

Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет



## ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Конспект лекцій  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
освітньої програми «Автомобільна електроніка»  
галузі знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво  
спеціальності 65 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та  
радіотехніка  
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

УДК 621.31(07)

E50

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки \_\_\_\_\_ Наталія ПОЛЩУК

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року.

Голова вченої ради ФКІТ \_\_\_\_\_ Інна КОНДІУС

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ, протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року.

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц. кафедри  
ЕіТК електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Укладачі: \_\_\_\_\_ Василь Чалий к.т.н., асистент кафедри  
електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Сергій МОРОЗ к.т.н., доц. кафедри  
електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Рецензент: \_\_\_\_\_ Віталій Пташенчук к.т.н., доц. кафедри АКІТ  
ЛНТУ

Відповідальний за \_\_\_\_\_ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц., завідувач  
випуск: кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

E50 Елементи електронних пристроїв. Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво, спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка / уклад. В. Д. Чалий, С. А. Мороз. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 86 с.

Видання містить виклад основного теоретичного лекційного матеріалу з дисципліни «Елементи електронних пристроїв.. Призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка».

В. Д. Чалий, С. А. Мороз 2025

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
ТЕМА 1. ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ .....	5
1.1 Класифікація електрорадіоелементів .....	5
1.2 Властивості електрорадіоелементів .....	9
ТЕМА 2. РЕЗИСТОРИ .....	14
2.1 Загальні відомості.....	14
2.2. Основні параметри резисторів .....	17
2.3 Резистори змінного опору .....	24
2.4 Спеціальні резистори .....	26
2.5 Особливості використання резисторів у РЕА .....	33
ТЕМА 3 КОНДЕНСАТОРИ .....	35
3.1 Загальні відомості .....	35
3.2 Основні параметри конденсаторів .....	37
3.3 Конденсатори змінної ємності .....	45
3.4 Спеціальні конденсатори .....	49
3.5 Особливості використання конденсаторів у РЕА .....	50
ТЕМА 4. ІНДУКТИВНІ КОМПОНЕНТИ .....	58
4.1. Високочастотні котушки індуктивності .....	58
4.2 Схема заміщення, основні та паразитні параметри .....	62
4.3 Трансформатори .....	63
ТЕМА 5 КОМУТАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ .....	66
5.1 Загальні відомості .....	66
ТЕМА 6 АКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ .....	72
6.1 Напівпровідникові діоди .....	72
6.2. Система позначень .....	73
3.3 Маркування діодів .....	76
ТЕМА 7 ТРАНЗИСТОРИ .....	80
7.1 Біполярні транзистори .....	80
7.2 Маркування транзисторів.....	83
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	85

## ВСТУП

Електронний апарат є сукупністю елементів, які поєднані відповідно до призначення та принципу дії. Ефективність електронних систем, параметри радіоелектронної апаратури (РЕА) значною мірою визначаються елементною базою, тобто характеристиками інтегральних схем, електровакуумних і напівпровідникових приладів, резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності, комутаційних пристроїв та інших елементів.

Компоненти (електрорадіоелементи) радіопристроїв – це «будівельні напівфабрикати» у радіоелектроніці. Їх оптимальним вибором радіоінженер впливає на якість пристрою аналогічно тому, як архітектор впливає на функції й тип будинку, споруди або на сукупність пристроїв, що утворюють радіосистему (у будівництві – ансамбль). Така аналогія не стає віддаленою від того, що вимоги до об'єктів проектування в цих випадках важко порівнювати. В одному випадку можна мати на увазі красу, виразність, необхідність врахування й непорушення сформованих містобудівних стилів і національних традицій, нарешті, комфортність, в іншому – якість відтворення переданої інформації, надійність, споживану потужність, масу й габарити пристрою, дизайн. Однак в обох випадках практично завжди беруться до уваги інші важливі фактори, такі, як час реалізації проекту, вартість виробництва, експлуатаційні витрати та ін.

Радіоінженер, розпочинаючи розробку принципової схеми, вирішує, які стандартизовані елементи, що випускаються промисловістю, доцільно використовувати. У деяких випадках він може ставити завдання розробки нових (позаноменклатурних) елементів з поліпшеними або принципово новими властивостями.

Особливістю сучасної елементної бази є її номенклатурна поширеність, яка дублюється різними виробниками. Це приводить, з одного боку, до розумної конкуренції, що можна вважати позитивним фактором, з іншого боку запроваджуються різні системи позначень, маркувань, що утруднює роботу радіоінженера з вибору оптимальної елементної бази для конкретного виробу.

# ТЕМА 1. ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

## 1.1 Класифікація електрорадіоелементів

Розробку й промислове виробництво електрорадіоелементів (ЕРЕ) здійснюють в основному підприємства електронної промисловості. Вибір компонентів часто неоднозначний, а отже, проектування – творчий процес. Що ж допомагає радіоінженерові вирішувати це непросте завдання, коли в його розпорядженні – елементи досить широкої номенклатури, різних характеристик і принципів дії? У своїй практиці він постійно звертається до довідників і каталогів. Однак велике значення мають ерудиція, досвід, інтуїція конструктора. Усе це допомагає фахівцеві вирішити, яким має бути необхідний компонент, а довідниковий матеріал допомагає знайти його опис і характеристики, необхідні для проведення розрахунків. Усе більше значення у практичній діяльності радіоінженерів відіграють системи автоматизованого проектування (САПР) на базі ЕОМ. До складу САПР входять банки різних даних, у тому числі й за елементною базою. Пошук необхідних елементів у цьому випадку зводиться до автоматизованого звертання до баз даних. Роль банків даних – зберігачів інформації – виконують пристрої зовнішньої пам'яті ЕОМ на електронних, магнітних і оптичних носіях. Потрібну інформацію також можна одержати з мережі Інтернет безпосередньо з сайтів фірмвиробників. Усі радіоелементи, що випускаються промисловістю, можна розділити на класи, групи за рядом найважливіших ознак – фізичними, функціональними, технологічними та ін. На рисунку 1.1 показано варіант можливої побудови такої системи [1].

Компоненти РЕА можуть бути розділені на два принципово відмінні класи: активні й пасивні. Активні елементи – це різноманітні електронні прилади, що розрізняються за принципами дії й призначенням. Вони називаються активними тому, що їхнє функціонування пов'язане зі споживанням енергії від зовнішніх джерел живлення. Як правило, у радіоелектронних пристроях - це електрична енергія. Напруга таких джерел

може бути постійною або змінною. Постійною напругою забезпечується живлення анодних і сіткових ланцюгів електровакуумних приладів, емітерних, колекторних та інших ланцюгів транзисторних схем. Цим створюється заданий режим роботи активних приладів. Джерела постійної (високої) напруги використовуються для живлення електронних приладів надвисоких частот, телевізійних і осцилографічних трубок. Джерела змінної напруги застосовуються для підігріву катодів електровакуумних приладів, перетворювачів напруги, випрямлячів.

## 1.2 Властивості електрорадіоелементів

Для активних компонентів характерні специфічні властивості, завдяки яким можливе створення генераторів коливань, підсилювачів потужності, модуляторів, пристроїв обробки сигналів та ін. Серед цих властивостей треба насамперед відзначити властивості невзаємності й нелінійності.

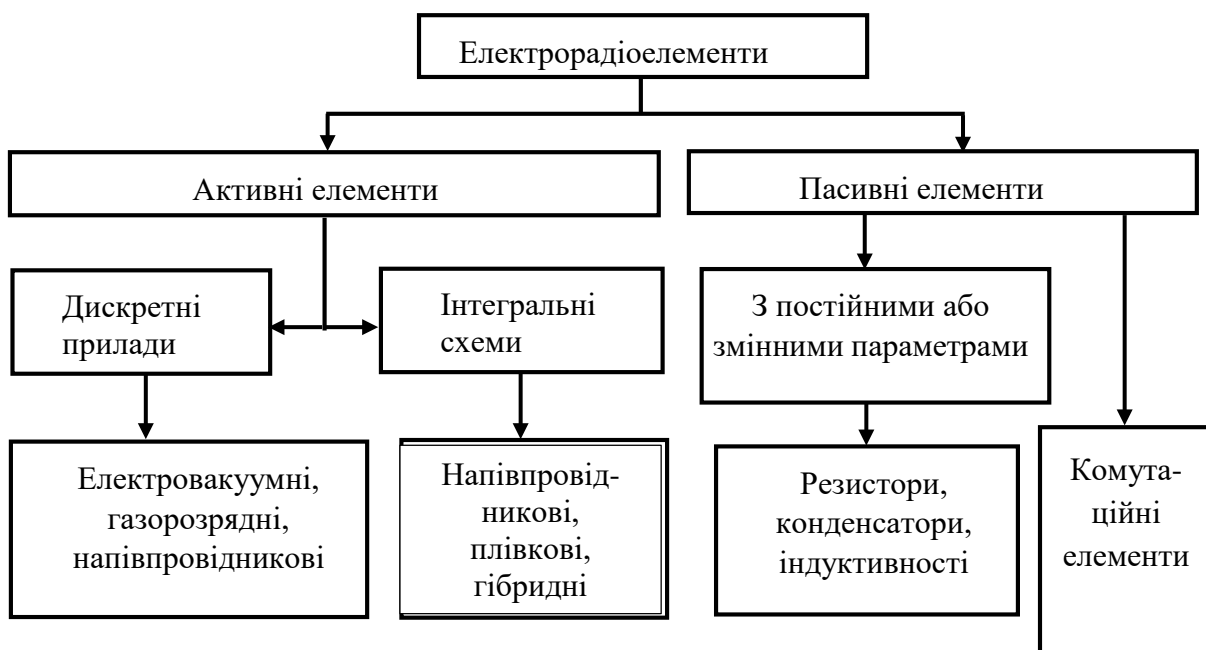


Рисунок 1.1. Класифікація електрорадіоелементів

Щоб зрозуміти властивість невзаємності, уявимо, що активний елемент

відіграє роль керованого електричного клапана, що дозує надходження у вихідний ланцюг електричної енергії, але не від вхідного керуючого джерела, а від зовнішнього джерела постійної напруги. При цьому витрата енергії на керування істотно менше керованої енергії (від джерела постійної напруги) [2].

Властивість нелінійності пов'язують з непропорційністю вихідного ефекту вхідному впливу – кілька окремих одночасних впливів викликають ефект, нееквівалентний сумі окремих ефектів (рисунок 1.2). Властивість нелінійності використовується при створенні пристроїв, що перетворюють форму коливань (наприклад, детекторів, перетворювачів частоти, модуляторів).

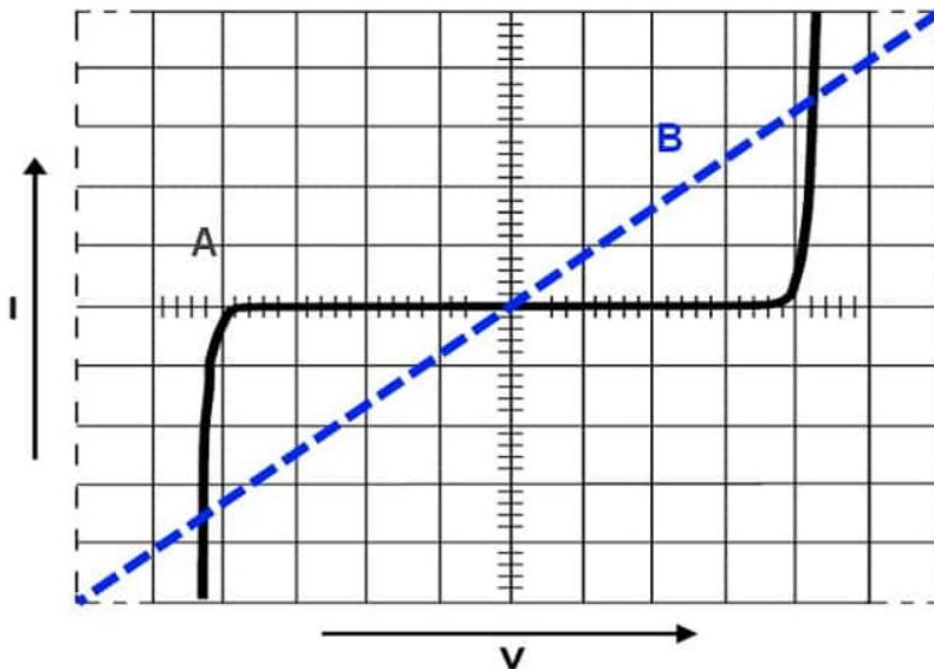


Рисунок 1.2. Графіки ВАХ лінійних та нелінійних радіокомпонентів

Усі активні елементи поділяють на дискретні прилади й інтегральні схеми (ІС).

Серед дискретних елементів РЕА виділяють: електровакуумні прилади (ЕВП) з високим розрідженням повітря в балоні (залишковий тиск – приблизно  $10^{-6}$  Па); газорозрядні прилади (ГРП) (найчастіше балон, заповнений інертним газом під тиском – від часток до тисяч паскаль залежно від призначення приладу); напівпровідникові прилади (НПП) [3].

Особливою групою активних приладів є інтегральні схеми (ІС) – мікроелектронні вироби, що виконують певну функцію перетворення й обробки сигналів і мають високу щільність електрично з'єднаних елементів. Схемне й конструктивне об'єднання великої кількості елементів в одному кристалі, тобто їх «інтеграція», привело до появи терміна «інтегральні» схеми (точніше й логічніше було б назвати їх «інтегрованими ланцюгами»). Одна ІС може містити від сотень до мільйонів елементів. За конструктивно-технологічними ознаками ІС поділяють на напівпровідникові й гібридні.

Напівпровідникова ІС звичайно являє собою кристал кремнію, у приповерхневому шарі якого в єдиному технологічному циклі сформовані області, еквівалентні елементам електричної схеми (транзистори, діоди, резистори, конденсатори та ін.), а також з'єднання між ними. Технологічні процеси виготовлення напівпровідникових мікросхем носять груповий характер, тобто одночасно виготовляють велику кількість ІС.

Інтегральні схеми виготовляють також шляхом пошарового нанесення тонких плівок різних матеріалів на загальну основу (ізоляційну підкладку) і формування на них пасивних елементів і їхніх з'єднань. Гібридні мікросхеми з'явилися як результат комбінування плівкових і напівпровідникових мікросхем і дискретних напівпровідникових активних елементів (транзисторів і діодів).

За допомогою друкованого монтажу поєднують дуже малі за розмірами елементи ІС: конденсатори, індуктивні елементи, напівпровідникові прилади (діоди, транзистори). Резистори формуються як сполучні лінії необхідної площі перетину й довжини, виконані з матеріалу з оптимальним питомим опором.

*Пасивні елементи* функціонують без зовнішніх джерел живлення. Вхідні сигнали передаються на вихід, відтворюючи закон часової залежності, без підсилення. Властивості цих елементів (у більшості випадків) не залежать від полярності прикладеної напруги або напрямку струму, що протікає. Номенклатура пасивних елементів досить широка (хоча, можливо, і не настільки широка, як номенклатура активних). До них відносять резистори, конденсатори, індуктивні компоненти, елементи комутації та інші елементи [4].

Пасивні елементи можна класифікувати за рядом ознак: призначенням, діапазонами частот, припустимою потужністю розсіювання, матеріалами і технологією виготовлення, точністю відтворення номінальних значень параметрів. Вони можуть мати сталі й змінні (регульовані) параметри. З цією ознакою пов'язані принципові відмінності в їхніх конструкціях. Елементи зі змінними параметрами, як правило, значно дорожчі, мають більші габарити й масу.

За способом монтажу їх поділяють на три категорії:

- встановлення методом об'ємного паяння;
- поверхневий монтаж на друковані плати;
- з'єднання за допомогою роз'ємів та цоколів.

За своїм призначенням радіоелементи можна розбити на кілька груп:

- функціональні деталі, закріплені на платах (перераховані вище компоненти);
- пристрої відображення, до них відносяться різні табло, індикатори та інше;
- акустичні пристрої (мікрофони, динаміки);
- вакуумні газорозрядні: електронно-променева трубка, октоди, лампи біжучої та зворотної хвилі, світлодіоди та РК екрани;
- термоелектричні деталі – термопари, терморезистори.

Матеріали, що використовуються для ЕРЕ, визначають їх основні електричні, механічні та вагові параметри. Металеві немагнітні матеріали (мідні та алюмінієві сплави, сплави з високим електричним опором, мідь, срібло, золото, сплави шляхетних металів та ін.) застосовуються для більшості конструкцій ЕРЕ.

Магнітні матеріали (трансформаторні сталі, спеціальні сталі з високою магнітною проникністю, ферити, карбонільне залізо та ін.) використовуються для низькочастотних та високочастотних котушок індуктивності та трансформаторів.

Як ізоляційні матеріали знаходять широке застосування гетинакс,

склотекстоліт, спеціальні електротехнічні папери та картон, полімерні плівки, лаковані текстильні матеріали, слюда, кераміка, кварц, скло, термопластичні та термореактивні пластмаси та ін.

ЕРЕ з обмотками використовують широку номенклатуру обмотувальних та спеціальних монтажних проводів. Для захисту ЕРЕ від вологості застосовують різні лаки, компаунди та спеціальні пластмаси.

Номінальні значення параметрів стандартних ЕРЕ встановлюються спеціальними числовими рядами. Для нестандартних ЕРЕ таких рядів номінальних значень параметрів не розроблено.

Допуски до основних параметрів ЕРЕ мають значення від  $\pm 0,002\%$  для кварцових резонаторів до  $30\%$  для електролітичних конденсаторів. Стандартні ЕРЕ мають величини допусків від  $\pm 1$  до  $\pm 30\%$ . Значення допусків встановлюються виходячи з функціональної необхідності, технологічності, виробничої чи фізичної здійсненності та техніко-економічної доцільності.

Для стандартних резисторів та конденсаторів використовуються допуски  $\pm 5$ ;  $10$ ;  $20\%$ , а для деяких типів  $\pm 1$  чи  $\pm 30\%$ . Найменші значення допусків потрібні рідко, а в ряді випадків і недоцільні через низький рівень стабільності параметрів вузлів. Наприклад, якщо параметр ЕРЕ має нестабільність у часі  $\pm 1\%$ , то призначення для нього допуску менше  $\pm 3\%$  навряд чи має сенс, хоча в процесі виготовлення ЕРЕ може бути витриманий допуск менше  $\pm 1\%$ . Якщо функціональне призначення ЕРЕ не вимагає малих величин допусків, їх значення необхідно встановлювати відповідно до технологічної та економічної доцільності [4].

Обмеженням мінімального значення допуску часом є його реальна фізична здійсненність. Наприклад, при виготовленні котушок індуктивності (неспеціальних, еталонних) практично не вдається отримати допуск менше  $\pm 0,01\%$ , так як у виробничих умовах не знайдеться вимірювальних засобів для встановлення дійсної величини індуктивності з такою точністю. Допуски на параметри будь-якого виробу, зокрема і ЕРЕ, значною мірою позначаються вартості виробу [4]. Найбільш різко ця залежність виражена для малих величин

допусків (менше 5%)

Стабільність вихідних параметрів ЕРЕ визначається ступенем стійкості параметрів матеріалів та взаємного розміщення елементів конструкції при дії зовнішніх факторів. На більшість конструкцій ЕРЕ впливає зміна їхнього теплового режиму та вологість. Вібрації та удари меншою мірою впливають на вихідні параметри ЕРЕ. Винятками є конденсатори змінної ємності, високочутливі реле та кварцові резонатори.

Захист ЕРЕ від вологості, вібрації та ударів проводиться різними методами. Значно важче змінити тепловий режим ЕРЕ.

Методи, які використовуються для відведення тепла від ЕРЕ або захисту від нього, завжди пов'язані з необхідністю суттєвого збільшення габаритних розмірів. Відомо, що найбільший вплив на параметри матеріалів надає підвищена температура її різкі перепади. Тому для ЕРЕ, що розраховуються на роботу при великих перепадах температури, необхідно дуже ретельно підбирати матеріали та способи з'єднання елементів конструкцій. елементів конструкцій з силовими замиканнями повинні мати однакові або близькі за своїми значеннями температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР).

