб знайти всі значення номінальних ємностей кожного ряду треба кожне число обраного ряду помножити на 10^n , де n – ціле позитивне або негативне число.

Фактичне значення ємності конденсатора може відрізнитися від номінального в межах допуску. Допуски виражаються у відсотках та позначаються цифрами або літерами (табл. 7.4).

Номинальна напруга

Номинальна напруга – це максимальна напруга, при якій конденсатор може працювати в заданих умовах на протязі гарантованого терміну із збереженням параметрів у заданих межах.

Величина номінальної напруги залежить від виду робочої напруги (постійна, змінна, імпульсна), температури та вологості оточуючого середовища, оточування площі обкладок.

Таблиця 7.3

Ряди номінальних значень ємностей конденсаторів,
які найбільш часто застосовуються

Е 3	Е6	Е12	Е24
1	1	1	1
		1.2	1.2
2.2	2.2	1.5	1.5
		1.6	1.6
		1.8	1.8
		2.2	2.2
		2.7	2.7
		3	3
		3.3	3.3
4.7	4.7	4.7	3.6
			3.9
			4.3
			4.7
			5.1
			5.6
			6.2
			6.8
			7.5
			8.2
6.8	6.8	6.8	9.1

Таблиця 7.4

Кодове позначення допустимого відхилення
фактичного значення ємності від номінального в процентах

Допустиме відхилення в %	Кодове позначення	Допустиме відхилення в %	Кодове позначення	Допустиме відхилення в %	Кодове позначення
± 0,001	Е	± 0,25	С	± 30	Н [Ф]
± 0,002	L	± 0,5	D [Д]	-10 ÷ +30	Q
± 0,005	R	± 1	F [Р]	-10 ÷ +50	T [Э]
± 0,01	P	± 2	G [Л]	-10 ÷ +100	Y [Ю]
± 0,02	U	± 5	I [J], [И]	-20 ÷ +50	S [Б]
± 0,05	X	± 10	K [С]	-20 ÷ +80	Z [А]
± 0,1	В [Ж]	± 20	M [В]	-10 ÷ +100	- [Я]

Примітка: в дужках вказано застаріле позначення.

Кодове позначення номінальної напруги конденсаторів приведені в табл. 7.5.

Таблиця 7.5

Кодове позначення номінальної НАПРУГИ конденсаторів

Номінальна напруга, В	Кодове позначення	Номінальна напруга, В	Кодове позначення
1	I	63	K
1,6	P	80	L
2,5	M	100	N
3,2	A	125	R
4	C	160	Q
6,3	B	200	Z
10	D	250	W
16	E	315	X
20	F	350	T
25	G	400	Y
32	H	450	U
40	S	500	V
50	J		

Наприклад, надпис на корпусі: **22nJZB7** – конденсатор постійної ємності, номінальна ємність 22 наноФаради, номінальна робоча напруга – 200В, варіант кліматичного виготовлення – □□гнето тверді□, 1997 року випуску.

Із збільшенням номінальної напруги збільшується кількість “слабких місць” діелектрика. Ізоляційні властивості діелектрика, який знаходиться в електричному полі, втрачаються, якщо напруженість поля перевищить критичне значення, що призведе до пробую. Під пробоем діелектрика розуміють процес утворення в ньому каналу великої провідності. Значення опору ізоляції для різних типів конденсаторів приведені в таблиці 7.6.

Пробій конденсаторів може бути тепловим та електричним.

Якщо на конденсатор одночасно діє постійна та змінна напруга, то для уникнення пробую необхідно, щоб:

- сума постійної напруги та амплітуда змінної не перевищувала допустиму напругу, яка вказується в нормативних документах;
- амплітуда змінної напруги у вольтах не перевищувала значення

$$U_M = 565 \cdot 10^3 \cdot \frac{P_{\text{доп}}}{f \cdot C},$$

де $P_{\text{доп}}$ - допустима реактивна потужність;

f – частота, Гц;

C – ємність, пФ.

Таблиця 7.6

Тип конденсатора	$R_{із}$, Мом	$tg\delta \cdot 10^{-3}$
Повітряний	50000	0,01 – 0,02
Слюдяний	10000 – 50000	0,05 – 1
Керамічний	5000 – 10000	1 – 2
Сигнетокерамічний	1000 – 5000	25 – 40
Скляний	10000 – 20000	2 – 3
□ □ гнето тверд	5000 – 20000	1,5 – 10
□ □ гнето тверді □	5000 – 20000	1,5 – 10
Паперовий	500 – 10000	10 – 20
□ □ гнето тверді □ □	200 – 20000	15 – 20
Плівковий	5000 – 100000	0,2 – 10
Електролітичний	3 – 50	1 – 3

Це значення змінної напруги наводиться також у нормативній документації (таблицях або графіках).

Температурний коефіцієнт ємності.

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) – це відносна зміна ємності при зміні температури на 1°C .

$$TKC = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

де C_1 та C_2 – значення ємності при відповідних температурах.

Безповоротні температурні зміни ємності конденсатора враховуються коефіцієнтом температурної нестабільності (КТНЕ) у %:

$$KTNE = \frac{\Delta C_{\text{зал}}}{C} = \beta_c,$$

де $\Delta C_{\text{зал}}$ – залишкові зміни ємності конденсатора після повернення до початкової температури;

C – початкова ємність конденсатора.

У сучасних конденсаторів постійної ємності дуже висока ступінь захищеності від дії вологи, тому її вплив на величину ємності незначний.

Старіння враховується як відносна безповоротна зміна ємності конденсатора за час його експлуатації. Це значення приводиться в таблицях.

ТКЄ є одним із найважливішим параметром конденсаторів, які входять до складу коливальних контурів та ланцюгів формування часових відрізків. ТКЄ таких конденсаторів поділяють на групи, які відрізняються значеннями ТКЄ і позначаються на своєму корпусі кодом.

Існує три способи кодування ТКЄ:

- літерами та цифрами;

- одним маркувальним знаком (рискою або крапкою) та кольором корпусу;

- двома маркувальними знаками при будь-якому кольорі корпусу.

Позначення **температурного коефіцієнта ємності** в залежності від типу конденсаторів може бути різною.

Літери позначають знак ТКЄ: **М** – мінус

П – плюс

МП – близьке до нуля (плюс – мінус)

Літера **Н** вказує на те, що температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) не нормується, а цифри після неї – на можливу зміну ємності в діапазоні допустимих температур.

Наприклад: **П100** означає, що $\text{ТКЄ} = +100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

М750 означає, що $\text{ТКЄ} = -750 \cdot 10^{-6}$

Н20 означає зміну ємності (відносно номіналу при температурі 20°C не більше 20%

Для позначення температурного коефіцієнту ємності часто використовують кольоровий код:

колір покриття вказує на знак ТКЄ;

колір знаку кодування - на його значення.

Наприклад: **синій** та **сірий** кольори корпусу – додатній ТКЄ

блакитний – температурний коефіцієнт ємності близький до нуля

червоний та **зелений** кольори корпусу – від'ємний ТКЄ

сірий корпус з **червоним** знаком – **П60**

червоний корпус з **зеленим** знаком – **М330**

зелений без знаку – **М1500**

ТКЄ можуть бути як позитивні, так і негативні, оскільки при зміні температури ємність одних конденсаторів збільшується, а інших – зменшується. Саме тому в групах ТКЄ літерою М позначається негативне значення ТКЄ (М – мінус), а літерою П – позитивні (П – плюс). Найкращу температурну стабільність мають конденсатори з нульовим ТКЄ, які маркують МПО.

Значення та умовні позначення ТКЄ наведені в □агні. 7.7.

Для менш стабільних конденсаторів ТКЄ не маркується, а позначення температурної стабільності складається з літери Н та числа, яке вказує на скільки відсотків може змінитися ємність в інтервалі робочих температур – $60 \dots +85^{\circ} \text{C}$ відносно ємності при нормальній температурі $+20^{\circ} \text{C}$ з допуском $\pm 5^{\circ} \text{C}$. Наприклад, позначення Н30 вказує, що ємність може змінюватися на $\pm 30\%$.

Температурна стабільність таких конденсаторів може позначатися кольором знаків маркування (рисок, крапок) на його корпусі (□агні. 7.8). В

цьому випадку корпус пофарбовано в оранжевий колір або в будь-який колір, але тоді перший знак маркування має оранжевий колір.

Таблиця 7.7

Тип конденсатора	Температур. коефіцієнт ємності, %/°C	Умовна маркіровка		
		Літерно-цифрова маркіровка	Кольоровий код	
			Колір корпусу	Колір маркіровочної точки
Керамічні	+0,012	П120	Синій	–
	+0,01	П100	Синій	Чорний
	+0,0033	П33	Сірий	–
	0	МПО	Голубий	Чорний
	–0,0033	М33	Голубий	Коричневий
	–0,0047	М47	Голубий	–
	–0,0075	М75	Голубий	Червоний
	–0,015	М150	Червоний	Оранжевий
	–0,022	М220	Червоний	Жовтий
	–0,033	М330	Червоний	Зелений
	–0,047	М470	Червоний	Синій
	–0,475	М750	Червоний	–
	–0,15	М1500	Зелений	–
	–0,22	М2200	Зелений	Жовтий
Склокерамічні:	±0,005	Т	–	–
СКТ	–0,035	Д	–	–
СКМ	0	МПО	–	Сірий
К22У - 1	–0,0047	М47	–	Голубий
Склоемалеві:				
СКС - 1	0	–	О	–
	–0,0065	–	М	–
	+0,007	–	Р	–
	+0,015	–	П	–
ДС	+0,005	–	–	–
Слюдяні	Не нормуються	А		–
	±0,002	Б		–
	±0,01	В		–
	±0,005	Г		–

Значення ТКЄ або температурної стабільності мають керамічні та слюдяні конденсатори, які застосовуються в контурах, де необхідна мала залежність ємності від температури. Залежність ємності від температури інших конденсаторів визначається по відповідним графікам, які наведені в довідниках та нормативних документах.

Допустима зміна ємності конденсаторів, %	Умове позначення групи температурної стабільності		
	Літерами та цифрами	Кольором 2-го знака	
		Нове позначення	Застаріле позначення
± 10	H10 [B]	Чорний	Чорний
± 20	H20 [Z]	Червоний	Червоний
± 30	H30 [D]	Червоний	Зелений
± 50	H50 [X]	Блакитний	Синій
± 70	H70 [E]	Фіолетовий	-----
± 90	H90 [F]	Білий	Білий

Добротність конденсатора – визначається втратами в його діелектрику, обкладках та виводах:

$$Q_c = \frac{P_R}{P_A},$$

де P_R – реактивна потужність;

P_A – активна потужність.

Еквівалентна схема конденсатора на високих частотах має вид рис. 7.3.

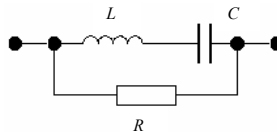


Рис. 7.3. Еквівалентна електрична схема конденсатора на високих частотах: L – паразитна індуктивність, яка утворюється індуктивностями виводів та взаємодією обкладок; C – ємність конденсатора без втрат; R – еквівалентні втрати активному опору

З врахуванням складових втрат вираз визначення добротності можна записати в вигляді:

$$Q_c = \frac{P_R}{P_d + P_0 + P_B},$$

де P_d – втрати в діелектрику;

P_0 – втрати в металевих обкладках;

P_B – втрати в металевих виводах.

В якості величини, яка характеризує втрати в конденсаторі, прийнятий тангенс кута втрат.

Тангенс кута втрат.

Для знаходження тангенса кута втрат $tg \delta$, яким оцінюються енергетичні втрати конденсатора, використаємо його схему заміщення на постійному струмі та складемо векторну діаграму (рис. 7.4).

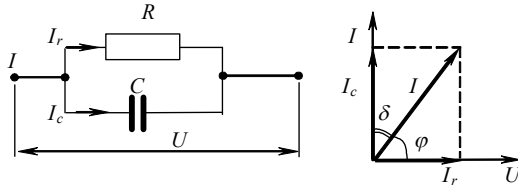


Рис. 7.4. Схема заміщення конденсатора на постійному струмі та його векторна діаграма

Зсув фази між струмом та напругою конденсаторів визначається кутом φ . В ідеальному конденсаторі він дорівнює 90° , в реальному менше 90° на кут $\delta = 90 - \varphi$.

Цей кут (δ) змінюється зі зміною опору втрат R_3 і характеризує енергетичні втрати в конденсаторі. Тому він називається кутом діелектричних втрат. Якщо $R_3 = R$, то:

$$tg \delta = I_{R3} / I_C; \quad (7.1)$$

де $I_C = \omega C U$; $I_R = U / R_3$,

$$tg \delta = I / \omega C R;$$

Потужність втрат на опорі R буде:

$$P = U_R I = U^2 R / R = U^2 \omega C tg \delta. \quad (7.2)$$

Із формули (7.1) та (7.2) виходить, що потужність втрат в діелектрику пропорційна значенню $tg \delta$, що дозволяє використовувати його як критерій енергетичних втрат.

Значення $tg \delta$ залежить від типу діелектрика та його якості, від температури, середовища та частоти змінного струму. Якщо частота збільшується, то і $tg \delta$ збільшується.

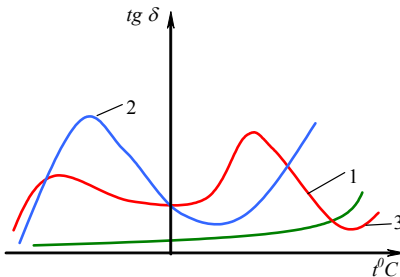


Рис. 7.5. Залежність втрат в діелектрику конденсатора від температури: 1 – неполярний; 2 – полярний;

На рис. 7.5. показана залежність втрат у діелектрику від температури. Максимум $tg \delta$ в лівій частині рисунку зумовлений дипольними втратами, а в правій – втратами від іонної провідності. Ріст значення $tg \delta$ із підвищенням

температури характерний для всіх діелектриків, а наявність максимумів характерно тільки для діелектриків із дипольною та дипольно - радикальною поляризаціями, а також для сегнетоелектриків.

Величина втрат у конденсаторі залежить також від частоти (рис. 7.6).

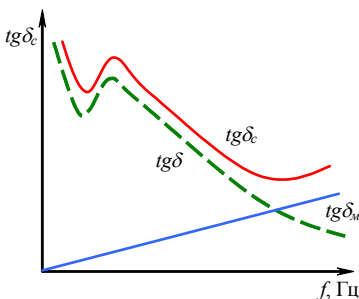


Рис. 7.6. Залежність втрат в конденсаторі від частоти: $tg\delta$ - втрати в діелектрику; $tg\delta_m$ - втрати в металевих частинах конструкції

Зростання $tg\delta_e$ зі збільшенням частоти зумовлений зростанням утрат у металевих частинах конструкції конденсатора $tg\delta_m$.

Опір ізоляції та струм витоку.

Опір ізоляції конденсатора ($R_{із}$) – це його електричний опір постійному струму. Звичайно його величина велика (десятки, сотні тисяч Ом).

Струм витоку ($I_{вт}$) – це струм провідності конденсатора при постійній напрузі на його виводах. Він зумовлений наявністю у діелектрика вільних носіїв заряду. Найбільший струм $I_{вт}$ (одиниці 10

мА) мають алюмінієві оксидні конденсатори.

Опір ізоляції та струм витоку характеризують якість діелектрика та конструкцію конденсатора.

Кінцева величина опору ізоляції призводить до саморозряду конденсатора, при якому напруга на його виводах після відключення від джерела з ЕРС E , зменшується за законом:

$$U(t) = E e^{-t/\tau_c},$$

де $\tau_c = R_{із} \cdot C$ – постійна часу конденсатора. Вона характеризує здатність конденсатора зберігати нагромаджений заряд і чисельно дорівнює часу, за який напруга на конденсаторі зменшиться завдяки саморозряду в e разів ($e = 2,7$ раз), $\tau_c \approx 20 \dots 5000$ с.

Опір ізоляції та струм витоку конденсатора залежить від температури середовища.

Повний опір. Під повним опором конденсатора $Z(j\omega)$ розуміють його опір гармонійному струму визначеної частоти. Його можна знайти зі схеми заміщення конденсатора, яка вміщує в себе елементи ємності C , індуктивності його виводів L , а також активного опору втрат у деталях конструкції R (рис. 7.7.).

