

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
"Харківський авіаційний інститут"

В.П. Олійник, Р.В. Колесник, С.М. Куліш, М.В. Долженков

**ПАСИВНІ ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТИ  
(елементна база радіоелектронних апаратів)**

*Навчальний посібник*

Харків «ХАІ» 2009

УДК 621.31 (075.8)

Пасивні електрорадіоелементи (елементна база радіоелектронних апаратів): навч. посіб. / В.П. Олійник, Р.В. Колесник, С.М. Куліш, М.В. Долженков. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т „Харк. авіац. ін-т”, 2009. – 65 с.

Наведено структуру елементної бази радіо- і електронних апаратів. Розглянуто функціональне призначення, основні електричні й експлуатаційні параметри і особливості застосування резисторів, конденсаторів, індуктивних компонентів та інших пасивних елементів функціональної електроніки.

Для студентів, що навчаються за напрямками «Радіоелектронні апарати», «Радіотехніка», «Телекомунікації», а також фахівців з проектування, конструювання і експлуатації радіоелектронних засобів.

Іл. 54. Табл. 14. Бібліогр.: 7 назв

Р е ц е н з е н т и: канд. техн. наук, проф. М.С. Макурін,  
канд. техн. наук В.І. Огар

© Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2009 р.

## 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, маркування, що утруднює роботу радіоінженера з вибору оптимальної елементної бази для конкретного виробу.

Тому в даному навчальному посібнику особливу увагу приділено групам електричних параметрів, які однозначно характеризують властивості, призначення, надійність елементів незалежно від конкретного виробника (фірми, країни), але за наявності достовірної технічної документації. Першою при вивченні логічно розглянути групу основних пасивних елементів.

## 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТІВ

Розробку й промислове виробництво електрорадіоелементів 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 фірм-виробників. Усі радіоелементи, що випускаються промисловістю, можна розділити на класи, групи за рядом найважливіших ознак – фізичними, функціональними, технологічними та ін. На рис. 1.1 показано варіант можливої побудови такої системи.

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. Напряга 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.

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.

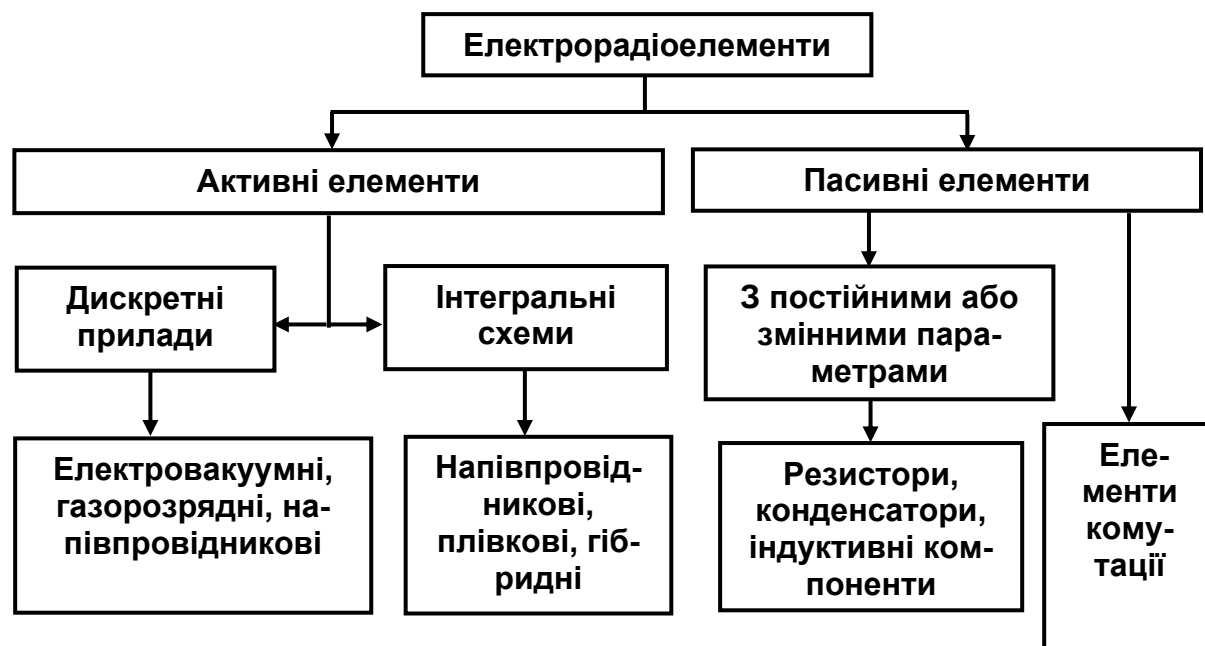


Рис. 1.1. Класифікація електрорадіоелементів

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).

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

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 паскалів залежно від призначення приладу); напівпровідникові прилади (НПП).

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 плівок 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.

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.

## 2. РЕЗИСТОРИ

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 (рис. 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.

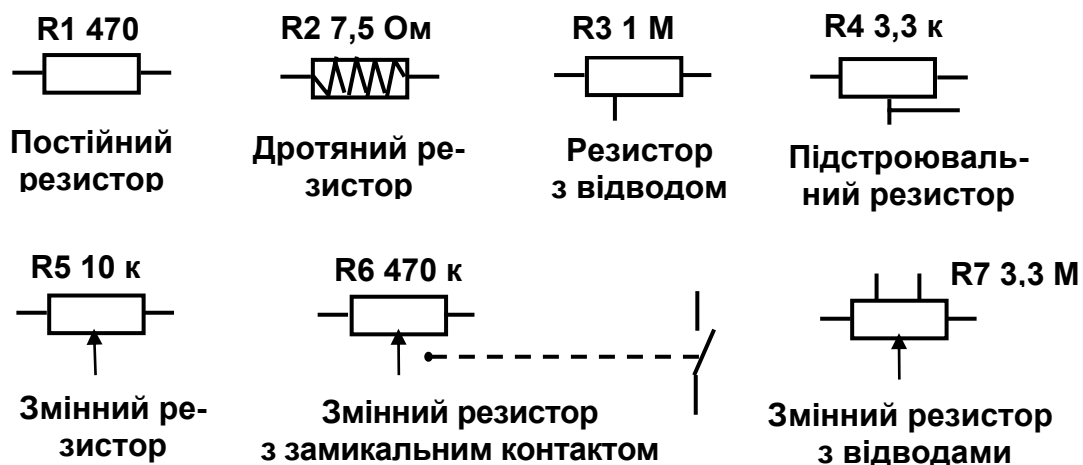


Рис. 2.1. Позначення резисторів на принципових схемах

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 (рис. 2.2).

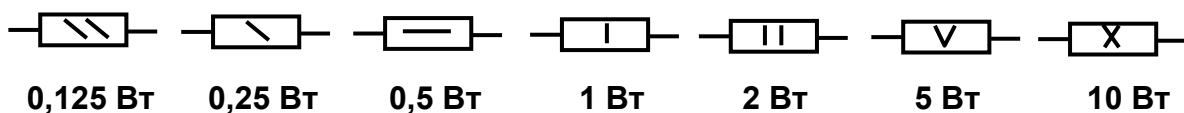


Рис. 2.2. Позначення номінальної потужності резисторів

## 2.1. 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.

Значення опорів можуть відхилятися 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

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

$$P_{\text{пит}} = P_{\text{ном}} / S_R ,$$

де  $S_R$  – площа поверхні охолодження резистора. Енергія, що виділяється, призводить до підвищення температури резистора (перегріву) на величину

$$\Delta T = P_{\text{пит}} / K ,$$

де  $K$  - коефіцієнт теплопередачі.

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

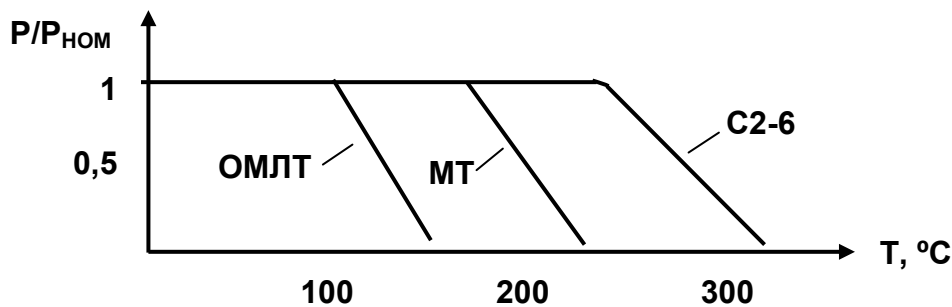


Рис. 2.3. Залежність потужності розсіювання від температури

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

$$U_{\text{max}} = \sqrt{P_{\text{ном}} \cdot R_{\text{ном}}} .$$

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

$$U_{\text{пр}} = 4 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{\rho \cdot \ell} ,$$

де  $\rho$  - тиск навколишнього середовища, Па;  $\ell$  - довжина резистора, см.

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

$$\alpha_R = \frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{R_0} ,$$

де  $R_0$  - опір резистора за номінальної температури. Приймають  $\alpha_R$  сталою величиною в усьому інтервалі робочих температур або у двох інтервалах від  $25^\circ\text{C}$  і вище та від  $25^\circ\text{C}$  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

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

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  $f_2$  і за температури  $T=300$  К визначається за формулою

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

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 мікрвольтів.

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 вакуумно-щільної герметизації.

Після припинення впливу вологи номінальний опір резистора може не відновлюватися.

Коефіцієнт старіння характеризує стабільність опору резисторів у часі:

$$\beta_R = \frac{dR}{dt} \cdot \frac{1}{R_0}$$

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).

Таблиця 2.2

Постійні	Змінні	Тип резистора
Р1 (С1)	РП1 (СП1)	Тонкоплівкові вуглецеві
Р2 (С2)	РП2 (СП2)	Тонкоплівкові металоплівкові, металоокисні
Р3 (С3)	РП3 (СП3)	Плівкові композиційні
Р4 (С4)	РП4 (СП4)	Об'ємні композиційні
Р5 (С5)	РП5 (СП5)	Дротяні

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 Е. 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 5 к; 500 Ом – к5; 4,7 кОм – 4к7.

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.

Таблица 2.3

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 ізолювані; 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 магнаніну й константану. Для маркування раніше випущених резисторів застосовувалися позначення: ПЭ – дротяні емальовані; ПЭВ – дротяні емальовані вологостійкі.

## 2.2. 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 рухомим контактом і одним з нерухомих контактів від кута повороту -  $R(\varphi)$  (або координати для лінійних резисторів). Найпоширеніші залежності показано на рис. 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 оберненологіфімічною 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.