У процесі виготовлення ЕРЕ в їх елементах часто виникають надмірні внутрішні механічні напруження. При зміні їх температури вони значною мірою змінюються, що зазвичай тягне зміну розмірів, форми і взаємного розташування елементів. Через війну змінюються параметри ЕРЕ.

Для усунення нестабільності параметрів ЕРЕ; виникає в результаті внутрішніх механічних напруг, застосовують термічну тренування, яка здійснюється шляхом циклічної зміни температури в максимально допустимих межах (від -60 до +60 ° С і більше). Число циклів нагріву та охолодження підбирають експериментально. Зазвичай число циклів дорівнює 3...6 і більше. Для проведення термічного тренування велике значення має час циклів, їхня черговість і швидкість зміни температури.

Стійкість ЕРЕ при ударах та вібраціях забезпечується за рахунок збільшення жорсткості та міцності конструкції. У поодиноких випадках (для

кварцових резонаторів і реле) вдаються до амортизаційних прокладок, що гасять дію ударів і вібрацій. Захист від вологості здійснюється просоченням, заливкою, обволіканням та герметизацією. Вид захисту вибирають виходячи з рівня вологості та ступеня чутливості параметрів ЕРЕ до її дії. Конструкції ЕРЕ зі спеціальним вологозахистом завжди мають великі габаритні розміри та вагу в порівнянні з аналогічними виробами без такого захисту. Найбільші габаритні розміри мають ЕРЕ з вакуум-щільною герметизацією, але вони й найкраще захищені від вологості. Вартість ЕРЕ за рахунок додаткових елементів конструкції та ускладнення процесу виготовлення, що викликаються вимогами захисту від вологості, збільшується на 5...30%.

Технологічність конструкції ЕРЕ є одним із найважливіших характеристик. При розробці конструкції ЕРЕ прагнуть забезпечити не лише малу вартість виготовлення, а й передбачити можливість зручного використання в блоках та апаратах, техніко-економічні характеристики яких багато в чому залежать від ЕРЕ.

Надійність ЕРЕ значною мірою визначає надійність РЕА, тому що в ній використовується велика кількість ЕРЕ. Особливо багато у сучасній РЕА стандартних ЕРЕ. У звичайних радіомовних та телевізійних апаратах число резисторів та конденсаторів досягає 100...200 шт. Якщо прийняти інтенсивність їх відмов  $\lambda=10^{-6}$  1/год, їх сумарне значення  $\Lambda=(100...200) 10^{-6}$  1/год =  $(1...2) 10^{-4}$  1/год. Ця величина помітно впливає загальну інтенсивність відмов апаратів.

У складнішій РЕА кількість стандартних ЕРЕ сягає кількох тисяч. Щоб їхній вплив на надійність апаратів було незначним, необхідно мати рівень інтенсивності відмов порядку  $10^{-8}...10^{-9}$  1/год. Забезпечити для стандартних ЕРЕ величину  $\lambda = (10^{-8}...10^{-9})$  1/год дуже складно і тому розраховувати на неї можна тільки в умовах спеціальної організації виробництва. Нестандартні ЕРЕ мають величину  $\lambda = (10^{-4} ... 10^{-5})$  1 / год. Число таких ЕРЕ в РЕА значно менше, ніж стандартних, тому, здавалося б, що і їх інтенсивність відмов може мати велику величину. ніж у нестандартних Крім того, в процесі виготовлення

нестандартних ЕРЕ іноді спостерігаються аномальні викиди величин  $\lambda$  до  $10^{-2}$ - $10^{-3}$ ) 1/год.

Ступінь впливу стандартних ЕРЕ на надійність РЕА значно менша, ніж нестандартних. Останні складніші за конструкцією і мають кілька вихідних параметрів, пов'язаних з основними параметрами РЕА. Часто нестандартні ЕРЕ є конструкцією, що складається з 10...30 деталей, напівфабрикатів і стандартних ЕРЕ. Вплив цих елементів на вихідні параметри ЕРЕ визначається як власними параметрами елементів, а й їх просторовими, механічними, електричними та інші зв'язками. Щоб забезпечити необхідний рівень надійності такої складної системи, необхідно виконати наступні умови, загальні всім типів ЕРЕ.

1. Конструкція в цілому, а також конструкція її окремих елементів повинна мати достатні запаси стійкості параметрів як у процесі виготовлення, так і при експлуатації.

2. Деталі конструкції, напівфабрикати, стандартні ЕРЕ, просторові, електричні, механічні та інші зв'язки між ними повинні бути стабільними як при дії заданих значень зовнішніх факторів у процесі Експлуатації, так і у виробництві (при виготовленні блоків та апаратів).

3. У конструкції має бути передбачено резервування окремих елементів (наприклад, сполучних вузлів).

4. Властивості матеріалів, напівфабрикатів та стандартних ЕРЕ, що використовуються у конструкції, повинні бути добре відомі. Щоб уникнути великих розкидів параметрів та прояву небажаних результатів від невідомих (не регламентованих технічними умовами) властивостей, необхідно користуватися постійним постачальником матеріалів, напівфабрикатів та стандартних ЕРЕ. При необхідності, наприклад, при зміні постачальника перед пуском у виробництво необхідно провести ретельний аналіз матеріалів, напівфабрикатів і стандартних ЕРЕ. Повинна бути повністю виключена модифікація стандартних матеріалів, напівфабрикатів та ЕРЕ. У виняткових випадках модифікація може проводитись лише після ретельних експериментальних досліджень.

5. Конструкцію необхідно розраховувати на добре освоєні технологічні процеси та нові процеси, які допустимі лише за умови, що вони пройшли ретельні дослідження та випробування в дослідному порядку.

6. Конструкція має передбачати можливість проведення необхідних контрольних перевірок у процесі виготовлення як візуально, так і за допомогою спеціальних вимірювальних засобів.

7. Конструкції кріпильних та сполучних елементів повинні бути такими, щоб при їх використанні в процесі встановлення ЕРЕ у блок або апарат повністю виключалась можливість його пошкодження.

## ТЕМА 2 РЕЗИСТОРИ

### 2.1 Загальні відомості

Резистор - це елемент РЕА, призначений для перерозподілу й регулювання електричної енергії між елементами схеми. Основною особливістю резистора є те, що електрична енергія перетворюється на ньому в теплову й розсіюється.

За найбільш загальною класифікацією розрізняють:

1. Постійні резистори з фіксованим значенням опору; залежно від призначення вони підрозділяються на резистори загального застосування, точні, прецизійні, високочастотні, високоомні.

2. Змінні резистори зі значенням опору, що змінюється; залежно від призначення поділяються на підстроювальні й регулювальні. Підстроювальні резистори використовують для точного встановлення опору в електричному колі, регулювальні використовують у процесі керування РЕА.

3. Спеціальні, або нелінійні, резистори – це особлива група постійних резисторів, опір яких залежить від дії зовнішніх факторів, а саме: величини струму або напруги (варистори), температури (терморезистори), освітлення (фоторезистори).

За принципом побудови резистивного елемента резистори поділяють на дротяні й недротяні.

У дротяних резистивним елементом є дріт зі сплаву з високим питомим опором. Дротяні резистори використовуються в РЕА тільки у випадках, коли останні мають певні переваги над недротяними.

Найбільш широко застосовують недротяні резистори: плівкові й об'ємні, у яких резистивні властивості створюються за допомогою плівок або об'ємних композицій з високим питомим опором.

Плівкові й об'ємні резистори мають меншу власну ємність та індуктивність, що дозволяє використовувати їх у широкому діапазоні робочих частот і виготовляти з більшою кількістю номіналів опору.

Позначення резисторів на схемах. На принциповій електричній схемі поруч з умовним графічним зображенням резистора у вигляді прямокутника позначають його літерою (велика латинська буква R) з порядковим цифровим (іноді буквеним) індексом, наприклад: R1, R2, R3,...,R<sub>c</sub>. У деяких видах технічної документації й видань також вказують номінальну величину опору (Рисунок 2.1).

У радіотехнічній літературі прийнято такі скорочення позначень величин опорів резисторів.

Опори від 1 до 999 Ом позначаються цілими числами без зазначення одиниці виміру. Наприклад, опір 330 Ом позначається як 330.

Опори резисторів від 1 до 999 кОм позначаються числом кілоом з додаванням малої літери к. Наприклад, опір 3,3 кОм позначається як 3,3 к.

Опори резисторів від 1 МОм і вище позначаються числом мегаомів з додаванням великої букви М. Наприклад, опір 5 МОм позначається як 5 М.

Величина опору, яка складає частки або число із частками Ом, позначається в омах із позначенням одиниці виміру. Наприклад, опір 0,5 Ом позначається як 0,5 Ом.

У змінного резистора вказується тільки максимальне значення його величини.

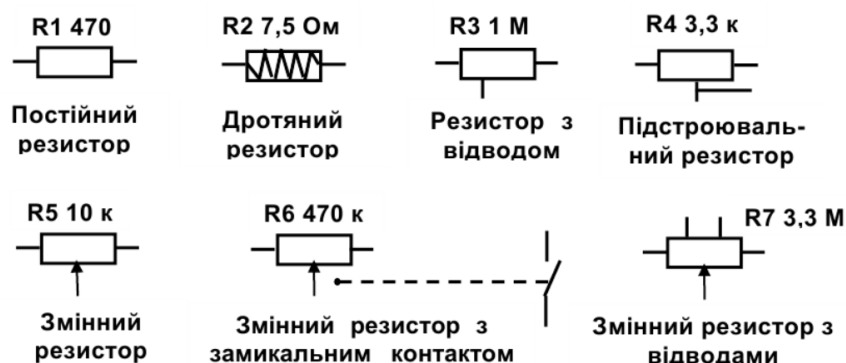


Рисунок 2.1 – Позначення резисторів на принципових схемах

Якщо зазначена в схемі номінальна величина опору резистора є приблизною, то поруч з умовною позначкою ставлять зірочку (R\* ).

На схемах часто вказують (умовним знаком усередині умовної позначки) номінальну потужність резистора (рисунок 2.2).

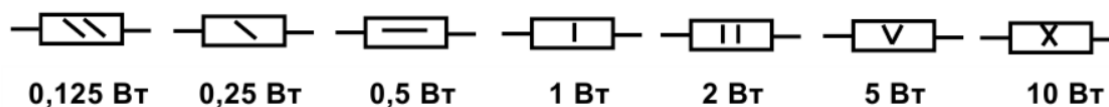


Рисунок 2.2. Позначення номінальної потужності резисторів

## 2.2. Основні параметри резисторів

Номінальний опір резистора – нормоване значення опору. Резистори виготовляють на різні номінали, які відповідно до рекомендацій МЕК (Міжнародна електротехнічна комісія) стандартизовані. Відповідно до Держстандарту встановлено шість рядів номіналів опорів: E6, E12, E24, E48, E96, E192. Цифра вказує кількість номінальних значень у даному ряді. Опори змінних резисторів мають ряди номіналів: E6, E12, E24 [5].

Значення опорів можуть відхилитися від номінальних у межах певних допусків. Ряд відхилень (допусків) також нормується. Допуск відповідає ряду номінальних опорів  $\pm 0,01$ ; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10; 20; 30%.

Принцип побудови рядів номінальних значень для резисторів із заданим допуском дано у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Ряди номінальних значень

Індекс ряду	Числові коефіцієнти, які помножують на будь-яке число, кратне $10^n$ , $n = 0, 1, 2, 3, \dots$	Допуск, %
E6	1,0 1,5 2,4 3,3 4,7 6,8	$\pm 20$
E12	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8 1,2 1,8 2,7 3,9 5,6 8,1	$\pm 10$
E24	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8 1,1 1,6 2,4 3,6 5,1 7,5 1,2 1,8 2,7 3,9 5,6 6,8 1,3 2,0 3,0 4,3 6,2 9,1	$\pm 5$

У резисторах загального застосування номінали опорів погоджені з

допусками таким чином, що виходить так звана “безвідхідна” шкала. При цьому номінал і даний допуск одного резистора примикають до номіналу й допуску сусіднього. Тому виготовлений резистор обов’язково потрапляє в одну з номінальних груп.

Номінальна потужність розсіювання ( $P_{\text{ном}}$ ) вказує припустиме електричне навантаження протягом тривалого часу при заданій стабільності опору. Номінальні потужності розсіювання (Вт) установлюють відповідно до Держстандарту. Вони відповідають ряду значень: для мікроелементів - 0,01; 0,025; 0,05; для РЕА на дискретних елементах - 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; для дротяних (як правило) резисторів - 5, 8, 10, 16, 25, 50, 75, 100, 160, 250, 500.

Потужність розсіювання визначається розмірами резистора, конструкцією й властивостями резистивного елемента. Часто користуються характеристикою питомої потужності розсіювання:

$$P_{\text{пит}} = P_{\text{ном}} / S_R, \quad (2.1)$$

де  $S_R$  – площа поверхні охолодження резистора.

Енергія, що виділяється, призводить до підвищення температури резистора (перегріву) на величину

$$\Delta T = P_{\text{пит}} / K, \quad (2.2)$$

де  $K$  - коефіцієнт теплопередачі.

З підвищенням температури навколишнього середовища тепловіддача погіршується й відбувається перегрів резистора (рисунок 2.3).

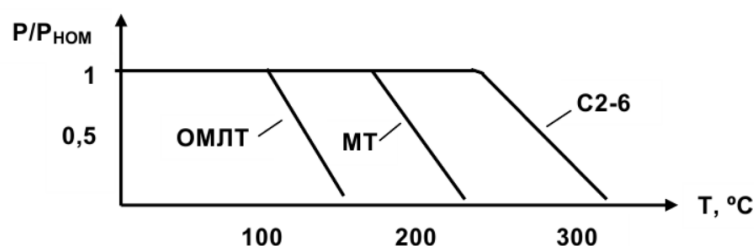


Рисунок 2.3. Залежність потужності розсіювання від температури

Максимальна напруга (постійного струму), що може бути тривалий час прикладена до резистора:

$$U_{\max} = \sqrt{P_{\text{ном}} \cdot R_{\text{ном}}} . \quad (2.3)$$

Пробивна напруга характеризує електричну міцність резистора. Звичайно, пробій відбувається по поверхні між выводами та між витками при спіралеподібній конструкції резистивного елемента. При довжині резистора менш 5 см  $U_{\text{пр}}$  визначається з емпіричної формули:

$$U_{\text{пр}} = 4 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{p \cdot \ell} , \quad (2.4)$$

де  $p$  - тиск навколишнього середовища, Па;

$\ell$  - довжина резистора, см.

Температурний коефіцієнт опору характеризує відносну зміну опору резистора під дією температури, його позначають як ТКО або:

$$\alpha_R = \frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{R_0} , \quad (2.5)$$

де  $R_0$  - опір резистора за номінальної температури.

Приймають  $\alpha_R$  сталою величиною в усьому інтервалі робочих температур або у двох інтервалах від 25°C і вище та від 25°C і нижче. Абсолютне значення ТКО для різних типів резисторів може бути як  $\alpha_R > 0$  (товстоплівкові резистори), так і  $\alpha_R < 0$  (тонкоплівкові резистори). Значення опору резистора може бути обчислене за формулою:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_R \cdot \Delta T) , \quad (2.6)$$

де  $\Delta T$  - зміна температури щодо номінальної.

Власні шуми резисторів характеризують тепловий і струмовий шуми.

Тепловий шум - електрична напруга, що випадково змінюється на кінцях провідника внаслідок неупорядкованого теплового руху електронів. Тепловий шум характеризується безперервним, широким, практично рівномірним спектром. ЕРС теплового шуму у смузі частот від  $f_1$  до  $f_2$  за температури 300 К визначається за формулою:

$$E_T \approx \frac{1}{8} \cdot \sqrt{R(f_2 - f_1)}, \quad (2.7)$$

де  $[E_T] = \text{мкВ}$ ;  $[f] = \text{кГц}$ ;  $[R] = \text{кОм}$ .

Струмовий шум виникає внаслідок випадкових змін опору провідника й зумовлений дискретною структурою струмопровідного елемента. Електричний струм у такому елементі створює локальні нагрівання, що супроводжуються порушенням контактів між одними частинками й утворенням контактів у результаті спікання між іншими. Через це виникає флуктуація значення опору й струму і на резисторі з'являється шумова складова напруги.

Струмовий шум має безперервний спектр, інтенсивність якого збільшується в області низьких частот. Оскільки ЕРС (або потужність) шуму залежить від струму, то вона повинна залежати також і від напруги, прикладеної до резистора. У першому наближенні в смузі частот 60...6000 Гц ЕРС струмового шуму можна визначити за формулою  $E_i = K_i U$ , де  $U$  - напруга на резисторі;  $K_i$  - коефіцієнт, що залежить від конструкції резистора. Для різних типів резисторів значення  $K_i$  змінюється від 0,2 до 20 мкВ/В. Рівень шуму композиційних резисторів у кілька разів вище, ніж у плівкових, і є їхнім істотним недоліком при використанні в РЕА. За абсолютною величиною струмовий шум може досягати сотень мікрівольтів [6].

Вологостійкість резисторів визначається відносною зміною опору, що виникає після перебування резистора в камері вологості за  $T=40^\circ\text{C}$  і відносної вологості 95...98% протягом заданого інтервалу часу.

Захисні покриття (лаки, емалі, пластмаси) повністю не захищають

резистор від впливу вологи. Вони затримують проникнення вологи на час, приблизно пропорційний квадрату товщини матеріалу покриття. Повний захист може бути досягнутий тільки за допомогою вакуумнощільної герметизації.

Після припинення впливу вологи номінальний опір резистора може не відновлюватися.

Коефіцієнт старіння характеризує стабільність опору резисторів у часі:

$$\beta_R = \frac{dR}{dt} \cdot \frac{1}{R_0}. \quad (2.8)$$

Звичайно  $\beta_R$  приймається в першому наближенні величиною, що не залежить від часу.

Частотні властивості резисторів пов'язані з номінальним опором і розподіленими індуктивністю і ємністю. Опір резистора на змінному струмі залежить як від його номінального значення, так і від його ємності й індуктивності, які, у свою чергу, залежать від конструкції резистора.

Для недротяних резисторів великого опору (сотні кілоомів) опір на високих частотах зменшується, а малого – збільшується. Це пов'язано, у першу чергу, з технологією виготовлення резисторів.

Маркування резисторів. На кожному недротяному резисторі вказують номінальний опір, припустимі відхилення опору від номінального (допуск) і тип резистора. Якщо рівень шумів резистора менше 1 мкВ/В, на ньому ставлять букву А.

Для резисторів прийнято систему скорочених позначень відповідно до Держстандарту. Резистори постійного опору позначають літерою Р (раніше використовувалась літера С), змінного – РП (СП), цифровий індекс вказує матеріал резистивного елемента (табл. 2.2).

Далі вказують номер розробки резистора.

Кодоване позначення номінального опору резисторів (у більшості випадків) складається з цифр, що позначають номінальний опір, і букви

одиниці виміру опору. Опори до 100 Ом виражають в омах і позначають буквою E. Опори від 100 Ом до 100 кОм виражають в кілоомах і позначають буквою к, а опори від 100 кОм до 100 МОм – у мегаомах і позначають буквою М. Ці букви ставляться на місце коми десяткового дробу, що виражає значення опору. Наприклад, 5 кОм маркують як 5к; 500 Ом – к5; 4,7 кОм – 4к7.

Таблиця 2.2 – Систему скорочених позначень

Постійні	Змінні	Тип резистора
P1 (C1)	РП1 (СП1)	Тонкоплівкові вуглецеві
P2 (C2)	РП2 (СП2)	Тонкоплівкові металоплівкові, металоокисні
P3 (C3)	РП3 (СП3)	Плівкові композиційні
P4 (C4)	РП4 (СП4)	Об’ємні композиційні
P5 (C5)	РП5 (СП5)	Дротяні

Припустимі відхилення опору від номінального маркують буквами (табл. 2.3).