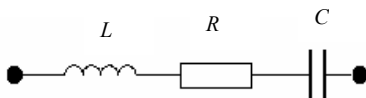


Рис. 7.7. Еквівалентна схема заміщення конденсатора при роботі на змінному струмі

Зі схеми заміщення можна знайти формулу повного комплексного опору конденсатора:

$$Z=R+j\omega L+1/j\omega C=1/j\omega C_{\text{эф}}, \quad (7.3)$$

де $Z_L=j\omega L$ - індуктивний опір; $Z_c=1/j\omega C$ - ємнісний опір.

Модуль повного опору буде:

$$|Z(j\omega)|=\sqrt{R^2+(1/\omega C-\omega L)^2};$$

де $|Z_L|=\omega L$, $|Z_c|=1/\omega C$.

Графік зміни опору конденсатору від частоти показано на рис 7.8.

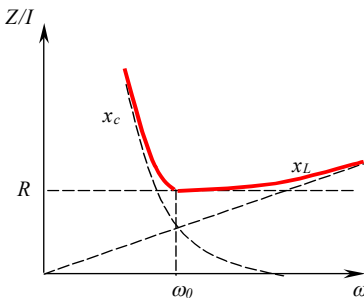


Рис. 7.8. Характер зміни повного опору конденсатора в залежності від частоти

Якщо частота ω зростає, то ємнісна складова опору конденсатора зменшується, а індуктивна зростає. Частота $\omega=\omega_0$, за якої реактивні складові опору дорівнюють одна одній $X_c=X_L$, а повний опір, мінімальний та активний, знаходяться із співвідношення

$$1/\omega_0 C = \omega_0 L.$$

З цієї формули визначимо ω_0

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}; \quad f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC};$$

де ω_0 (f_0) - власна резонансна частота

конденсатора.

Наближені значення резонанс-них частот та власних індуктивностей конденсаторів різних типів наведені в таб. 7.9.

Таблиця 7.9

Тип конденсатора	L_n , нГн	F_0 , мГц
Керамічний, слюдяний	0,25...15	1...5000
Паперовий, плівковий у циліндричному корпусі	6...20	1,5...15
Паперовий, плівковий в прямокутному корпусі	10...100	0,1...2,5
Оксидний	3...40	0,035...12

Таким чином конденсатор має ємнісний опір до частоти $\omega_0(f_0)$.

З формули (7.3) можна знайти ефективну ємність конденсатора $C_{\text{эф}}$, тобто фактично ємність на заданій частоті.

Для цього знехтуючи величиною R запишемо:

$$Z=j\omega L+1/j\omega C=(1-\omega LC)/j\omega C=1/j\omega C_{\text{эф}},$$

де $C_{\text{эф}} = C/(1-\omega LC)$.

На низьких частотах можна вважати $C=C_{\text{эф}}$.

7.4. Типи конденсаторів за видом діелектриків

Як відомо конденсатори за видом діелектрика розподіляються на конденсатори з органічним, неорганічним, оксидним та газоподібним діелектриком.

7.4.1. Конденсатори з органічним діелектриком

Електродами цих конденсаторів є металеві або металізовані стрічки, між якими розміщують діелектрик – конденсаторний папір, плівки з полістірола, фторопласта, лавсану, поліпропілену, полікарбонату, лакоплівки або їх комбінацій.

Вони розподіляються на низьковольтні (до 1600 В) та високовольтні (більше 1600 В), дозиметричні та такі, що придушують заваду.

Високовольтні конденсатори розподіляються на постійної напруги та імпульсні.

Імпульсні конденсатори мають невелику власну індуктивність для того, щоб неспотворювалась форма імпульсів.

Дозиметричні конденсатори працюють в ланцюгах з малим рівнем струмових навантажень, тому вони мають дуже малий саморозряд та великий опір ізоляції. Краще всього ці умови виконують фторопластові конденсатори.

Конденсатори, що придушують заваду мають малу власну індуктивність, а тому високу резонансну частоту та широку смугу частот придушення.

За типом органічного діелектрика конденсатори розподіляються на паперові, плівкові та комбіновані.

Паперові конденсатори мають великі ємності та робочі напруги; низьку вартість; однак великі втрати при змінній напрузі [$tg\delta \approx (5 \text{ до } 10) \cdot 10^{-3}$], (тому їх застосовують до частот 200...500 Гц), низьку температурну стабільність та обмежений температурний діапазон, швидке старіння.

В зв'язку з підвищеною абсорбцією електричних зарядів паперові конденсатори не рекомендовано застосовувати в ланцюгах, де проходять швидкі процеси заряду та розряду.

Плівкові конденсатори мають великий опір ізоляції та малі енергетичні втрати $tg\delta = (0,5 \dots 4) \cdot 10^{-4}$ при ϵ до 2,5; високу температурну стабільність та номінальну напругу, вони більш високочастотні, мають невеликі габарити, але відносно велику вартість.

Найбільшу питому ємність серед конденсаторів цієї групи мають лакоплівкові конденсатори, які можуть замінити навіть конденсатори з оксидним діелектриком при наявності підвищених значень змінної складової напруги.

Кращі параметри в діапазоні середніх частот 500...2000 Гц мають плівкові полікарбонатні конденсатори (К77-1, К77-2, К77-3, К77-4, К77-5).

На більш високих частотах працюють плівкові полістирольні, фторопластові та поліпропіленові конденсатори.

Полістирольні конденсатори мають стабільний опір ізоляції та малу залежність ємності від температури. Тому застосовуються в часових контурах, пристроях інтегрування, контурах великої добротності.

Фторопластові конденсатори застосовуються при підвищених температурах.

Плівкові конденсатори застосовуються також і для придушення завад.

Комбіновані конденсатори К75-10, К75-12, К75-24, К75-4 мають підвищені електричну міцність та опір ізоляції.

7.4.2. Конденсатори з неорганічним діелектриком

Електродами цих конденсаторів є тонкі шари металу, фольги, які наносяться на діелектрик шляхом металізації.

Діелектриком у таких конденсаторах є кераміка, скло, □□гнето тв, склокераміка, слюда.

До основних типів конденсаторів із неорганічним діелектриком відносяться:

- **керамічні** (К10, К15). Вони мають невеликі розміри невелику вартість, $TКЄ = (120...3300) \cdot 10^{-1} / ^\circ C$, ε – від 6 до десятків тисяч. По застосуванню розподіляються на три види:

1-й – високочастотні (до тисяч МГц). Мають малі втрати та власні індуктивності, ТКЄ нормовані. Застосовуються в коливальних контурах.

2-й – низькочастотні. Мають великі втрати ($tg\delta$ до 0,055), але велику питому ємність. Застосовуються для блокування та розв'язки електричних контурів.

3-й – низькочастотні (опорні та прохідні). Мають великі втрати ($tg\delta$ до 0,01). Застосовуються для придушення промислових побутових завад, виконують функцію фільтрів низьких частот;

- **скляні** (К21), □□гнето тверді (К22) та склоемальові. Мають високу теплостійкість до 200...350°C.

- **слюдяні**. Діелектриком слюдяного конденсатора є пластинки природної слюди (мусковіта) завтовшки 0,01 мм, а електродами алюмінієва (КСО) або срібна фольга (КСГ, СГМ), яка впаюється в діелектрик. Ці конденсатори мають високу стабільність ємності при зміні частоти та температури, малі втрати [$tg\delta = (1...2) \cdot 10^{-4}$]; високі робочі напруги, але відносно великі габарити та високу вартість

7.4.3. Конденсатори з оксидним діелектриком

До них відносяться:

- оксидно-електролітичні алюмінієві конденсатори (K50);
- об'ємно-пористі танталові конденсатори (K52);
- оксидно-напівпровідникові конденсатори (K53).

В конденсаторах з оксидним діелектриком одним електродом (анодом) є метал (алюміній, тантал, ніобій), а другим електродом (катодом) – електроліт. Між металом та електролітом виникає оксидна плівка, яка і є робочим діелектриком. В оксиднонапівпровідникових конденсаторах між електродами розміщують напівпровідник (двоокис марганцю).

Оксидний шар між електродами має невелику товщину (долі мікрон), але високу пористість (розпушену поверхність), тому велику площину і велике значення діелектричної проникності ($\epsilon = 10 \dots 100$). Це дозволяє створювати конденсатори з великим значенням ємності (від 0,5 до 5000 мкФ).

Однак, наявність у оксидних конденсаторах електроліту, який має більший питомий опір ніж металеві електроди, призводить до підвищених втрат. Крім того оксидні конденсатори мають низький температурний та частотний діапазони, а також низьку стабільність параметрів в часі завдяки висиханню електроліту.

В залежності від матеріалу анода, конденсатори з оксидним діелектриком, поділяють на алюмінієві, танталові та ніобієві. Танталові та ніобієві конденсатори мають велику питому ємність, оскільки оксидний шар на танталі та ніобії має більшу діелектричну проникність і електричну міцність, а велика хімічна стійкість тантала і ніобія дозволяє застосовувати більш агресивні електроліти, які мають малий питомий опір, що призводить до зменшення втрат і зростанню стабільності параметрів конденсаторів

Робоча напруга не перевищує: на алюмінієвих – 450В, на танталових і ніобієвих – 100-150В.

Нормальна робота оксидних конденсаторів забезпечується тільки при вірному його підключенні в ланцюг, тобто тоді, коли позитивний потенціал підключається до анода, а негативний – до катода. Невірне підключення конденсатора призводить до проходження великого струму крізь нього і виходу його з ладу. Це відноситься до полярних конденсаторів.

Тому полярні конденсатори можуть застосовуватися тільки для роботи в ланцюгах постійного та пульсуючого струму – в фільтрах джерела живлення, в перехідних та розподільчих контурах.

Для електричних ланцюгів, де полярність напруги змінюється, застосовуються неполярні конденсатори. Вони можуть розглядатися, як два полярні конденсатори, які включені назустріч один одному та поєднані в спільному корпусі. Практично, іноді при відсутності неполярних конденсаторів, включають зустрічно два однакових полярних.

До нових оксидно – напівпровідникових конденсаторів відноситься конденсатор К53 – 59, який зроблений на основі травленої алюмінієвої фольги (анода). Він має структуру – метал – окисел – напівпровідник (МОН). Напівпровідником є катод.

До переваг цього конденсатора належить: підвищена стійкість до впливу напруги зворотної полярності (30% від номінального значення); можливість роботи в неполярному (знакозмінному) режимі, наприклад, при змінній синусоїдальній напрузі частоти 50 Гц з розмахом 80% від максимальної; підвищена термостійкість до 175...200°С.

Оксидні конденсатори розподіляються на конденсатори загального призначення, високочастотні, імпульсні, пускові та ті, що придушують заваду.

Оксидні конденсатори групи загального призначення можуть бути полярні або неполярні. Експлуатація полярних конденсаторів можлива, якщо до анода прикладена позитивна напруга постійна або пульсуюча. Неполярні конденсатори можуть включатися без урахування полярності.

Високочастотні оксидні конденсатори застосовуються в джерелах вторинного живлення, як елементи нагромадження та фільтрування в ланцюгах розв'язок та перехідних у діапазоні частот пульсуючого струму від десятків до сотень кГц. Тому поняття “високочастотні” для оксидних конденсаторів є відносним.

Імпульсні оксидні конденсатори застосовуються в електричних ланцюгах із відносно тривалим зарядом та швидким розрядом, наприклад, у пристроях фотоспалаху. Вони енергомісткі, мають малий повний опір і велику робочу напругу. До них відносяться алюмінієві конденсатори з напругою 450 В.

Пускові оксидні конденсатори застосовують в асинхронних двигунах, де конденсатор вмикається тільки в момент пуску і створює магнітне поле, що обертається, яке за формою наближується до колоподібного, що збільшує магнітний потік і пусковий момент.

Оксидними конденсаторами, що придушують заваду є прохідні оксидно-напівпровідникові танталові конденсатори. Вони мають велику ємність та виконують роль фільтра низьких частот. Кожна обкладка таких конденсаторів має два виводи – по одному на кожному торці корпусу. Така конструкція забезпечує меншу власну індуктивність конденсатора за збільшену частотну смугу фільтрації.

7.4.4. Конденсатори з газоподібним діелектриком

Розподіляються на постійні та змінні. Діелектриком цих конденсаторів є повітря, стиснутий газ (азот, фреон, елєгаз) або вакуум. Особливістю газоподібних діелектриків є велика електрична міцність, малі втрати ($tg\delta$ до

10^{-6}) і висока стабільність електричних параметрів. Тому основним місцем застосування цих конденсаторів є високовольтні високочастотні пристрої. Газонаповнені конденсатори ємністю 50...100 пФ при $U_{роб}=100...500$ кВ застосовуються в високовольтних вимірювальних приладах, а конденсатори ємністю до декілька тисяч пікофарад при $U_{роб} = 30...50$ кВ – в контурах потужних передавачів на частотах до 0,5 МГц.

На частотах 0,5 МГц до 40 МГц в радіопередавачах застосовуються вакуумні конденсатори, які мають більші ніж повітряні питомі ємності, малі втрати, високу електричну міцність.

7.5. Конденсатори змінної ємності

Ємність цих конденсаторів можна змінювати при роботі пристроїв. Їх застосовують для настроювання коливальних контурів радіопередавачів та радіоприймачів, приладах автоматики, в вимірювальній техніці.

Управління ємністю здійснюється механічно або температурою (термоконденсатори) та електричною напругою (варіконди та варікани). В останньому випадку конденсатори називаються нелінійними.

Конденсатори з механічним управлінням.

Найбільш поширені є повітряні конденсатори змінної ємності, які складаються із системи рухомих пластин (ротора), та системи нерухомих пластин (статора) (рис. 7.9)

При повороті роторних пластин відносно статорних змінюється площа перекриття S і тому змінюється ємність. Можливо змінювати ємність зміною зазору між пластинами.

Конденсатори змінної ємності крім загальних параметрів мають специфічні, які враховують особливості їх функціонального призначення та конструкцію. До цих параметрів належать – **найбільша та найменша ємність, момент повороту, зносостійкість.**

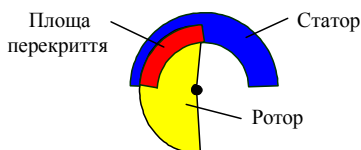


Рис. 7.9. Конструкція змінного конденсатора

Момент повороту це найменший момент необхідний для переміщення рухомої системи конденсатора.

Зносостійкість – це здатність конденсатора протистояти зносу при поворотах його рухомої частини.

Важливою характеристикою повітряних конденсаторів є **залежність ємності C від кута повороту θ** рухомих пластин,

$$C=f(\theta).$$

Для різних типів конденсаторів ця залежність різна.

Відповідно до цього і конденсатори можуть бути (7.10):

- лінійні (прямоємносні);

- квадратичні (прямохвильові);
- зворотньоквадратичні (прямочастотні);
- логарифмічні.

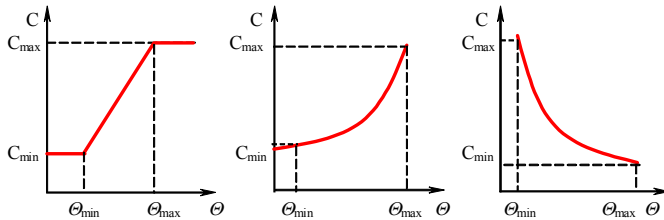


Рис. 7.10. Характер зміни ємності конденсатора:
а) лінійна; б) прямохвильова; в) зворотньоквадратична

Прямоемносні конденсатори мають напівкруглу форму пластин та лінійну залежність $C=f(\theta)$

$$C=a\theta+b,$$

де a та b – постійні коефіцієнти.

Для прямоемносного конденсатора $a=C_{\max}-C_{\min}/180^\circ$, $b=C_{\min}$.

Для цих конденсаторів характерне те, що щільність настроювання контуру (зміна частоти на одиницю кута повороту) буде по частотному діапазону нерівномірна: при малих ємностях – велика, при великих – мала. Конденсатори цього типу в основному застосовуються для настроювання коливальних контурів на необхідну частоту.

Прямохвильові конденсатори забезпечують лінійну зміну довжини хвилі коливальних контура від кута повороту. Причому ємність конденсатора буде змінюватись за квадратичним законом:

$$C=(a\theta+\sqrt{b})^2,$$

де $a=\sqrt{C_{\max}-C_{\min}}/180^\circ$, $b=C_{\min}$.

Ці конденсатори застосовують у радіовимірювальних приладах.

Прямочастотні конденсатори дозволяють отримати лінійну зміну частоти контура, забезпечуючи постійну щільність настроювання по діапазону.

Ємність від кута повороту рухомих пластин змінюється за зворотньоквадратичним законом:

$$C=1/(a\theta+b)^2,$$

де $a=\frac{1/\sqrt{C_{\min}}-1/\sqrt{C_{\max}}}{180^\circ}$, $b=\frac{1}{\sqrt{C_{\max}}}$.