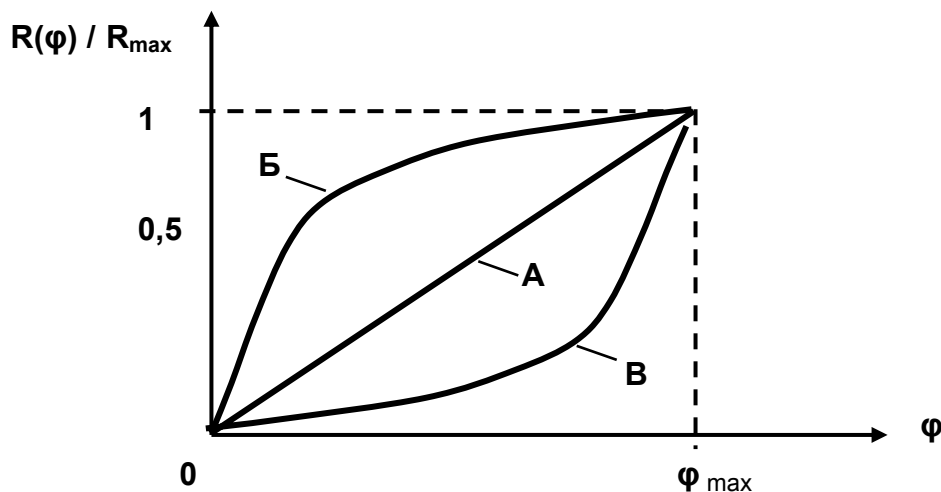


Рис. 2.4. Функціональні характеристики змінних резисторів

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).

### 2.3. 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 (рис. 2.5). Основне їхнє призначення - стабілізація й обмеження напруги.

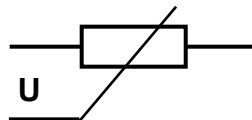


Рис. 2.5. Позначення варисторів на принципових схемах

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

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

Нелінійність характеристики викликана тим, що при збільшенні напруги відбувається перекриття дрібних зазорів між кристалами карбїду, опір зменшується, струм росте. Варистори виготовляють на на-

пругу від 15 В до 25 кВ, струм - від 50 мкА до 10 мА й потужністю від 0,8 до 3 Вт.

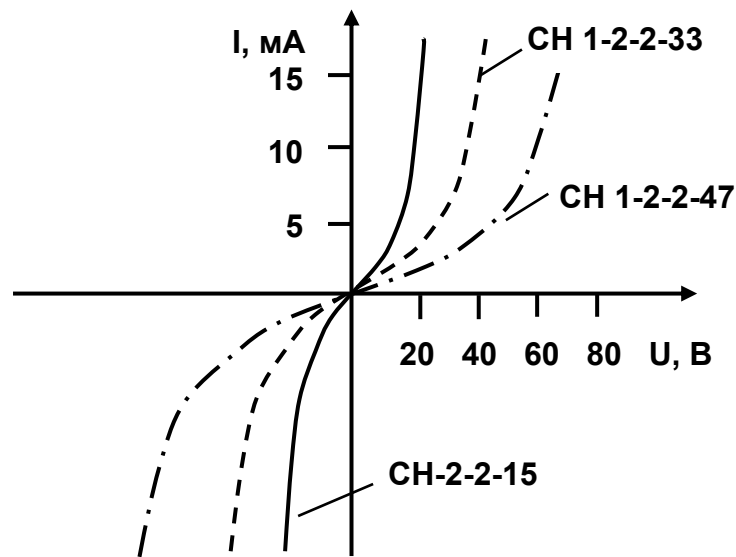


Рис. 2.6. Вольт-амперні характеристики варисторів

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), мідно-марганцеві (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

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

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 підігрівом: 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 рис. 2.7.

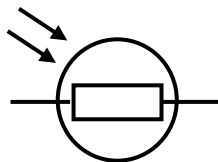


Рис. 2.7. Умовне графічне зображення фоторезисторів

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

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 рис. 2.8.

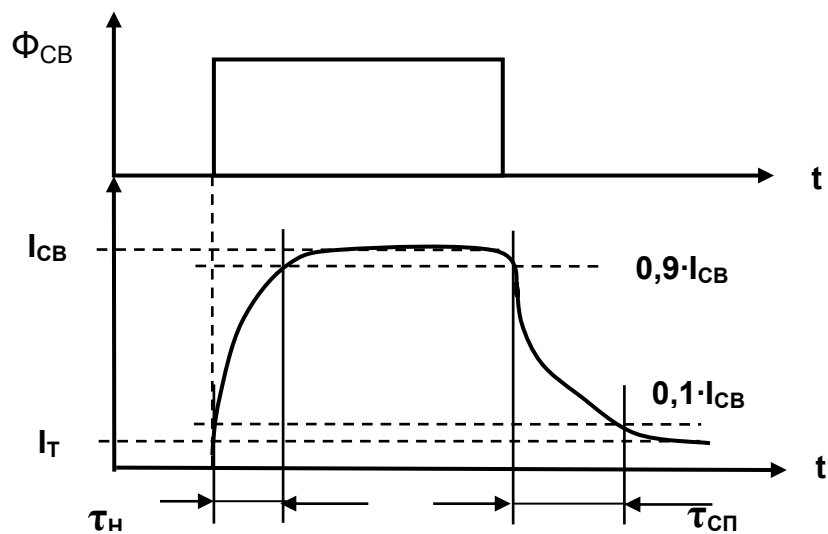


Рис. 2.8. Залежність струму фоторезистора при імпульсному освітленні

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

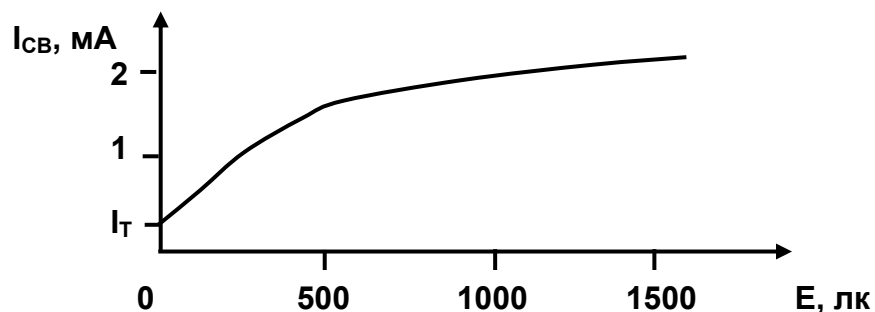


Рис. 2.9. Люкс-амперна характеристика

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

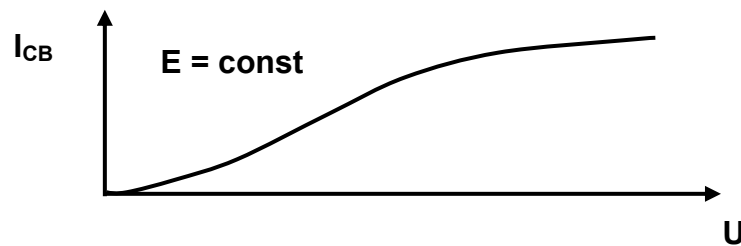


Рис. 2.10. Вольт-амперна характеристика фоторезистора

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

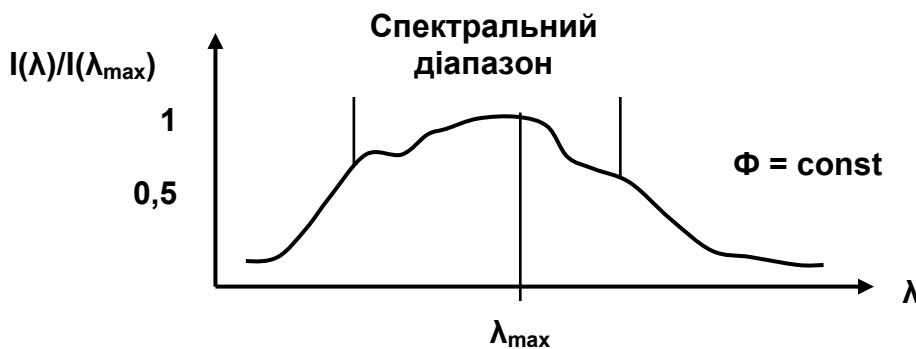


Рис. 2.11. Спектральна характеристика фоторезисторів

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

Для маркування фоторезисторів використовують буквено-цифрове 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) – Cd (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 фоторезистора 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

$$S = \frac{\Delta R \cdot l}{R \cdot \Delta l},$$

де  $l$ ,  $R$ ,  $\Delta R$  і  $\Delta l$  - довжина й опір тензочутливого елемента та їх збільшення відповідно.

## 2.4. Особливості використання резисторів у РЕА

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

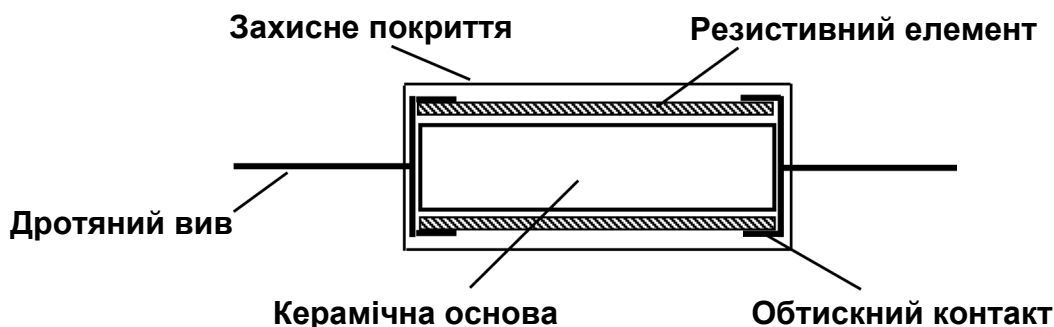


Рис. 2.12. Елементи конструкції резисторів загального призначення

У плівкових резисторах резистивний елемент наносять на діелектричну основу у вигляді суцільної або спіралеподібної плівки

(рис. 2.13, а). В об'ємних резисторах функцію основи резистивного елемента виконує композиційний елемент із заданим питомим опором (рис. 2.13, б). У дротяних резисторах резистивний елемент утворює спіраль із дроту.