На недротяних резисторах номінальну потужність вказують тільки на резисторах великих габаритів. Номінальну потужність малогабаритних резисторів визначають за розміром корпусу.

Старі позначення типів резисторів маркували буквами. Перша буква звичайно позначає вид резистивного елемента (відповідно російськомовним термінам). Наприклад, У – вуглецевий; М – металоплівковий; Б – боровуглецевий; К – композиційний. Друга буква – вид захисту резистивного елемента: Л - лакований; Г – герметичний; Э – емальований, ізолюваний, вакуумований. Третя буква – особливі властивості резистора: Т – теплостійкий; П – прецизійний; В – високоомний; М – малогабаритний; ОБ – об’ємний; Н – низькоомний.

Таблиця 2.3 – Припустимі відхилення опору від номінального

Припустиме відхилення, %	Код	Припустиме відхилення, %	Код
± 0,1	Ж	± 20	В
± 0,2	У	± 30	Ф
± 0,5	Д	від + 50 до - 10	Э
± 1	Р	від + 50 до - 20	Б
± 2	Л	від + 80 до - 20	А
± 5	И	±100	Я
± 10	С	від + 100 до - 10	Ю

Іноді тип резистора позначають двома буквами: МО металоокисний.

Найбільш поширені типи резисторів, що застосовувались раніше: МЛТ, ОМЛТ, МТ - металоплівкові резистори, термостійкі (рівень шумів для групи А - не більше 1 мкВ/В, для групи Б - не більше 5 мкВ/В); ВС – вологостійкі вуглецеві; УЛМ - вуглецеві лаковані малогабаритні; МОН - металоокисні; КИМ - композиційні, плівкові ізольовані; СЧ - композиційні, об'ємні, у склокерамічній оболонці; С2 – металодіелектричні.

Дротяні резистори характеризуються підвищеною стабільністю величини опору, термостійкістю, вологостійкістю й малим рівнем шумів, витримують значні перевантаження. Внаслідок високої індуктивності їхній частотний діапазон не перевищує 1...2 МГц. Дріт, який використовують для резистивного елемента цих резисторів, виготовляють зі сплавів манганіну й константану. Для маркування раніше випущених резисторів застосовувалися позначення: ПЭ – дротяні емальовані; ПЭВ – дротяні емальовані вологостійкі.

### 2.3 Резистори змінного опору

Резистори змінного опору (змінні резистори) застосовують для регулювання сили струму і величини напруги.

За конструктивним виконанням їх поділяють на одинарні й здвоєні, одно- і багатооборотні, з вимикачем і без нього.

За призначенням – на підстроювальні для разового або періодичного підстроювання апаратури й регулювальні для багаторазового регулювання у процесі експлуатації.

Функціональна характеристика змінного резистора визначає залежність величини опору між рухомих контактом і одним з нерухомих контактів від кута повороту -  $R(\varphi)$  (або координати для лінійних резисторів). Найпоширеніші залежності показано на рисунку 2.4.

Резистори групи А мають лінійну залежність опору від кута повороту:  $R_A(\varphi) = r_0 + \varphi K$ , де  $r_0$  – початковий опір резистора;  $K$  – сталий коефіцієнт.

Резистори з логарифмічною залежністю (група Б) характеризуються постійним приростом опору на одиницю зсуву рухомого контакту:  $R_B(\varphi) = r_0 e^{k\varphi}$ , де  $k$  – стала приросту опору.

Змінні резистори з оберненологіфічною залежністю (група В) характеризуються плавною зміною величини опору на початку регулювання:  $R_B(\varphi) = R_{\max}(1 - e^{-k\varphi})$ , де  $R_{\max}$  – максимальний опір резистора.

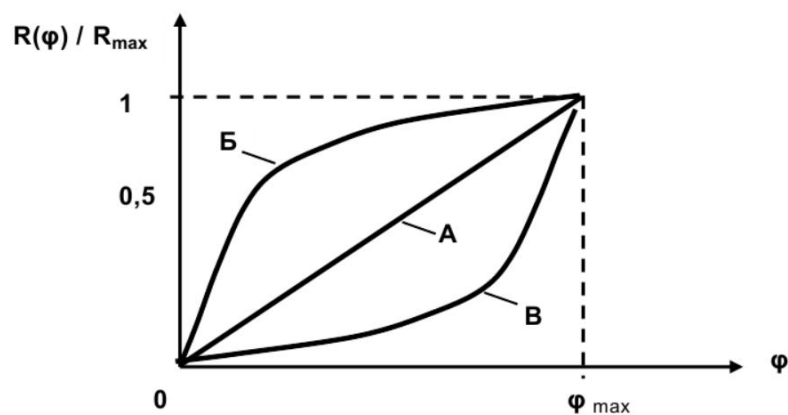


Рисунок 2.4 – Функціональні характеристики резисторів змінного опору

Для РЕА спеціального призначення (вимірювальної, метрологічної, наукової) розробляють резистори змінного опору інших функціональних залежностей.

Змінні резистори мають ряд специфічних характеристик.

Початковий стрибок опору - мінімальний опір при зрушенні рухомого контакту з нульового положення.

Точність установки визначається роздільною здатністю резистора (зернистістю резистивного елемента, величиною площі контакту).

Шуми обертання\_(пересування) - шуми, що виникають у процесі переміщення рухомого контакту.

Момент обертання визначає зусилля, яке необхідно прикласти до осі обертання для регулювання.

Дротяні резистори змінного опору відрізняються підвищеною термостійкістю, навантажувальною здатністю, високою зносостійкістю, стабільністю, низькими шумами й малим ТКО. Однак вони мають обмежений діапазон номінальних опорів, високі власні ємність та індуктивність, високу вартість.

Резистивним елементом недротяних резисторів служить вуглецева або композиційна суміш, нанесена на плоску основу (склотекстоліт, кераміка, гетинакс).

## 2.4 Спеціальні резистори

Спеціальні, або нелінійні, резистори – елементи із заздалегідь передбаченими й цілеспрямованими змінами опору за наявності тих або інших впливів.

Варистори – елементи, опір яких значно змінюється зі зміною прикладеної напруги (Рисунок 2.5). Основне їхнє призначення - стабілізація й обмеження напруги.

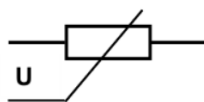


Рисунок 2.5 – Позначення варисторів на принципових схемах

Варистори виготовляють шляхом спікання суміші із кристалів карбіду кремнію (карборунду) і зв'язувальних речовин. Струм, що протікає через варистор, змінюється при зміні напруги за нелінійним законом (рисунок 2.6).

Маркування варисторів: букви СН – означають опір нелінійний, цифри - шифр матеріалу й тип конструкції.

Нелінійність характеристики викликана тим, що при збільшенні напруги відбувається перекриття дрібних зазорів між кристалами карбіду, опір зменшується, струм росте. Варистори виготовляють на напругу від 15 В до 25 кВ, струм – від 50 мкА до 10 мА й потужністю від 0,8 до 3 Вт.

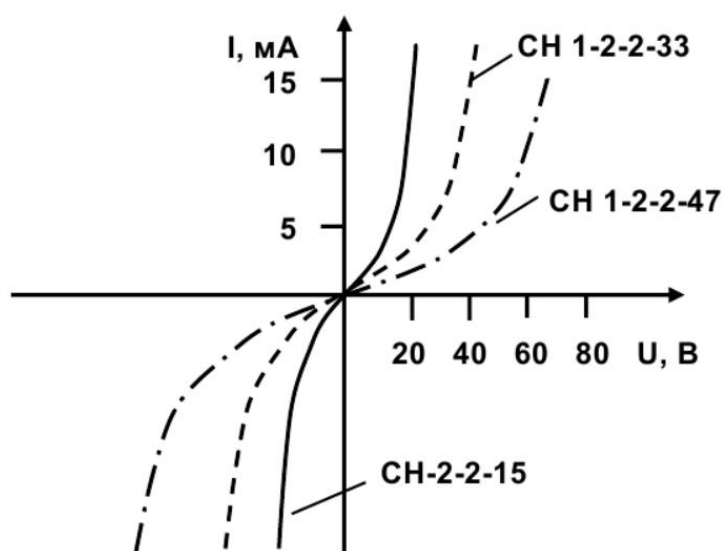


Рисунок 2.6 –Вольт-амперні характеристики варисторів

Опір варистора значно залежить від частоти струму й може відрізнятися від значення на постійному струмові до 10 разів. Для параметрів варисторів характерні великі відхилення й нестабільність. Наприклад, струм за заданої напруги може мати відхилення від  $\pm 10\%$  до  $20\%$ . Температурний коефіцієнт опору може досягати значень  $10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Терморезистори – це термочутливі резистори, опір яких значно змінюється зі зміною температури.

Терморезистори за призначенням поділяють на такі групи:

– для вимірювання й регулювання температури;

- термокомпенсації елементів електричних кіл у широкому інтервалі температур;
- систем теплового контролю;
- вимірювання потужності СВЧ коливань від часток мікроватів до одиниць міліватів;
- стабілізації напруги в колах постійного та змінного струму.

Залежно від застосовуваного напівпровідникового матеріалу терморезистори поділяють на кобальтомарганцеві (КМТ і СТ1), мідномарганцеві (ММТ і СТ2), мідно-кобальтові (СТ-3), титанобарієві (СТ-5 - СТ9, СТ15).

Усі терморезистори (за винятком деяких спеціальних випадків) – прямого підігріву, тобто їхнє робоче тіло нагрівається струмом, що протікає через нього. Застосовують їх для температурної стабілізації радіоелектронних пристроїв, а також як первинні датчики температури. За знаком ТКО терморезистори поділяють на термістори й позистори.

Термістори характеризуються негативним ТКО (опір знижується зі зростанням температури). Для більшості термісторів температурну залежність опору в робочому інтервалі температур визначають співвідношенням

$$R_T = R_0^{B(T_0 - T)/T \cdot T_0}, \quad (2.9)$$

де  $T_0$  – абсолютна температура, за якої опір терморезистора дорівнює  $R_0$ ;

$T$  – абсолютна температура, за якої обчислюють значення  $R_T$ ;

$B$  – сталий коефіцієнт (для різних типів термісторів 2600...7200 К).

Сталою часу термістора прийнято вважати час, протягом якого температура його тіла зменшиться в  $e$  разів за різкої зміни температури навколишнього повітря зі 120 до 20 °С.

Вольт-амперні характеристики термісторів мають різко виражений максимум в області малих струмів.

Інтервал робочих температур: - 60...+180 °С (залежно від типу). Основні

типи термісторів із прямим підгрівом: КМТ, ММТ, СТ1, СТ3.

Позистори – терморезистори з великим позитивним ТКО. В інтервалі робочих температур - 60...+200 °С кратність зміни опору може досягати  $10^4$  разів. Основні типи позисторів: СТ5, СТ6.

Відповідно до нової системи позначень терморезистори маркують буквами ТР. Наступна цифра за позначенням вказує вид матеріалу, з якого виготовлений терморезистор (кобальт, марганець, мідь).

Фоторезистори – це дискретні світлочутливі резистори, принцип дії яких оснований на зміні провідності напівпровідникового матеріалу під дією випромінювання оптичного діапазону. Позначення фоторезисторів на принципових схемах показано на рисунку 2.7.

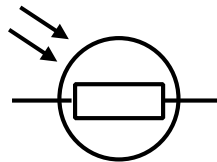


Рисунок 2.7 – Умовне графічне зображення фоторезистора

Світлочутливий елемент фоторезистора виготовляють у вигляді прямокутної або круглої таблетки, спресованої з напівпровідникового матеріалу або тонкої плівки на скляній підкладинці.

Наведемо основні параметри фоторезисторів.

Темновий опір  $R_T$  – опір фоторезистора за час відсутності випромінювання, що падає на нього (за прикладеної робочої напруги  $U_p$  і темного струму  $I_T$   $R_T = U_p / I_T$ ).

Світловий струм  $I_{CB}$  – струм, що протікає через фоторезистор при впливі потоку випромінювання заданих інтенсивності й спектрального розподілу. Тоді опір освітленого фоторезистора  $R_{CB} = U_p / I_{CB}$ . Кратність зміни опору  $K_j = R_{CB} / R_T$ .

Динамічні властивості фоторезисторів характеризують: стала часу за наростанням струму  $\tau_n$ , стала часу за спадом струму  $\tau_{сп}$ . Залежність струму фоторезистора при імпульсному освітленні показано на рисунку 2.8.

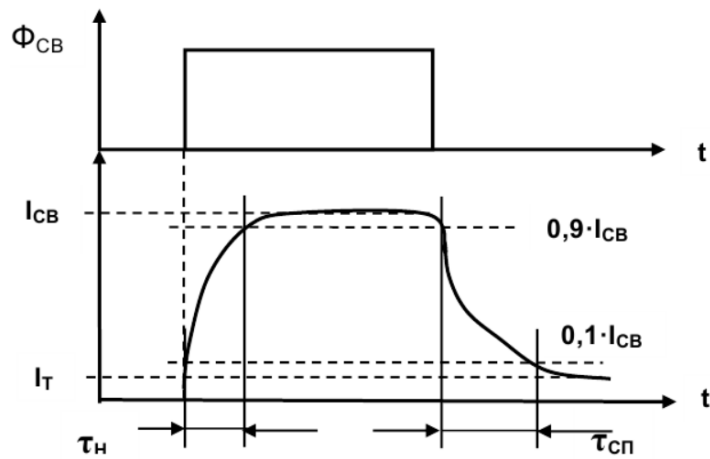


Рисунок 2.8 – Залежність струму фоторезистора при імпульсному освітленні

Люкс-амперна характеристика фоторезисторів відбиває залежність світлового струму, що протікає через фоторезистор, від освітленості. Вона звичайно має нелінійний характер.

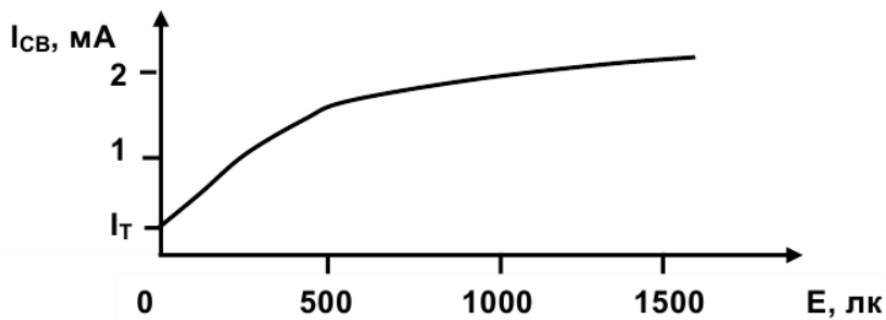


Рисунок 2.9 – Люкс-амперна характеристика

Вольт-амперна характеристика фоторезисторів показує залежність світлового струму від прикладеної до резистора напруги (рисунок 2.10) за незмінної освітленості  $E$ .

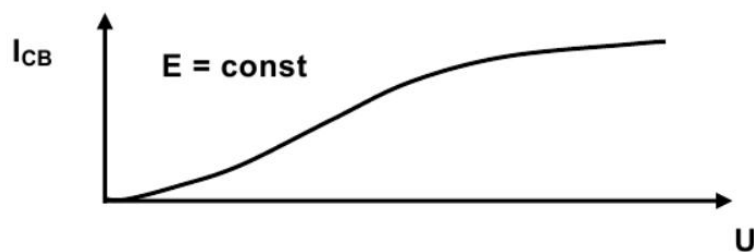


Рисунок 2.10. Вольт-амперна характеристика фоторезистора

Спектральна характеристика відображає чутливість фото резистора залежно від довжини хвилі падаючого випромінювання при незмінній його інтенсивності (рисунок 2.11), а  $\lambda_{\max}$  - довжина хвилі, що відповідає максимуму спектральної чутливості фоторезистора.



Рисунок 2.11. Спектральна характеристика фоторезисторів

Температурний коефіцієнт світлового струму ( $TKI_{\text{СВ}}$ ) фоторезистора характеризує відносна зміна  $I_{\text{СВ}}$  від температури за незмінності інших параметрів.

Для маркування фоторезисторів використовують буквеноцифрове кодування. Перші дві букви позначення: РФ (резистор фоточутливий або СФ (опір фоточутливий), а також ФС (старі позначення). Далі буквами або цифрами позначають матеріал фоторезистора й робочий спектральний діапазон:

- А (1) – Рв (сірчистий свинець) – інфрачервона область спектра;
- К (2) – Сd (сірчистий кадмій) – видима область спектра, частково ультрафіолетове випромінювання;
- Д (3) – CdSe (селенистий кадмій) – червона й ближня інфрачервона області спектра.

Цифри, що розташовані після дефіса, характеризують конструктивне оформлення фоторезистора. Перед цифрою може стояти буква Г, яка позначає герметизовану конструкцію, наприклад: СФ 2-1, ФСК-1а, ФСД-Г2, СФ 3-1.

Резистивний оптрон – комбінація лампи розжарювання (світлодіода) і фото резистора в одному елементі. Дозволяє здійснювати передачу сигналів за відсутності електричного з'єднання в ланцюзі. Використовують для гальванічної розв'язки в сигнальних ланцюгах.

Тензорезистори - елементи, електричний опір яких залежить від величини механічних деформацій. Розрізняють:

– дротяні тензорезистори, що як чутливий елемент мають ґрати з тонкого дроту діаметром 2...30 мкм;

– фольгові тензорезистори, що мають ґрати з фольги товщиною 5...10 мкм;

– напівпровідникові тензорезистори, у яких чутливим елементом є напівпровідник товщиною 20...50 мкм і які мають велику чутливість.

Тензочутливість резистора визначається співвідношенням:

$$S = \frac{\Delta R \cdot l}{R \cdot \Delta l}, \quad (2.10)$$

де  $l$ ,  $R$ ,  $\Delta R$  і  $\Delta l$  – довжина та опір тензочутливого елемента та їх зміна відповідно.

## 2.5 Особливості використання резисторів у РЕА

Конструкція резисторів загального призначення. Наведемо основну найпоширенішу конструкцію (рисунок 2.12) резисторів постійного опору (наприклад, МЛТ - металоплівкові, лаковані, теплостійкі).

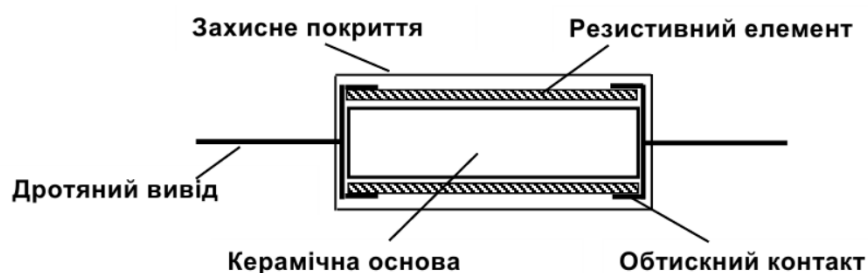


Рисунок 2.12 – Елементи конструкції резисторів загального призначення

У плівкових резисторах резистивний елемент наносять на діелектричну основу у вигляді суцільної або спіралеподібної плівки (рисунок 2.13, а). В об'ємних резисторах функцію основи резистивного елемента виконує композиційний елемент із заданим питомим опором (рисунок 2.13, б). У дротяних резисторах резистивний елемент утворює спіраль із дроту.