Ці конденсатори найбільш розповсюджені. Вони дозволяють отримати рівномірну за частотою шкалу настроювання коливального контура.

Логарифмічні конденсатори мають постійну відносну зміну ємності (частоти контура) на одиницю кута повороту. Це забезпечує однакову точність відрхунку по усій шкалі діапазону.

Ємність від кута повороту змінюється за законом:

$$C = ae^{b\theta},$$

де $a = C_{\min}$, $b = \frac{\ln C_{\max} - \ln C_{\min}}{180^\circ}$.

Графік цієї функції наближається до графіку прямокутних конденсаторів.

Значення ємностей змінних повітряних конденсаторів, які найчастіше застосовуються в різних діапазонах частот наведено в табл. 7.10.

Таблиця 7.10

Діапазон зміни ємності, пФ	Довгі хвили	Середні хвили	Короткі хвили	Надкороткі хвили
C_{\max}	450...750	250...450	50...150	15...50
C_{\min}	25...125	10...15	6...10	2,6...7

Повітряні змінні конденсатори (КП2) відрізняються великою точністю установлювання ємності, малими втратами та відносно високою стабільністю.

Вакуумні змінні конденсатори (КП1) застосовуються в передавачах, де необхідна висока стабільність частоти контурів при великих напругах (до 100 кВ). Діапазон зміни ємності від 1 до 25000 пФ.

Змінні конденсатори з твердим діелектриком (слюда, полістирол, фторопласт, кераміка) мають менші розміри, але низьку точність та стабільність, а тому застосовуються в основному в $\square\square$ гнето тверд транзисторних приймачів побутового призначення

Конденсатори змінної ємності можуть бути односекційними та багатосекційними. Багатосекційні конденсатори застосовуються коли необхідне одночасне настроювання декількох коливальних контурів.

Параметри деяких вакуумних конденсаторів змінної ємності наведено в табл. 7.11.

При необхідності зміни ємності в невеликих межах застосовуються напівзмінні конденсатори, які забезпечують зміну ємності в межах 1,5...140 пФ. Вони можуть бути з повітряним діелектриком (КТ2) та твердим діелектриком (КТ4).

Конденсатори з управлінням температурою або електричною напругою.

До цих конденсаторів відносяться варіконди та термоконденсатори.

Таблиця 7.11

Тип конденсатора	$C_{н\bar{}}$, пФ	$U_{роб}$, кВ	F_{max} , МГц	I , А
КП1-1	10...100	25	60	35
КП1-9	50...400	45	7,5	500
КП1-16	10...1000	1,8	30	20

Варіконди – це нелінійні сегметокерамічні конденсатори, ємність яких змінюється під дією напруги.

Застосовуються в каскадах радіоелектронних пристроїв, які змінюють форму напруги або генерують напругу спеціальної форми. Хоча ємність варікондів можна змінювати в 2 – 3 рази, але в коливальних контурах вони не застосовуються завдяки низькій стабільності параметрів.

За функціональним призначенням до варікондів близькі напівпровідникові діоди – варикапи, які змінюють свою ємність при зміні напруги на p - n -переході, та варактори, які застосовуються для множення частоти.

До параметрів варіконда відносяться:

- номінальна ємність, $C_{н\bar{}}$;
- максимальна напруга, U_{max} ;
- коефіцієнт нелінійності, $K_{н\bar{}}$, показує у скільки разів збільшується ємність варіконда, якщо напруга струму частоти 50 Гц змінюється від 5 В до значення, при якому ємність буде максимальною;
- коефіцієнт управління, $K_{у}$, показує у скільки разів зменшується ємність варіконда при зміні постійної напруги від 0 до 200 В.

Параметри найбільш поширених варікондів наведено в табл. 7.12.

Таблиця 7.12

Тип	$C_{н\bar{}}$	$K_{н\bar{}}$	$K_{у}$	U_{max} , В
ВК2-1;2;3;4; ЗШ;Б;БШ	470пФ-0,22мкФ	7-8	-	=160;~100
ВК4-1;2;3;4;Б	220пФ-0,5мкФ	7-8	-	~100
КН1-5	2,2пФ-47пФ	-	1,3-1,5	=200; ~100 ~100
КН1-6	4,7пФ-10пФ	-	1,3	

Термоконденсатори – це нелінійні сегметокерамічні конденсатори, ємність яких управляється температурою (незначна зміна ємності від температур є у всіх конденсаторів, однак цей ефект небажаний).

Термоконденсатори застосовуються для термокомпенсації ємності конденсаторів та ємнісних складових електричних ланцюгів. Для роботи в кварцових генераторах електронних годинниках застосовують термоконденсатор КН2 – 2 з номінальними ємностями 47; 68 та 100 пФ.

7.6. Маркування конденсаторів та позначення їх на схемах

Маркування конденсаторів – літерно-цифрове. Воно наноситься на його корпус і може бути повне або скорочене.

Умовне позначення конденсатора складається з літерно-цифрового коду, який має такі елементи:

1-й – літера або дві літери, які відповідають підкласу конденсатора:

К – конденсатор постійної ємності;

КТ – напівзмінний конденсатор;

КП – конденсатор змінної ємності;

КН – конденсатори нелінійні;

2-й – цифра, яка позначає групу конденсатора за матеріалом діелектрика (табл. 7.13);

3-й – літера, яка вказує вид робочого струму:

У – придатний для роботи в колах змінного, постійного, пульсуючого струмів та в імпульсних режимах;

П – придатний для роботи в колах постійного, змінного та пульсуючого струмів;

Ч – конденсатор для кіл змінного струму;

И – конденсатор призначений для роботи в імпульсних режимах.

(Цей елемент у позначенні може бути відсутній, якщо обмежень відносно цього виду струму нема);

4-й – (після дефіса) вказує реєстраційний номер конденсатора;

5-й – робоча напруга;

6-й – номінальна ємність;

7-й – допуск;

8-й – температурний коефіцієнт ємності.

Приклади:

1. К-10-47: керамічний конденсатор постійної ємності на номінальну напругу до 1600 В з номером розробки – 47.

2. КТЧ-27: конденсатор напівзмінний з твердим діелектриком для змінного струму та номером за порядком – 27.

3. КЗ1П-1: конденсатор постійної ємності, слюдяний, малопотужний для постійного струму з номером за порядком – 1.

Повне умовне позначення конденсатора має такі елементи (рис. 7.11):

- підклас конденсатора (постійний, змінний);

- тип конденсатора (за видом діелектрика);

- номінальна ємність;
- номінальна напруга;
- температурний коефіцієнт ємності;
- допуск;
- дата виготовлення та документ на поставку.

Таблиця 7.13

Підклас конденсаторів	Група конденсаторів за типом діелектрика	Позначення групи
КОНДЕНСАТОРИ ПОСТІЙНОЇ ЄМНОСТІ (К)	Керамічні: на $U_n < 1600\text{В}$	10
	на $U_n \geq 1600\text{ В}$	15
	Склоплівкові	21
	Склокерамічні	22
	Тонкоплівкові з неорганічним діелектриком	26
	Слюдяні:	
	– малої потужності	31
	– великої потужності	32
	Паперові з фольговими обкладками:	
	на $U_n < 2\text{кВ}$	40
	на $U_n \geq 2\text{кВ}$	41
	Паперові з металізованими обкладками	42
	Оксидно-електролітичні алюмінієві	50
	Об'ємно-пористі танталові	52
	Оксидно-напівпровідникові	53
	Повітряні	60
	Вакуумні	61
	Полістирольні плівкові з фольговими обкладками	70
	Полістирольні плівкові з металізованими обкладками	71
	Фторопластові плівкові	72
	Лавсанові металізовані плівкові	73
	Лавсанові фольгові плівкові	74
	Комбіновані	75
Лакоплівкові	76	
Полікарбонатні плівкові	77	
Поліпропіленові плівкові	78	
Підстроєчні (КТ) та змінної ємності (КП)	Вакуумні	1
	Повітряні	2
	З газоподібним діелектриком	3
	З твердим діелектриком	4
Нелінійні	Вариконди	1
	Термоконденсатори	2

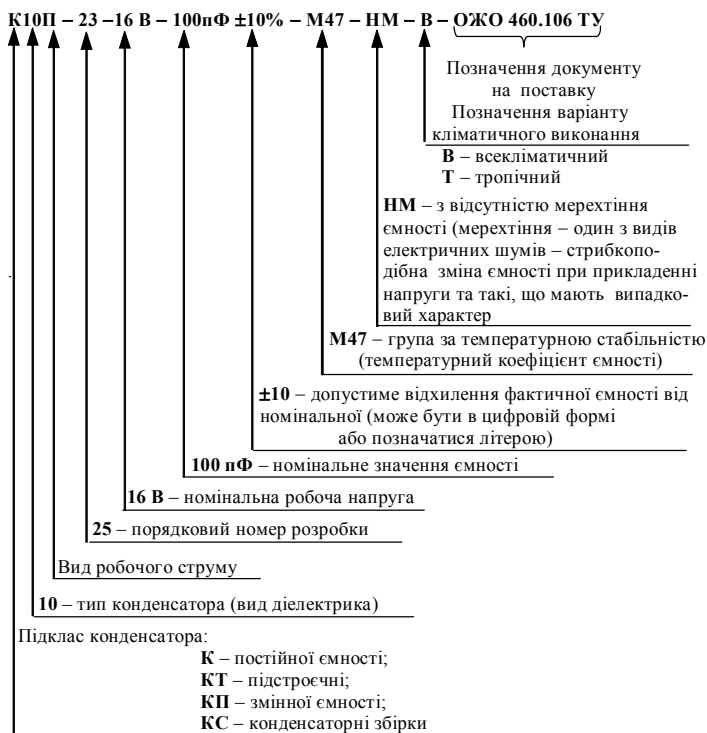


Рис. 7.11. Повне умовне позначення конденсаторів

Наприклад, в позначенні номінальної ємності можуть бути відсутні одиниці вимірювання, якщо конденсатори цього типу вимірюються тільки в одних одиницях, наприклад, в мкФ у оксидних конденсаторах.

Може бути відсутнім і допуск, якщо конденсатори цього типу випускаються з одним допуском.

В радіоелектронній апаратурі ще зустрічаються конденсатори із застарілим позначенням, які мають різні ознаки – конструктивні різновиди, технологічні та експлуатаційні особливості, області застосування та інші.

- КД – конденсатори дискові;
- КТ – конденсатори трубчаті;
- КМ – конденсатори монолітні;
- КЛС – конденсатори секційні вилиті;
- КСО – конденсатори слюдяні опресовані;
- СГМ – конденсатори слюдяні герметизовані малогабаритні;
- КБГИ – конденсатори паперові герметизовані ізольовані;
- КЭГ – конденсатори електролітичні герметизовані;
- ЭТО – конденсатори електролітичні танталові об’ємнопористі;

- КПК – конденсатори керамічні напівзмінні;
 МБМ – конденсатори металопаперові малогабаритні та т. ін.
 Скорочене умовне позначення конденсатора (маркіровка на корпусі) включає в себе слідуєчі елементи (рис. 7.12):
- підклас конденсатора (постійний, змінний);
 - цифр, які позначають номінальне значення ємності;
 - літера, яка позначає одиницю вимірювання ємності П – (пФ), Н – (нФ), М – (мФ) і розміщується в місці знаходження коми в значенні номінальної ємності;
 - літера, яка позначає допуск.

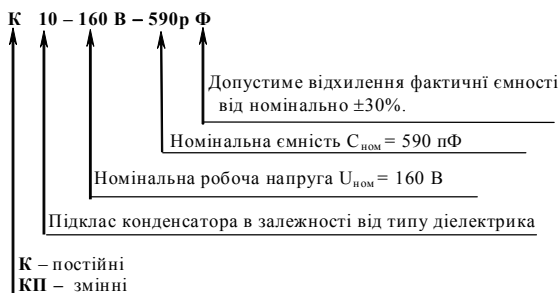


Рис. 7.12. Умовне скорочене позначення конденсаторів

Наприклад, Н15И – ємність конденсатора 0,15 (150 пФ), допуск – $\pm 5\%$.

На корпусах керамічних та слюдяних конденсаторів крім номіналу й допуску вказують код температурного коефіцієнта ємності (ТКЄ), який складається з літери (П або М) та яке після множення на 10^{-6} , відповідає середньому значенню ТКЄ. Наприклад, позначення П33 відповідає $ТКЄ = +33 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, а М47 – $-47 \cdot 10^{-6}$, МПО – $1/^\circ\text{C}$.

На корпусах менш стабільних конденсаторів маркується літера Н та число, яке відповідає допустимому відхиленню ємності у відсотках із зміною температури. Наприклад, Н30 – ємність може змінюватись на $\pm 30\%$.

На корпусах слюдяних конденсаторів умовне позначення групи ТКЄ маркується літерою:

- А – ненормований ТКЄ;
- Б – $ТКЄ = \pm 200 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;
- В – $ТКЄ = \pm 100 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;
- Г – $ТКЄ = \pm 50 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

На корпусах керамічних конденсаторів КМ попереду коду групи ТКЄ стоїть ще одна цифра, яка відповідає конструктивному різновиду конденсатора. Наприклад, 5КМ33: конденсатор КМ має конструктивний різновид – 5 та код ТКЄ – П33. В деяких випадках конденсатори маркують

кольоровим кодом (табл. 7.14). Кольором визначається код номінальної ємності, її множника та допустимої напруги. Код номінальної ємності відповідає кольору фарби корпусу конденсатора біля виводів (виводу), кодом множника може бути колір плями посередині корпусу, а код допустимої напруги – фарба другої частини корпусу конденсатора.

Таблиця 7.14

Кольоровий код	$C_{ном}$, пФ	Множник	$U_{доп}$, В
Чорний	10	1	4
Коричневий	12	10	6,3
Червоний	15	10^2	10
Оранжевий	18	10^3	16
Жовтий	22	10	40
Зелений	27	10	25 або 20
Блакитний	33	10	32 або 30
Фіолетовий	39	10	50
Сірий	47	10^{-2}	3,2
Білий	56	10^{-1}	63
Срібний	68	-	2,5
Золотий	82	-	1,6

Наприклад, конденсатор K53 – 59 пофарбований в блакитний та коричневий колір з зеленою плямою відповідає конденсатору з номінальною ємністю $33 \cdot 10^{-5}$ пФ і $U_{доп} = 6,3$ В.

На рис. 7.13 представлена кольорова маркіровка конденсаторів. Вона може складатися з 4 - 5 кольорових міток в виді полос або точок, які відображають номінальне значення опору, множник, допуск, номінальна напруга. Для визначення цих параметрів в визначеній послідовності необхідно набрати кольорові мітки і програма покаже внизу чисельні значення.

На рис 7.14. наведено умовні графічні позначення конденсаторів на принципових електричних схемах: а – постійного; б – полярного; в – неполярного; г – оксидного прохідного; д – опорного, є – змінного; ж – □□гнето тверді; із – вариконда та к – термоконденсатора. Поруч із ними вказують позиційне позначення. Воно складається з літери С та номера за порядком на схемі. Тут також вказується номінал ємності. Причому одиниці вимірювання ємності конденсатора (розмірність) згідно стандарту не наводиться, якщо значення ємності лежить у межах 1...9999 пФ і є цілим (наприклад С1 – 38).

Якщо значення ємності є десятковим дробом, то позначення ємності має розмірність, (наприклад, С2 38,2 пФ).