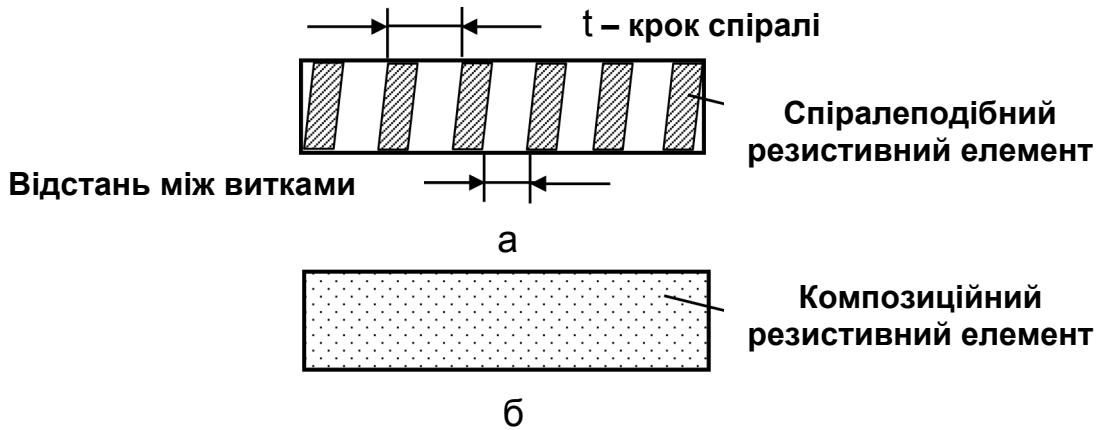


Рис. 2.13. Резистивні елементи недротяних резисторів

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:  $R_K$  – контактної опору,  $R_O$  – опору основи,  $R_{ЗП}$  – опору захисного покриття. Покажемо це на схемі заміщення резистора, ввімкненого в коло постійного струму (рис. 2.14).

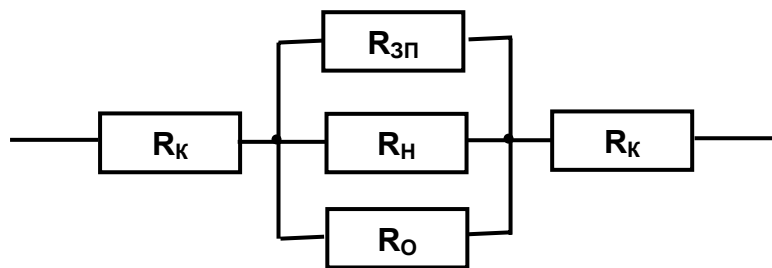


Рис. 2.14. Схема заміщення резистора на постійному струмі

У спіралеподібному резистивному елементі шунтувальний вплив провідності ізоляційної основи та захисного покриття зростає. Сумарний опір резистора можна подати так:

$$R_{\Sigma} = 2R_K + \frac{R_H}{1 + (t \cdot R_H (R_{ЗП} + R_O)) / (a R_{ЗП} R_O)},$$

де  $t$  - крок спіралі;  $a$  - відстань між витками.

За нормальної температури й вологості провідність захисного покриття й діелектричної основи можна не враховувати, якщо величина опору не перевищує  $10^9 \dots 10^{10}$  Ом.

Нелінійні властивості резисторів. У неметалічних резистивних елементах (особливо при зернистій структурі) вплив напруги на опір може проявлятися при невідчутному нагріванні резистивного елемента в цілому. Збільшення провідності резистивного шару пов'язують з електричним пробоем між мікроструктурами зернистого шару при збільшенні прикладеної напруги. У цьому випадку вольт-амперна характеристика резистора не відповідає закону Ома й має нелінійний характер (рис. 2.15).

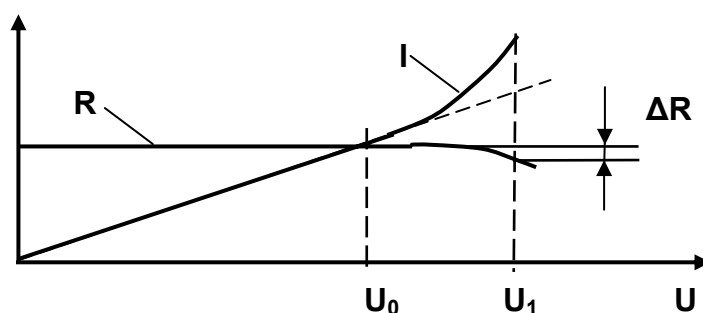


Рис. 2.15. Вольт-амперна характеристика реального резистора

Нелінійні властивості резисторів відображає коефіцієнт напруги  $K_H = \Delta R / ((U_1 - U_0) R_0)$ . У результаті таких властивостей резистор може бути джерелом нелінійних спотворень, як показано на рис. 2.16.

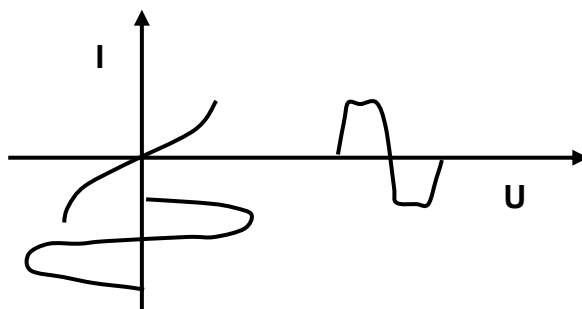


Рис. 2.16. Спотворення форми синусоїдального сигналу

Якщо резистор суттєво нагрівається протікаючим струмом, то зміна опору залежно від прикладеної напруги буде визначатися не тільки його нелінійністю, але й температурою нагрівання. Сумарна зміна опору характеризується коефіцієнтом навантаження

$$K_{\text{НГ}} = K_{\text{Н}} \cdot U + \Delta T \cdot \text{ТКО} .$$

Робота резисторів у високочастотних (ВЧ) колах. Комплексний опір резистора на змінному струмі характеризують розподілені ємність  $C'$  та індуктивність  $L'$ . З урахуванням цих властивостей схему заміщення резистора на ВЧ зображено на рис. 2.17.

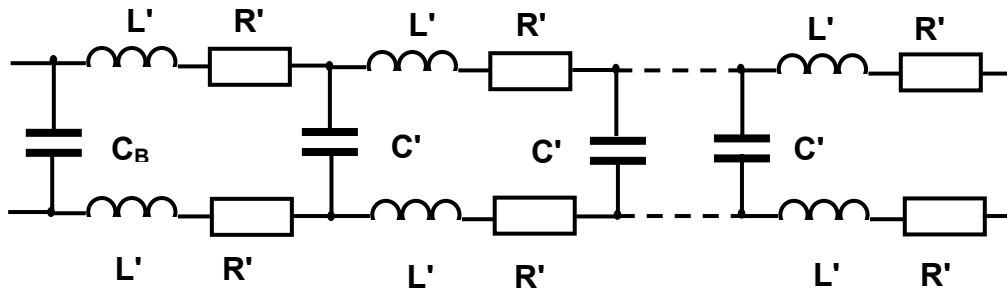


Рис. 2.17. Еквівалентна схема резистора на змінному струмі

Робота з такою еквівалентною схемою вкрай незручна. У більшості випадків раціонально користуватися спрощеною схемою заміщення, наведеною на рис. 2.18.

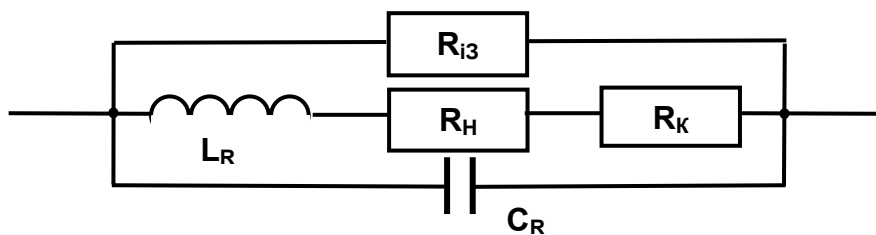


Рис. 2.18. Спрощена еквівалентна схема резистора для ВЧ кіл

До високоомних резисторів можна віднести резистори, величина опору яких  $R > (L' / C')^{1/2}$ . Для реальних резисторів ця умова виконується, коли їх опір становить більше 300...3000 Ом. За таких величин опору впливом індуктивності можна знехтувати. Еквівалентна схема набуває вигляду, зображеного на рис. 2.19, де  $R_f$  - активний опір резистора на частоті  $f$ ;  $C_f$  - власна ємність резистора.

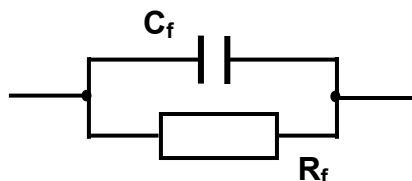


Рис. 2.19. Еквівалентна схема високоомного резистора у ВЧ колах

Варто зауважити, що величина  $R_f$  урахує активні втрати, пов'язані з поверхневим ефектом і втратами в ізоляційних матеріалах на робочій частоті.

Для низькоомних резисторів з опором менше 300 Ом величиною ємнісного опору порівняно з індуктивним можна знехтувати. Еквівалентна схема набуває вигляду, зображеного на рис. 2.20.

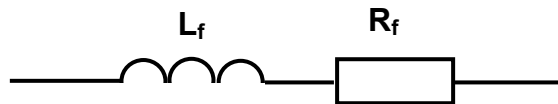


Рис. 2.20. Еквівалентна схема низькоомного резистора у ВЧ колах

Дротяні резистори через велику власну індуктивність у високо-частотних колах не використовують. У зв'язку з суттєвими втратами на високих частотах об'ємні резистори також мають обмежене застосування у ВЧ апаратурі.

### 3. КОНДЕНСАТОРИ

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:  $[C] = \text{Ф}$  (фарада);  $10^{-6} \text{ Ф} = \text{мкФ}$  (мікрофарада);  $10^{-9} \text{ Ф} = \text{нФ}$  (нанофарада);  $10^{-12} \text{ Ф} = \text{пФ}$  (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,

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

де  $d$  - товщина діелектрика;  $S$  - площа обкладинок;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність діелектрика.

Для циліндричного конденсатора ємність розраховують за формулою

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



де  $D_1$  і  $D_2$  – діаметри зовнішньої й внутрішньої циліндричних обкладинок;  $l$  – їх довжина; розмірності величин –  $[C] = \text{пФ}$ ;  $[l, d] = \text{мм}$ ;  $[S] = \text{мм}^2$ .

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, неізольованими, ізольованими, 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  $C$  з порядковим цифровим або буквеним індексом (рис. 3.1).

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

Ємності від 1 до 999 пФ позначають без указання одиниці виміру. 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,  $C_{\text{мін}} = 5$  пФ,  $C_{\text{макс}} = 340$  пФ позначають як 5...340.