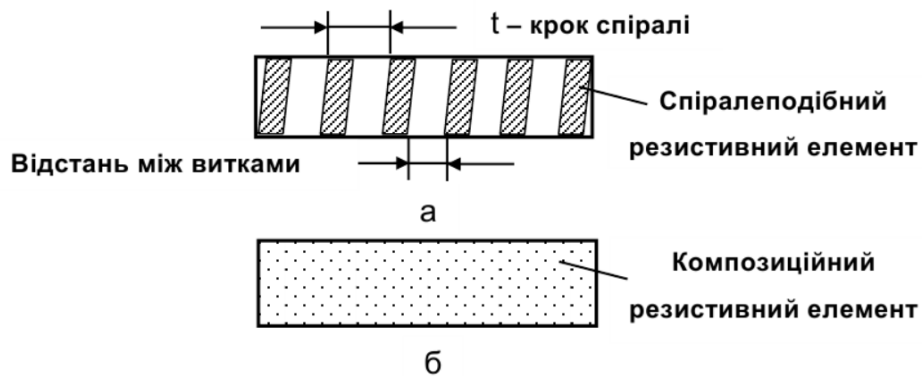


Рисунок 2.13 – Резистивні елементи недротяних резисторів

Резистори в колі постійного струму. У загальному випадку опір резистора постійному струму визначається не тільки опором резистивного елемента  $R_H$ , але й рядом інших компонентів:  $R_K$  – контактного опору,  $R_O$  – опору основи,  $R_{ЗП}$  – опору захисного покриття.

## ТЕМА 3 КОНДЕНСАТОРИ

### 3.1 Загальні відомості

Електричний конденсатор - це елемент з двох провідників (обкладинок), розділених діелектриком, і який має властивість накопичувати електричну енергію (ємність). Ємність конденсатора  $C$  визначається відношенням електричного заряду  $q$ , що накопичується в ньому, до прикладеної напруги  $U$ :  $C = q/U$ . Одиниці виміру ємності:  $[C] = \Phi$  (фарада);  $10^{-6} \Phi = \text{мк}\Phi$  (мікрофарада);  $10^{-9} \Phi = \text{н}\Phi$  (нанофарада);  $10^{-12} \Phi = \text{п}\Phi$  (пікофарада).

Ємність конденсатора залежить від матеріалу діелектрика, форми й взаємного розташування обкладинок.

Ємність плоского конденсатора, що складається з  $n$  обкладинок, з'єднаних паралельно в одній конструкції:

$$C = \frac{8,8 \cdot 10^{-3} \varepsilon \cdot S(n-1)}{d}, \quad (3.1)$$

де  $d$  – товщина діелектрика;

$S$  – площа обкладинок;

$\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність діелектрика.

Для циліндричного конденсатора ємність розраховують за формулою:

$$C = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \varepsilon l}{\frac{D_1}{D_2}}, \quad (3.2)$$

де  $D_1$  і  $D_2$  – діаметри зовнішньої й внутрішньої циліндричних обкладинок;

$l$  – їх довжина; розмірності величин –  $[C] = \text{п}\Phi$ ;  $[l, d] = \text{мм}$ ;  $[S] = \text{мм}^2$ .

Загальна класифікація конденсаторів. За характером зміни ємності конденсатори поділяють на кілька груп.

Конденсатори постійної ємності – це конденсатори з фіксованою

ємністю, що у процесі експлуатації не регулюється. Застосовують у ланцюгах блокування, як розв'язки по колах живлення, як перехідні, роздільні, елементи фільтрів і коливальних контурів. Існує велика кількість типів постійних конденсаторів. Значна частина їх стандартизована й налагоджене їхнє масове виробництво.

Конденсатори змінної ємності (КЗЕ) використовують для плавного настроювання коливальних контурів. Випуск КЗЕ не підлягає повній стандартизації. Їх розробляють згідно з вимогами до конкретної конструкції.

Підстроювальні конденсатори застосовують у електричних колах, ємність яких повинна точно встановлюватися при разовому або періодичному регулюванні й не змінюватися в процесі експлуатації. Деякі типи підстроювальних конденсаторів стандартизовані, їх випускають серійно.

Спеціальні (нелінійні) конденсатори, ємність яких визначається прикладеною напругою (варіконди) або температурою (термоконденсатори).

Іншою класифікаційною ознакою був вибраний вид діелектрика. Залежно від виду діелектрика конденсатори можна поділити на елементи з органічним, неорганічним, газоподібним і оксидним діелектриком (неорганічний діелектрик для полярних електролітичних конденсаторів). Конденсатори постійної ємності, переважно, виготовляють із твердим діелектриком.

За способом захисту від зовнішніх впливів конденсатори виконують незахищеними, захищеними, неізолюваними, ізолюваними, ущільненими й герметизованими.

Залежно від використання в конкретних електричних режимах роботи апаратури конденсатори поділяють на низьковольтні й високовольтні, низькочастотні й високочастотні, імпульсні тощо.

На принципових схемах конденсатори позначають латинською буквою С з порядковим цифровим або буквеним індексом (рисунок 3.1).

Для відображення номіналів на схемах прийнято такі скорочення позначень ємності конденсаторів.

Ємності від 1 до 999 пФ позначають без вказання одиниці вимірювання.

Наприклад: ємність 3300 пФ буде позначена як 3300; 10 пФ – 10.

Ємності від 0,01 мкФ (10000 пФ) і більше позначають малими літерами (мк). Наприклад: ємність 0,1 мкФ позначають як 0,1 мк; 220 мкФ – 220 мк.

Для конденсаторів змінної ємності, а також підстроювальних конденсаторів указують мінімальну й максимальну ємності. Наприклад:  $C_{\min} = 5$  пФ,  $C_{\max} = 340$  пФ позначають як 5...340.

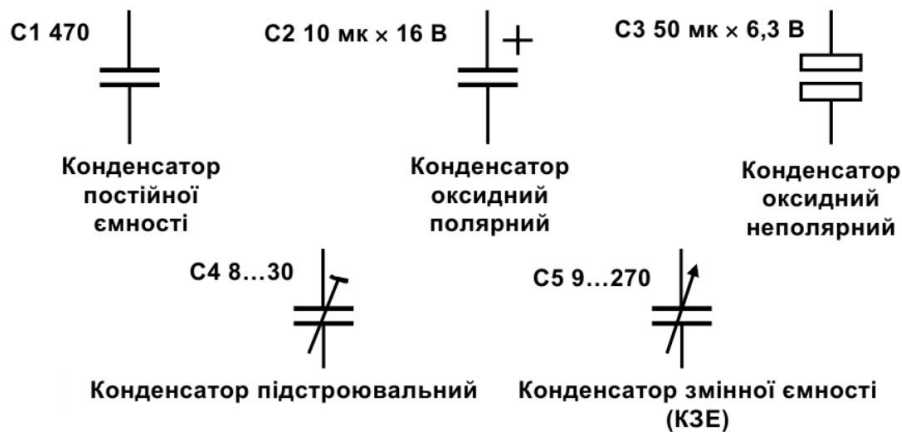


Рисунок 3.1 – Умовні позначення конденсаторів на схемах

Для оксидних (електролітичних, полярних) конденсаторів поруч з позначенням ємності вказують знак x і робочу напругу конденсатора у вольтах. Наприклад: конденсатор ємністю 100 мкФ на робочу напругу 25 В позначають як 100 мк x 25 В.

### 3.2 Основні параметри конденсаторів

Питома ємність конденсатора – відношення ємності до об'єму або маси конденсатора. Цей параметр використовується при масогабаритній оптимізації конструкції.

Номінальна ємність конденсатора – ємність, яку повинен мати конденсатор відповідно до нормативної документації. Номінальні ємності всіх типів конденсаторів постійної ємності стандартизовані й з точністю до множника відповідають рядам E6 - E192 (докладно розглянуто в другому розділі).

Допустиме відхилення ємності від номінальної (допуск) характеризує точність завдання ємності. Значення цих відхилень стандартизовані, їх вказують у відсотках для конденсаторів ємністю від 10 пФ і більше й у пікофарадах для конденсаторів з меншою ємністю. Кодовані значення допусків наведено в таблицях 3.1 і 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1 – Кодовані значення допусків

Припустиме відхилення, %	Код	Припустиме відхилення, %	Код
±0,001	E -	±10	K (C)
±0,002	L -	±20	M (B)
±0,005	R -	±30	N (Φ)
±0,01	P -	-10...+30	Q -
±0,02	U -	-10...+50	T (Э)
±0,05	X -	-10...+100	Y (Ю)
±0,1	B (Ж)	-20...+50	S (Б)
±0,25	C (B)	-20...+80	Z (A)
±0,5	D (Д)	+100	- (Я)

Таблиця 3.2 – Кодовані значення допусків

Відхилення, пФ	Код
±0,1	B
±0,75	C
±0,5	D
±1	F

Номінальна робоча напруга (номінальна напруга) – максимальна напруга, за якої конденсатор може працювати в заданих умовах експлуатації протягом гарантованого терміну служби. Як правило, її вказують на конденсаторі. Номінальні напруги і їхнє кодування (в основному для малогабаритних

конденсаторів) наведено в таблиці 3.3.

Випробувальна напруга – максимальна напруга, за якої конденсатор може перебувати без пробою невеликий проміжок часу (від одиниць секунд до одиниць хвилин). Відповідно до номінальної випробувальна напруга має такі величини:  $U_{\text{ВИП}} = 2U_{\text{НОМ}}$  – для слюдяних і скляних конденсаторів; для керамічних і паперових  $U_{\text{ІСП}} = (2...3)U_{\text{НОМ}}$ ; для металопаперових –  $U_{\text{ВИП}} = (1,5...2)U_{\text{НОМ}}$ .

Таблиця 3.3 – Номінальні напруги і їхнє кодування

$U_{\text{НОМ}}, \text{В}$	Код	$U_{\text{НОМ}}, \text{В}$	Код
1,0	I	63	K
1,6	P	80	L
2,5	M	100	N
3,2	A	125	P
4,0	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		

Пробивна напруга – мінімальна напруга, за якої відбувається електричний пробій конденсатора при швидкому випробуванні. Вона звичайно перевищує номінальну в 1,5 - 3 рази.

Опір ізоляції – опір конденсатора постійному струму:

$$R_{\text{із}} = \frac{U}{I_{\text{вт}}}, \quad (3.3)$$

де  $I_{\text{вт}}$  - струм витоку або провідності.

Найбільший опір ізоляції (десятки тисяч мегаом) мають плівкові конденсатори, найменший – електролітичні оксидні.

Стала часу конденсатора – добуток опору ізоляції і ємності конденсатора  $\tau_c = R_{\text{із}}C$ .  $\tau_c$  – є основною характеристикою якості конденсатора на постійному струмі. Розмірність  $[\tau_c] = \text{с}$  (секунди). Для різних типів конденсаторів  $\tau_c$  може становити від декількох хвилин до декількох діб і характеризує час, протягом якого напруга на конденсаторі зменшується в  $e$  раз (або до 37% від початкового значення).

Реактивна потужність конденсатора характеризує “навантажувальну” здатність конденсатора на змінному струмі:

$$P_p = U \cdot I \cdot \sin \varphi; \text{ оскільки } \varphi \approx 90^\circ, \text{ то } P_p = I \cdot U = U^2 \omega C. \quad (3.4)$$

Звідси отримуємо припустиме значення амплітуди  $U_a$  змінної напруги на конденсаторі при заданій потужності  $P_p$ :

$$U_a = \sqrt{\frac{P_p}{\omega C}}, \text{ або } U_a \approx 565 \sqrt{\frac{P_p}{fC}}, \quad (3.5)$$

де  $[U_a] = \text{В}$ ,  $[P_p] = \text{Вар}$  (реактивні вольт-ампери) реактивна потужність,  $[f] = \text{МГц}$ ;  $[C] = \text{мкФ}$ .

Тангенс кута втрат ( $\text{tg } \delta$ ) характеризує втрати енергії у конденсаторі при протіканні змінного струму. Втрати відбуваються в обкладинках і діелектрику. Основні втрати припадають на діелектрик. Наявність втрат ( $P = IR_{\text{а із}}$ ) призводить до того, що вектор повного струму відхиляється на кут  $\delta$  щодо вектора ємнісного струму. Тоді відношення потужності активних втрат до

реактивної потужності можна записати як:

$$\frac{P_a}{P_p} = \frac{U \cdot I \cdot \sin \delta}{U \cdot I \cdot \cos \delta} = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \operatorname{tg} \delta. \quad (3.6)$$

Величину, зворотню  $\operatorname{tg} \delta$ , називають добротністю конденсатора:

$$Q_c = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}. \quad (3.7)$$

Сучасні конденсатори (окрім електролітичних) мають дуже малі втрати  $\operatorname{tg} \delta < 0,01 \dots 0,001$ .

Стабільність параметрів конденсаторів. Електричні властивості конденсатора й термін служби залежать від умов експлуатації, впливу тепла, вологості, радіації, вібрацій, ударів, а також часу.

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) характеризує зворотні зміни ємності конденсатора зі зміною температури. ТКЄ або  $\alpha_c$  являє собою відносну зміну ємності при зміні температури на один градус:

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{\Delta T \cdot C_0}, \quad (3.8)$$

де  $C_0$  – ємність конденсатора за номінальної температури.

Детальний аналіз показав, що  $\alpha_c = \alpha_\epsilon + \alpha_s + \alpha_d$ , де  $\alpha_\epsilon$  - температурний коефіцієнт діелектричної проникності;  $\alpha_s$  – температурний коефіцієнт зміни площі обкладинок;  $\alpha_d$  – температурний коефіцієнт зміни товщини діелектрика. Оскільки звичайно  $\alpha_\epsilon \ll |\alpha_s| + |\alpha_d|$ , то умова температурної самокомпенсації  $\alpha_s = \alpha_d$ .

Конденсатори постійної ємності залежно від температурної стабільності поділяють на групи, кожна з яких характеризується своїм ТКЄ. Як “базову” температуру беруть  $20^\circ\text{C}$ .

Групи ТКЄ для слюдяних конденсаторів наведено в табл. 3.4, керамічних з нормованим ТКЄ - у таблиці 3.5, керамічних (низькочастотних) з ненормованим ТКЄ - у таблиці 3.6.

Незворотні зміни ємності конденсатора під дією температури характеризують коефіцієнтом температурної нестабільності ємності (КТНС):

$$\beta_c = \frac{\Delta C}{C}. \quad (3.9)$$

З підвищенням температури зменшуються також електрична міцність конденсатора та строк його служби.

При зниженні атмосферного тиску відбуваються зменшення електричної міцності, зміна ємності внаслідок механічної деформації, порушення герметизації.

При поглинанні вологи діелектриком збільшується ємність і зменшується опір ізоляції.

Таблиця 3.4 – Групи ТКЄ для слюдяних конденсаторів

Група	А	Б	В	Г
ТКЄ, %/°С	Ненормований	±0,02	±0,01	±0,005

Маркування конденсаторів. Повне маркування конденсаторів містить: позначення типу конденсатора, номінальні ємність і напругу, припустиме відхилення ємності від номінальної (у відсотках), групу ТКЄ, місяць і рік випуску. Маркування може бути буквено-цифровим або за допомогою кольорів.

Таблиця 3.5 – Для керамічних конденсаторів з нормованим ТКЄ

Група	ТКЄ, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Буквений код
П100	+100	A
П60	+60	G
П33	+33	N
МПО	0	C
М33	-33	H
М47	-47	M
М75	-75	L
М150	-150	P
М220	-220	R
М330	-330	S
М470	-470	T
М750	-750	U
М1500	-1500	V
М2200	-2200	K
М3300	-3300	Y

Таблиця 3.6 – Для керамічних конденсаторів з ненормованим ТКЄ

Група	H10	H20	H30	H50	H70	H90
Допуск на зміну ємності в інтервалі температур - 60...+85 °C, %	±10	±20	±30	±50	±70	±90
Буквений код	B	Z	D	X	E	F

Конденсатори постійної ємності маркують буквою К. Цифровий код позначення типів конденсаторів (залежно від діелектрика) наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Цифровий код позначення типів конденсаторів

Група	Код	Група	Код
Керамічні $U_H \leq 1600$ В $U_H > 1600$ В	10 15	Паперові ( $U_H \leq 2$ кВ)	40
		Паперові фольгові	41
		Паперові металізовані	42
Скляні Склокерамічні Тонкоплівкові	21 22 26	Оксидно-електролітичні, алюмінієві	50
		Оксидно-електролітичні	51
		Об'ємно-пористі	52
		Оксидно-напівпровідникові	53
		Оксидні неполярні	58
Слюдяні малої потужності Слюдяні великої потужності	31 32	Повітряні	60
		Вакуумні	61
		Полістирольні	71
Поліетилентерефтал атні	73	Фторопластові	72
		Комбіновані	75
		Лакоплівкові	76
		Полікарбонатні	77
		Поліпропіленові	78

Зустрічаються також старі позначення постійних конденсаторів: КД – конденсатор дисковий; КТ – конденсатор трубчастий; КН – конденсатор нелінійний; ФТ – фторопластовий термостійкий.

Підстроювальні конденсатори позначають сполученням букв КТ з додаванням цифрового коду (для вакуумних – 1, з повітряним діелектриком – 2, з газоподібним – 3, із твердим – 4).

Конденсатори змінної ємності мають буквене маркування КП (тип діелектрика кодується так само, як і для підстроювальних конденсаторів).

Для нелінійних конденсаторів використовують позначення КН. Наступна цифра коду 1 відповідає варикондам, цифра 2 - термоконденсаторам.

Сполученням букв КС маркують конденсаторні збирання.

Кодоване позначення номінальних ємностей складається із трьох або чотирьох знаків.

Ємність від 0 до 999 пФ виражають у пікофарадах і позначають буквою "р", наприклад, ємність 10 пФ маркують як 10 р.

Ємність від 1000 до 999999 пФ виражають у нанофарадах і позначають буквою "н". Наприклад, ємність 0,022 мкФ - 22 н.

Ємність від 1 до 999 мкФ виражають у мікрофарадах і позначають буквою "μ". Наприклад, 10 мкФ - 10 μ.

Ємність від 1000 до 999999 мкФ виражають у міліфарадах і позначають буквою "m". Наприклад, 2000 мкФ - 2 m.

Ємність від 1Ф і більше позначають у фарадах буквою "F".

Якщо є потреба, букву коду ставлять на місце коми десяткового дробу, наприклад 5,6 пФ - 5р6.

Маркування ємності конденсаторів вітчизняного виробництва більш ранніх випусків здійснювалося в такий спосіб: ємність менша за 100 пФ вказувалася у пікофарадах буквою П; для інтервалу  $100 \text{ пФ} \leq C < 0,1 \text{ мкФ}$  ємність вказувалася в нанофарадах буквою Н і для  $C \geq 0,1 \text{ мкФ}$  у мікрофарадах - буквою М.

### **3.3 Конденсатори змінної ємності (КЗЄ)**

КЗЄ - елементи радіоапаратури, призначені для зміни параметрів резонансних кіл.

Конструкція будь-якого конденсатора змінної ємності містить: систему нерухомих пластин (плоских або циліндричних) - статор; систему рухомих пластин - ротор; корпус або основу для складання всіх елементів конденсатора; напрямляючі оберտального або поступального руху ротора; струмознімачі. Як

правило, статор ізолюють від корпусу, іноді ізолюють і ротор.

Єдиної класифікації КЗЄ немає. Можна лише вказати основні класифікаційні ознаки.

Призначення: вхідні й підсилювальні каскади приймачів, гетеродини приймачів, генератори передавачів, антенно-фідерні пристрої, вимірювальна апаратура тощо.

Застосовуваний діелектрик – твердий, рідкий, газоподібний, вакуумний.

Закон зміни ємності: прямоємнісний, прямочастотний, прямо-хвильовий, логарифмічний, косинусоїдальний, за заданою функцією.

Величина ємності й діапазон частот. Розрізняють КЗЄ для діапазонів довгих (ДХ), середніх (СХ), коротких (КХ), ультракоротких (УКХ) і дециметрових (ДЦХ) хвиль.

Форма електродів: пластинчаста, циліндрична, спіральна.

Вид переміщення електродів: поступальний, обертальний.