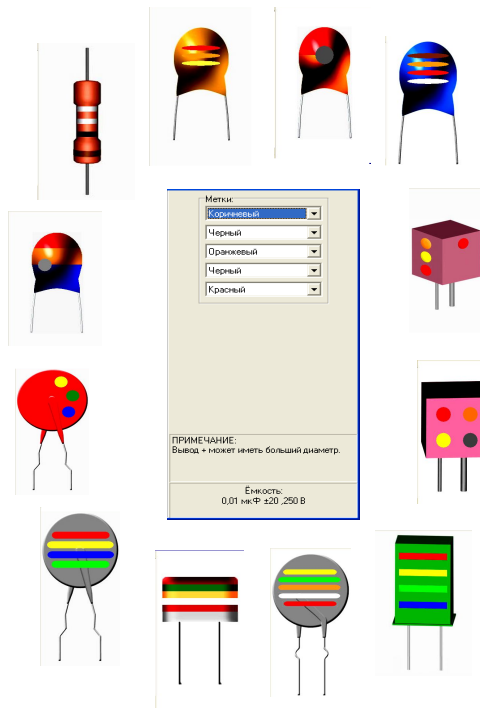


Рис. 7.13. Кольорова маркіровка конденсаторів

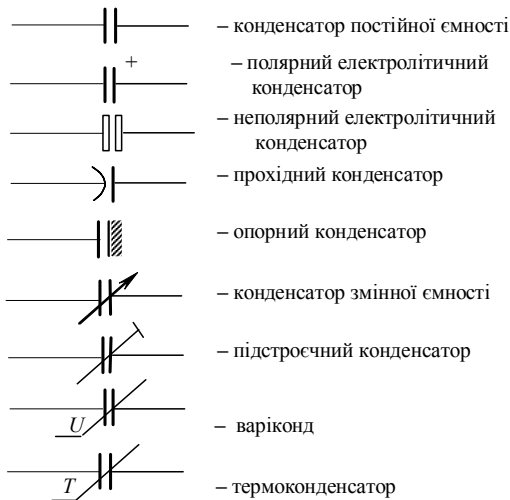


Рис. 7.13. Умовне графічне позначення конденсаторів на принципових електричних схемах

Ємність конденсаторів від 0,01 мкФ і більша позначається в мкФ, але також без позначення розмірності. При цьому ємність записується десятковим дробом, (наприклад, С3 – 0,025), а у випадку цілого числа – із нулем після коми, (наприклад, С4 – 1,0).

Оксидні полярні конденсатори при їх позначенні на схемах мають біля позитивної обкладки знак “+”, і крім номіналу ємності через знак “Х” – номінальну напругу, (наприклад, С5 47,0х20В).

При схемному позначенні конденсаторів змінної та напівзмінної ємності вказуються межі зміни ємності, (наприклад, С6 – 3...270).

7.7. Надійність базових типів конденсаторів та перспективи їх розвитку

Надійність роботи конденсаторів визначається головним чином електричною міцністю ізоляції його діелектрика. Найбільш поширені відмови конденсаторів пов’язані з пробоем ізоляції між обкладками. Крім того причинами відмови конденсаторів є вихід їх параметрів – ємності, опору ізоляції та tg кута діелектричних втрат за межі норм, а також обрив виводів.

Найбільший вплив на надійність конденсаторів мають: робоча напруга, температура, вологість.

Якщо робоча напруга, температура та вологість перевищують допустимі значення, то більш інтенсивно проходить процес старіння, знижується опір ізоляції, збільшуються енергетичні втрати, збільшується струм витоку. Це призводить до зміни ємності та пробоем.

Електричне навантаження конденсатора оцінюється за допомогою коефіцієнта навантаження:

$$K_n = U_{\text{роб}} / U_{\text{доп}}$$

де $U_{\text{роб}}$ – напруга на конденсаторі;

$U_{\text{доп}}$ – допустима напруга.

Доцільно вибирати $K_n \leq 0,5$

Найменшу надійність мають оксидні конденсатори. Термін їх служби залежить від температури. Так, перегрів конденсатора на 10...15°C зменшує термін його служби у 8-10 разів.

Тривале зберігання конденсаторів призводить до розформовки оксидного шару, збільшенню струму витоку, який в свою чергу веде до електричного перевантаження конденсатора та виходу його з ладу. Тому після тривалого зберігання пристрої з оксидними конденсаторами повинні вмикатися спочатку на зменшену напругу.

Для різних приладів конденсатор вибирається виходячи з умови його застосування та необхідних параметрів.

Подальший розвиток конденсаторів пов'язаний з розробкою та застосуванням безвивідних конденсаторів для автоматизованої зборки та монтажу радіоелектронної апаратури.

Засвоєння надвисокочастотного діапазону потребує розробки спеціальних конденсаторів із малою індуктивністю та малими енергетичними втратами.

В зв'язку з необхідністю розв'язування проблеми зменшення пульсацій спрямовувачів напруг, застосовуються оксидні конденсатори, здатні працювати на частотах до сотень кГц з плоскою вивідною конструкцією.

Для підвищення заводо захищеності радіоелектронної апаратури від індустриальних та радіозавод застосовуються конденсатори та фільтри з визначеними смугами придушення завод.

Серед конденсаторів, так як і серед резисторів виділяються базові вироби (талб. 7.15).

Конденсатори відповідають самим суровим вимогам експлуатації, являються перспективними для застосування апаратурі зв'язку та телекомунікаційних системах.

Створені нагромаджувачі зарядів із дуже великими значеннями ємності – одиниці та десятки фарад. Такі ємності необхідні в RC – контурах для відрахунку часу в радіолокації, в інтеграторах для підриву зарядів та т. ін. Вони можуть також застосовуватися як резервні джерела струму і як елементи пам'яті. Зараз вже є нагромаджувачі з ємністю до 50 Ф, але їх допустима напруга низька (не більше 0,5 В). Тому їх подальше удосконалення пов'язано з підвищенням допустимої напруги.

Для більш детального ознайомлення з іншими параметрами базових конденсаторів, а також іншими типами конденсаторів необхідно звертатися до спеціальних довідників, які як правило складені за класами виробів електронної техніки.

Ситуація з розвитком конденсаторів аналогічна розвитку резисторів. В інтересах мікроелектроніки створені "чїп" – конденсатори. Освоєння СВЧ діапазону потребувало створення спеціальних конденсаторів із малою індуктивністю та малими втратами. Поряд із другими класами виробів розроблюються безвивідні конденсатори для автоматизованої зборки та монтажу РЕА.

Велике значення в апаратурі зв'язку надається підвищенню заводостійкості, в тому числі від індустриальних радіозавод. З цією метою розробляються заводо захищені конденсатори та фільтри з відповідними полосами подавлення перешкод.

При застосуванні конденсаторів приймаються до уваги робоча напруга та співвідношення між змінною та постійною складових, діапазон робочих частот $tg\delta$.

Таблиця 7.15

Основні параметри базових конденсаторів

Тип	Діапазон номінальних напруг, В	Діапазон номінальних ємностей	Конструктивні особливості
1	2	3	4
КЕРАМІЧНІ			
K10-47	25-500	1000 пФ–6, 8 мкФ	Прямокутні з однонаправленими виводами в пластмасових корпусах для печатного монтажу та безвивідні (ЧП) для гібридних мікросхем
З ОРГАНІЧНИМ ДІЕЛЕКТРИКОМ			
K71-7	250	1000 пФ–0,5 мкФ	Прямокутні з однонаправленими виводами в пластмасових корпусах для печатного монтажу. Циліндричні з різнонаправленими виводами в алюмінієвих корпусах. Циліндричні з однонаправленими виводами в алюмінієвих корпусах. Високовольтні з різнонаправленими виводами в монолітному епоксидному корпусі циліндричної та прямокутної форми
K73-16	63-1600	4700 пФ–22 мкФ 15 мкФ–150 мкФ	
K73-26	63-100	0,01 мкФ–10 мкФ	
K75-47	2500-63000		
З ОКСИДНИМ ДІЕЛЕКТРИКОМ			
1	2	3	4
K53-16	1,6-30	0,01–15 мкФ	Прямокутні з однонаправленими виводами в пластмасових корпусах для печатного монтажу
K53-18	6,3-40	0,03 –1000 мкФ	
K53-30	1,6-32	0,1 –15 мкФ	Циліндричні герметизовані з різнонаправленими виводами
K53-28	6,3-40	1 –150 мкФ	Окулені епоксидним компаундом з однонаправленими виводами.
K50-24	6,3-160	2,2 –1000 мкФ	Плоскі чотирививідні на розширений діапазон частот
K50-27	160-450	2,2 –1000 мкФ	Циліндричні з різнонаправленими дротяними виводами.
K50-33	6,2-160	470 –22000 мкФ	
K50-37	3,2-250	1000 – 470000 мкФ	Циліндричні з пелостковими однонаправленими виводами.
K50-38	6,3-160	1–10000 мкФ 1,5 мкФ–68 мкФ	Циліндричні з пелостковими виводами чотирививідні на розширений діапазон частот.
K52-9	50-125	6,8 мкФ–80 мкФ	Циліндричні з втулочними виводами на більшій ємності.
K52-10	6,3-50		Циліндричні з дротяними однонаправленими виводами для печатного монтажу. Циліндричні герметизовані з різнонаправленими виводами.

Контрольні питання для самоперевірки

1. Який принцип конструкції конденсаторів та його призначення в електричних схемах
2. За якими ознаками класифікуються конденсатори?
3. Якими основними параметрами характеризуються конденсатори постійного опору?
4. Як залежить опір конденсатора від температури і яким параметром ця залежність характеризується?
5. Як кодується ТКЄ для різних типів конденсаторів?
6. Які параметри входять у повне та скорочене умовне позначення конденсаторів?
7. Як залежить $\text{tg}\delta$ від зовнішніх факторів?
8. Дайте характеристику основних типів конденсаторів з оксидним діелектриком та області їх застосування.
9. Які основні типи конденсаторів відносяться до конденсаторів із неорганічним діелектриком?
10. На чому оснований принцип роботи варікондів і якими параметрами вони характеризуються?
11. Якими основними параметрами характеризуються конденсатори змінної ємності?
12. Як графічно позначаються конденсатори на електричних принципових схемах?

РОЗДІЛ VIII

КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ

Котушки індуктивності, за винятком дроселів, призначених для використання в колах живлення, не являються комплектуючими виробами, як, наприклад, резистори та конденсатори. Вони виготовляються на радіозаводах і мають ті параметри, які необхідні для конкретних виробів.

Із-за труднощів мікромініатюризації, значних масогабаритних показників, поганої повторюваності характеристик та параметрів, високої трудоемності виготовлення область їх застосування обмежена. Однак при створенні цілого ряду пристроїв електроніки обійтись без них поки що неможливо. При цьому важливим являється те, що індуктивні компоненти з використанням існуючої ізоляції можуть успішно працювати при температурі до 200 – 500 °С, тому знання функцій, які котушки індуктивності вносять в схеми, їх характеристик та параметрів, являються необхідними для цілісного сприйняття роботи електронного пристрою.

8.1. Призначення, конструкція та класифікація

Котушка індуктивності – це радіодеталь електронної апаратури, здатна запасати електромагнітну енергію і призначена для використання її індуктивності.

Конструктивно, котушка індуктивності складається з обмотки, яка намотується на каркас з ізоляційного матеріалу; вона може мати феромагнітне осердя. В деяких котушках застосовується і феромагнітний настроювач, який змінює індуктивність у невеликих межах. Іноді застосовується електромагнітний екран. Індуктивність котушки визначається відношенням потокозчеплення самоіндукції Φ обмотки до струму I через неї:

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

Струм, який проходить через котушку приводить до появи ЕРС самоіндукції E . Її значення залежить від індуктивності.

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad L = \frac{E}{\frac{dI}{dt}}$$

З цієї формули, можна визначити індуктивність як фізичну величину, яка чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, якщо струм обмотки змінюється на 1А за 1с.

Іноді індуктивність визначають і з формули реактивного опору X_L змінному струму, який діє в обмотці.

$$X_L = \omega \cdot L; L = \frac{X_L}{\omega};$$

Індуктивність котушки залежить від її геометричних розмірів, властивостей осердя та кількості витків:

$$L = \frac{\mu \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot W^2}{e} \cdot 10^{-3} \quad \text{мкГн}, \quad (8.1)$$

де μ – магнітна проникність осердя;

D – діаметр котушки (см);

W – кількість витків;

L – довжина котушки (см);

Котушки індуктивності застосовуються у коливальних контурах підсилювачів та генераторів, у фільтрах, для зв'язку між ланцюгами через магнітний потік, в кабелях зв'язку.

Котушки індуктивності діапазону радіохвиль класифікуються за різними ознаками (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Класифікація котушок індуктивності

За частотним діапазоном вони розділяються на котушки надвисокохвильові, короткохвильові, середньохвильові та довгохвильові.

В залежності від призначення – на контурні (для коливальних контурів), зв'язку (які передають електромагнітні коливання з одного контуру до другого), дроселі високої частоти (які загороджують шлях високочастотному струму).

За можливістю зміни індуктивності – на котушки з постійною та змінною індуктивністю (варіометри).

За конструктивними ознаками – на котушки циліндричні, кільцеві, спіральні, броньові, одношарові та багатшарові, з осердям та без осердя, із каркасом та без каркаса, з екраном та без екрана.

На принципових схемах прийняті такі умовні позначення котушок (рис. 8.2): а – котушка або дросель без осердя; б – котушка з відводом; в – котушка з феромагнітним осердям; г – котушка з підстроювачем з феромагного матеріалу.

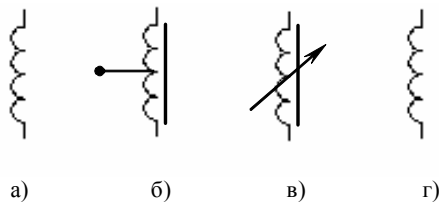


Рис. 8.2. Умовні позначення котушок індуктивності:

- а) котушка з відводом; б) котушка з осердям;
в) котушка з підстроювачем і осердям; г) котушка без осердя

8.2. Основні параметри котушок індуктивності

Властивості котушок індуктивності обумовлюються їх параметрами. До них належать:

- номінальна індуктивність та допуск;
- власна ємність;
- добротність;
- температурний коефіцієнт індуктивності;
- повний опір.

Номінальна індуктивність та допуск.

Номінальна індуктивність – це індуктивність, яка маркується на корпусі котушки або наведена у нормативній документації.

Одиницею вимірювання індуктивності є Генрі (Г) або міліГенрі (1мГ=10⁻³Г), мікроГенрі (1мкГ=10⁻⁶Г), наноГенрі (1нГ=10⁻⁹Г).

Фактичне значення індуктивності котушки може відрізнятись від розрахункового (номінального) на величину допуску. Допуски котушок коливальних контурів лежать у межах (0.2...0.5)% і більше, а для котушок зв'язку, дроселів і інших, які працюють не на резонансних частотах – (10 – 15)%.

Власна ємність.

Між витками котушки індуктивності утворюється розподільна ємність, яку можна замінити зосередженою ємністю C_L , підключеною паралельно індуктивності (рис. 8.3а). Цю ємність називають власною ємністю котушки. Її значення можуть бути до 50 нФ. Крім того, до власної ємності входять ємність між обмоткою, каркасом та осердям.

Наявність власної ємності погіршує параметри котушки (знижує добротність, температурну стабільність). Тому при конструюванні котушки намагаються зменшити її власну ємність. Це досягається застосуванням спеціальних обмоток та каркасів із малими діелектричними втратами та застосуванням спеціальних конструкцій.

Повний опір.

Для знаходження повного опору котушки використаємо її схему заміщення (рис. 8.3б). До неї входять індуктивність L , власна ємність C_L , активний опір проводу R_{np} та активний опір R_1 , який враховує $\square\square$ гнето втрати в каркасі, екрані та осерді.

Опір R_v значно більше опору гілки з конденсатором C_L та опором R_{np} і індуктивністю L . Тому в інженерних розрахунках опором R_1 нехтують. Тоді схема заміщення спрощується (рис. 8.3 в). Використовуючи цю схему заміщення можна описати вираз для повного опору котушки:

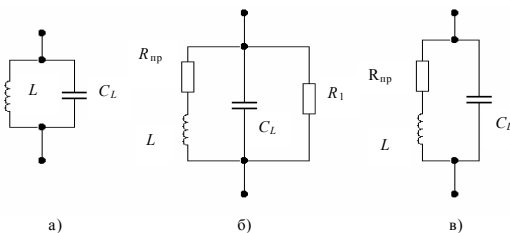


Рис. 8.3. Схема заміщення котушок індуктивності:
а - найпростіша; б - з урахуванням втрат; в - найбільш поширена

$$Z = \frac{(R_{np} + j\omega L) \frac{1}{j\omega C_L}}{R_{np} + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_L}} = \frac{R_{np} + j\omega L}{1 - \omega^2 LC_L + j\omega C_L R_{np}} = R_{сф} + j\omega L_{сф}, \quad (8.2)$$

де L – розрахункова (номінальна) індуктивність;

$R_{\text{еф}}$ – ефективний активний опір;

$L_{\text{еф}}$ – ефективна індуктивність.

З формули (8.2) можна знайти ефективну індуктивність (значення індуктивності для даної частоти):

$$L_{\text{еф}} = \frac{L}{1 - \omega^2 LC_L}.$$

Якщо ємкісний та індуктивний опори котушки однакові,

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_L},$$

то виникає резонанс.

Частоту, яка відповідає цьому випадку називають власною частотою котушки.

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_L}}$$

Котушка може виконувати свої функції до частоти ω_0 , оскільки на частоті більше ω_0 вона матиме ємкісний опір.