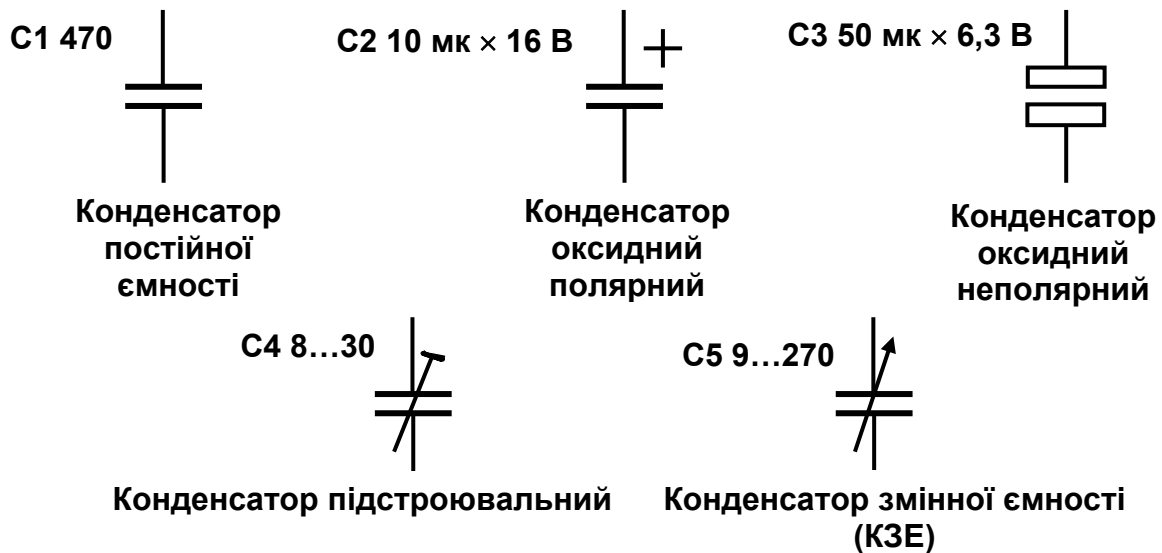


Рис. 3.1. Умовні позначення конденсаторів на схемах

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

### 3.1. 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).

Припустиме відхилення ємності від номінальної (допуск) характеризує точність задання 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 табл. 3.1 і 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1

Припустиме відхилення, %	Код	Припустиме відхилення, %	Код
±0,001	E -	±10	K (C)
±0,002	L -	±20	M (B)
±0,005	R -	±30	N (Ф)
±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 (В)	-20...+80	Z (А)
±0,5	D (Д)	+100	- (Я)
±1	F (Р)		
±2	G (Л)		
±5	J (И)		

Таблиця 3.2

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

Номинальна робоча напруга (номинальна напруга) – максимальна напруга, за якої конденсатор може працювати в заданих умовах експлуатації протягом гарантованого терміну служби. Як правило, її вказують на конденсаторі. Номинальні напруги і їхнє кодування (в основному для малогабаритних конденсаторів) наведено в табл. 3.3.

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

Таблиця 3.3

U <sub>НОМ</sub> , В	Код	U <sub>НОМ</sub> , 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:

$$R_{\text{із}} = \frac{U}{I_{\text{вт}}},$$

де  $I_{\text{вт}}$  - струм витоку або провідності. Найбільший опір ізоляції (десять 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:

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

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

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

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 ( $P_a = IR_{13}$ ) 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

$$\frac{P_a}{P_p} = \frac{U \cdot I \cdot \sin \delta}{U \cdot I \cdot \cos \delta} = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \text{tg } \delta.$$

Величину, обернену до  $\text{tg } \delta$ , називають добротністю конденсатора:

$$Q_c = \frac{1}{\text{tg } \delta}.$$

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

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:

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{\Delta T \cdot C_0},$$

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 табл. 3.5, керамічних (низькочастотних) з ненормованим ТКЄ - у табл. 3.6.

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

$$\beta_c = \frac{\Delta C}{C}$$

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

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

Таблиця 3.5

Група	ТКЄ, 10 <sup>-6</sup> /°С	Буквений код
П100	+100	А
П60	+60	Г
П33	+33	Н
МПО	0	С
М33	-33	Н
М47	-47	М
М75	-75	Л
М150	-150	Р
М220	-220	Р
М330	-330	С
М470	-470	Т
М750	-750	У
М1500	-1500	В
М2200	-2200	К
М3300	-3300	У

Таблиця 3.6

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

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.

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

Таблиця 3.7

Група	Код	Група	Код
Керамічні $U_n \leq 1600$ В $U_n > 1600$ В	10	Паперові ( $U_n \leq 2$ кВ)	40
	15	Паперові фольгові	41
		Паперові металізовані	42
Скляні Склокерамічні Тонкоплівкові	21	Оксидно-електролітичні, алюмінієві	50
	22	Оксидно-електролітичні	51
	26	Об'ємно-пористі	52
		Оксидно-напівпровідникові	53
		Оксидні неполярні	58
Слюдяні малої потужності Слюдяні великої потужності	31	Повітряні	60
	32	Вакуумні	61
		Полістирольні	71
Поліетилентерефталатні	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.

### **3.2. 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; напрямні 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, прямохвильовий, 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 рис. 3.2.

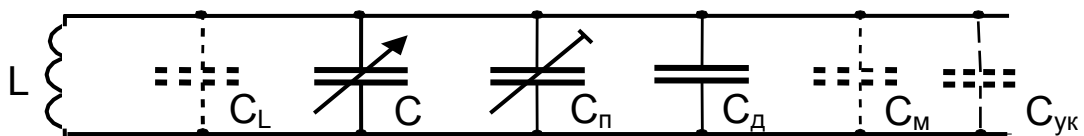


Рис. 3.2. Еквівалентна схема коливального контура

На значення резонансної частоти коливального контуру також впливають:  $C_L$  – власна ємність котушки індуктивності;  $C_d$  – додаткова ємність;  $C_m$  – ємність монтажу;  $C_{\text{пк}}$  – вхідна ємність підсилювального каскаду;  $C_p$  – ємність підстроювального конденсатора.

Усі ємності визначають мінімальну ємність контура:

$$C_{\text{к. мін}} = C_{\text{мін}} + C_L + C_d + C_m + C_p + C_{\text{пк}}$$

Тоді максимальна ємність контура

$$C_{\text{к. макс}} = C_{\text{к. мін}} + C_{\text{змін}}$$

Коефіцієнт перекриття за частотою знаходимо зі співвідношення

$$K_f = \frac{f_{\text{макс}}}{f_{\text{мін}}} = \frac{\sqrt{C_{\text{к.макс}}}}{\sqrt{C_{\text{к.мін}}}} = \frac{\sqrt{C_{\text{к.мін}} + C_{\text{змін}}}}{\sqrt{C_{\text{к.мін}}}}$$

Звідси можна одержати залежність

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

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

Таблиця 3.8

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

Мінімальна ємність у реальних конструкціях конденсаторів у 6 - 20 разів менше максимальної. В електровимірвальній 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 ( $r = \text{const}$ ) (рис. 3.3).

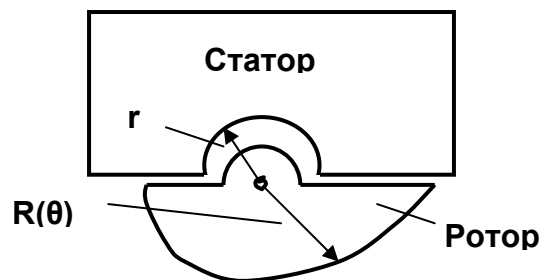


Рис. 3.3. Елементи конденсатора змінної ємності

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

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

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

Для прямочастотного конденсатора

$$\frac{dC}{d\theta} = \frac{2A^2 \cdot C_{\text{к.мін}}}{(A-\theta)^3}, \quad A = \frac{K_f \theta_{\text{макс}}}{K_f - 1}$$

Графік функціональної залежності для прямочастотного конденсатора показано на рис. 3.4, б.

Для прямохвильового типу конденсатора

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

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

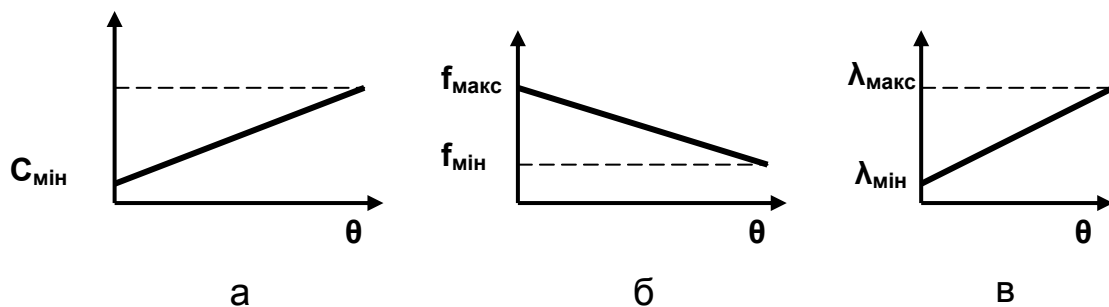


Рис. 3.4. Графіки функціональних залежностей для КЗЕ

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

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

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  $10^{-6} \dots 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ .

### 3.3. 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.

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 випущено термоконденсатори типу КН-2 на номінальні ємності 47, 68 і 100 пФ (для кварцових генераторів електронних годинників).