Спосіб зміни ємності: зміна площі перекриття пластин, зміна зазорів між пластинами, зміна діелектричної проникності діелектрика.

Кут повороту (для КЗЄ з обертальним переміщенням електродів): нормальний (приблизно  $180^\circ$ ), розширений (більше  $180^\circ$ ), такий, що дорівнює  $90^\circ$ .

Тип струмознімання: гнучкий, ємнісний, за допомогою тертя. Ємність будь-якого КЗЄ визначається початковою  $C_{\text{мін}}$  і змінною  $C_{\text{змін}}$  ємностями:  $C_{\text{макс}} = C_{\text{мін}} + C_{\text{змін}}$ .

Для оцінки можливості перестроювання коливального контуру за частотою розглянемо характерну схему вмикання, зображену на рисунку 3.2.

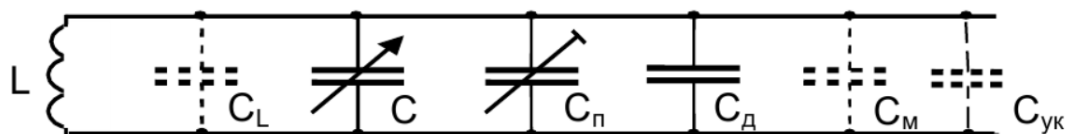


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема коливального контуру

На значення резонансної частоти коливального контуру також впливають:  $C_L$  – власна ємність котушки індуктивності;  $C_d$  – додаткова ємність;  $C_m$  – ємність монтажу;  $C_{пк}$  – вхідна ємність підсилювального каскаду;  $C_{п}$  – ємність підстроювального конденсатора. Усі ємності визначають мінімальну ємність контура:  $C_{к. мін} = C_{мін} + C_L + C_d + C_m + C_{п} + C_{пк}$ .

Тоді максимальна ємність контура:

$$C_{к. макс} = C_{к. мін} + C_{змін}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнт перекриття за частотою знаходимо зі співвідношення:

$$K_f = \frac{f_{макс}}{f_{мін}} = \frac{\sqrt{C_{к.макс}}}{\sqrt{C_{к.мін}}} = \frac{\sqrt{C_{к.мін} + C_{змін}}}{\sqrt{C_{к.мін}}}. \quad (3.11)$$

Звідси можна одержати залежність:

$$C_{змін} = C_{к.мін} (K_f^2 - 1). \quad (3.12)$$

У таблиці 3.8 наведено рекомендовані в межах робочого діапазону частот значення ємностей  $C_{к.мін}$  і  $C_{змін}$ , що є оптимальними для забезпечення стабільності ємності контура, необхідних величин чутливості приймача або потужності передавача.

Таблиця 3.8 – Рекомендовані в межах робочого діапазону частот значення ємностей

Діапазон	$C_{к. мін}$ , пФ	$C_{змін}$ , пФ
ДХ, СХ	50...100	300...650
КХ	30...70 10...25	120...250
УКХ	10...15	20...50
ДЦХ		10...30

Мінімальна ємність у реальних конструкціях конденсаторів у 6...20 разів менше максимальної. В електровимірювальній техніці іноді застосовують конденсатори з максимальною ємністю до 3000...5000 пФ.

Необхідна залежність зміни ємності від кута повороту забезпечується найчастіше зміною площі перекриття статорних пластин роторними зі змінним радіусом  $R = R(\theta)$  при напівкруглому вирізі в статорних пластинах ( $r = \text{const}$ ) (рисунок 3.3).

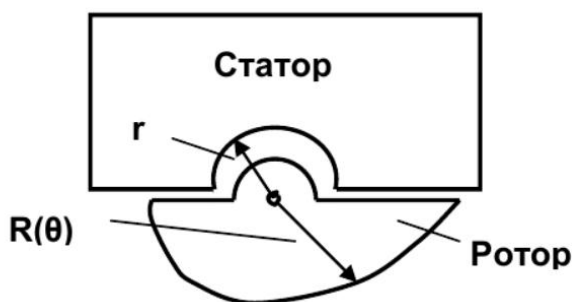


Рисунок 3.3 – Елементи конденсатора змінної ємності

Функціональну залежність радіуса ротора від кута повороту конденсатора, що має  $n$  пар пластин, описує вираз:

$$R(\theta) = \sqrt{r^2 + \frac{1440d}{1,11(n-1)} \cdot \frac{dC}{d\theta}} \quad (3.13)$$

Для прямоємнісного конденсатора  $dC/d\theta = \text{const}$ , тому радіус ротора незмінний. Графік, що відбиває функціональну залежність, показано на рисунку 3.4, а.

Для пряmocчастотного конденсатора:

$$\frac{dC}{d\theta} = \frac{2C_{\text{к.мін}}(B+\theta)}{B^2}, \quad K_\lambda = \frac{\lambda_{\text{макс}}}{\lambda_{\text{мін}}}, \quad B = \frac{\theta_{\text{макс}}}{K_\lambda - 1} \quad (3.14)$$

Графік функціональної залежності для пряmocчастотного конденсатора

показано на рисунку 3.4, б. Для прямохвильового типу конденсатора:

$$\frac{dC}{d\theta} = \frac{2C_{\text{к.мін}}(B+\theta)}{B^2}, \quad K_{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{макс}}}{\lambda_{\text{мін}}}, \quad B = \frac{\theta_{\text{макс}}}{K_{\lambda} - 1}. \quad (3.15)$$

Графік функціональної залежності для прямохвильового конденсатора зображено на рисунку 3.4, в.

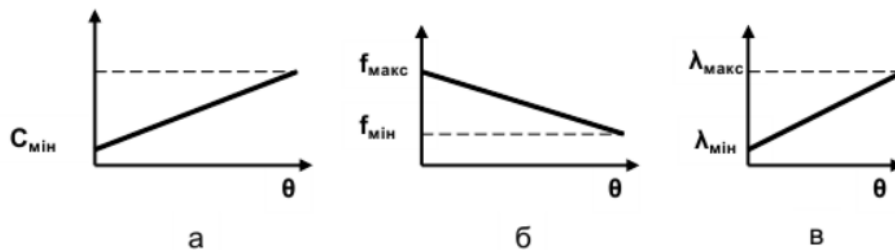


Рисунок 3.4 – Графіки функціональної залежності конденсаторів

Температурний коефіцієнт конденсатора змінної ємності. З огляду на те, що ТКЄ усього конденсатора описується виразом  $\alpha = \alpha_c (C_{\text{мін}}) + \alpha_c (C_{\text{змін}})$ , причому  $\alpha_c (C_{\text{мін}}) \ll \alpha_c (C_{\text{змін}})$ , можна допустити, що  $\alpha \approx \alpha_c (C_{\text{змін}})$ . Для практичних цілей останній коефіцієнт можна знайти з виразу:

$$\alpha_c = \alpha_{\epsilon} + \frac{\alpha_{\text{мп}}(2d+h) - \alpha_{\text{в}}(d+h)}{d}, \quad (3.16)$$

де  $h$  – товщина пластини;

$d$  – відстань між пластинами;

$\alpha_{\text{мп}}$  – температурний коефіцієнт розширення матеріалу пластин;

$\alpha_{\text{в}}$  – температурний коефіцієнт розширення матеріалу втулки.

Значення  $\alpha_c$  для конденсаторів змінної ємності, що використовуються у радіоапаратурі, має порядок  $10^{-6} \dots 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$ .

### 3.4 Спеціальні конденсатори

Варикондами називаються конденсатори з діелектриком зі спеціального сегнетокерамічного матеріалу, що має властивість різко змінювати діелектричну проникність при зміні напруженості електричного поля. Ємність таких конденсаторів під впливом прикладеної до них змінної напруги може змінюватися в 4...6 разів [7].

Номінальні значення ємності варикондів визначаються за напруги 5 В і частоти 50 Гц (в інших випадках умови виміру наводяться) і для різних типів знаходяться в інтервалі значень 100 пФ...0,1 мкФ. При збільшенні напруги ємність варикондів зростає, досягає максимального значення, а потім знижується.

Ця властивість дозволяє застосовувати вариконди як підсилювачі змінного й постійного струмів, помножувачів частоти, стабілізаторів напруги, генераторів напруги, генераторів імпульсів та інших пристроїв. Опір ізоляції постійному струму – не менше  $10^4$  МОм.

Вариконди виготовляють декількох видів (ВК1 – 0 (1, 2, 3, 6)) на номінальну робочу напругу 250 В постійного струму й на 160 В за частоти 50 Гц. Спеціальні вариконди призначені для роботи на надвисоких частотах.

Звичайно вариконди виготовляють у вигляді дисків товщиною 0,4...0,6 мм, покритих червоною емаллю.

Термоконденсатори призначені для роботи як вбудовані елементи в колах термостабілізації й термокомпенсації електронної апаратури. Серійно випущені термоконденсатори типу КН-2 на номінальні ємності 47, 68 і 100 пФ (для кварцових генераторів електронних годинників).

### 3.5 Особливості використання конденсаторів у РЕА

Специфіка використання конденсаторів постійної ємності в РЕА значною мірою пов'язана з електрофізичними властивостями діелектриків, а також

конструкцією елементів.

Конденсатори з повітряним діелектриком мають більші розміри й вартість. Застосовуються лише в коливальних контурах потужних генераторів і як зразкові еталони ємності.

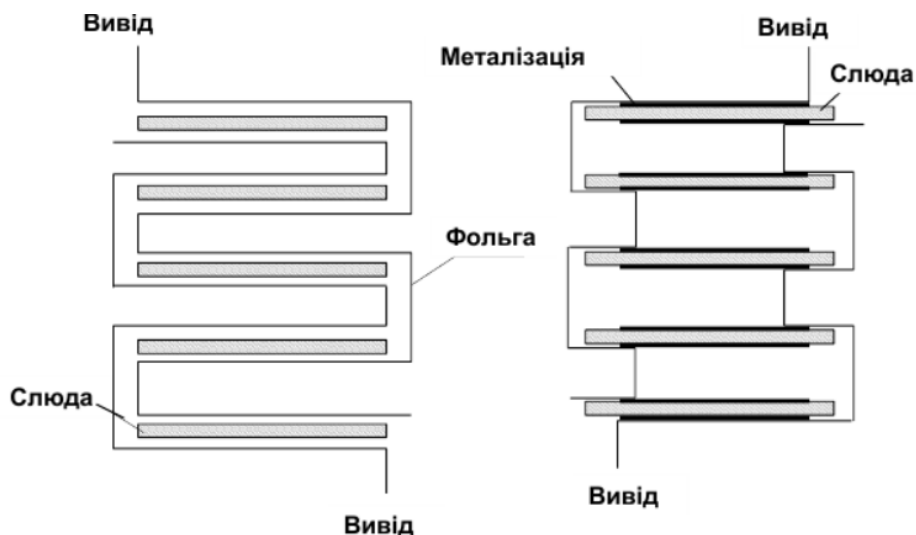
Конденсатори з неорганічними діелектриками (крім оксидних) відрізняються високою стабільністю й малою питомою ємністю.

Конденсатори з органічним діелектриком мають досить високу питому ємність, але знижену стабільність.

Розглянемо конструкції й області застосування деяких типів конденсаторів із твердим діелектриком.

У слюдяних конденсаторах як діелектрик використовують нормалізовані пластини з конденсаторної слюди товщиною 0,2...0,6 мм. Обкладинки виконують з фольги або наносять способом металізації.

Конструктивно слюдяний конденсатор являє собою плоский пакет, у якому пластини слюди чергуються з металевими обкладинками, як показано на рисунку 3.5.



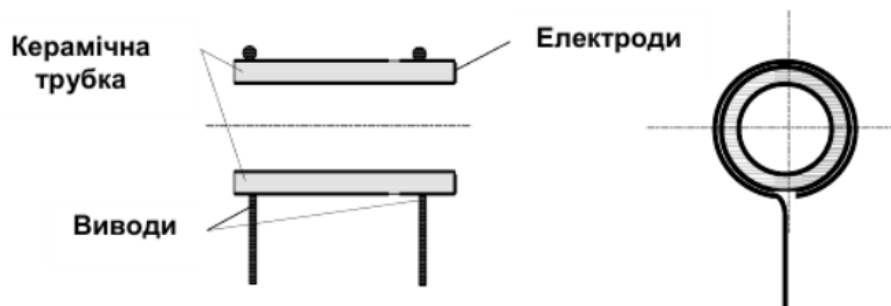
Рисунк 3.5 – Конструкція слюдяних конденсаторів

Слюдяні конденсатори за способом захисту пакета від впливу зовнішнього середовища поділяють на відкриті, опресовані в пластмасу,

герметизовані. Опір ізоляції слюдяних конденсаторів 7,5...50 ГОм, добротність перевищує 1000. Застосовують як контурні, перехідні, роздільні, блокувальні, а також елементи різних фільтрів.

Керамічні конденсатори являють собою пластинки, диски або трубки з кераміки з нанесеними на них електродами з металу. Для захисту від зовнішніх впливів їх фарбують емаліями або герметизують, покриваючи епоксидними компаундами або розташовуючи в спеціальному корпусі.

Найбільш прості конструкції керамічних конденсаторів показано на рисунку 3.6, 3.7.



Рисунку 3.6 – Конструкція трубчастого керамічного конденсатора

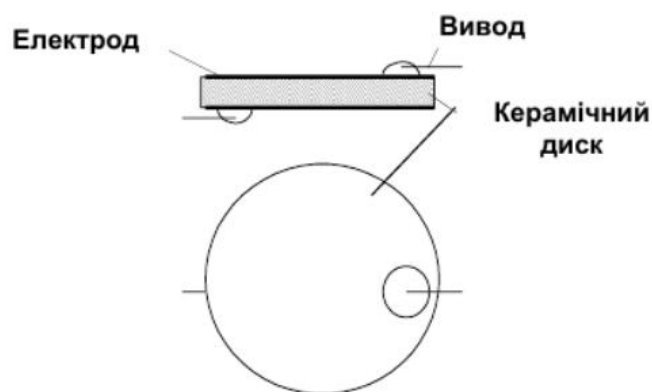


Рисунок 3.7. Конструкція дискового конденсатора

Для керамічних конденсаторів: опір ізоляції не менше 5...10 ГОм;  $\text{tg } \delta = 0,0012...0,0015$  на частоті 1 МГц.

Істотним недоліком трубчастих і дискових конденсаторів є невелика питома ємність. Цей недолік усунутий у литому й монолітному керамічному

конденсаторах.

Литі секціоновані конденсатори являють собою керамічну призму, розділену тонкими перегородками на секції. На ці перегородки наносять металізацію, при цьому утворюється група конденсаторів, з'єднаних паралельно, і досягається більша питома ємність (до 0,8 мкФ/см<sup>3</sup>).

Монолітні конденсатори складаються з тонких керамічних шарів, що чергуються, з нанесеними на них обкладинками, спресованими при високій температурі в монолітний пакет, покритий захисною оболонкою.

Використовують високочастотну й низькочастотну кераміку. Низькочастотна кераміка при більш низькій добротності й стабільності дозволяє одержати більшу питому ємність.

Керамічні конденсатори застосовуються як контурні, блокувальні, роздільні, прохідні й опорні.

Скляні конденсатори являють собою монолітні спечені блоки з шарів скляної плівки й алюмінієвої фольги, що чергуються. Мають підвищену теплостійкість і добротність. Опір ізоляції 10...50 ГОм. Призначення й основні параметри ті ж, що й у керамічних конденсаторів.

Склокерамічні конденсатори за конструкцією подібні до скляних. Діелектриком служить скло з добавкою високочастотної кераміки. За електричними параметрами близькі до керамічних і скляних.

Склоемалеві конденсатори за конструкцією подібні до скляних. Діелектриком у них служить склоподібна емаль, обкладинками - шари срібла. Характеризуються високим опором ізоляції (більше 20 ГОм), високою добротністю (приблизно 700 на частоті 1 МГц), підвищеною теплостійкістю [8].

Паперові конденсатори конструктивно виконуються з двох довгих смуг алюмінієвої або свинцевої фольги, які розділені декількома шарами паперу товщиною 4...15 мкм, згорнутих у вигляді круглого або овального рулону. Для підвищення електричної міцності й стабільності конденсатор просочують парафіном, церезином, вазеліном, маслом або спеціальними компаундами.

У металопаперових конденсаторах металеві обкладки наносять методом

вакуумного випаровування безпосередньо на лаковану основу паперової стрічки (Рисунок 3.8). Їхньою особливістю є здатність до самовідновлення після пробою.

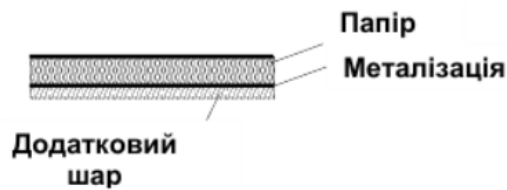


Рисунок 3.8 – Структура металопаперових конденсаторів

За електричними показниками паперові конденсатори значно поступаються слюдяним і керамічним ( $\operatorname{tg}\delta \approx 0,01$ ), мають більшу власну індуктивність. Застосовуються як блокувальні, шунтувальні, низькочастотні перехідні, елементи мережних фільтрів.

У плівковкових і металоплівкових конденсаторах діелектриком є тонка плівка з пластмаси (полістирол, фторопласт), обкладинками – металева фольга або тонкий шар металу, нанесений на плівку.

Для цих конденсаторів характерна велика добротність (до 2000), великий опір ізоляції (до  $10^5$  ГОм), висока температурна стабільність. Застосовуються в колах високої частоти, імпульсних пристроях.

Оксидні електролітичні й оксидно-напівпровідникові конденсатори діелектриком мають оксидний шар (товщиною 0,01...1 мкм) на металі. Оксидований метал є першою обкладинкою (анодом) таких конденсаторів. Другою обкладинкою (катодом) є електроліт (в електролітичних конденсаторах) або шар напівпровідника (в оксиднонапівпровідникових), нанесений безпосередньо на оксидний шар (Рисунок 3.9).

Аноди виготовляють з алюмінієвої, танталової або ніобієвої фольги. За однакових електричних параметрів танталові конденсатори мають менший об'єм, ніж конденсатори з алюмінієвими електродами.

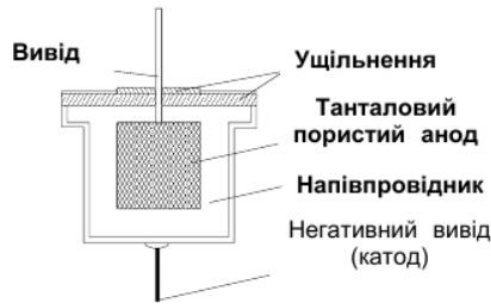


Рисунок 3.9 – Будова оксидно-напівпровідникового конденсатора

Оксидні конденсатори відрізняються великою питомою ємністю. Використовуються в колах постійного й імпульсного струму, фільтрах випрямлячів, як блокувальні й перехідні на низьких частотах. Однак недоліки таких конденсаторів – це значні струми витоку й низька добротність.

У неполярних електролітичних конденсаторах обидві обкладинки містять оксидний шар.

Робота конденсаторів у високочастотних колах. Крім ємності  $C$  конденсатор має також активний опір втрат  $R$  і власну індуктивність  $L$ , що складається з індуктивності самого конденсатора, зовнішніх і внутрішніх з'єднувальних провідників (рисунок 3.12).