Добротність

Добротність котушки індуктивності Q_L , пов'язана з втратами енергії і знаходиться як відношення її індуктивного опору,

$$X_L = \omega L,$$

до активного опору R на заданій частоті:

$$Q_L = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R}. \quad (8.3)$$

Активний опір котушки складається з опору проводу обмотки ($R_{\text{пр}}$) та опору втрат ($R_{\text{в}}$) в осерді, корпусі та екрані, які вносяться до обмотки.

Тоді:

$$R = R_{\text{пр}} + R_{\text{в}}$$

Через котушку часто проходять одночастотний постійний та змінний струми, тому опір проводу буде мати дві складові: опір постійному струму R_0 та опір змінному струму R_f :

$$R_{\text{пр}} = R_0 + R_f$$

Відомо, що опір прямолінійного проводу змінного струму вище його опору постійного струму. Це пояснюється тим, що під впливом власного магнітного поля в провіднику виникають індукційні струми, взаємодія яких з основним струмом приводить до нерівномірного розподілу струму по перетину проводу: щільність струму в вищих шарах провідника зростає, а у внутрішніх – спадає, тобто струм витискається з середини до поверхні

проводу. Це явище називається **поверхневим ефектом**.

Поверхневий ефект зростає із зростанням частоти. Найбільший вплив на опір має поверхневий ефект на надвисоких частотах. Тут велике значення має шорсткість поверхні провідника, яка збільшує довжину шляху струму.

У спіральній обмотці під впливом магнітного поля контуру виникають індукційні струми, які теж приводять до зміни розподілу щільності струму.

У перетині проводу найбільша щільність струму буде в областях перетину, що розміщені більш до середини котушки. Це явище зветься **ефектом близькості**.

Обидва явища (поверхневий ефект та ефект близькості) приводять до зменшення ефективного січення проводу, а значить до збільшення його опору.

Таким чином, активний опір котушки змінного струму R_f дві складові:

$$R_f = R_{п.е.} + R_{е.б.}$$

де $R_{п.е.}$ – опір за рахунок поверхневого ефекту;

$R_{е.б.}$ – опір за рахунок ефекту близькості;

Тоді формулу активного опору проводу можна записати:

$$R_{пр} = R_0 + R_{п.е.} + R_{е.б.},$$

а загального активного опору:

$$R = R_0 + R_f + R_b.$$

Питома вага складових опору R залежить від частоти. Більший вплив мають: R_0 – на частотах до десятків кГц; $R_{п.е.}$ та $R_{е.б.}$ – на частотах від десятків кГц до десятків мГц; R_b – на частотах більше десятків мГц.

Опір проводу $R_{пр}$ і його діаметр d пов'язані складною залежністю: опори R_0 та $R_{п.е.}$ зменшуються при зростанні d , а $R_{е.б.}$ – збільшуються (рис. 8.4).

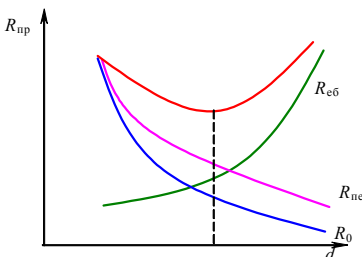


Рис. 8.4. Графік залежності опору проводу від його діаметру

Сума графіків цих залежностей дає графік $R_{пр}$, якій має мінімум. Величина оптимального діаметру проводу $d_{опт}$, залежить від частоти та розміру котушки і для одношарових котушок із діаметром $d = 20 \dots 50$ мм лежить у межах $0,2 \dots 0,6$ мм, а для багатошарових – більше $0,3$ мм.

З формули (8.3) бачимо, що при зміні частоти змінюється добротність і існує частота, на якій добротність максимальна Q_{max} (рис. 8.5). З цієї характеристики можна знайти оптимальний частотний діапазон застосування котушок. Він визначається на рівні $0,707$ від максимуму. Практичні значення добротності знаходяться в

межах 60...400.

При конструюванні котушок індуктивності намагаються отримати її максимальну добротність. Це досягається збільшенням діаметра котушки (згідно з формулою 8.1) індуктивність збільшується пропорційно квадрату діаметра котушки);

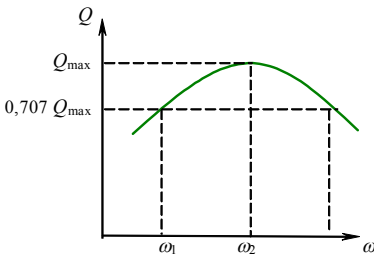


Рис. 8.5. Графік залежності добротності котушки

- застосуванням багатожильного проводу (літцендрату);

- застосуванням проводу з оптимальним діаметром (до 1,5 мГц);

- зменшенням шорсткості поверхні проводу й нанесенням на нього шару срібла (Ag) (на надвисоких частотах для зменшення $R_{не}$);

- застосування каркасу з ізоляційних

матеріалів із малими втратами;

- застосуванням осердя з високочастотного феромагнітного матеріалу (карбонільного заліза, фериту), який дозволяє отримати задану індуктивність при меншій довжині проводу;

- обранням оптимального частотного діапазону.

Температурна стабільність.

Зворотні температурні зміни індуктивності визначаються температурним коефіцієнтом індуктивності, тобто відносною зміною індуктивності при зміні температури на $1^{\circ}C$:

$$TKI = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}, \quad 1^{\circ}C$$

де L_1 та L_2 – індуктивності при температурах T_1 та T_2 відповідно.

Температурна нестабільність індуктивності пов'язана зі зміною діаметра та довжини котушки, а також із зміною магнітної проникності осердя при зміні температури.

Стабільність визначає відносну стабільність параметрів котушки під дією зовнішніх факторів. Їх вплив проявляється при зміні параметрів матеріалів та розмірів котушки, тому дуже важливе значення має правильний вибір матеріалу, конструкції та технології виготовлення.

Діапазон регулювання індуктивності являється важливим фактором, який визначає можливість зміни індуктивності котушки. Визначається коефіцієнтом перекриття:

$$K_L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\min}}$$

Його значення не перевищує 10. В даний час застосовуються наступні способи регулювання індуктивності котушок:

- введенням в котушку немагнітного електропровідного елемента;
- введенням зазору в магніт;
- зміною магнітопроникності магнітопроводу шляхом його підмагнічування постійним струмом або постійним магнітом;
- переміщенням витків або секцій котушки та перестановкою виводів.

8.3. Типи обмоток котушок індуктивності

Провід укладений визначним способом, називається обмоткою. Технологічний процес укладання проводу називається намоткою. Намотка обмоток проводиться на спеціальних приладах або станках, які забезпечують отримання таких типів обмоток:

- одно або багат шарову, коли всі витки розміщені в один або декілька шарів;
- рядову, коли витки розміщені вздовж осі з кроком, якій дорівнює діаметру проводу;
- довільну рядову;
- крокову, коли витки розміщені довільно на деякій відстані один від одного;
- універсальну, коли витки намотані під кутом до площини її розміщення на каркасі мають різкий перебіг у торців;
- секційну, коли витки укладені групами вздовж осі котушки;
- спіральну, коли витки укладені у виді плоскої спіралі.

Крокова обмотка забезпечує малу власну ємність, що пов'язано зі зменшенням ємності між витками при збільшенні кроку.

Багат шарові обмотки забезпечують великі індуктивності котушок (до 500 мкГ). Але вони мають велику власну ємність (до 70 пФ), низьку добротність (20...30) та малу температурну стабільність.

Зменшення власної ємності багат шарових котушок забезпечується секціюванням обмоток, а також застосуванням обмоток, намотаних "внавал" або універсальних. Секціювання зменшує власну ємність до 10 пФ.

Малі значення власної ємності багат шарових котушок (5...10 пФ) забезпечує універсальна обмотка. Котушки з універсальною обмоткою мають індуктивність до (400...500) мкГ та добротності до 100.

Спіральні обмотки застосовуються на коротких та надкоротких хвилях. Вони мають малі розміри та малу власну ємність (до 2 пФ), але їх індуктивність також невелика (до 8 – 10 мкГ). Котушки без корпусів дозволяють отримати більшу добротність, але мають меншу температурну стабільність. Типи обмотувальних проводів котушок індуктивності наведені в шаблонах.

8.4. Котушки індуктивності з магнітним осердям

8.4.1. Типи магнітних осердей котушок індуктивності

Магнітне осердя – це деталь з феромагнітного матеріалу призначена для зосередження в ній магнітного потоку. Магнітні осердя застосовують у котушках індуктивності.

Осердя котушки індуктивності характеризуються еквівалентною (відносною) магнітною проникністю та коефіцієнтом використання магнітних властивостей.

Еквівалентна магнітна проникність – це відношення індуктивності котушки з осердям L_c до індуктивності цієї котушки без осердя L $\mu_{\text{екв}} = \frac{L_c}{L}$.

Коефіцієнт використання магнітних властивостей матеріалу осердя показує наскільки еквівалентна магнітна проникність осердя менше початкової магнітної проникності матеріалу, із якого він

виготовлений $K_\mu = \frac{\mu_{\text{екв}}}{\mu_{\text{п}}}$.

Типи осердей котушок індуктивності наведені на рис. 8.6.

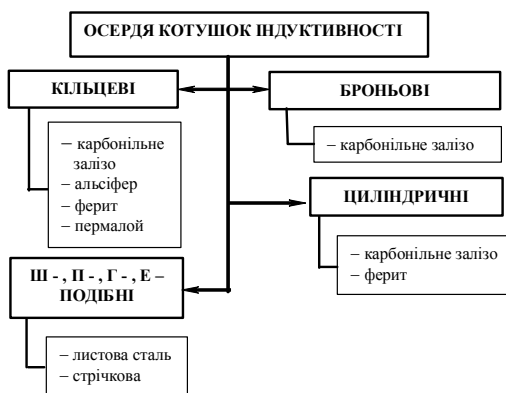


Рис. 8.6. Осердя котушок індуктивності

Найбільш розповсюдженими є циліндричні, броньові та кільцеві осердя.

Циліндричні осердя виготовляються з карбонільного заліза та феритів. За конструкцією вони можуть бути стержневі, різьбові, трубчасті. Вони мають низький коефіцієнт використання магнітних властивостей, тому застосовуються в основному як підстроювачі індуктивності.

Броньові осердя (СБ та Б виготовляються з карбонільного заліза та

мають більший коефіцієнт використання магнітних властивостей K_μ), застосовуються в контурних котушках індуктивності в діапазоні 0.1...0.5 мГц.

Найбільший коефіцієнт K_μ мають кільцеві осердя, які виготовляються з карбонільного заліза, альсіферу, пермалою та фериту.

Крім того іноді застосовуються листові осердя типа Ш, П, Е, Г.

8.4.2. Вплив магнітних осердей на параметри котушок індуктивності

Введення в котушку магнітного осердя змінює її основні параметри:

- збільшує індуктивність L ;
- збільшує власну ємність C_L ;
- знижує температурну стабільність;
- змінює добротність Q .

Зростання індуктивності котушки з осердям пов'язане зі збільшенням магнітного потоку, оскільки він зосереджується в осерді.

Зростання власної ємності котушки (в 1.5...3 рази) пов'язано з появою додаткової ємності між обмоткою та осердям.

Зниження температурної стабільності можна проаналізувати за формулою температурного коефіцієнта індуктивності котушки з осердям:

$$TKI_{oc} = TKI + TKI_\mu \quad (8.4.)$$

де TKI – температурний коефіцієнт котушки без осердя;

TKI_μ – температурний вплив осердя.

Добротність котушки з осердям знаходиться за формулою:

$$Q_{oc} = \frac{\omega L_{oc}}{R_{np} + R_k + R_{oc}},$$

де R_{np} – опір проводу;

R_k – опір втрат, які вносяться корпусом;

R_{oc} – опір втрат, які вносяться матеріалом осердя;

Запишемо цю формулу у вигляді:

$$Q_{oc} = \frac{\omega L}{R_{np} + R_k} \cdot \frac{\frac{L_{oc}}{L}}{1 + \frac{R_{oc}}{R_{np} + R_k}} = QK_Q$$

де Q – добротність котушки без осердя;

K_Q – коефіцієнт добротності.

Для покращення властивостей котушок застосовують осердя (наприклад броньові), з повітряним зазором. Це необхідно, по - перше, для зменшення

спотворень форм сигналів в каскадах з котушками індуктивності, які з'являються завдяки нелінійною залежністю магнітної індукції та проникності μ від напруженості поля H ;

$$B = f(H), \mu = f(H)$$

по - друге, для зменшення температурної нестабільності, що пояснюється зменшенням впливу другого доданка у формулі (8.4).

Зменшення нелінійності характеристик $B = f(H), \mu = f(H)$ в осердях з опором виникає тому, що в них з'являються магнітні полюси, які створюють поле, направлене назустріч зовнішньому полю. Це призводить до зменшення індукції й згладжування характеристики $\mu = f(H)$. Але при цьому зменшується індуктивність (рис. 8.7).

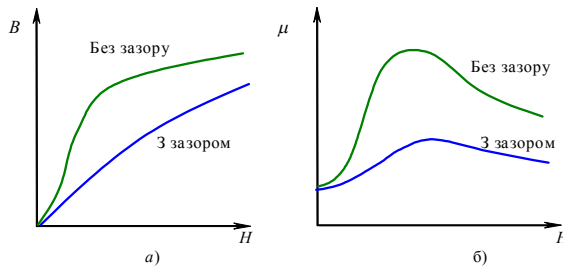


Рис. 8.7. Вплив магнітного зазору на характеристики осердь:
 а) $B = f(H)$; б) $\mu = f(H)$

Добротність котушки Q_L залежить від ширини магнітного зазору осердя l_s (рис. 8.8). При малих зазорах добротність зростає, за рахунок переважання зменшення магнітних утрат (на вихрові струми), над зменшенням індуктивності. При великих зазорах добротність знижується за рахунок переважання складової, пов'язаної із зменшенням індуктивності над зменшенням магнітних втрат.

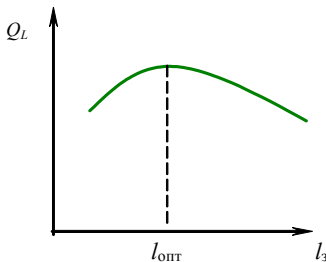


Рис. 8.8. Графік залежності індуктивності котушки з осердям від магнітного зазору

Таким чином існує оптимальна ширина повітряного зазору, яка забезпечує максимальну добротність.

При правильно вибраному зазорі добротність котушки з осердям може доходити до 600.

Добротність котушки залежить від частоти котушках з високим значенням магнітної проникності μ та малими магнітними втратами, при збільшенні частоти, починаючи з невеликих

частот, добротність зростає. При подальшому збільшенні частоти збільшуються втрати в осерді, що приводить до зменшення добротності (див. рис. 8.9).

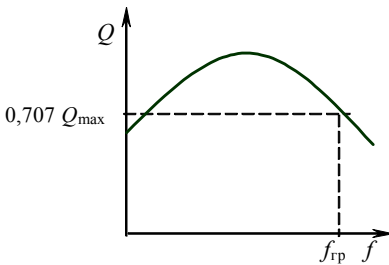


Рис. 8.9. Графік залежності добротності від частоти

Таким чином добротність котушки з осердям може бути більша або менша її добротності без осердя. Вона визначається значенням коефіцієнта добротності K_Q , який залежить від магнітної проникності та втрат, пов'язаних із частотним діапазоном та величиною зазору.

Верхня границя частотного діапазону $f_{гр}$ є частота, для якої $K_Q=1$ ($Q_c=Q$).

8.5. Котушки індуктивності з немагнітним осердям

Немагнітні осердя виготовляються з меді (Cu) або латуні. Такі осердя можна уявити як короткозамкнутий виток, який індуктивно зв'язаний з котушкою. В ньому, під дією магнітного поля котушки виникають вихрові струми, електромагнітне поле яких направлено проти основного поля. Це ослаблює основне поле, що приводить до зменшення індуктивності та добротності котушки. Крім того, немагнітне осердя зменшує добротність котушки завдяки збільшенню опору, який вноситься в котушку.

Важливою властивістю немагнітних осердь є велика температурна стабільність (менша залежність від температури). Тому вони застосовуються в котушках каскадів, які потребують підвищеної температурної стабільності.

Для підстроювання індуктивності котушки немагнітні осердя застосовуються в короткохвильовому та ультрахвильовому діапазоні.

Високочастотні та низькочастотні котушки індуктивності.

Високочастотні котушки індуктивності використовуються в коливальних контурах, різного роду фільтрах для здійснення магнітного зв'язку між окремими ділянками електричних кіл РЕА, в лініях затримки для створення необхідного реактивного опору на окремих ділянках електричного кола.