### 3.4. 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 рис. 3.5.

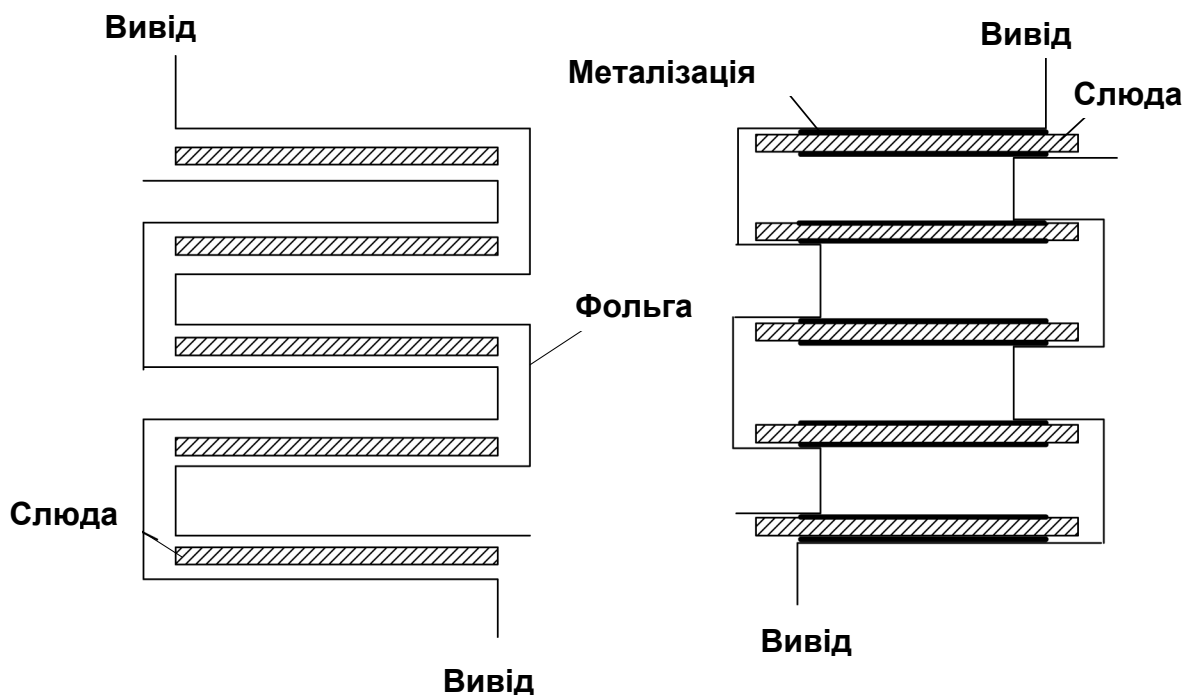


Рис. 3.5. Конструкція слюдяних конденсаторів

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 емалями або герметизують, покриваючи епоксидними компаундами або розташовуючи в спеціальному корпусі.

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

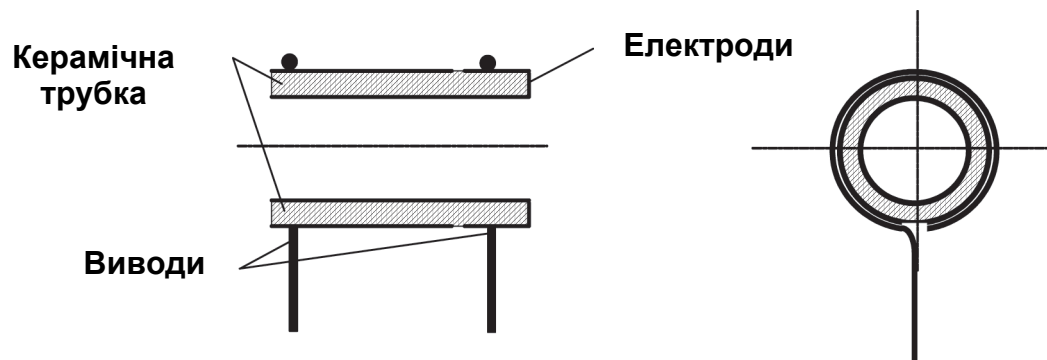


Рис. 3.6. Конструкція трубчастого керамічного конденсатора

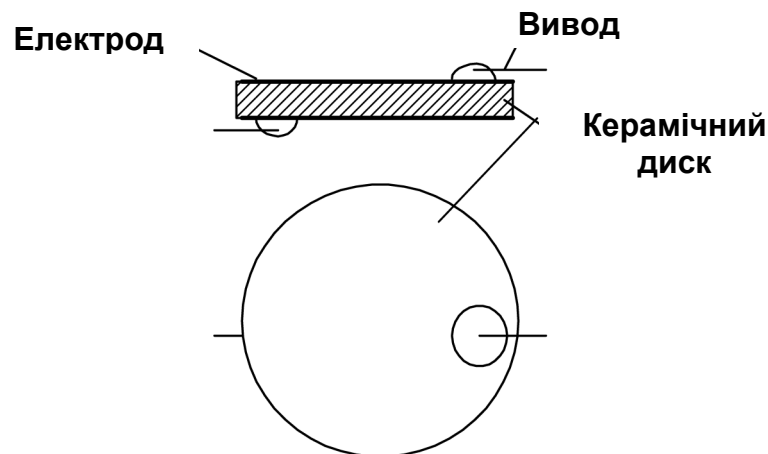


Рис. 3.7. Конструкція дискового конденсатора

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  $0,8 \text{ мкФ/см}^3$ ).

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.

*Паперові конденсатори* конструктивно виконуються з двох довгих смуг алюмінієвої або свинцевої фольги, які розділені декількома шарами паперу товщиною 4...15 мкм, згорнутими 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 (рис. 3.8). Їхньою особливістю є здатність до самовідновлення після пробою.

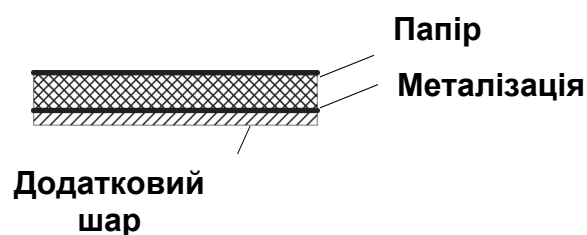


Рис. 3.8. Структура металопаперових конденсаторів

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

У плівкових 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 оксидно-напівпровідникових), нанесений безпосередньо на оксидний шар (рис. 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.

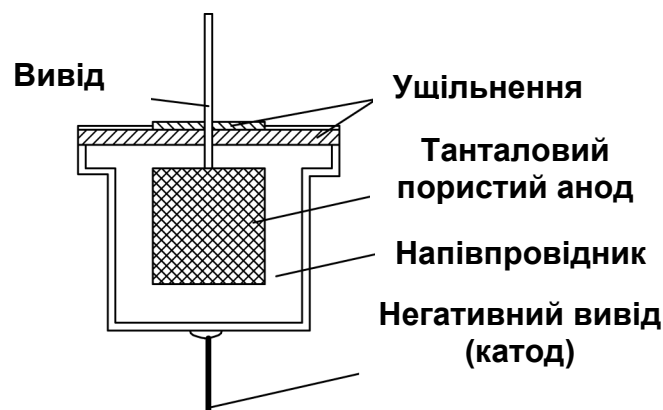


Рис. 3.9. Будова оксидно-напівпровідникового конденсатора

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.

Розглянемо деякі характерні риси застосування конденсаторів у РЕА, властиві всім типам конденсаторів.

Явище абсорбції. При короткочасному короткому замиканні зарядженого конденсатора напруга на ньому падає до 0, але після розмикання відновлюється до деякого значення (рис. 3.10). Це явище називають абсорбцією.



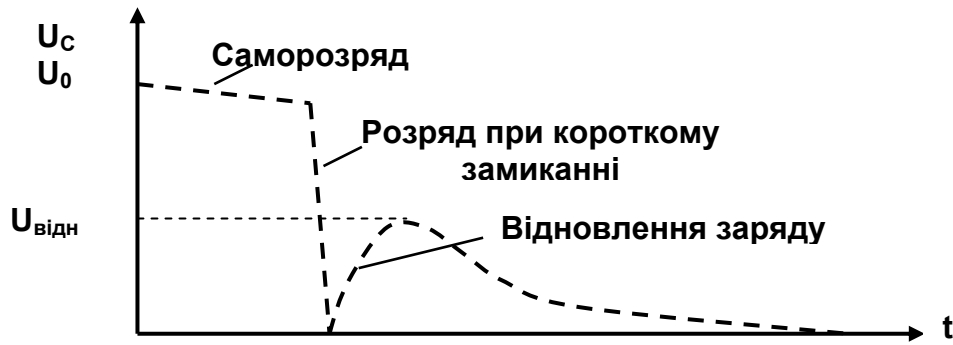


Рис. 3.10. Зміна заряду на конденсаторі при абсорбції

Як наслідок при проведенні ремонтних робіт у високовольтних колах виникають небезпечні (вражаючі) напруги для людини, а в низьковольтних - помилкові спрацьовування імпульсних схем. Виникає абсорбція переважно в конденсаторах з багат шаровим неоднорідним діелектриком.

Явище абсорбції моделюється еквівалентною схемою, зображеною на рис. 3.11.

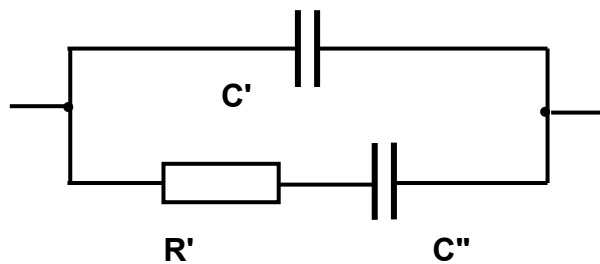


Рис. 3.11. Еквівалентна схема для моделювання абсорбції

Абсорбція пояснюється тим, що ємність конденсатора може розглядатися як така, що складається з двох частин: основної  $C'$  і додаткової  $C''$ , яка пов'язана з наявністю зарядів на неоднорідностях і поверхнях розділу. Опір  $R'$  імітує сталу часу заряду ємності.

При короткочасному замиканні конденсатора повністю встигає розрядитися лише ємність  $C'$ . Після розмикання відбувається перерозподіл зарядів, що збереглися на  $C''$ . Цей процес характеризує коефіцієнт абсорбції

$$K_a = \frac{U_{\text{відн}}}{U_0}.$$

Характерні значення коефіцієнта абсорбції для плівкових конденсаторів – 0,003...0,7 %; паперових – 0,6...5 %; слюдяних – 1,5...5 %; керамічних – 5...15 %; оксидних – 1...5,5 %.

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 (рис. 3.12).

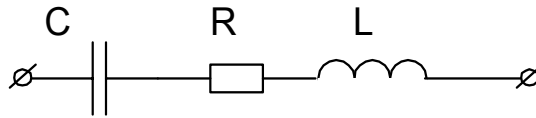


Рис. 3.12. Еквівалентна схема конденсатора на ВЧ

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 рис. 3.12.

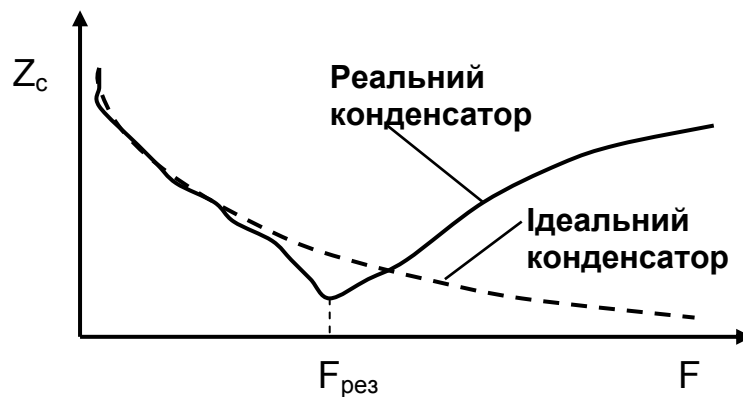


Рис. 3.12. Резонансні явища в конденсаторах

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 конденса-

тори (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 спричиняється 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, восками, 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.