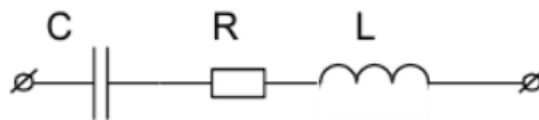


Рисунок 3.12 – Еквівалентна схема конденсатора на ВЧ

Присутність індуктивності призводить до нехарактерної залежності повного опору конденсатора  $Z_c$  від частоти й викликає появу резонансних явищ у конденсаторі. На резонансній частоті опір конденсатора мінімальний і дорівнює активному опору втрат. На інших частотах повний опір конденсатора має реактивний характер, на низьких частотах – ємнісний, на високих – індуктивний. Якісну залежність  $Z_c$  від частоти показано на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13 – Резонансні явища в конденсаторах

Коректне використання конденсатора можливе лише на частотах нижче резонансної, на яких він має ємнісний опір. Необхідно, щоб максимальна робоча частота була в 2...3 рази нижче за власну резонансну частоту. Наближаючись до резонансу, різко зростає залежність повного опору від частоти. Це обмежує застосування конденсаторів великої ємності на високих частотах.

Для зниження індуктивності варто зменшити розміри конденсаторної секції, виконувати виводи не із дроту, а зі стрічки й робити їх по можливості більш короткими, а іноді виготовляти безвивідні конденсатори (як правило керамічні) з металізованими торцями, якими вони безпосередньо впаються в схему.

Надійність роботи конденсаторів залежить від умов експлуатації.

Під впливом температури змінюється також добротність конденсатора. Це викликається змінами опору провідників і діелектричних втрат у діелектрику.

Під дією вологи змінюються діелектрична проникність діелектрика, опір ізоляції, зростають активні втрати. Вологостійкість конденсатора забезпечують застосуванням негігроскопічних речовин, наприклад негігроскопічних діелектриків (кераміки конденсаторної), просоченням гігроскопічних діелектриків негігроскопічними смолами, компаундами, обволіканням, опресуванням конденсатора пластмасами, покриттям емаллями й герметизацією.

РЕА на літальних апаратах зазвичай експлуатуються при зниженому атмосферному тиску, що призводить до зменшення ємності й електричної міцності конденсаторів.

Надійним захистом від зміни атмосферного тиску служить герметизація. Малочутливі до зниження тиску вакуумні конденсатори.

Найбільш частими причинами раптових відмов конденсаторів є пробій діелектрика й перекриття між краями обкладинок. Вони пов'язані з недоліками конструкції й прихованими виробничими дефектами. До таких дефектів відносяться повітряні включення, що сприяють іонізації й коронним розрядам з виділенням вуглецю навіть за напруг 300...500 В.

## ТЕМА 4 ІНДУКТИВНІ КОМПОНЕНТИ

### 4.1. Високочастотні котушки індуктивності

Індуктивні компоненти - це елементи, опір яких змінному струму має індуктивний характер. До індуктивних компонентів відносять: високочастотні котушки індуктивності, дроселі, трансформатори та деякі пристрої функціональної електроніки.

Залежно від призначення розрізняють:

- контурні котушки (елементи, що разом з конденсаторами утворюють коливальний контур);
- котушки зв'язку (передають високочастотні коливання з одного електричного кола в інше);
- високочастотні дроселі (котушки індуктивності, що мають великий опір струмам високої частоти).

За конструктивними ознаками котушки можуть бути розділені на циліндричні, спіральні, тороїдальні, одношарові, багатшарові, із сердечником або без нього, екрановані, з постійною або змінною індуктивністю.

На принципових електричних схемах поруч з умовним графічним зображенням котушки індуктивності поміщають її символічне літерне позначення (латинська прописна буква L) з порядковим цифровим (іноді буквеним) індексом. Значення індуктивності на схемі, як правило, не вказують (рисунок 4.1).

Дроселі мають таке ж графічне зображення, але позначаються буквами Др.

Основні параметри високочастотних котушок.

Індуктивність характеризує кількість енергії магнітного поля, що запасється котушкою, при протіканні через неї електричного струму. Одиниця вимірювання індуктивності – генрі (Гн) і її частки: мілігенрі (мГн =  $10^{-3}$  Гн) і мікрогенрі (мкГн =  $10^{-6}$  Гн).

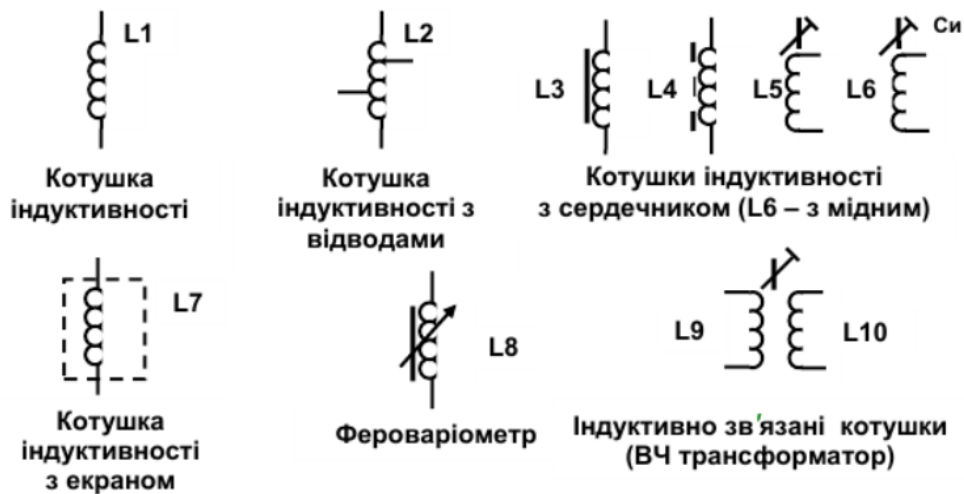


Рисунок 4.1 – Позначення котушок індуктивності на схемах

У радіотехнічній апаратурі використовують високочастотні котушки з індуктивністю від часток мікрогенрі до десятків мілігенрі.

Індуктивність котушки залежить від її форми, розмірів і кількості витків, а також від властивостей осердя або екрана.

Добротність – відношення реактивного опору котушки до її активного опору втрат:

$$Q_L = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{r}, \quad (4.1)$$

де  $r$  – еквівалентний активний опір втрат у котушці на частоті  $f$ .

За аналогією з конденсаторами втрати енергії в котушках індуктивності можна виразити тангенсом кута втрат:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{r}{2\pi \cdot f \cdot L} = \frac{1}{Q}. \quad (4.2)$$

У більшості радіотехнічних пристроїв використовують котушки з добротністю від 40 до 200.

Власна ємність є паразитним (побічним) параметром котушки

індуктивності, вона збільшує втрати, зменшує стабільність і коефіцієнт перестроювання контуру за частотою.

Температурний коефіцієнт індуктивності характеризує відносна зміна індуктивності котушки при зміні температури на 1°C:

$$TKI = \alpha_L = \frac{\Delta L}{L(T_0) \cdot \Delta T}. \quad (4.3)$$

Звичайні циліндричні котушки мають  $TKI = 30 \dots 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , а котушки з керамічним каркасом –  $8 \dots 16 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Стабільність параметрів котушок індуктивності залежить також від вологості, величини атмосферного тиску й тощо.

Промисловість не випускає, як правило, типові високочастотні котушки. Тому для апаратури різного призначення виготовляються по можливості оптимальні індуктивні елементи.

Розрахунок індуктивності деяких типів високочастотних котушок. Наведемо розрахункові формули для найбільш часто використовуваних конструкцій.

Індуктивність прямолінійного провідника з круглим перетином розраховують за формулою:

$$L_{np} = 0,002l \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right), \quad (4.4)$$

де  $[L] = \text{мкГн}$ ;  $[l] = \text{см}$  - довжина провідника;

$[d] = \text{см}$  - діаметр провідника без ізоляції.

Для провідника з плоским перетином у наведену формулу замість діаметра підставляють значення ширини.

До подібних елементів відносяться резонансні кола ДЦХ діапазону, дротяні виводи резисторів, конденсаторів, активних елементів.

Оптимізація добротності котушок індуктивності.

Не менш важливим параметром, ніж індуктивність, при розрахунках індуктивних компонентів контурів, фільтрів, ліній затримки є їхня добротність.

На заданій частоті добротність котушки індуктивності визначають за формулою:

$$Q_L = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{r}, \quad (4.5)$$

де  $r$  - активний опір втрат, що має кілька складових.

Опір втрат можна подати у вигляді суми:

$$r = r_0 + r_f + r_k + r_{\epsilon m} + r_{\epsilon k p} + r_c, \quad (4.6)$$

де  $r_0$  – опір обмотки постійному струму;

$r_f$  – високочастотні втрати;

$r_k$  – втрати в матеріалі каркаса;

$r_{\epsilon m}$  – ємнісні втрати;

$r_{\epsilon k p}$  – втрати в матеріалі екрана;

$r_c$  – втрати в матеріалі сердечника.

Опір високочастотних втрат в обмотці складається із втрат, зумовлених поверхневим (скін) ефектом і ефектом близькості  $r_f = r_{\text{скін}} + r_{\text{близ}}$ . Обидві ці складові мають виражену залежність від діаметра провідника намотки, як показано на рисунку 4.2. Ця властивість використовується для одержання максимальної добротності шляхом вибору оптимального діаметру дроту намотування.

Дроселем високої частоти називають котушку індуктивності, що вмикається в електричне коло для збільшення опору струмам високої частоти. Основні параметри:  $Z_{\text{др}}$  - повний опір,  $R$  - опір постійному струму,  $C_{\text{др}}$  - власна ємність.

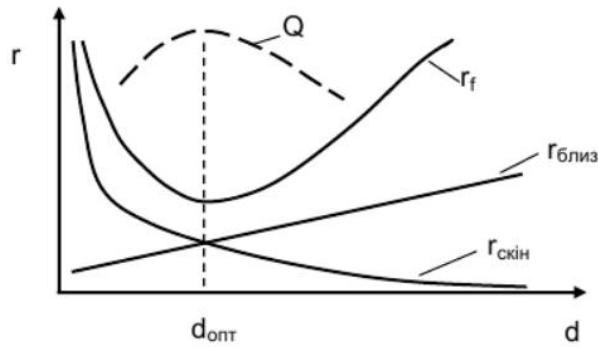


Рисунок 4.2 – Оптимальний діаметр дроту намотки

Повний опір на робочих частотах повинен бути великим і мати індуктивний характер. Власна ємність дроселя (Рисунок 4.3) визначає його критичну частоту  $f_{кр} = 1/(2\pi(L_{др}C_{др})^{1/2})$ , нижче якої розташований робочий інтервал частот.

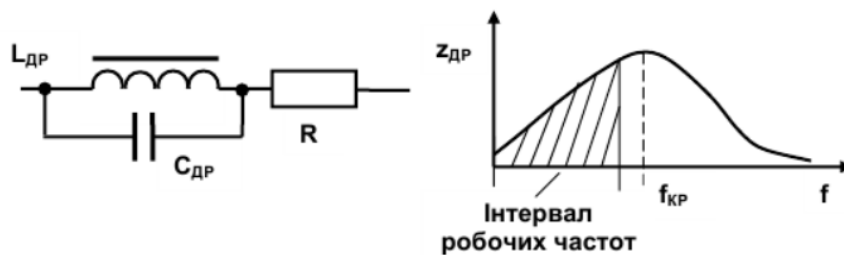


Рисунок 4.3 – Еквівалентна схема й повний опір дроселя

Серійно випускаються ВЧ дроселі типу ДМ із феритовим сердечником. Інтервал індуктивностей 1...500 мкГн. Припустиме значення струму 60 мА.

#### 4.2 Схема заміщення, основні та паразитні параметри

У котушці індуктивності крім основного ефекту – індуктивності – спостерігаються і паразитні. Схема заміщення (Рисунок 4.4а) котушки відображає її основні властивості і містить не тільки основний параметр, індуктивність  $L$ , але і ряд додаткових: індуктивність виводів (враховані в  $L$ ); власну ємність, обумовлену наявністю обмотки, висновків, сердечника і екрану  $Z_L$ ; опір, що відображає втрати в ємності  $R_C$ ; опір, залежне від втрат у котушці

$R_L$ ,  $Z_L$  з  $L$  утворює паралельний резонансний контур. Його резонансна частота  $f_0 = 1 / 2 \pi (LC_0)^{1/2}$ , еквівалентна схема контуру показана на рисунку 4.4, б.

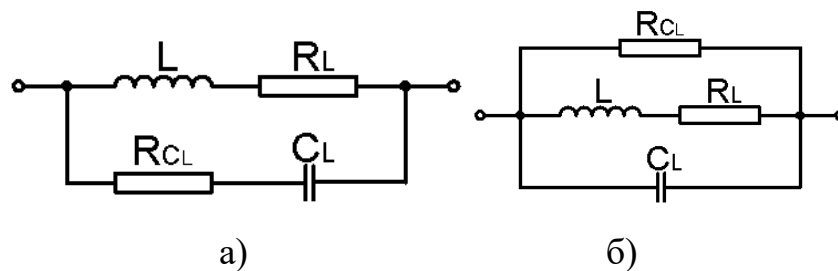


Рисунок 4.4. Схема заміщення котушки (а) та еквівалентна схема контуру (б)

Котушка індуктивності - котушка з дроту з ізольованими витками; володіє значною індуктивністю при відносно малій ємності та малому активному опорі. Призначена для накопичення магнітної енергії, поділу або обмеження електричних сигналів різної частоти і т. д. Індуктивність котушки індуктивності визначається лінійними розмірами котушки, числом витків обмотки і магнітною проникністю навколишнього середовища і провідників; змінюється від десятих часток мкГн до десятків Гн. Інші основні параметри котушки індуктивності: добротність  $Q$  (відношення індуктивного опору до активної), власна ємність, механічна міцність, габаритні розміри, маса. Залежно від конструкції котушки індуктивності діляться на каркасні і безкаркасні, одно-і багат шарові, екрановані і неекрановані, з магнітними сердечниками (з феритовими сердечниками) і без них (Рисунок 4.5). Важливе значення котушок індуктивності з сердечниками - можливість підстроювання (зміна індуктивності котушки індуктивності в певних межах шляхом зміни параметрів сердечника). Котушки індуктивності використовуються в якості одного з основних елементів електричних фільтрів і коливальних контурів, накопичувача електричної енергії та ін. [9].

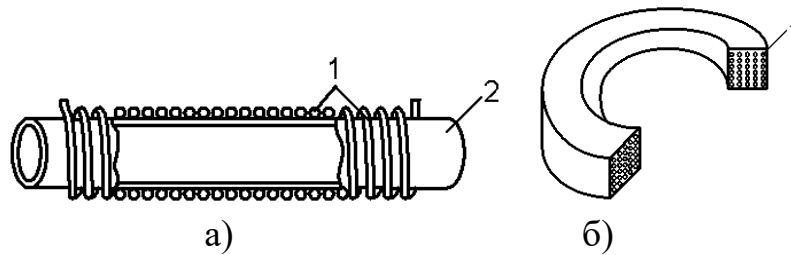


Рисунок 4.5 – Циліндрична одношарова котушка індуктивності (а) та тороподібна багатшарова котушка індуктивності з січенням – квадрат

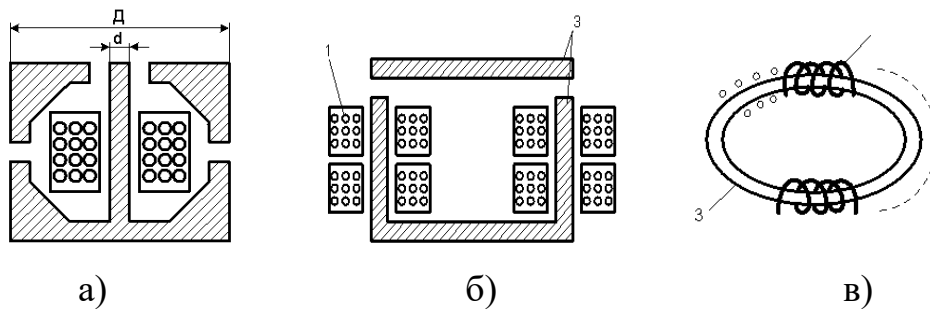


Рисунок 4.6 – Котушка індуктивності з циліндричним осердям (броньовий) (а), котушка індуктивності з П-подібним осердям (б) та зразкова індуктивність на керамічному тороїді (в)

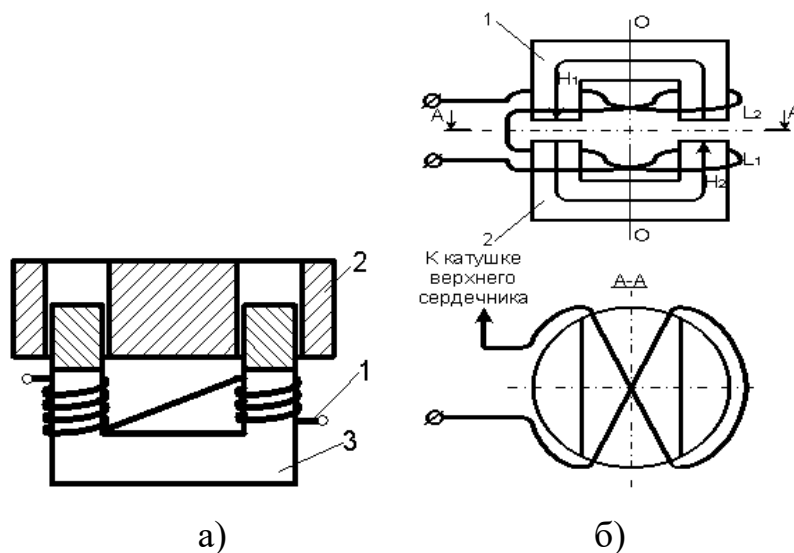


Рисунок 4.6 – Варіометр – котушка з регульованою індуктивністю і поступальним переміщенням осердя (1 - обмотка; 2 - каркас; 3 – осердя) (а) та варіометр з обертовим осердям (1 - ротор; 2 – статор) (б)

Індуктивність котушки, мкГн, може бути розрахована за формулами:

$$L = L_0 W^2 D \cdot 10^{-3} \quad (4.6)$$

Для одношарової котушки:

$$L_0 = f(l_n / D), \quad (4.7)$$

де  $l_n$  - довжина намотування, см;

$D_{\text{сер}} = D_k + d$  - Середній діаметр витка, см;

$D_k$  - діаметр каркаса;

$d$  - діаметр проводу;

$W$  - кількість витків.

Для багатошарової котушки:

$$L_0 = f(l_n / D_{\text{сер}}) \text{ і } L_0 = f(b / D_{\text{сер}}), \quad (4.8)$$

де  $D$  - зовнішній діаметр котушки, см;

$D_{\text{сер}}$  - Середній діаметр котушки, см;

$D_k$  - діаметр каркаса, см;

$b$  - глибина намотування, см.

Важливим параметром котушки при її застосуванні в коливальних контурах є добротність, характеризує відносних рівень активних втрат в її обмотці, власної ємності, сердечнику і екрані:

$$Q = \omega L / R_L \quad (4.9)$$

Властивості котушки при зміні температури описуються температурним коефіцієнтом індуктивності  $\alpha_L$ , що визначається виразом:

$$\alpha_L = \frac{dL \cdot I}{dT \cdot L_{OT}} \quad (4.10)$$

Індуктивність при температурі  $T$  визначається виразом:

$$L(T) = L_{\text{вд}} [1 + \alpha_L (T - T_0)], \quad (4.10)$$

де  $T$  - температура;

$L_{\text{вд}}$  - індуктивність при номінальній температурі;

$T_0$  - номінальна температура.

Зміна параметрів у часі (старіння) характеризується коефіцієнтом старіння:

$$\beta_L = (dL / dt) (1 / L_0), \quad (4.11)$$

де  $t$  - час;

$L_0$  - індуктивність безпосередньо після виготовлення котушки.

Індуктивність після тривалої роботи бути визначена з виразу:

$$L(t) = L_0 (1 + \beta_L t). \quad (4.12)$$

Велике значення мають також конструктивні параметри: надійність, габарити, маса, діапазон температур, вологостійкість, стійкість проти механічних впливів, а також технологічності котушки, можливість її виготовлення з використанням високопродуктивних методів, вартість, узгодженість її конструкції з ІС і можливість виготовлення котушок методами мікроелектроніка. Конструкція і параметри котушки істотно залежать від використання в ній сердечника з високою магнітною проникністю.