Конструкція середньо – та високочастотних котушок індуктивності визначається частотним діапазоном її використання, умовами застосування в РЕА та вимогами стабільності. Для котушок індуктивності на порівняно невисокі частоти (2 – 5 МГц) вибір матеріалу в основному визначається його технологічність. Як правило, каркаси виготовляються із пластмаси, мають циліндричну форму із фланцями або секціями. Обмотка котушок

багат шарова, частіше за все типу “універсал” із проводу ПЭВ – 1, ПЭВ – 2, ПЭЛШО. Для настройки застосовують феромагнітні сердечники з різьбою для завінчування в отвір каркасу. В цілях зменшення розмірів котушок застосовують котушки з магнітопроводами (магнітодіелектрика або фериту) замкнутої форми (тороїдальні, кільцеві, броневі, П – та Ш – подібні). Котушки індуктивності на високі частоти (10 МГц і більше) мають відносно малу індуктивність, добротність 50 – 100 і особисту ємність 1 –2 пФ. В якості матеріалу для каркасу використовується кераміка, поліетилен, полістирол. За формою частіше за все гладкі циліндричні, рідше нарізні та ребристі. Слід відмітити, що ребристі каркаси дають можливість зменшити особисту ємність котушки до 0,5 пФ. В якості обмоточних проводів використовують ПЭВ – 1, ПЭВ – 2, ПЭЛ та неізольовані з міді марок ММ і МТ. Намотка в більшості випадків одношарова. Підстройка здійснюється частіше всього переміщенням крайніх витків.

Прецизійні котушки дуже високої стабільності виконують на каркасах із спеціальних високотійких матеріалів (кераміка та плавлений кварц).

Найбільш високоточні котушки індуктивності отримують при виконанні струмопроводів у пазах. Для мініатюрних та мікромініатюрних вузлів РЕА застосовують мікромодульні та котушки індуктивності у виді плоских багатовиткових спіралей.

Котушки зв'язку застосовуються для здійснення індуктивного зв'язку між окремими колами. Такий зв'язок вигідний так, як дозволяє повністю розділити кола постійного та змінного струму. Індуктивний зв'язок може бути постійний або регулюємий. Величина зв'язку оцінюється коефіцієнтом зв'язку:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

де M – взаємна індукція між котушками зв'язку L_1 та L_2 ;

L_1 та L_2 – індуктивності котушок зв'язку.

Дроселі – високочастотні котушки індуктивності, які включаються в коло для збільшення її реактивного опору. Для успішного вирішення цієї задачі особиста частота котушки повинна бути значно вище робочої. Для цього дросельна котушка індуктивності повинна мати велику індуктивність і дуже малу особисту ємність. Точність значення індуктивності для дроселя не має значення. Добротність дроселя впливає тільки тоді коли її включення може впливати на добротність контура. Для зменшення особистої ємності дроселі намотуються секційно, а на частотах вище 10 МГц виконуються одношарові намотки зі змінним кроком.

Низькочастотні котушки індуктивності використовуються в якості індуктивностей низькочастотних коливальних контурів і фільтрів, для здійснення магнітного зв'язку між окремими ділянками електричного кола:

зміна величини напруги, узгодження опорів електричних кіл, розділення електричних кіл за постійним струмом та зміною опору електричного кола відносно землі (як правило, всі перераховані функції виконуються електромагнітними пристроями – трансформаторами, які являються практично багатообмоточними низькочастотними котушками індуктивності з замкнутим магнітним осердям).

Низькочастотні трансформатори та дроселі. Класифікація низькочастотних трансформаторів показана на рис. 8.10. Трансформатори, які застосовуються в РЕА можна розділити на: силові, □□гнето тв, та імпульсні.



Рис. 8.10. Класифікація низькочастотних трансформаторів

Силові трансформатори у свою чергу підрозділити на: малопотужні, середньої потужності, високої потужності, однофазні, трифазні, трансформатори підвищеної та технічної частоти, низьковольтні та високовольтні.

Дросель – елемент, який використовується в електричних колах у якості індуктивного опору. Класифікація низькочастотних дроселів показана на рис. 8.11.



Рис. 8.11. Класифікація низькочастотних дроселів

По призначенню їх можна розділити на дроселі змінного струму, узгоджуючі дроселі, управляючі та нелінійного опору. За конструктивними ознаками трансформатори і дроселі діляться відкриті й захищені корпусами.

За формою магнітопроводу – броневі, стержневі та кільцеві.

За способом захисту від вологи їх можна розділити на незахищені, захищені, обволакуючі та герметичні.

8.6. Варіометри

Варіометри – це котушки зі змінною індуктивністю, які застосовуються для плавного регулювання індуктивності коливальних контурів. Це може здійснюватися:

- плавною зміною кількості витків рухомим контактом;
- зміною взаємної індуктивності між сусідніми котушками;
- переміщенням магнітного або немагнітного осердя всередині котушки.

Основним параметром варіометра є коефіцієнт перекриття з індуктивності,

$$K_L = \frac{L_{\max}}{L_{\min}},$$

де L_{\max} і L_{\min} – максимальна й мінімальна індуктивності відповідно.

Коливальні контури оцінюються коефіцієнтом перекриття діапазону, який є відношенням максимальної та мінімальної частоти. Неважко довести, що межі перенастроювання контуру зв'язані з межами зміни ємності або індуктивності таким співвідношенням:

$$K_g = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \sqrt{\frac{C_{\max}}{C_{\min}}} = \sqrt{\frac{L_{\max}}{L_{\min}}}$$

Варіометри з магнітним осердям мають нерухому котушку, всередині якої переміщується осердя з карбонільного заліза або фериту.

Варіометри з магнітним осердям застосовуються до 70 мГц, а з немагнітним до 220 мГц. Діапазон покриття залежить від співвідношення розмірів осердя та котушки і часто дорівнює 1,3...1,4 (для магнітних осердь) або 1,05...1,15 (для немагнітних осердь).

В варіометрах із немагнітним осердям із посрібленої міді, латуні або алюмінію регулювання індуктивності досягається завдяки впливу на магнітне поле котушки зворотного магнітного поля вихрових струмів.

Варіометри застосовують у потужних вихідних каскадах радіопередавачів, де застосування конденсаторів стає менш ефективним, ніж варіометрів, завдяки складності їх конструкцій, великих розмірів, а головне чутливості до вібрацій, завдяки яким виникає коливання пластин, які приводять до механічної модуляції ємності, а в контурі до небажаної (паразитної) модуляції частоти.

Механічна модуляція ємності виникає і в радіостанціях, які розміщуються на рухомих об'єктах. В цих випадках зручно використовувати варіометри замість змінних конденсаторів.

8.7. Екранування та надійність котушок індуктивності

Для зменшення паразитних зв'язків між котушками індуктивності та іншими елементами апаратури застосовують електромагнітні екрани.

Поле котушки приводить до появи вихрових струмів у металевому екрані, які утворюють власне поле, напрям якого протилежний напрямку поля котушки. Суттю електромагнітного екранування є компенсація полем вихрових струмів поля котушки або зовнішнього поля. Але застосування екранів зменшує індуктивність котушки на 10...20%, збільшує власну ємність на 10...30%, збільшує втрати та знижує добротність.

Надійність котушок індуктивності

Характерними видами відмов котушок є:

- перегорання та обрив обмоток, обумовлені перегрівом;
- пробій ізоляції обмотки на корпус, між витками та обмотками при великих напругах;
- замкнення між витками та обмотками при старінні ізоляції обмотувальних проводів;
- вихід параметрів котушки за межі норми при впливі температури, вологи, електричних та механічних навантажень.

Найбільша кількість відмов пов'язана з одночасним впливом вологи та

підвищеної температури. Циклічна деформація конструкції й різниця температурних коефіцієнтів матеріалів, приводять до появи тріщин та раковин, в які попадає волога. Протікання вологи зменшує опір ізоляції між витками завдяки виникненню електролітичних процесів, які руйнують ізоляцію. При цьому змінюється індуктивність та добротність котушки.

В котушках із магнітними осердями параметри виходять за межі норм завдяки старінню феромагнітного матеріалу, зміни його магнітної проникності та збільшенню втрат.

Збільшення надійності котушок досягається завдяки:

- захисту котушки від проникнення вологи пропиткою та герметизацією;
- додержання нормативних умов експлуатації.

Інтенсивність відмов котушки:

$$\lambda = (0.01 \dots 0.03) \cdot 10^{-6}, \text{ 1/год}$$

Ознакою нормальної роботи котушки є відповідність її параметрів (активного опору, індуктивного, добротності) вимогам нормативної документації.

Активний опір котушки залежить від кількості витків та довжини проводу і, найчастіше, знаходиться в межах від одиниць до сотен Ом, добротність – у межах 40...600, індуктивність – від десятків мкГн до десятків мГн.

8.8. Індуктивності. Значення, допуск, маркіровка

Зазвичай для індуктивностей кодується номінальне значення індуктивності і допуск, тобто відхилення, що допускається, від вказаного номіналу. Номінальне значення кодується цифрами, а допуск - буквами. Застосовується два види кодування.

А. Перші дві цифри вказують значення в мікрогенрі (мкГн), остання - кількість нулів. Наступна за цифрами буква вказує на допуск. Наприклад, код 101J позначає 100 мкГн $\pm 5\%$. Якщо остання буква не вказується - допуск 20%. Виключення: для індуктивностей менше 10 мкГн роль десяткової коми виконує буква R, а для індуктивностей менше 1 мкГн - буква N (рис. 8.12).

Допуск: D = ± 0.3 нГн; J = $\pm 5\%$; K = $\pm 10\%$; M = $\pm 20\%$.

Приклади позначень:

2N2D — 2.2 нГн ± 0.3 нГн	1R0K — 1.2 мкГн $\pm 10\%$	470K — 47 мкГн $\pm 10\%$
22N — 22 нГн	2R2K — 2.2 мкГн $\pm 10\%$	680K — 68 мкГн $\pm 10\%$
R10M — 0.10 мкГн $\pm 20\%$	3R3K — 3.3 мкГн $\pm 10\%$	101K — 100 мкГн $\pm 10\%$
R15M — 0.15 мкГн $\pm 20\%$	4R7K — 4.7 мкГн $\pm 10\%$	151K — 150 мкГн $\pm 10\%$
R22M — 0.22 мкГн $\pm 20\%$	6R8K — 6.8 мкГн $\pm 10\%$	221K — 220 мкГн $\pm 10\%$
R33M — 0.33 мкГн $\pm 20\%$	100K — 10 мкГн $\pm 10\%$	331K — 330 мкГн $\pm 10\%$
R47M — 0.47 мкГн $\pm 20\%$	150K — 15 мкГн $\pm 10\%$	471J — 470 мкГн $\pm 5\%$
R68M — 0.68 мкГн $\pm 20\%$	220K — 22 мкГн $\pm 10\%$	681J — 680 мкГн $\pm 5\%$
1R0K — 1.2 мкГн $\pm 20\%$	330K — 33 мкГн $\pm 10\%$	102 — 1000 мкГн

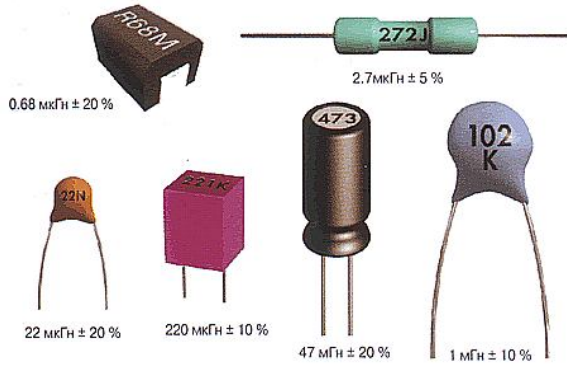


Рис. 8.12. Перший вид кодування котушок індуктивності



Рис. 8.13. Другий вид кодування котушок індуктивності

Колір маркіровочного знаку	Номінальна індуктивність		
	Перший елемент (перша цифра)	Другий елемент (друга цифра)	Третій елемент (множник)
Чорний		0	1
Коричневий	1	1	10
Червоний	2	2	10 ²
Помаранчевий	3	3	10 ³
Жовтий	4	4	10 ⁴
Зелений	5	5	10 ⁵
Синій (голубий)	6	6	10 ⁶
Фіолетовий	7	7	10 ⁷
Сірий	8	8	10 ⁸
Білий	9	9	10 ⁹

Кольорова маркіровка.

Відповідно до вимог ІЕС 62 для індуктивностей кодується номінальне значення індуктивності і допуск, тобто відхилення, що допускається, від вказаного номінала. Найчастіше застосовується кодування 4 або 3 кольоровими кільцями або крапками. Перші дві мітки вказують на значення номінальної індуктивності в мікрогенрі (мкГн), третя мітка - множник, четверта - допуск. У разі кодування 3 мітками мається на увазі допуск 20%. Кольорове кільце, що позначає першу цифру номінала, може бути ширше, ніж всі останні (рис. 8.14).

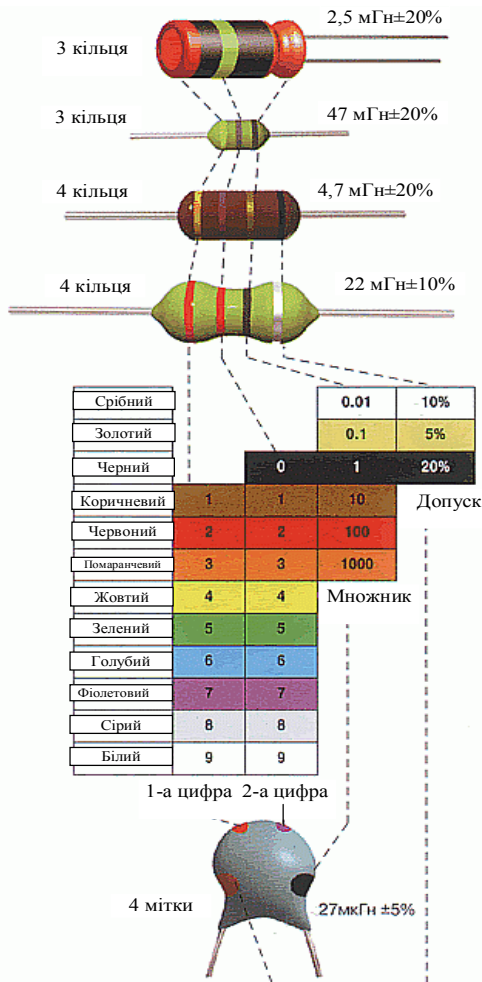


Рис 8.14. Кольорова маркіровка котушок індуктивності

Для розрахунку номінального значення індуктивності різних типів котушок застосовуються різноманітні програми. Одна з них представлена на рис. 8.15. Для розрахунку заданої індуктивності задається тип котушки, її геометричні розміри, крок та тип намотки, діаметр дроту і програма розрахує необхідну кількість витків.

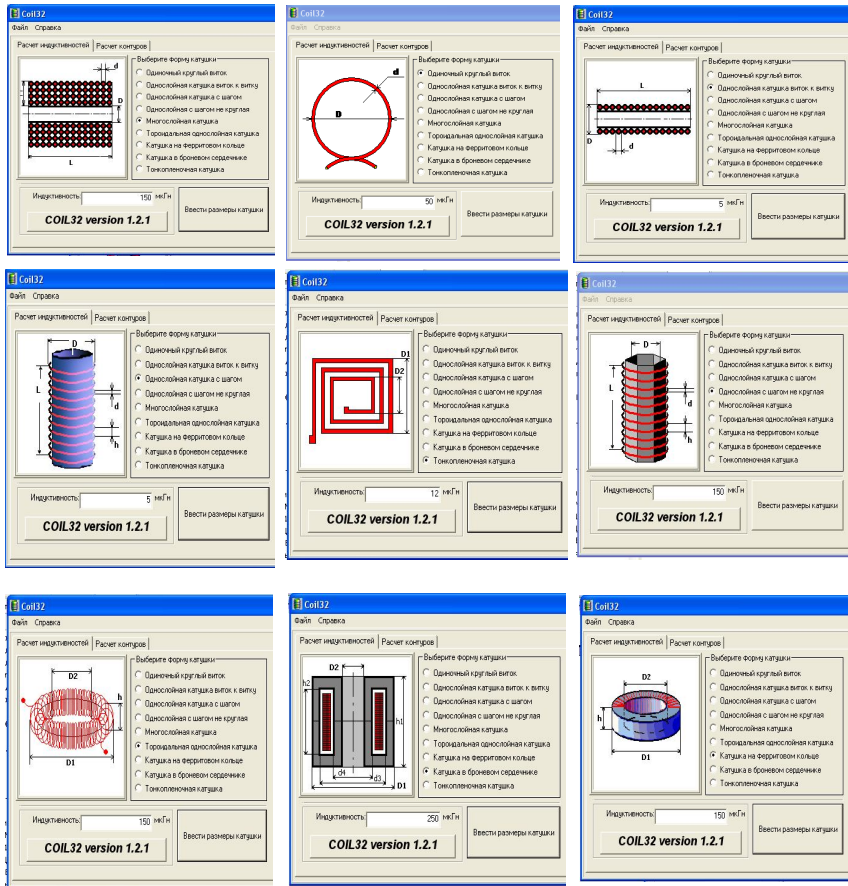


Рис. 8.15 Приклад програми для розрахунку номінального значення індуктивності

Контрольні питання для самоперевірки

1. Для чого призначені котушки індуктивності та їх конструкція?
2. За якими основними ознаками класифікуються котушки індуктивності?
3. Якими параметрами характеризуються котушки індуктивності?
4. Дайте визначення добротності КІ та фактори які впливають на неї?
5. Які існують типи обмоток котушок індуктивності?
6. Як класифікуються магнітні осердя?
7. Як впливає магнітне осердя на параметри котушки індуктивності?
8. Як впливає магнітний зазор на індуктивність котушки?
9. Дайте характеристику високочастотним котушкам індуктивності?
10. Як класифікуються низькочастотні трансформатори та дроселі?