Ще один вид специфічних відмов - втрата контакту між обкладинками й виводами, що виникає лише за малих напруг. Таке явище властиве алюмінієвим обкладинкам з накладними виводами й зумовлено виникненням на алюмінієвій поверхні тонкої окисної плівки.

Поступові відмови спричиняються в основному процесами старіння й окислювання за рахунок збільшення втрат і зменшення опору ізоляції.

Можна показати, що інтенсивність і термін служби конденсаторів за різних напруг і температур оцінюють із таких співвідношень:

$$\lambda = \lambda_n (K_n)^m, \quad K_n = \frac{U_{роб}}{U_{ном}}$$

де  $\lambda_n$  – інтенсивність відмов при нормальних умовах;  $K_n$  – коефіцієнт навантаження;  $U_{ном}$  – номінальна напруга;  $U_{роб}$  – робоча напруга;  $m$  – показник степеня, величина якого залежить від виду діелектрика (для кераміки  $m = 3...5$ ; паперу –  $4...6$ ; інших діелектриків –  $6...7$ ).

Тривалість експлуатаційної придатності конденсатора оцінюють виразом

$$D = D_n (K_n)^{-n} \cdot \exp(-0,0693 \cdot \Delta T),$$

де  $D_n$  – термін служби за нормальних умов експлуатації;  $\Delta T$  - температура перегріву над нормальною (20 °С);  $n$  – показник степеня (для керамічних конденсаторів  $n = 3$ , для паперових  $n = 5 \dots 15$ )

Робота ЕА на космічних апаратах, об'єктах атомної енергетики передбачає вплив іонізуючих випромінювань. Вплив останніх призводить до порушення структури матеріалів, погіршення електричної й механічної міцності.

Конденсатори з органічними діелектриками більш чутливі до впливів іонізуючого випромінювання, ніж конденсатори з неорганічними діелектриками. Найбільш стійкі до впливу іонізуючого випромінювання керамічні конденсатори.

Дозиметричні конденсатори працюють у колах з дуже низьким рівнем струмових навантажень. Тому вони повинні мати дуже малий саморозряд, більший опір ізоляції (велику сталу часу). Найкраще ці вимоги задовольняють фторопластові конденсатори.

## 4. ІНДУКТИВНІ КОМПОНЕНТИ

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.

### 4.1. Високочастотні котушки індуктивності

Залежно від призначення розрізняють:

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

За конструктивними ознаками катушки 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 поміщують її символічне літерне позначення (латинська прописна буква L) з порядковим цифровим (іноді буквеним) індексом. Значення індуктивності на схемі, як правило, не вказують (рис. 4.1).

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

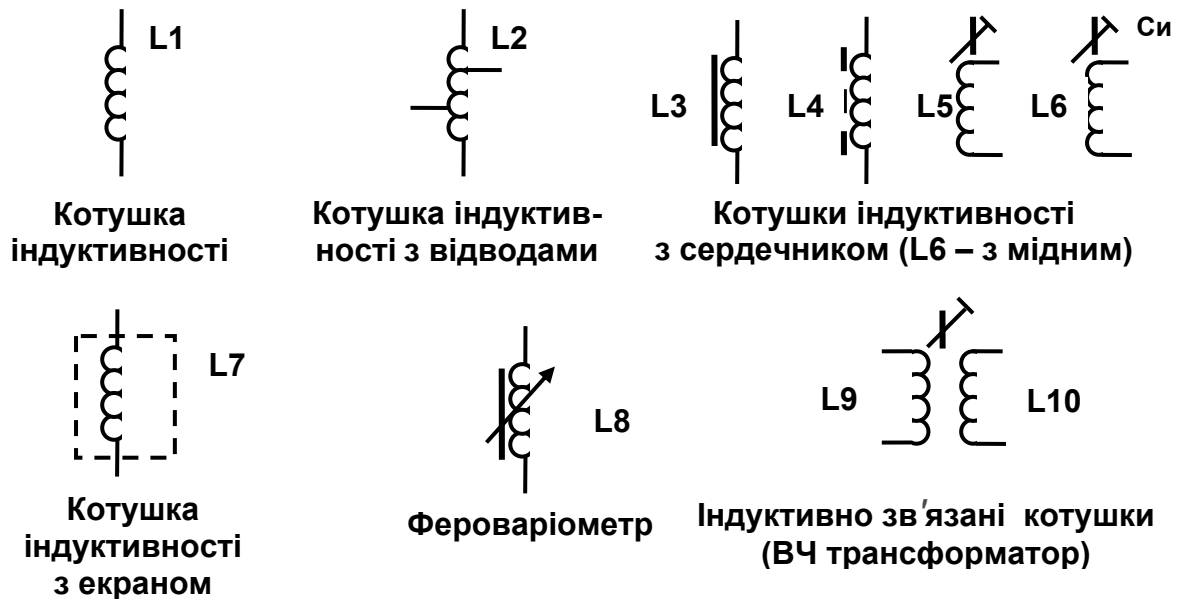


Рис. 4.1. Позначення котушок індуктивності на схемах

#### Основні параметри високочастотних котушок.

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

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 сердечника або екрана.

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

$$Q_L = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{r},$$

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:

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

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  $1^\circ\text{C}$ :

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

Звичайні циліндричні котушки мають  $\text{TKI} = 30 \dots 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , 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 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

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

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.

*Індуктивність круглого витка з провідника круглого перетину* знаходять за допомогою формули

$$L_{\text{кр}} = 0,00628D \left( \ln \frac{8D}{d} - 1,75 \right),$$

де  $[D] = \text{см}$  - діаметр витка.

Розрахунок  $L_{\text{кр}}$  використовують для оцінювання індуктивності рамкових (резонансних) антен, котушок зв'язку та інших одновиткових контурів.

Індуктивність замкнутого геометричного контуру завжди буде менше індуктивності прямого провідника тієї ж довжини. Найбільша індуктивність – у того із замкнутих геометричних контурів однакового периметра, який має найбільшу площу. Отже, найбільшу індуктивність має контур у формі кола.

*Індуктивність одношарової циліндричної котушки (рис. 4.2).*

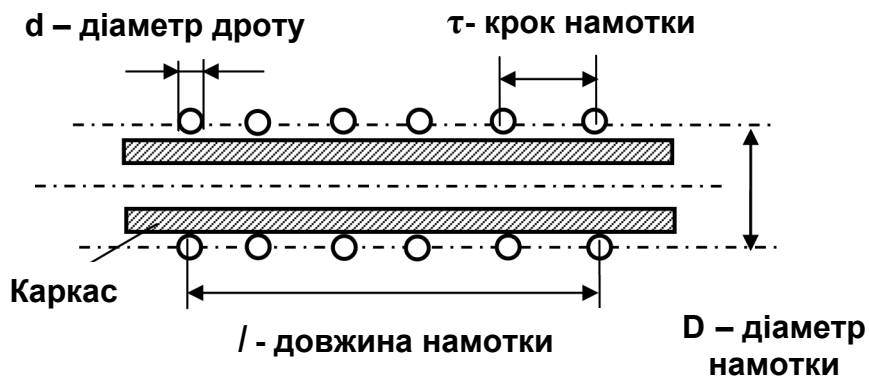


Рис. 4.2. Елементи одношарової циліндричної котушки

Якщо довжина намотки  $l = \tau \cdot N$  ( $N$  – кількість витків) відповідає нерівності  $l \gg D$ , то прийнято використовувати формулу

$$L = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2 \cdot 10^{-3}}{l} \text{ мкГн.}$$

Якщо довжина намотки котушки порівнянна з її діаметром, то вводиться поправковий коефіцієнт  $L_0$ . Значення цього коефіцієнта знаходять за графіком, який наведено на рис. 4.3, а величину індуктивності визначають за допомогою формули

$$L = L_0 \cdot N^2 \cdot D \cdot 10^{-3} \text{ мкГн.}$$

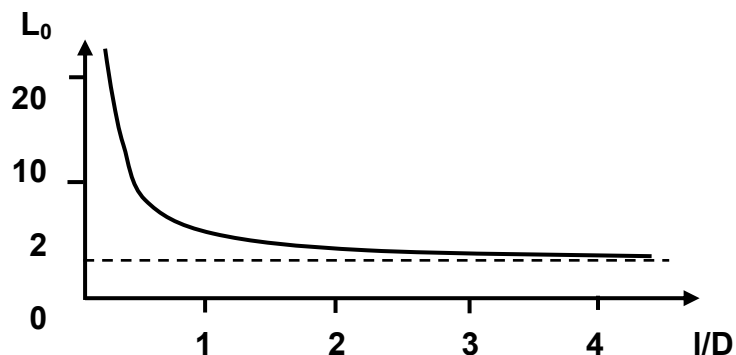


Рис. 4.3. Графічна залежність поправкового коефіцієнта

*Індуктивність багатошарової циліндричної котушки.* Для одержання більших значень індуктивності використовують багатошарові котушки. Індуктивність таких котушок можна визначити за попередньою формулою, але поправковий коефіцієнт  $L_0$  (рис. 4.4) буде залежати від співвідношення товщини намотки до зовнішнього діаметра  $t/D$ .

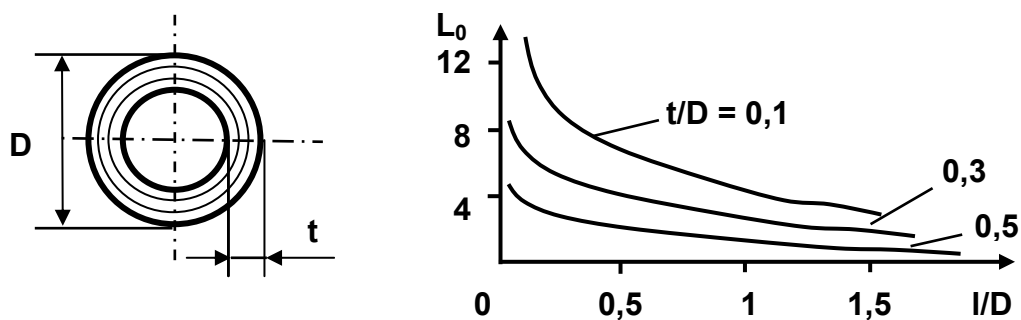


Рис. 4.4. Поправковий коефіцієнт для багатошарової котушки

*Індуктивність котушки з сердечником.* Одержати оптимальне значення індуктивності й добротності, забезпечити точну установку індуктивності дозволяє застосування сердечників. Індуктивність котушки з сердечником  $L_c = \mu_c L$ , де  $L$  – індуктивність тієї ж котушки без сердечника ;  $\mu_c$  – діюча магнітна проникність. Якщо  $\mu$  - магнітна проникність матеріалу, з якого виконано сердечник, то відношення  $K_\mu = \mu_c / \mu$  - коефіцієнт використання магнітних властивостей. Він залежить від конструкції котушки й визначається експериментально.