### **4.3 Трансформатори**

Трансформатором називається елемент ЕА, призначений для одержання

різних за амплітудою, потужністю й фазою змінних напруг, а також здійснення гальванічної розв'язки в електричному колі.

Трансформатори поділяють на трансформатори живлення (силові), сигнальні (узгоджувальні), імпульсні. Основними елементами трансформатора є магнітопровід (осердя) і розміщені на ньому обмотки (рисунок 4.7).

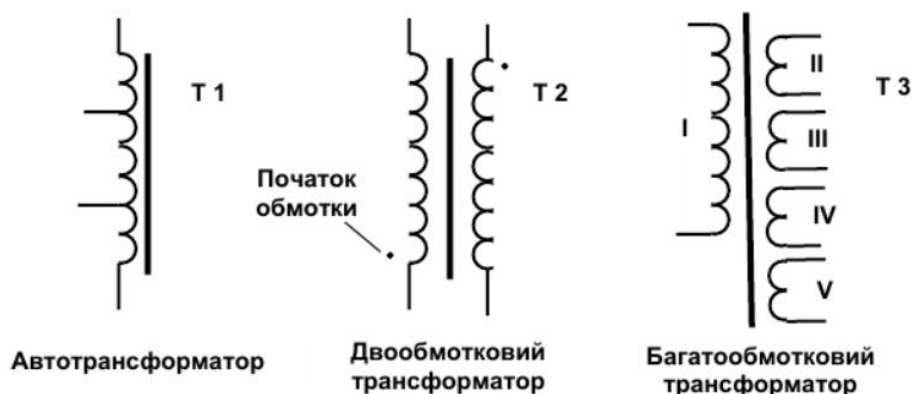


Рисунок 4.7 – Схеми трансформаторів

За видом використовуваного магнітопроводу розрізняють трансформатори з пластинчастим, стрічковим і пресованим осердям.

Маркування трансформаторів.

Трансформатори живлення: перший елемент – буква Т; другий - буква або дві букви (А – трансформатор живлення анодних кіл, Н – трансформатор живлення розжарювальних кіл, АН – трансформатор живлення анодно-розжарювальних кіл, ПП – трансформатор для живлення напівпровідникової апаратури, С – силовий трансформатор для побутової апаратури); третій елемент (число) – номер розробки; четвертий елемент (число) – номінальна напруга живлення (110, 127, 220, 230 В); п'ятий елемент (число) - робоча частота (50, 60, 400, 1000 Гц); шостий елемент - буква або сполучення букв (В - всекліматичного виконання, ТС - для сухого тропічного клімату, ТВ - для вологого тропічного клімату), наприклад ТА5 -127/220 - 50-В.

Сигнальні трансформатори: перший елемент – буква Т; другий елемент – сполучення букв (ВТ – вхідний для транзисторної апаратури, М – міжаскадний, ОТ – вихідний трансформатор для транзисторних пристроїв); третій елемент –

порядковий номер розробки. Наприклад, ТОТ-1 – вихідний трансформатор для транзисторної апаратури.

Імпульсні трансформатори: перший елемент – буква Т; другий елемент – буква І для імпульсів тривалістю 0,5...100 мкс, букви ІМ для імпульсів тривалістю 0,02...100 мкс; третій елемент – порядковий номер розробки.

Основні електричні параметри.

Для трансформаторів живлення:  $U_1$  – напруга на первинній обмотці;  $n$  – коефіцієнт трансформації при розімкнутій вторинній обмотці (у режимі холостого ходу);  $P_n$  – номінальна потужність (сума потужностей вторинних обмоток);  $F$  – частота мережі живлення; ККД – коефіцієнт корисної дії. Існують ряди значень  $P_n$  і  $n$ .

Для сигнальних трансформаторів, крім перелічених вище, виділяють такі параметри: смуга робочих частот, вхідний і вихідний імпеданс на робочих частотах, індуктивності обмоток, опір дроту обмоток постійному струму, коефіцієнт нелінійних спотворень.

Специфічні параметри імпульсних трансформаторів: тривалість імпульсу, частота проходження імпульсів, амплітуда імпульсу на первинній обмотці, спад плоскої вершини вихідного імпульсу, тривалість фронтів вихідного імпульсу.

## ТЕМА 5 КОМУТАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ

### 5.1 Загальні відомості

Комутаційні пристрої (КП) – елементи, які мають властивість з'єднувати та роз'єднувати електричні кола під дією керуючого впливу. У пасивних КП використовують як керовані елементи з'єднання металеві контакти, в активних – стрибкоподібну зміну внутрішнього електричного опору активного елементу. Загальну структуру комутаційних пристроїв показано на рисунку 5.1, а приклади позначень на принципових схемах електричних – на рисунку 5.2.

Пасивні КП умовно можна поділити на такі види: перемикачі, електромагнітні реле, геркони, рознімні з'єднувачі.

Конструкція перемикачів з механічним (ручним) керуванням складається з діелектричної несучої конструкції, на якій розміщені на окремих ізоляторах рухомі й нерухомі металеві контакти. Перемикачі використовують для комутації кіл постійного і змінного струму в радіоелектронній апаратурі, вимірювальних приладах та інших радіотехнічних пристроях.

Рознімні з'єднувачі – призначені для технологічного з'єднання вузлів, блоків, пристроїв, приладів у радіоелектронній системі для забезпечення виконання її цільової функції. З'єднання забезпечується механічним (як правило, ручним) контактом металевих електродів розміщених в вилці і розетці. Кількість гарантованих з'єднань і роз'єднань зумовлюється технічними характеристиками конкретної радіоелектронної конструкції. Розрізняють такі види рознімних з'єднувачів: односигнальні, багатосигнальні (у тому числі шлейфові), низькочастотні, високочастотні, високочастотні коаксіальні, для НВЧ сигналів.



Рисунок 5.1 – Структура комутаційних пристроїв

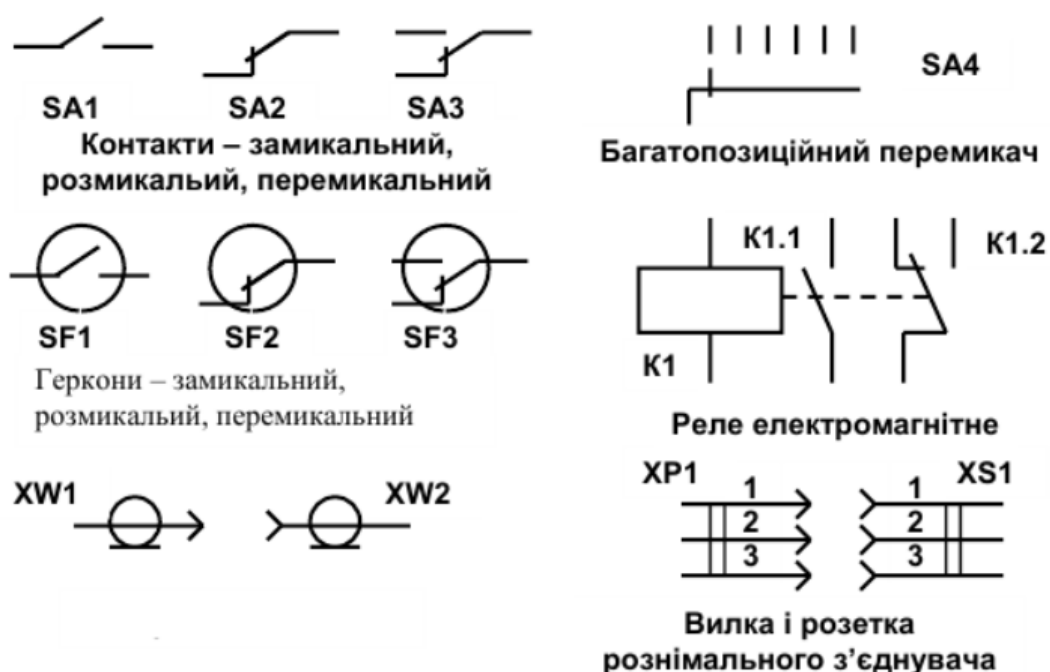


Рисунок 5.2 – Приклади позначень КП на принципових схемах

Електромагнітні реле застосовують для комутації електричних кіл і сигналів у радіоелектронних пристроях зв'язку, автоматики, сигналізації. Реле складається з корпусу, який зазвичай є і частиною магнітопроводу, осердя, котушки електромагніту, якоря, контактної групи, основи, захисного чохла. Поляризовані реле як осердя мають постійний магніт, тому замикання-розмикання контактів залежить від полярності керуючої напруги.

Геркони – елементи, контактна група яких розміщена в герметичному

скляному балоні, а пружна частина рухомого контакту містить магнітні матеріали. Управління з'єднанням здійснюють за допомогою магнітного поля постійного магніту, або електромагніту.

Реле та геркони відносять до КП, у яких коло комутації та коло управління гальванічно роз'єднані, а також місця комутації й управління можуть бути просторово віддалені.

Загальні характеристики КП: чутливість (мінімальна енергія управління), електричні опори замкненого й розімкненого станів, кількість контактів, час спрацьовування, максимальні потужність, напруга та струм, що комутуються, умови експлуатації, маса та габарити.

## ТЕМА 6 АКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

### 6.1 Напівпровідникові діоди

Під діодом звичайно розуміють електровакуумні або напівпровідникові прилади, які пропускають змінний електричний струм тільки в одному напрямку і мають два контакти для включення в електричний ланцюг. Одностороння провідність діода є його основною властивістю. Це властивість і визначає призначення діода:

- Перетворення високочастотних модульованих коливань в струми низької частоти (детектування);
- Випрямлення змінного струму в постійний.

Існують різні види напівпровідникових діодів - випрямні, імпульсні, тунельні, лавино-пролітні, опорні (стабілітрони), з регульованою ємністю (варикапи) і тощо.

По вихідному напівпровідниковому матеріалу діоди поділяють на чотири групи:

- германієві;

кремнієві діоди мають малі зворотні струми, для них характерна більш висока робоча температура (150-200 °С проти 80-100 °С), витримують великі зворотні напруги, крім того, кремній – широко поширений елемент (на відміну від германія, який відноситься до рідкоземельних елементів);

- з арсеніду галію;
- фосфіду індію.

Германієві діоди використовуються широко в транзисторних приймачах, так як мають вищий коефіцієнт передачі, ніж кремнієві. Це пов'язано з їх більшою провідністю при невеликій напрузі (близько 0,1 ... 0,2 В) сигналу високої частоти на вході детектора і порівняно малому опорі навантаження (5 ... 30 кОм).

За конструктивно-технологічною ознакою розрізняють діоди точкові і площинні.

Точковий діод утворюють за допомогою Si або Ge пластини n-типу площею 0,5-1,5 мм<sup>2</sup> і сталевій голки, що утворює р-n-перехід в місці контакту. У результаті малої площі перехід має малу ємність, отже, такий діод здатний працювати в високочастотних схемах. Але струм через перехід не може бути великим (звичайно не більше 100 мА).

Площинний діод складається з двох з'єднаних Si або Ge пластин з різною електропровідністю. Велика площа контакту веде до великої ємності переходу і відносно низької робочої частоти, але прохідний струм може бути великим (до 6000 А).

За призначенням напівпровідникові діоди поділяють на такі основні групи:

- випрямні,

- універсальні,

- імпульсні, Імпульсні діоди застосовуються в малопотужних схемах з імпульсним характером напруги. Головна вимога до них – малий час переходу із закритого стану у відкритий і назад (0,1-100 мкс).

- варикапи, Варикапи (діод Джона Джеума). Завдяки тому, що закритий р-n-перехід має чималу ємність, що залежить від прикладеної зворотної напруги, застосовується в якості конденсаторів змінної ємності.

- стабілітрони (опорні діоди), Стабілітрони – використовують зворотню гілку характеристики діода з пробоем для стабілізації напруги. Ці напівпровідникові прилади також мають два виводи: анод і катод. У прямому напрямку (від анода до катода) стабілітрон працює як діод, вільно пропускаючи струм. У зворотному напрямку він спочатку не пропускає струм, але при збільшенні напруги, що на нього подається, він «пробивається» і починає пропускати. Напруга «пробою» називається напругою стабілізації. Вона буде залишатися незмінною навіть при значному збільшенні вхідної напруги. Завдяки цій властивості стабілітрон застосовується в тих випадках, коли треба отримати стабільну напругу живлення якого-небудь пристрою при коливаннях, наприклад мережевої напруги.

– стабістор;

– тунельні діоди, це напівпровідниковий діод на основі виродженого напівпровідника, в якому тунельний ефект призводить до появи на вольт-амперній характеристиці при прямій напрузі ділянки з негативною диференціальною провідністю. Застосовуються як підсилювачі, перетворювачі, генератори сигналів та ін.

– обернені діоди, Обернені діоди виготовляють при концентрації домішок в р- і n-областях більшій, ніж у звичайних випрямних діодів. Такі діоди мають малий опір при проходженні струму при зворотному включенні і порівняно великий опір при прямому включенні. Тому їх застосовують при випрямленні малих сигналів з амплітудою напруги в декілька десятих вольтів.

– лавинно-пролітні (ЛПД), Напівпровідниковий лазер – твердотільний лазер, в якому в якості робочої речовини використовується напівпровідник. У такому лазері, на відміну від лазерів інших типів (в тому числі й інших твердотільних), використовуються випромінювальні переходи не між ізольованими рівнями енергії атомів, молекул та іонів, а між дозволеними енергетичними зонами або підзонами кристалу. У напівпровідниковому лазері накачування здійснюється безпосередньо електричним струмом (пряме накачування); електронним пучком; електромагнітним випромінюванням.

Оскільки в напівпровідниковому лазері збуджуються і колективно випромінюють атоми, що складають кристалічну решітку, сам лазер може мати дуже малі розміри. Іншими особливостями напівпровідникових лазерів є високий ККД, мала інерційність, простота конструкції.

– тиристоры,

– фотодіоди, Фотодіоди. Замкнений фотодіод відкривається під дією світлового випромінювання. Застосовуються в якості датчиків світла, руху тощо.

– світлодіоди. Світлодіоди (діоди Генрі Раунду, LED). При переході електронів, у таких діодів відбувається випромінювання у видимому діапазоні світла.

– оптрони.

Діоди характеризуються такими основними електричними параметрами:

- струмом, що проходить через діод в прямому напрямі (прямий струм  $I_{пр}$ );
- струмом, що проходить через діод у зворотному напрямку (зворотний струм  $I_{зв}$ );
- найбільшим допустимим випрямленим струмом  $I_{випр.макс}$ ;
- найбільшим допустимим прямим струмом  $I_{пр.доп.}$ ;
- прямим напругою  $U_{пр}$ ;
- зворотною напругою  $U_{обр}$ ;
- найбільшим допустимим зворотним напругою  $U_{обр.макс}$ ;
- ємністю  $C_d$  між висновками діода;
- габаритами і діапазоном робочих температур.

## 6.2. Система позначень

У відповідності до системи позначень, розробленої до 1964 р., скорочене позначення діодів складалося з двох або трьох елементів. Перший елемент буквенний, Д – діод. Другий елемент – Номер, відповідний типу діода: 1 ... 100 – точкові германієві, 101 ... 200 – точкові кремнієві, 201 ... 300 – площинні кремнієві, 801 ... 900 – стабілітрони, 901 ... 950 – Варикапи, 1001 ... 1100 – випрямні стовпи. Третій елемент – буква, що означає різновид приладу. Цей елемент може бути відсутнім, якщо різновидів діода немає.

В даний час існує система позначень, відповідна ГОСТ 10862-72. У новій, як і в старій системі, прийнято наступне поділ на групи по граничній (граничній) частоті підсилення (передачі струму) на низькочастотні НЧ (до 3 МГц), середньої частоти СЧ (від 3 до 30 МГц), високочастотні ВЧ (понад 30 МГц) і надвисокочастотні СВЧ; по потужності, що розсіюється – на малопотужні. (До 0,3 Вт), середньої (від 0,3 до 1,5 Вт) і великий (понад 1,5 Вт) потужності.

Нова система маркування діодів більш досконала. Вона складається з чотирьох елементів. Перший елемент (буква або цифра) вказує вихідний напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлений діод: Г або 1 – германій \* До або 2 – кремній, А або 3 – арсенід галію, І або 4 – фосфід індію. Другий елемент – буква, що показує клас або групу діода. Третій елемент – Число, що визначає призначення або електричні властивості діода. Четвертий елемент вказує порядковий номер технологічної розробки діода і позначається від А до Я. Наприклад, діод КД202А розшифровується: К – матеріал, кремній, Д – діод випрямний, 202 – призначення і номер розробки, А – різновид; 2С920 – кремнієвий стабілітрон великої потужності різновиди типу А; АІ301Б – фосфід-індієвий тунельний діод перемикає різновиди типу Б.

Іноді зустрічаються діоди, позначені по застарілих систем: ДГ-Ц21, Д7А, Д226Б, Д18. Діоди Д7 відрізняються від діодів ДГ-Ц суцільнометалевою конструкцією корпусу, внаслідок чого вони надійніше працюють у вологій атмосфері. Германієві діоди типу ДГ-Ц21 ... ДГ-Ц27 і близькі до них за характеристиками діоди Д7А ... Д7Ж зазвичай використовують у випрямлячах для живлення радіоапаратури від мережі змінного струму. В умовне позначення діода не завжди входять деякі технічні дані, тому їх необхідно шукати в довідниках по напівпровідниковим приладам. Одним із винятків є позначення для деяких діодів з буквами КС або цифрою замість К (наприклад, 2С) – кремнієві стабілітрони і Стабістор. Після цих позначень стоїть три цифри, якщо це перші цифри: 1 або 4, то взявши останні дві цифри і розділивши їх на 10 одержимо напругу стабілізації  $U_{ст}$ . Наприклад, КС107А – Стабістор,  $U_{ст} = 0,7$  В, 2С133А – стабілітрон,  $U_{ст} = 3,3$  В.

Якщо перша цифра 2 або 5, то останні дві цифри показують  $U_{ст}$ , наприклад, КС 213Б –  $U_{ст} = 13$  В, 2С 291А –  $0U_{ст} = 91$  В, якщо цифра 6, то до останніх двох цифр слід додати 100 В, наприклад, КС 680А –  $U_{ст} = 180$  В.

### 3.3 Маркування діодів

На корпусі діода зазвичай вказують матеріал напівпровідника, з якого він виготовлений (буква або цифра), тип (буква), призначення чи електричні властивості приладу (цифра), букву, відповідну різновиди приладу, і дату виготовлення, а також його умовне позначення. Умовне позначення діода (анод і катод) вказує, як потрібно підключати діод на платах пристроїв. Діод має два висновки, один з яких катод (мінус), а інший – анод (плюс). Умовне графічне зображення на корпусі діода наноситься у вигляді стрілки, що вказує пряме напрямком, якщо стрілки немає, то ставиться знак «+». На плоских висновках деяких діодів (наприклад, серії Д2) прямо виштамповано умовне позначення діода і його тип. При нанесенні колірною коду, кольорову мітку, точку або смужку наносять ближче до анода (Рисунок 2.1). Для деяких типів діодів використовується кольорове маркування у вигляді крапок і смужок (табл. 2.1). Діоди старих типів, зокрема точкові, випускалися в скляному оформленні та маркувалися літерою «Д» з додаванням цифри і букви, що позначають підтип приладу. Германієвих-індієвий площинні діоди мали позначення «Д7».