РОЗДІЛ ІХ

ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

9.1. Етапи та напрямки розвитку інтегральних мікросхем

Сучасні та перспективні зразки техніки зв'язку розробляються та виготовляються на новій елементній базі – інтегральних мікросхемах (ІМС). Проблемами розробки, виготовлення та експлуатації техніки зв'язку на ІМС займається спеціальна наука – мікроелектроніка.

Мікроелектроніка дозволяє створити зразки техніки, які відрізняються від існуючих зразків на дискретних елементах такими якостями, як: висока надійність, незначне споживання електроенергії, малі габаритні розміри та маса, низька собівартість виготовлення.

Ці якості досягаються за рахунок застосування так називаємої інтегральної технології виготовлення ІМС, при якій процеси виготовлення радіоелементів і з'єднання їх у функціонально закінчений вузол суміщаються.

За рахунок інтегральної технології стало можливим перехід від традиційних методів збірки функціональних вузлів на дискретних радіоелементах до групового методу виготовлення та з'єднання інтегральних радіоелементів у єдиному конструктивно закінченому функціональному вузлі.

Рівень мініатюризації техніки зв'язку характеризується відношенням числа радіоелементів у вузлі до об'єму, який займає цей вузол, і називається густиною наковки.

Прийнято вважати, техніка зв'язку пройшла у своєму розвитку пройшла п'ять етапів мініатюризації. Кожному етапу відповідає своє покоління елементної бази (рис. 9.1).

Покоління радіоелектронної техніки	Етапи мініатюаризації радіоелектронної техніки	Елементна база радіоелектронної техніки
I – покоління (50 - ті роки)	Мініатюризація	Електронно - вакуумні прилади
II – покоління (60 - ті роки)		Дискретні напівпровідникові прилади
III – покоління (70 - ті роки)	Мікромініатюризація	Інтегральні схеми (ІС)
IV – покоління (80 - ті роки)	Комплексна мікромініатюризація	Великі та надвеликі інтегральні схеми (ВІС, НВІС)
V – покоління (90 - ті роки)		Елементи функціональної електроніки

Рис. 9.1. Етапи розвитку мініатюризації електронної техніки

Перший етап – це етап вакуумної електроніки. Елементну базу на цьому етапі складали електронно - вакуумні прилади. На цьому етапі здійснювалась мініатюризація електронних лапм та пасивних елементів, покращувались характеристики й параметри, використовувався пакетний монтаж. Це дозволило збільшити густину паковки до 200 елементів на 1 дм³ (0,2 ел/см³).

Другий етап – етап дискретної напівпровідникової електроніки наступив з появою і широким впровадженням в РЕТ у якості елементної бази дискретних напівпровідникових приладів – діодів, транзисторів. Застосування транзисторів і мініатюрних радіоелементів забезпечило якісний стрибок у мініатюризації РЕТ, підвищення її надійності, економічності, зменшенні габаритних розмірів і маси.

До цього часу (в 60 - ті роки) широке розповсюдження отримала так називаємий функціонально - вузловий метод конструювання РЕТ.

Сутність методу заключається в конструюванні РЕТ не із окремих радіодеталей, а із уніфікованих функціональних вузлів (УФВ) – підсилювачів, генераторів, перетворювачів, тригерів і т. ін. Такі УФВ, зібрані на дискретних елементах, отримали назву модулів (мікромодулів). Їх застосування дозволило отримати густину паковки до 2 ел/см³.

Третій етап – етап мікроелектроніки. На цьому етапі мікромініатюризації РЕТ у якості елементної бази використовуються інтегральні схеми (ІС). Термін “схема” включає в себе поняття пристрою, вузла, а термін “інтегральна” означає об’єднання великої кількості електрично з’єднаних елементів в одному корпусі.

Четвертий етап – етап комплексної мікромініатюризації. Елементною базою для побудови РЕТ служать інтегральні схеми підвищеного рівня інтеграції (ВІС) та надвеликі інтегральні схеми (НВІС)..

9.2. Класифікація інтегральних схем

Інтегральні схеми класифікуються за такими ознаками:

За технологією виготовлення:

- напівпровідникові;
- плівкові;
- гібридні.

За функціональним призначенням:

- аналогові (АІС);
- цифрові (ЦІС);
- цифро аналогові (ЦАС).

За функціональними можливостями:

- універсальні;
- спеціалізовані.

За рівнем інтеграції. Ступінь інтеграції ІС являється показником складності ІС і характеризується кількістю елементів та компонентів в її складі $N_{ел}$.

Для характеристики рівня інтеграції використовують величину k :

$$k = \lg N_{ел}$$

де k – коефіцієнт, який заокруглюється до найближчого більшого цілого числа.

В залежності від величин k ($N_{ел}$) розрізняють:

- ІС малого рівня інтеграції (ІС – 1, 2), у яких $N_{ел} \leq 10$, $k = 1$, або $10 < N_{ел} \leq 100$, $k = 2$;

- ІС середнього рівня інтеграції (ІС – 3), у яких $100 < N_{ел} \leq 1000$, $k = 3$;

- великі та над великі інтегральні схеми (ІС – 4, 5), у яких $1000 < N_{ел} \leq 10000$, $k = 4$, або $10000 < N_{ел} \leq 100000$, $k = 5$.

За типом основного активного елемента:

- ІС на біполярних транзисторах;

- ІС на польових транзисторах.

За конструктивним виконанням:

- корпусні;

- безкорпусні.

9.3. Технологія виготовлення пасивних елементів ІС

В даний час у радіоелектронній промисловості для виготовлення ІС дві технології (рис. 9.2): гібридна та напівпровідникова.

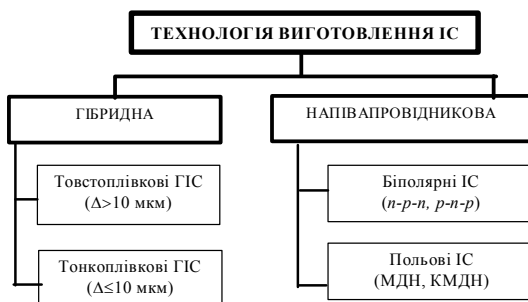


Рис. 9.2. Технології виготовлення ІС

До технології виготовлення пред'являються протирічні вимоги. З однієї сторони, необхідно підвищувати ступінь інтеграції ІС, а з іншої, необхідно мати типові (універсальні) ІС. Однак збільшення рівня інтеграції ІС обмежує область їх застосування. Наявність двох технологій дозволяє, в деякій мірі, задовільнити цим протирічними вимогам.

Найбільшу густину паковки ІС забезпечує напівпровідникова технологія. Однак її складність та властивості отриманих елементів не завжди задовольняють технічним вимогам. Більш економічною являється гібридна технологія. Вона дозволяє отримати ІС із кращими властивостями елементів, але більш низьким рівнем інтеграції.

9.3.1. Гібридна технологія виготовлення ІС

Гібридна технологія частіше всього застосовується для виготовлення спеціалізованих, прецизійних ІС.

Її основні **переваги**:

- висока якість пасивних елементів;
- широкий частотний діапазон;
- температурна стабільність.
- спільна підкладка з діелектрика дозволяє усунути паразитні зв'язки.

Крім переваг, гібридна технологія має і **недоліки**:

- меншу, чим у напівпровідникових ІС густину паковки;
- великі габаритні розміри та масу;
- меншу надійність;
- велику собівартість.

Гібридна технологія заключається в наступному. На відшліфовану підкладку з діелектрика (скло, кераміка) по чергово за допомогою масок наносяться плівки резистивних та провідящих матеріалів, контактні площадки. Таким чином, в ГІС пасивні елементи (резистори, конденсатори, котушки індуктивності, з'єднання та контактні площадки) виконуються у виді різних плівок. Активні елементи ГІС (діоди, транзистори) не виконуються плівковими, так як неможливо досягти їх високої якості. Активні елементи ГІС виготовляються окремо в безкорпусному виконанні, а потім припаюються (приклеюються) до відповідних точок схеми.

Розрізняють дві різновидності ГІС:

- товстоплівкові ГІС, у яких товщина плівки Δ , яка наноситься на підкладку, перевищує 10 мкм ($\Delta > 10$ мкм);
- тонкоплівкові ГІС ($\Delta \leq 1 - 2$ мкм).

Основна відзнака заключається в різному способі нанесення плівок.

Для виготовлення ГІС на товстих плівках зазвичай використовують метод шовкографії. Плівки (пасти) резистивних та провідящих матеріалів наносяться на діелектричну площадку товщиною $d = 0,5 - 1$ мм через трафарети (маски, шаблони) з основою із шовку. Випал у спеціальних печах при температурах від 500 до 1200 °С приводить до перетворення плівки в скляну структуру.

Виготовлення ГІС методом тонких плівок здійснюється за допомогою фотолітографії. При цьому методі нанесення необхідних плівок на конкретні

місця підложки здійснюється через фотшаблони в тліючому вакуумі термовакуумним випарюванням та іонним (катодним) розпиленням. В останні роки для виготовлення тонко плівкових ГІС використовується електронна літографія, а також планарна технологія, яка є універсальним технічним принципом, який об'єднує сукупність фізико-хімічних методів створення елементів інтегральних схем і електронних приборів. Завдяки її розвитку з'явилася можливість інтегрувати мільйони різних електронних елементів на одній підкладці, при цьому не погіршуючи надійності схеми, що у свою чергу, суттєво відобразилося на розвитку функціональних можливостей електронної техніки і її широкому впровадженні.

Вивчення характеристик інтегральних схем є достатньо складним процесом, що вимагає застосування спеціальних вимірювальних приборів, тому для ознайомлення з принципами інтегральної технології у якості об'єкта дослідження пропонується гібридна інтегральна схема з пасивними R , C , L – елементами, виконаними на діелектричній пасивній підкладці.

Базовими технологічними процесами при виготовленні інтегральних схем є нанесення тонких плівок, різні методи легірування, фотолітографічна обробка, герметизація та корпусування, вимірювання параметрів схем як на кінцевому етапі виробництва, так і в процесі їх виготовлення.

Гібридні інтегральні схеми (ГІС) виконуються на діелектричній підкладці. В якості пасивних підложок для інтегральних схем широке застосування має полікристалічна кераміка типу сітала (98% SiO_2), полікора (97% Al_2O_3), BeO_2 . З монокристалічних підкладок великого застосування має сапфір ($\alpha - Al_2O_3$), п'єзокварц ($\alpha - SiO_2$), ніобатлітія ($LiNbO_3$), гранати.

Загальною вимогою до матеріалів підкладок є висока механічна стійкість, добра теплопровідність, хімічна стійкість, технологічність обробки.

Тонкоплівкові провідники (мікросмути) в інтегральних схемах виконуються з високопровідних матеріалів. При відсутності доброї адгезії застосовуються багатопшарові структури. Мікросмугові елементи виконуються з використанням вакуумного напилення чи напилення з наступним гальванічним осадженням при захисній плівці.

Основними вимогами до мікросмугових елементів є висока електропровідність, добра адгезія до підложки, хімічна та антикорозійна стійкість, технологічність до пайки або зварювання. Основні характеристики матеріалів для провідних елементів представлені в таблиці 9.1.

Плівкові резистори. У гібридних інтегральних схемах застосовуються тонкоплівкові резисторні елементи. У випадках наявності в одній схемі резисторів, у яких номінали різняться у сотні разів, на підложці крім тонкоплівкових резисторів може бути застосований навісний монтаж.

Матеріал	$\rho \cdot 10^{-8}$ Ом·м	ρ_s , Ом/м	Адгезія, відн.одн.
<i>Ag</i>	1.6	0.16	4
<i>C</i>	1.7	0.2	15
<i>Au</i>	2.3	0.27	1
<i>Al</i>	2.6	0.33	35
<i>Cr</i>	13	10 - 300	260
<i>Mo</i>	5	1.0	250

Для отримання резисторів на підкладку наносять резистивні плівки. Резистори невеликого опору отримують із плівок, які представляють собою сплав високого опору (наприклад, ніхром). Для резисторів високого опору застосовується суміш металу з керамікою (кермет).

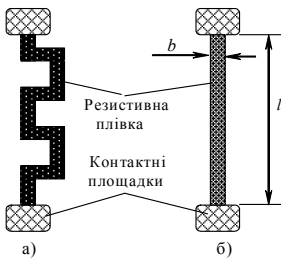


Рис. 9.3. Будова плівкового резистора

Опір плівкового резистора (рис. 9.3, б) залежить від товщини та ширини плівки, її довжини та матеріалу. Для збільшення опору виготовляють плівкові резистори зигзагоподібної форми (рис. 9.3, а). Їх питомий опір вимірюють в омах на квадрат (Ом/м).

У тонкоплівкових резисторів питомий опір складає від 10 до 300 Ом/м і номінали від 10 до 10^6 Ом. Точність їх виготовлення $\pm 5\%$, підгонка заключається в частковій зміні резистивного шару до необхідного розміру.

Товстоплівкові резистори мають питомий опір від 5 Ом до 1 МОм/м, номінали від 0,5 до $5 \cdot 10^8$ Ом, точність виготовлення $\pm 5\%$, стабільність в часі гірша чим в тонкоплівкових резисторів.

При розрахунку тонкоплівкових резисторів користуються формулою:

$$R = \rho_s \cdot K,$$

де $K = l / b$ - коефіцієнт форми,

ρ_s – поверхневий опір, Ом/м.

Коли резистор має складну форму (рис. 9.3), то його опір визначається за формулою:

$$R = \rho_s \cdot (K + 0,55N)$$

де N – число вигібів,

K – коефіцієнт форми на лінійних ділянках.

Характеристики матеріалів для тонкопівчаних резисторів представлені в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2

Матеріал	Питомий поверхневий опір, R_s , Ом/м.	Питома потужність розсіювання $P_{\text{пит.}}$, Вт/см ²	Відносна зміна опору за 1000 г роботи, %	ТКО 10^{-6} град ⁻¹
Хром	100 – 200	2	0,5	± 100
Ніхром	до 300	0,5	0,5	± 100
Тантал	80 – 200	до 10	1,0	100
Нітрид танталу	10 – 200	—	0,2	100
Титан	50	—	—	0
Реній	200 – 300	—	—	0
Кермет	1200	4	0,5	200
Метало-селіцидні сплави	500	1	1	± 150

Діапазон номіналів плівкових резисторів лежить у межах 50 Ом ...10 Мом.

За максимально допустиму питому потужність розсіювання приймають потужність, яка приходить на квадрат плівки, при якій температура резистора не перевищує $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температурі навколишнього середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У процесі настройки мікросхем у деяких випадках необхідно виміряти номінал резистора. Для цього на резистивну плівку напиляють перемички, число і розміщення яких залежать від умови підстройки. Коли необхідно підстроїти номінал резистора в бік збільшення, резистивну плівку частково видаляють хімічним травленням або за допомогою променя лазерного пристрою підгонки. Плівкові резистори можуть робити при напругах до декількох сотень вольт на частотах до декількох сотень мегагерц.

Плівкові конденсатори. Плівкові конденсатори виконуються на діелектричній підкладці в вигляді трьох шарових структур метал - діелектрик - метал (рис. 9.4).