Для ферромагнетиків (ферити, карбонільне залізо)  $\mu_c > 1$ , для діамгнетиків (латунь, мідь, алюміній)  $\mu_c < 1$ . Таким чином, використовуючи ферромагнетики, підвищують індуктивність котушки, а використовуючи діамгнетики, знижують її.

*Індуктивність тороїдальної котушки (з кільцевим сердечником)* визначають за формулою

$$L_{\text{ТОР}} = 0,00628 \mu \cdot N^2 \left( D - \sqrt{D^2_{\text{Т}} - D_{\text{В}}} \right),$$

де  $D_{\text{Т}}$  – діаметр осьової лінії тора, см;  $D_{\text{В}}$  – середній діаметр витка;  $\mu$  - початкова магнітна проникність матеріалу тора.

*Індуктивність екранованої котушки.* Екранування виконують або шунтуванням магнітного поля ферромагнітним екраном з великою відносною магнітною проникністю або витисненням магнітного поля ек-



раном з діамагнетика (мідь, латунь, алюміній). Для екранування ВЧ котушок використовують, як правило, другий спосіб.

Індуктивність циліндричної котушки з алюмінієвим циліндричним екраном

$$L_e = L \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D}{D_e} \right)^3 \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{l}{2 \cdot l_e} \right)^2 \right],$$

де  $L$  – індуктивність котушки без екрана;  $D$  – діаметр обмотки;  $D_e$  – діаметр екрана;  $l$  – довжина намотування;  $l_e$  – довжина екрана. Добротність екранованої котушки завжди нижче, а власна ємність вище котушки без екрана.

*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

$$Q_L = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{r},$$

де  $r$  – активний опір втрат, що має кілька складових. Опір втрат можна подати у вигляді суми

$$r = r_0 + r_f + r_k + r_{\text{ем}} + r_{\text{екр}} + r_c,$$

де  $r_0$  – опір обмотки постійному струму;  $r_f$  – високочастотні втрати;  $r_k$  – втрати в матеріалі каркаса;  $r_{\text{ем}}$  – ємнісні втрати;  $r_{\text{екр}}$  – 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 рис. 4.5. Ця властивість використовується для одержання максимальної добротності шляхом вибору оптимального діаметра дрота намотування.

Діелектричні втрати, що виникають у полі власної ємності котушки через діелектрик, мають ту ж природу, що й у конденсаторах, і описуються тангенсом діелектричних втрат на робочій частоті.

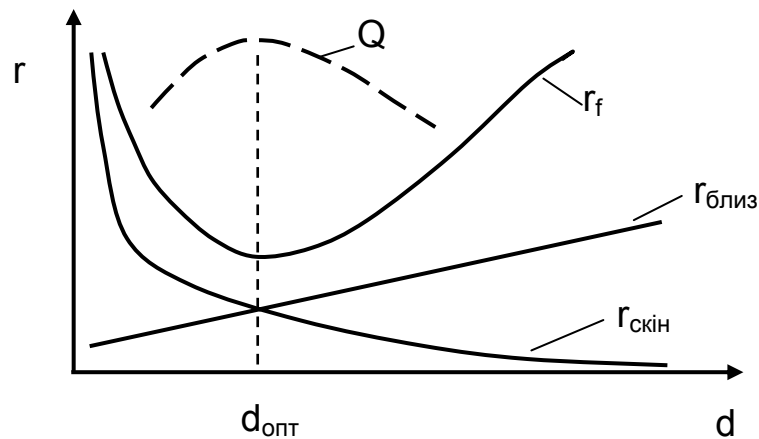


Рис. 4.5. Оптимальний діаметр дроту намотки

Дроселем високої частоти називають котушку індуктивності, що вмикається в електричне коло для збільшення опору струмам високої частоти. Основні параметри:  $z_{др}$  - повний опір,  $R$  - опір постійному струму,  $C_{др}$  - власна ємність. Повний опір на робочих частотах повинен бути великим і мати індуктивний характер. Власна ємність дроселя (рис. 4.6) визначає його критичну частоту  $f_{кр} = 1/(2\pi(L_{др}C_{др})^{1/2})$ , нижче якої розташований робочий інтервал частот.

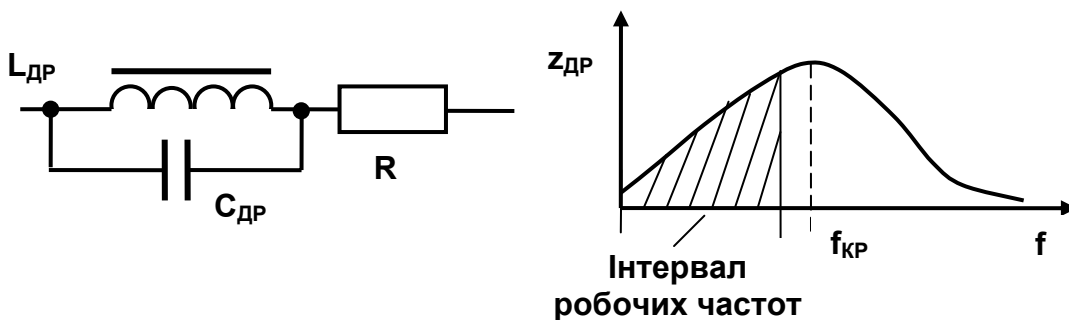


Рис. 4.6. Еквівалентна схема й повний опір дроселя

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

## 4.2. 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 (сило-ві), сигнальні (узгоджувальні), імпульсні.

Основними елементами трансформатора є магнітопровід (осердя) і розміщені на ньому обмотки (рис. 4.8).

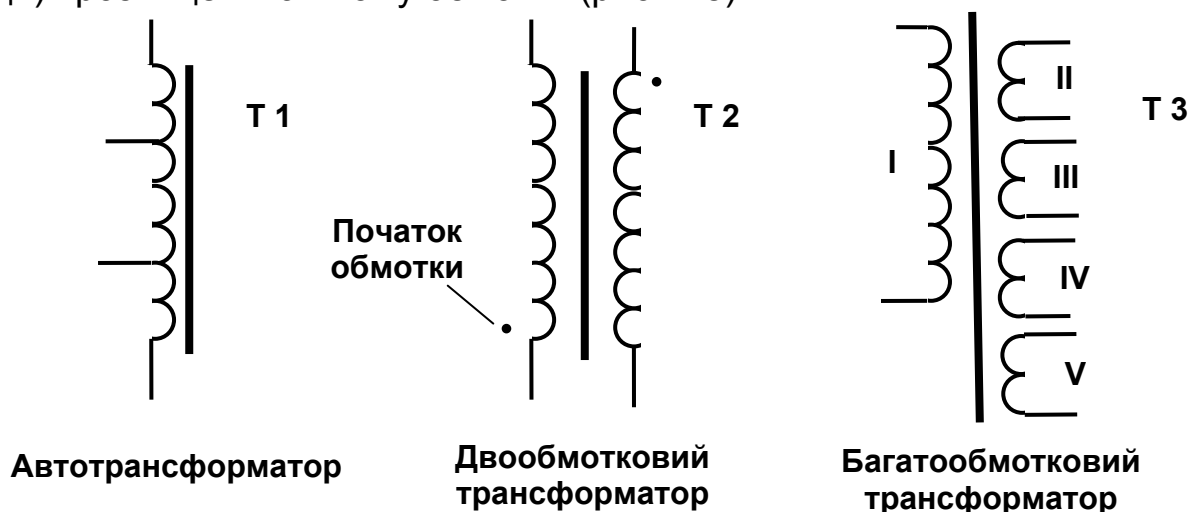


Рис. 4.8. Позначення трансформаторів на принципових схемах

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 волого 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 імпеданси 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.

### 4.3. Тверdotілі аналоги LC кіл

Ці елементи використовують явище механічного резонансу на ультразвукових частотах у пружних тверdotілих структурах. За виконуваною функцією їх поділяють на фільтри й резонатори.

Розрізняють фільтри п'єзоелектричні і електромеханічні.

*П'єзоелектричні фільтри* виконують з кварцових і п'єзокерамічних пластин, у яких виникають резонансні коливання при збудженні поперечних або поверхневих акустичних хвиль на частоті  $f = N_f/l$ , де  $N_f$  - частотна стала матеріалу;  $l$  – характерний лінійний розмір. Промисловістю випускається широка номенклатура п'єзокерамічних фільтрів (ПКФ) з робочим діапазоном від одиниць кілогерц до декількох мегагерц, які використовують в аналогових трактах радіо й телевізійної апаратури (рис. 4.9).

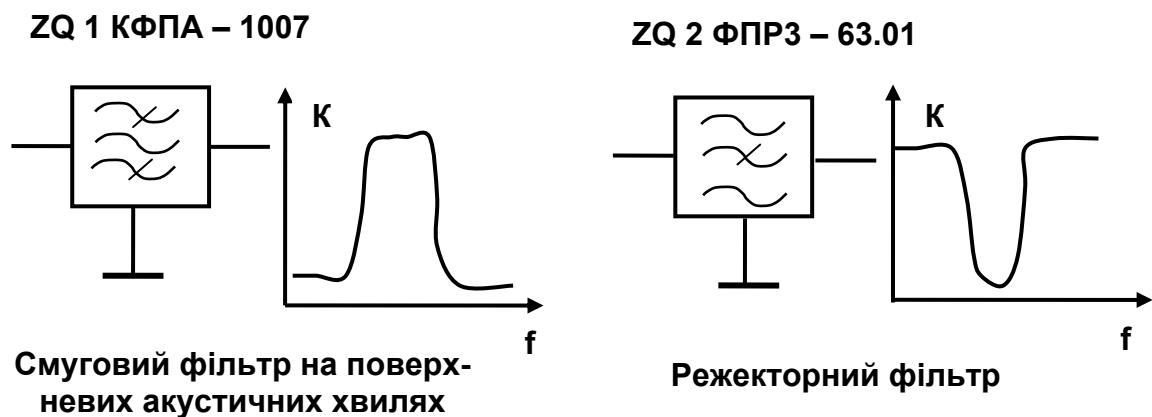


Рис. 4.9. Позначення й частотні характеристики ПКФ фільтрів

Істотним недоліком ПКФ є наявність додаткових резонансів поза робочим діапазоном частот, зумовлених просторовою структурою елемента. Для режекції побічних смуг пропускання використовують погоджувальні LC контури.