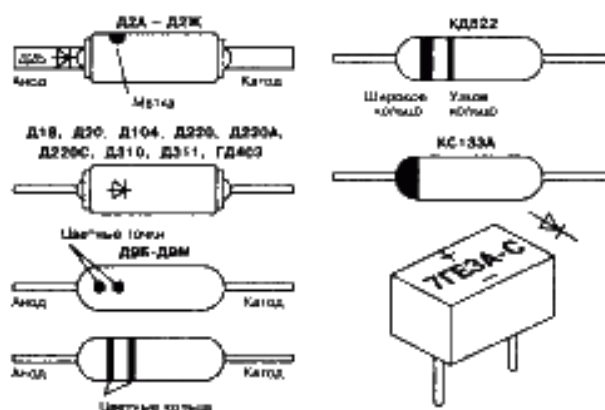


Рисунок 6.1 – Нанесення колірною коду на діоди

На схемах діоди мають умовне графічне позначення подібне до стабілітронів, тунельних діодів та інших різновидів. Умовне графічне зображення діода та схема включення подана на рисунку 6.2.

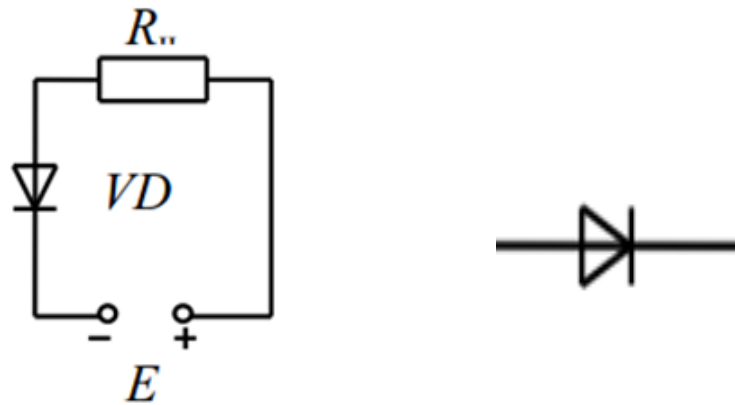


Рисунок 6.2 – Умовне графічне зображення діода та схема включення

#### Типові несправності діодів

Втрата працездатності діодів і стабілітронів може наступити внаслідок:

- обриву ланцюга всередині приладу (згоряння);
- втрати замикаючої здатності (пробою);
- обриву виводів. Непрацездатний діод (або стабілітрон) може бути

визначений за допомогою вольтметра змінного струму або омметра.

Непрацездатний діод (або стабілітрон) у схемі випрямлення, що під напругою, може бути визначений за допомогою вольтметра шляхом вимірювання напруги на всіх діодах (або стабілітронах).

Навантаження схеми повинно бути включене, а ємнісний фільтр на виході схеми відключений.

При згорянні діода (стабілітрона) напруга на ньому буде завжди більша, ніж на справному. При пробі напруга буде дорівнює нулю або мало відрізнятиметься від нуля.

Непрацездатний діод (стабілітрон) може бути визначений за допомогою омметра шляхом вимірювання опору діода в обох напрямках.

У справних діодів (стабілітронів) опір залежить від типу, сили вимірювального струму і температури середовища і коливається в межах від одиниць до сотень (десятьків) кілоом в прямому напрямку та до десятків мегаом – у зворотньому напрямку.

Селенові стовпи і високовольтні діоди, у яких пряме падіння напруги більше напруги джерела живлення омметра, показуватимуть нескінченно велике як зворотне, так і пряме значення опору.

Їх справність можна перевірити напругою мережі. Для цього до одного виводу діода під'єднують резистор опором 100-200 кОм, до іншого – конденсатор ємністю 0,01-0,1 мкФ на номінальну напругу не менше 400 В.

Непідключені виводи резистора і конденсатора включають у мережу. При справному діоді конденсатор зарядиться до напруги, величина якої дорівнює різниці між амплітудним значенням мережевої напруги (310 В) і прямим падінням напруги в діоді. Наявність напруги на конденсаторі перевіряють виникненням іскри розряду при замиканні його виводів.

Для перевірки справності стабілітронів слід визначити прямий опір, який відповідає кремнієвим діодам.

Справність варикапів перевіряють так само, як і імпульсних діодів.

Фотодіод вважається справним, якщо його зворотний опір під дією світла зменшується від декількох мегаом до декількох десятків кілоом.

Для встановлення справності світлодіода перевіряють прямий опір, який дорівнює кільком сотням Ом. Напруга джерела живлення омметра має бути не менше 4 В [17]

Перевірка світлодіода за допомогою мультиметра. Необхідно його анодний вивід підключити до колодки PNP (транзистори PNP структури) – в роз'єм Е (емітер), а вивід катода в роз'єм С (колектор) тієї ж PNP колодки, то якщо мультиметр включений і світлодіод справний – то він засвітиться.

Перевірка діода за допомогою осцилографа. Якщо на екрані з'явилася вертикальна лінія – в діоді наявне коротке замикання, горизонтальна – обрив. Якщо зображення окреслює один з квадрантів – діод справний. Перевірка стабілітронів проводиться аналогічно перевірці діодів. При каліброваному масштабі горизонтальної розгортки осцилографу по відстані між вертикальними лініями визначають значення напруги стабілізації (рисунок 6.3).

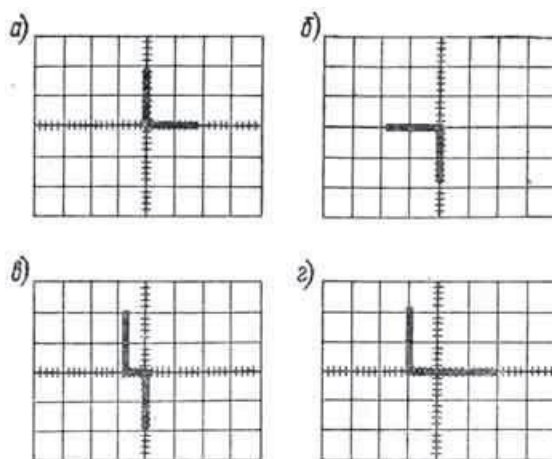


Рисунок 6.3 – Осцилограми при дослідженні діодів (а, б) і стабілітронів (в, г)

## ТЕМА 7 ТРАНЗИСТОРИ

### 7.1 Біполярні транзистори

Структура і принцип дії біполярного транзистора. Схеми включення (СЕ, СБ, СК).

Напівпровідниковий прилад, що має три електроди і два взаємодіючих між собою р-п-переходи, називається біполярним транзистором.

Статичні ВАХ і параметри для основних схем включення. Біполярний транзистор був винайдений американськими фізиками Джоном Бардіном і Уолтером Браттейном в 1948 р. Вони разом з американським фізиком Вільямом Шоклі в 1956 р. були нагороджені Нобелівською премією за дослідження напівпровідників і відкриття транзисторного ефекту.

Конструкції першого біполярного транзистора (БТ) наведена на рисунку 4.1. До платівки монокристалічного германію п-типу 1 з силою втискався пластмасовий трикутник 2, обгорнутий золотою фольгою 3. На вершині трикутника фольга розрізали бритвою. У місці дотику фольги з поверхнею пластини утворюються області р-типу: емітер 4 і колектор 6. Між ними розташовується база 5. На рисунку 6.1, б наведено зображення першого промислового біполярного транзистора, де 1 – Контакт емітера; 2 – контакт колектора, 3 – корпус, 4 – ізолююча прокладка, 5 – контактна проволочка; 6 – кристал германію; 7 – контакт до бази. Емітерний та колекторний переходи виготовлялися вплавленням в германієвий кристал тонких зволікань. Діаметр транзистора становив 1 см, висота 4 см.

Пристрій, позначення і включення біполярних транзисторів п-р-п-і р-п-р-типу в активному режимі (режим підсилення) показано на рисунку 7.2.

Біполярним транзистор називається тому, що в ньому використовуються носії заряду двох видів: електрони і дірки. Слово «транзистор» (від англійської transfer resistor) означає, що цей прилад узгодить низькоомних вхідний ланцюг емітера з високоомної вихідним ланцюгом колектора, третій електрод - база - є керуючим.

Основними матеріалами для виготовлення біполярних транзисторів служать кремній, германій і арсенід галію. За технологією виготовлення вони діляться на сплавні, дифузійні та епітаксialьні.

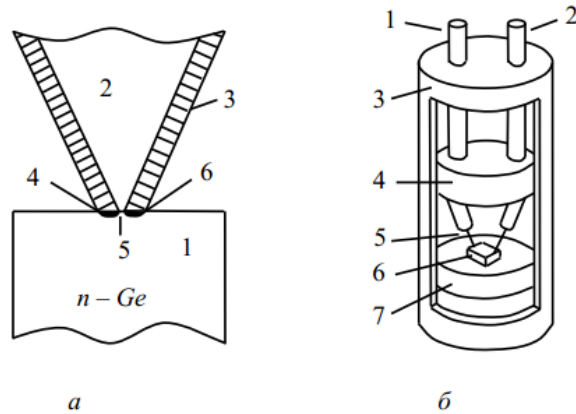


Рисунок 7.1 – Конструкції першого біполярного транзистора (а) і перший промисловий зразок (б)

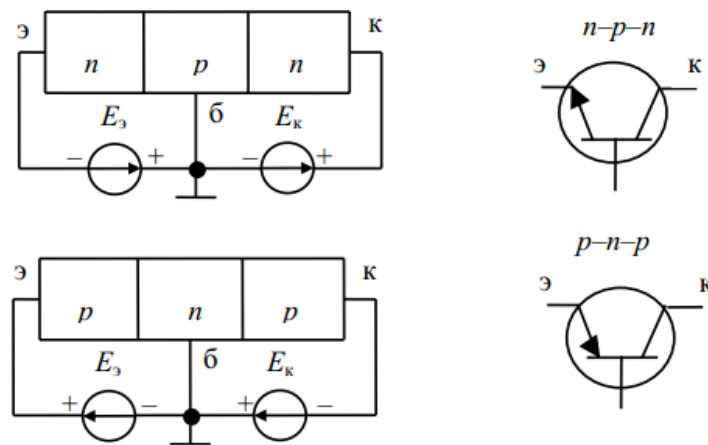


Рисунок 7.2 – Пристрій, умовне позначення і включення біполярних транзисторів в активному режимі

Біполярні транзистори - активні прилади, що дозволяють посилювати, генерувати і перетворювати електричні коливання в широкому діапазоні частот і потужностей. Відповідно до цього їх можна розділити на низькочастотні (до 3 МГц), середньочастотні (3...30 МГц), високочастотні (30...300 МГц), надвисокочастотні (більше 300 МГц). За потужністю їх можна розділити на малопотужні (не більше 0,3 Вт), середньої потужності (0,3...1,5 Вт) і великої

потужності (більше 1,5 Вт).

Залежно від того, який з електродів транзистора є загальною точкою дії вхідної і вихідної напруги, розрізняють три основні схеми включення БТ: схема із спільним емітером (СЕ), схема з спільною базою (СБ) і схема із спільним колектором (СК), звана також емітерним повторювачем.

Принцип роботи, характеристики і параметри біполярних транзисторів зручно розглядати на прикладі широко використовуваної на практиці схеми включення транзистора із загальним емітером. Ця схема дає найбільше посилення по струму, напрузі і потужності. На схемі показані включені в ланцюг бази джерело живлення  $E_b$  з резистором  $R_b$  для завдання режиму роботи транзистора по постійному струму і джерело живлення  $E_k$  ланцюга колектора з навантажувальним резистором  $R_k$ .

## 7.2 Маркування транзисторів.

Позначення та маркування транзисторів здійснюються за принципом, подібним до принципу, що використовується для діодів.

Перша буква (або цифра) позначає матеріал:

- Г (або 1) - германій (Ge);
- К (або 2) - кремній (Si);
- А (або 3) - арсенід галію (GaAs);
- Друга буква – тип приладу;
- Т - біполярний транзистор;
- П - польовий транзистор.

Далі йдуть три (або чотири) цифри, перша з яких (третій символ) позначає розсіювану потужність та частотні властивості транзистора:

- низькочастотний;
- середньочастотний малої потужності;
- високочастотний;
- низькочастотний;

- середньочастотний середньої потужності;
- високочастотний;
- низькочастотний;
- середньочастотний великої потужності;
- високочастотний.

Наступні дві (три) цифри вказують номер розробки і, відповідно, визначають параметри конкретного транзистора, котрі вказуються в каталогах виробника або довідниках.

Далі можуть йти літери, що відрізняють транзистори даної розробки. Наприклад: КТ815Г – кремнієвий біполярний середньочастотний транзистор великої потужності,

ГТ349А – германієвий біполярний високочастотний транзистор малої потужності,

2П103А – кремнієвий польовий низькочастотний транзистор малої потужності.

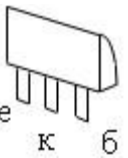
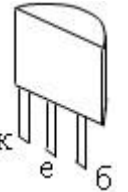
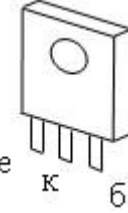
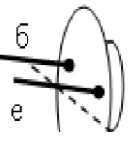
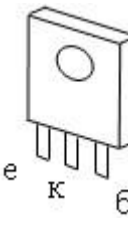
В таблицях наведені зовнішній вигляд деяких транзисторів і вказані їх найважливіші параметри.

$I_{кбо}$  – зворотний струм колектора (струм через колекторний перехід при заданій зворотній напрузі колектор-база і розімкненому виводі емітера)  $U_{ке макс}$  – максимально припустима напруга колектор-емітер.

$h_{21e}$  – статичний коефіцієнт передачі струму біполярного транзистора (відношення постійного струму колектора до постійного струму бази для заданої зворотної постійної напруги колектор-емітер в схемі зі спільним емітером)

$f_{гр}$ , МГц – гранична частота коефіцієнта передачі струму в схемі зі спільним емітером (частота, для якої модуль коефіцієнта передачі струму в схемі зі спільним емітером прямує до одиниці)


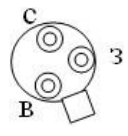

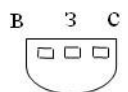

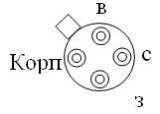

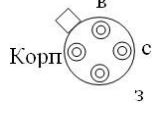

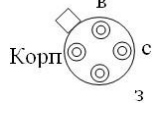

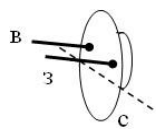
Таблиця 7.1 – Маркування біполярних транзисторів

Назва	Тип	$I_{кб0}$ , мА (мкА)	$U_{ке, макс}$ , В	$h_{21e}$	$f_{зр}$ , МГц	$I_{к макс}$ ( $i$ ), А	$P_{к, макс}$ Вт	Зовнішн. вигляд транзистора
КТ315А	<i>n-p-n</i>	(<0,5)	25	30-120	>250	0,1	0,15	
КТ361А	<i>p-n-p</i>	(<1)	25	20-90	>250	0,05	0,15	
КТ502А	<i>p-n-p</i>	(<1)	40	40-120	5-50	0,15	0,35	
КТ503А	<i>n-p-n</i>	(<1)	40	40-120	5-50	0,15	0,35	
КТ814А	<i>p-n-p</i>	0,5	40	>40	>3	1,5(3)	1	
КТ815А	<i>n-p-n</i>	0,5	40	>40	>3	1,5(3)	1	
КТ825Г	<i>p-n-p</i>	<1	90	750	>4	20(30)	125	
КТ827Б	<i>n-p-n</i>	<3	80	>750	>4	20(40)	125	
КТ846А	<i>n-p-n</i>	<1	1500	>4	2	5(7)	12	
КТ972	<i>n-p-n</i>	<1	60	>750	>200	4	8	
КТ973	<i>p-n-p</i>	<1	60	>750	>200	4	8	

$I_{к макс(i)}$  – максимально припустимий (імпульсний) струм колектора

$P_{к макс}$  – максимально припустима постійна розсіювана потужність колектора транзистора без тепловідводу (без радіатора)

Таблиця 7.2 – Маркування польових транзисторів

Назва	Тип	$I_{c\text{ поч.}}$ , мА (мкА)	$U_{св, макс}$ В	$S$ , мА(А)/ В	$U_{зв, відс}$ В	$I_{с макс}$ ( $i$ ), мА ( $A$ )	$P_{с, макс}$ Вт	Зовнішн. вигляд транзистора (вигляд знизу)
КП103Е 	$p$ - $n$ перехід з $r$ каналом	0,3-2,5	10	0,4-2,4	< 2,4		0,07	
КП103ЕР1 	$p$ - $n$ перехід з $r$ каналом	0,3-2,5	10	0,4-2,4	< 2,4		0,07	
КП302А 	$p$ - $n$ перехід з $n$ каналом	3-24	20	>5	< -5	24	0,3	
КП303А 	$p$ - $n$ перехід з $n$ каналом	0,5-2,5	25	1-4	< -3	20	0,2	
КП305Д 	ізолюваний затвор вбудован. $n$ -канал	4	15	5-10	>-6	15	0,15	
КП802А 	$p$ - $n$ перехід з $n$ каналом		500	>800	-25	2500	40	

$I_{c\text{ поч.}}$ , мА(мкА) – початковий струм стоку польового транзистора (струм для випадку, коли напруга між затвором і витоком дорівнює нулю і коли напруга між стоком і витоком більше напруги насичення)

$U_{св макс}$ , В – максимально допустима постійна напруга між стоком і витоком  $S$ , мА(А)/В – крутизна характеристики польового транзистора

(відношення зміни струму стоку до зміни напруги на затворі для випадку короткого замикання за змінним струмом на виході транзистора зі спільним витоком).  $U_{зв\ відс}$ , В – напруга відсічки польового транзистора (напруга між затвором і витоком польового транзистора з р-n переходом або з ізольованим затвором, який працює в режимі збіднення, для якої струм стоку досягає заданого малого рівня)

$I_{с\ макс}$  (і), мА(А) – максимально припустимий струм стоку

$P_{с\ макс}$ , Вт – максимально припустима постійна розсіювана потужність на транзисторі без тепловідводу (без радіатора) [9].

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 2783-94 Монтаж електричний радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні вимоги до монтажу виробів електронної техніки та електротехнічних на друковані плати. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=96130](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96130) (дата звернення 15.05.2025 р).

2. ДСТУ 2783-94 Монтаж електричний радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні вимоги до монтажу виробів електронної техніки та електротехнічних на друковані плати. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=96130](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96130) (дата звернення 15.05.2025 р)

3. Кузьмичев А. І., Писаренко Л. Д., Цибульський Л. Ю. Технологічні основи електроніки. Кн. 1: Технологія виробництва мікросхем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 127 с.

4. Новіков В. О., Рожко Ж. А., Богуш А. Р., Грінько С. С. Теоретичні та практичні основи електроніки. Херсон, Херсонський національний технічний університет, 2022. 146 с.

5. Піддубний В. О., Товкач І. О. Елементна база радіоелектронної апаратури. В 4 ч. Ч. 1.: Пасивні радіокомпоненти. Навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 98 с.

6. Піддубний В. О., Товкач І. О. Елементна база радіоелектронної апаратури. В 4 ч. Ч. 2. Напівпровідники та діоди. Навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 117 с.

7. Піддубний В. О., Товкач І. О. Елементна база радіоелектронної апаратури. В 4 ч. Ч. 3. Багатоперехідні структури. Навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 134 с.

8. Піддубний В. О., Товкач І. О. Елементна база радіоелектронної апаратури. В 4 ч. Ч. 4. Основи мікроелектроніки. Навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 119 с.

9. Кевшин А. Г., Галян В. В. Основи електроніки : конспект лекцій. Луцьк, 2025. 101 с. URL: [https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/27378/3/Electronics\\_LectureNotes.pdf](https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/27378/3/Electronics_LectureNotes.pdf) (дата звернення 20.05.2025 р).

E50

Елементи електронних пристроїв. Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво, спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка, денної та заочної форми навчання / уклад. В. Д. Чалий, С. А. Мороз. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 86 с.

Комп'ютерний набір  
Редактор

Сергій МОРОЗ  
Василь ЧАЛИЙ

Підп. до друку «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.  
Формат 60x84/16. Папір офс.  
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. \_\_\_\_.  
Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції  
Луцького національного технічного університету  
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75  
Друк – ВІП ЛНТУ