В якості матеріалів для обкладок частіше всього використовують алюміній, а також золото, срібло, тантал, мідь. Діелектриками служать

моноокис кремнію SiO_2 , моно окис германію GeO , трьохсерниста сурма Sb_2S_3 , п'ятиокис танталу Ta_2O_5 , бороселікатне та алюмосилікатне скло.

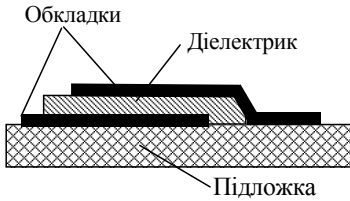


Рис. 9.4. Конструкція плівкового конденсатора

обкладок якого дорівнює 1 см^2 , називається питомою ємністю C_0 (виражається вона у пФ/см^2):

$$C_0 = 0,0885 \frac{\varepsilon}{d}.$$

Тоді ємність конденсатора можна визначити за формулою:

$$C = C_0 \cdot S.$$

Як видно з формули, величину питомої ємності визначають діелектрична проникливість і товщина діелектрика. Для отримання великої питомої ємності застосовують діелектрики з високим значенням діелектричної проникливості, а також зменшують товщину діелектрика, котра звичайно, складає десяті долі мікрметра.

Електрична міцність діелектрика оцінюється величиною пробивної напруги $U_{\text{проб}}$ і відповідає значенням напруженості електричного поля $E_{\text{пр}}$, між якими існує залежність:

$$E_{\text{проб}} = \frac{U_{\text{проб}}}{d}.$$

Важливим експлуатаційним показником конденсаторів є температурний коефіцієнт ємності (ТКЕ), який визначається за формулою:

$$TKC = \frac{C_2 - C_1}{C_1(T_2 - T_1)},$$

де C_1 – ємність при першоначальній температурі;

C_2 – ємність при підвищеній температурі;

T_1 – початкова температура;

T_2 – кінцева температура.

Втрати у діелектрику плівкового конденсатора відображають через тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$.

Основні електричні та експлуатаційні властивості плівкових конденсаторів приведені у таблиці 9.3.

Таблиця 9.3

Матеріал	Діелектрична проникність, ϵ	Експлуатаційн а питома ємність, $C_{\text{експ}}$, ПФ/см ²	Тангенс кута діелектричних втраг $\text{tg } \delta$ при $f=1$ кГц, %	Електрична міцність, $E_{\text{проб}}$, кВ/мм	ТКС 10^{-4} , 1/град
<i>SiO</i>	5...6	10^4	0,5...1	10...100	2...5
<i>SiO₂</i>	4	$2 \cdot 10^4$	0,5	$5 \cdot 10^2 \dots 10^3$	2
<i>GeO</i>	10...12	$10^4 \dots 2 \cdot 10^4$	0,2...0,5	10...50	2...4
<i>Sb₂O₃</i>	18...20	$2 \cdot 10^4$	0,5...1	до 200	5...6
<i>Al₂O₃</i>	8	$3 \cdot 10^4 \dots 4 \cdot 10^4$	0,3...1	до 500	3...4
<i>Ta₂O₅</i>	20...22	$5 \cdot 10^4 \dots 10^5$	0,3...1	до 500	2...3
Боросилі- катне скло	4	$10^4 \dots 2 \cdot 10^4$	0,1...0,3	до 100	100
Алюмосилі- катне скло	4...5	$10^4 \dots 5 \cdot 10^4$	0,2...0,3	до 100	100

Розрахунок плівкових конденсаторів при вибраній товщині діелектрика зводиться до визначення площі обкладинок за формулою:

$$S = \frac{C_n}{C_0},$$

де C_n – заданий номінал ємності.

Питома ємність змінюється в межах від десятків до тисяч пФ на 1 мм², при площі конденсатора в 25 мм² (5×5 мм) номінальна ємність може досягати від сотень до десятків тисяч пікофарад, точність виготовлення $\pm 15\%$, а температурний коефіцієнт ємності отримується рівним $(0,005 - 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Ємність реального плівкового конденсатора завжди буде відрізнятися від розрахованої у наслідок наступних причин:

- невідповідність розмірів механічних або фотолітографічних масок розрахованим розмірам електродів;
- розкид значень величини ϵ діелектрика;
- невідповідності товщини плівки діелектрика розрахованому значенню.

Плівкові котушки індуктивності. Плівкові котушки індуктивності являють собою плоскі круглі або прямокутні спіралі нанесені на поверхню підкладки. Ширина полосок та просвітів між ними складає декілька десятків мікрометрів із питомою індуктивністю 10 – 20 нГн/мм² на площі 25 мм² можна отримати індуктивність до 0,5 мкГн. Збільшення індуктивності досягається шляхом нанесення на котушки феромагнітної плівки, яка виконує роль сердечника.

Індуктивність котушки з круглими витками можна визначити за формулою:

$$L = 24,75D_{\text{сер}} \sqrt[3]{N^5} \left(\lg \frac{4D_{\text{сер}}}{t} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн};$$

а індуктивність котушки з квадратними витками за формулою:

$$L = 55,5a \sqrt[3]{N^5} \left(\lg \frac{8a}{t} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн}.$$

де $D_{\text{сер}}$ – середній діаметр спіралі, см.

$$D_{\text{сер}} = \frac{1}{2}(D_{\text{н}} - D_{\text{вн}}),$$

a – довжина середньої сторони квадрата, см.

$$a = \frac{1}{2}(A_{\text{н}} - A_{\text{вн}}),$$

t – радіальна ширина намотки, см.

$$t = \frac{1}{2}(D_{\text{н}} - D_{\text{вн}}),$$

$$Z' = \frac{1}{2}(A_{\text{н}} - A_{\text{вн}})$$

N – кількість витків.

Так як виготовлення тонкоплівкових котушок індуктивності пов'язано з великими труднощами, в тонко плівкових схемах застосовують головним чином дискретні мікро котушки індуктивності з осердям із порошкового заліза або із спеціальних феритів.

9.3.2. Пасивні компоненти напівпровідникових інтегральних схем

Резистори. В напівпровідникових інтегральних схемах резистори виготовляють методом локальної дифузії домішок в островки епітаксіального шару кремнієвої заготовки. При цьому одночасно з утворенням резисторів відбувається утворення емітерної та базової областей транзистора. В процесі емітерної дифузії утворюються резистори з малим питомим опором 0,5 Ом/м, а в процесі базової дифузії – із питомим опором 100 – 300 Ом/м. Це пояснюється тим, що в емітерній області накопичується найбільша кількість основних носіїв зарядів, а в базовій дуже мало.

Діапазон номіналів дифузійних резисторів лежить в межах 10 Ом – 50 кОм із допустимим відхиленням $\pm 10 - 20 \%$.

На рис. 9.5. показаний дифузійний планарний резистор, сформований у базовій області. Від інших елементів схеми він ізолюється $p-n$ -переходом (1 – 2).

Дифузійні резистори працюють на частотах 10 – 20 МГц. У схемах

працюючих на частотах більше 20 МГц, резистори формуються в островках, ізольованих слоєм двоокису кремнію.

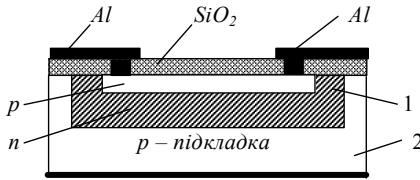


Рис. 9.5. Дифузійний резистор:
Al – алюмінієві виводи резистора;
SiO₂ – ізолююча плівка;
 1 – епітаксціальний шар кремнію *n* - типу, в якому дифузією утворений резистор з провідністю *p* - типу;
 2 – кремнієва підкладка

Температурний коефіцієнт опору дифузійних резисторів складає $(2 - 3) \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Максимальне падіння напруги на резисторі – близько 20 В.

В якості резистора може бути використаний канал метал – окисел – напівпровідник (МОН) структури.

Такі МОН резистори виконують одночасно з МОН транзисторами і підбором напруги затвору можна встановити необхідний опір резистора.

Аналогічні МОН резисторам так

називаємо пінч - резистори, які мають структуру польового транзистора з *p-n* переходом. Резистором служить канал, а необхідний опір підбирається напругою затвору.

Конденсатори. В напівпровідникових інтегральних схемах в якості конденсаторів використовують бар'єрну ємність *p-n* переходу, який формується в островках кремнієвої пластини одночасно з формуванням транзисторів інтегральної схеми способом дифузії, *p-n* перехід включається у зворотному напрямку.

Типічні конструкції конденсаторів на основі *p-n* переходів показані на рис. 9.6.

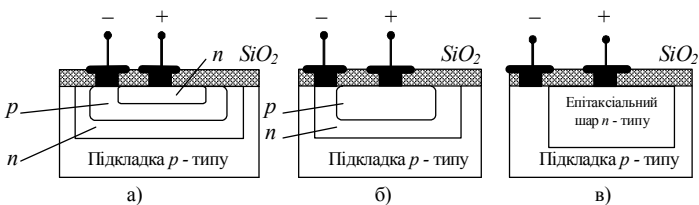


Рис. 9.6. Конструкція конденсаторів інтегральних схем на основі *p-n* переходу: а – емітер - база; б – колектор - база; в – колектор - підкладка

В першій конструкції (рис. 9.6, а) використовується перехід емітер - база, який володіє найбільшою із всіх переходів питомою ємністю (близько 1500 пФ/мм²), але і значно меншою пробивною напругою (одиниці вольт).

В другій конструкції (рис. 9.6, б) використовується перехід колектор - база, питома ємність якого в п'ять – шість разів нижча, чим у емітерного переходу, а пробивна напруга приблизно в скільки ж разів вища.

Недоліком розглянутих конструкцій являється наявність паразитних ємностей, які виникають між однією із обкладок та землею. Найменшою паразитною ємністю характеризуються конденсатори на основі переходу колектор – підложка (рис. 9.6, в). Однак, конденсатори виготовлені на такій основі володіють найменшою питомою ємністю.

Котушки індуктивності. Найбільш тяжко виконати в інтегральних напівпровідни-кових схемах – це елементи індуктивності. В даний час не існує методу отримання індуктивностей класичного виду в ІС. Тому в них штучно створюють схемні елементи, які реалізують індуктивний ефект (відставання струму від напруги по фазі). Однак реалізуємі таким чином індуктивності мають величину одиниці мікрогенрі, а добротність – не більше декількох десятків. Тому застосування їх обмежено. У зв'язку з цим при конструюванні напівпровідникових ІС в основному застосовують навісні мініатюрні котушки індуктивності.

Контрольні питання для самоперевірки

1. Які основні етапи та напрямки розвитку мініатюризації радіоелектронної техніки?
2. Як класифікуються інтегральні мікросхеми?
3. Які існують основні технології виготовлення ІС? Їх сутність.
4. Гібридна технологія виготовлення ГІС (її сутність, переваги, недоліки, різновидності).
5. В чому заключається гібридна технологія виготовлення плівкових резисторів та котушок індуктивності (конструкція, різновидності, розрахункові формули)?
6. В чому заключається гібридна технологія виготовлення плівкових конденсаторів (конструкція, різновидності, розрахункові формули)?
7. В чому заключається напівпровідникова технологія виготовлення пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності) радіоелектронної техніки?

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ I	
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ	
ЕЛЕКТРОРАДІОМАТЕРІАЛІВ	
1. Фізико-хімічні властивості електроматеріалів електроніки.....	7
1.1. Поняття про будову атома та молекули.....	7
1.2. Валентні електрони. Хімічні зв'язки атомів.....	9
1.3. Енергетичні рівні електронів атомів хімічних елементів.....	10
1.4. Періодичний закон Менделєєва.....	12
1.5. Енергетичні спектри.....	14
1.6. Агрегатні стани речовини.....	15
Контрольні питання для самоперевірки.....	17
РОЗДІЛ II	
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ	
2.1. Провідникові матеріали.....	18
2.1.1. Особливості провідникових матеріалів та їх класифікація.....	18
2.2. Провідникові матеріали високої провідності.....	21
2.3. Провідникові матеріали з великим питомим опором.....	27
2.4. Контактні матеріали.....	28
2.5. Припої.....	32
Контрольні питання для самоперевірки.....	32
РОЗДІЛ III	
ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ	
3.1. Загальні відомості про діелектричні матеріали, їх електричні параметри.....	33
3.1.1. Поляризація діелектриків.....	33
3.1.2. Параметри діелектричних матеріалів.....	35
3.1.3. Експлуатаційні якості діелектриків.....	39
3.1.4. Класифікація діелектриків.....	40
3.2. Органічні діелектрики.....	42
3.3. Неорганічні діелектрики.....	43
3.4. П'єзоелектричні матеріали.....	45
3.5. Рідинні кристали.....	45
Контрольні питання для самоперевірки.....	50
РОЗДІЛ IV	
НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ	
4.1. Загальні відомості про напівпровідники.....	51

4.1.1.	Напівпровідники з власною електропровідністю.....	53
4.1.2.	Напівпровідник з електронною електропровідністю.....	54
4.1.3.	Напівпровідники з дірковою електропровідністю.....	56
4.2.	Струми в напівпровідниках. Дрейфовий струм.....	58
4.3.	Рекомбінація носіїв заряду та час їх життя.....	60
4.4.	Рівняння неперервності.....	63
	Контрольні питання для самоперевірки.....	65

РОЗДІЛ V

МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

5.1.	Магнітні матеріали, їх класифікація та застосування.....	66
5.2.	Параметри та характеристики магнітних матеріалів.....	67
5.3.	Властивості магнітних матеріалів за формою петлі гістерезисну.....	69
5.4.	Властивості магнітних матеріалів за хімічним складом.....	70
5.4.1.	Магнітом'які магнітні матеріали.....	70
5.4.2.	Магнітотверді магнітні матеріали.....	76
5.5.	Спеціальні магнітні матеріали.....	78
	Контрольні питання для самоперевірки.....	79

РОЗДІЛ VI

КОМПОНЕНТНА БАЗА ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

6.1.	Резистори.....	80
6.2.	Основні параметри постійних резисторів.....	82
6.3.	Основні характеристики та параметри змінних резисторів.....	87
6.4.	Маркування резисторів та їх застосування. Кодова і кольорова маркіровка резисторів. Кодоване позначення номінального опору, допуску і приклади позначення.....	89
6.5.	Основні типи резисторів.....	104
6.6.	Нелінійні резистори.....	119
6.6.1.	Варистори.....	119
6.6.2.	Терморезистори.....	122
6.6.3.	Болометри.....	124
6.6.4.	Фоторезистори.....	124
6.6.5.	Тензорезистори.....	126
	Контрольні питання для самоперевірки.....	127

РОЗДІЛ VII

ЕЛЕКТРИЧНІ КОНДЕНСАТОРИ

7.1.	Призначення та конструкції конденсаторів.....	128
7.2.	Класифікація конденсаторів.....	129

7.3.	Параметри постійних конденсаторів.....	131
7.4.	Типи конденсаторів за видом діелектриків.....	142
7.4.1.	Конденсатори з органічним діелектриком.....	142
7.4.2.	Конденсатори з неорганічним діелектриком.....	143
7.4.3.	Конденсатори з оксидним діелектриком.....	144
7.4.4.	Конденсатори з газоподібним діелектриком.....	145
7.5.	Конденсатори змінної ємності.....	146
7.6.	Маркування конденсаторів та позначення їх на схемах.....	150
7.7.	Надійність базових типів конденсаторів та перспективи їх розвитку.....	156
	Контрольні питання для самоперевірки.....	159

РОЗДІЛ VIII

КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ

8.1.	Призначення, конструкція та класифікація.....	160
8.2.	Основні параметри котушок індуктивності.....	162
8.3.	Типи обмоток котушок індуктивності.....	167
8.4.	Котушки індуктивності з магнітним осердям.....	168
8.4.1.	Типи магнітних осердей котушок індуктивності.....	168
8.4.2.	Вплив магнітних осердей на параметри котушок індуктивності.....	169
8.5.	Котушки індуктивності з немагнітним осердям.....	171
8.6.	Варіометри.....	174
8.7.	Екранування та надійність котушок індуктивності.....	175
8.8.	Індуктивності. Значення, допуск, маркіровка.....	176
	Контрольні питання для самоперевірки.....	180

РОЗДІЛ ІХ

ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

9.1.	Етапи та напрямки розвитку інтегральних мікросхем.....	181
9.2.	Класифікація інтегральних схем.....	182
9.3.	Технологія виготовлення пасивних елементів ІС.....	183
9.3.1.	Гібридна технологія виготовлення ІС.....	184
9.3.2.	Пасивні компоненти напівпровідникових інтегральних схем.....	190
	Контрольні питання для самоперевірки.....	192