Для побудови вузькосмугових фільтрів, а також стабілізації частоти автогенераторів застосовують кварцові резонатори. Для них характерна висока добротність до частот у десятки мегагерц.

*Електромеханічні фільтри* використовують магнітострикційні (рис. 4.10) або п'єзоелектричні перетворювачі, селекція здійснюється в механічно зв'язаних резонаторах. Специфічна характеристика – вузька смуга пропускання (~3 кГц), для робочих частот до – 2 МГц.



Рис. 4.10. Елементи магнітострикційного перетворювача

Резонатори виконують, як правило, із пластин кварцу, завдяки їхнім механічним властивостям отримують дуже високу добротність елемента.

#### 4.4. Магнітні головки

Магнітні головки - це елементи ЕА, призначені для запису, зчитування й стирання інформації на магнітному носії. Вони є тороподібними котушками індуктивності, магнітопрвід яких має зазор (рис. 4.11).

За призначенням поділяються на *звукові (аудіо), відео, цифрові й спеціальні*.

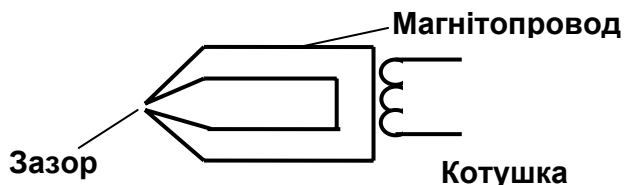


Рис. 4.11. Будова магнітної головки

### Основні параметри магнітних головок.

*Індуктивність головки* характеризує повний імпеданс (від 1 Гн до часток мікрогенрі).

*Струм запису* – величина струму, що протікає через обмотку головки, при якому забезпечується одержання номінальної ЕРС при зчитуванні з певного магнітного носія.

*Струм стирання* – величина струму, що забезпечує задану режекцію попередніх записів стосовно наступного (від 30 дБ і вище).

*ЕРС відтворення* – напруга на виході головки при нормованих умовах запису на носій (на заданій частоті).

*Робочий діапазон частот* характеризує АЧХ тракту запис – відтворення.

За виконуваною функцією в електронній апаратурі розрізняють такі головки: записувальні, відтворювальні, стиральні (рис. 4.12).

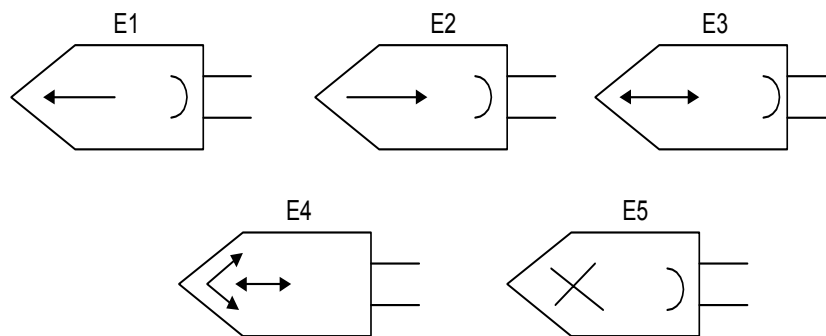


Рис. 4.12. Позначення магнітних головок на схемах: E1 – записувальна; E2 – відтворювальна; E3, E4 – універсальна; E5 – стиральна

Маркування магнітних головок залежить від фірми виробника апаратури. Для вітчизняної звукової апаратури використовують таке маркування, поелементно: цифра відповідає ширині магнітної стрічки (3, 6, 12,... мм); буква – призначенню (А – для запису, В – відтворення, С – стирання, D – універсальна головка); цифра – максимальній кількості доріжок одночасно записуваних або відтворюваних; цифра – максимальній кількості доріжок; буква – опору головки (Н – низький, П – високий); цифровий код – модифікації виробу.

## 4.5. Штучні лінії

Штучні лінії в імпульсній техніці використовують для формування імпульсів і затримки їх у часі.

Формувальні лінії застосовують, як правило, у модуляторах потужних імпульсних станцій для одержання стабільних за тривалістю імпульсів високої напруги.

Лінії затримки (ЛЗ) – елементи ЕА, призначені для нормованої тимчасової затримки вихідних відеоімпульсів відносно вхідних (рис. 4.13).

Електричні ЛЗ призначені для затримки відеоімпульсів від одиниць наносекунд до десятків мікросекунд. Їх поділяють на *однорідні* (з розподіленими елементами) і на *лінії із зосередженими параметрами*.

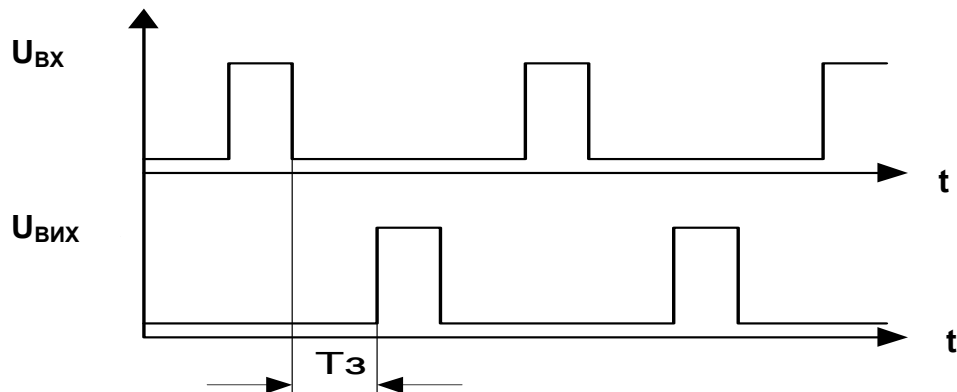


Рис. 4.13. Затримка відеоімпульсів

На принципових електричних схемах ЛЗ позначають великими буквами ЕТ з порядковим числовим або буквеним індексом (рис. 4.14). Як правило, вказується марка ЛЗ.

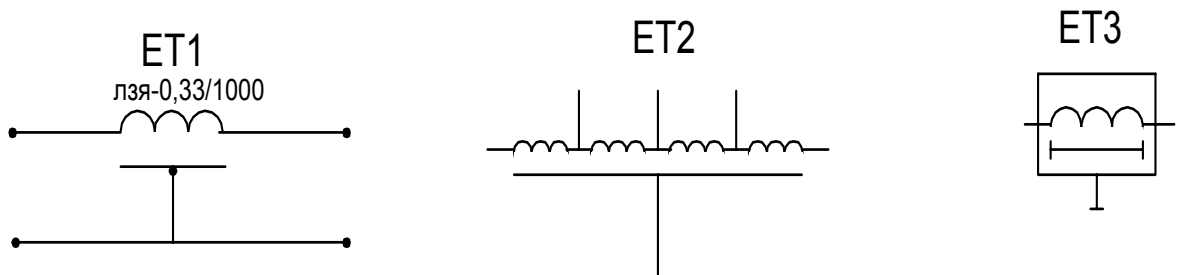


Рис. 4.14. Позначення ліній затримки на схемах

Для створення затримок наносекундної тривалості використовують лінії з розподіленими елементами (двопровідникові, коаксіальні, спіральні). Для цих ліній вводиться поняття розподілених (погонних) індуктивності ( $L_0$ ) і ємності ( $C_0$ ) (рис. 4.15). Якщо довжина лінії  $l$ , то сумарна індуктивність  $L = l \cdot L_0$  і сумарна ємність  $C = l \cdot C_0$ .

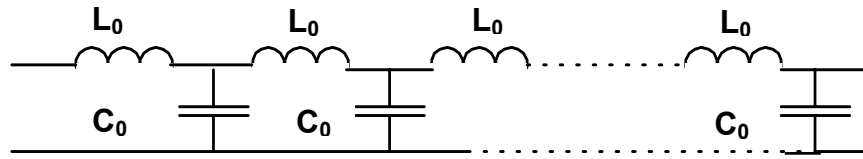


Рис. 4.15. Еквівалентна схема однорідної лінії затримки

До основних параметрів ліній затримок відносять хвильовий опір однорідної лінії  $W = (L/C)^{1/2}$ , а також час затримки

$$T_3 = (LC)^{1/2} = l(L_{\text{я}} C_{\text{я}})^{1/2}.$$

Для збільшення часу затримки й хвильового опору використовують спіральні ЛЗ із феритовим стрижнем. При цьому  $W_c = W\sqrt{\mu}$ ,  $T_{3c} = T_3\sqrt{\mu}$ , де  $\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу стрижня.

Для одержання  $T_3$  від часток до десятків мікросекунд раціонально використовувати ЛЗ із зосередженими параметрами (рис. 4.16).

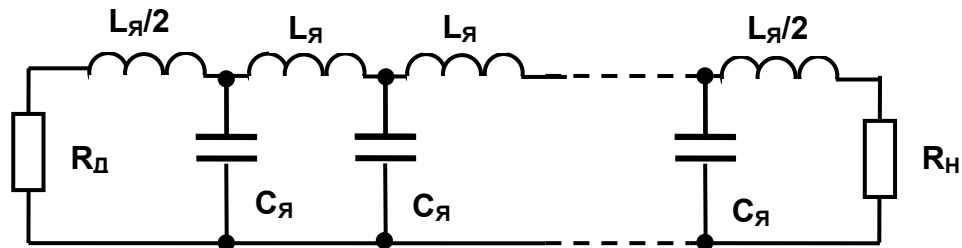


Рис. 4.16. Лінія затримки із зосередженими параметрами

У цьому випадку  $W = (kL_{\text{я}} / kC_{\text{я}})^{1/2} = (L_{\text{я}} / C_{\text{я}})^{1/2}$ ,  $T_3 = k(L_{\text{я}} \cdot C_{\text{я}})^{1/2}$ , де  $L_{\text{я}}$  і  $C_{\text{я}}$  – відповідно індуктивність котушки і ємність конденсатора однієї ланки;  $k$  – кількість ланок зоседжених елементів.

Частотні властивості ЛЗ характеризують амплітудно-частотна (АЧХ) і фазочастотна (ФЧХ) характеристики (рис. 4.17).

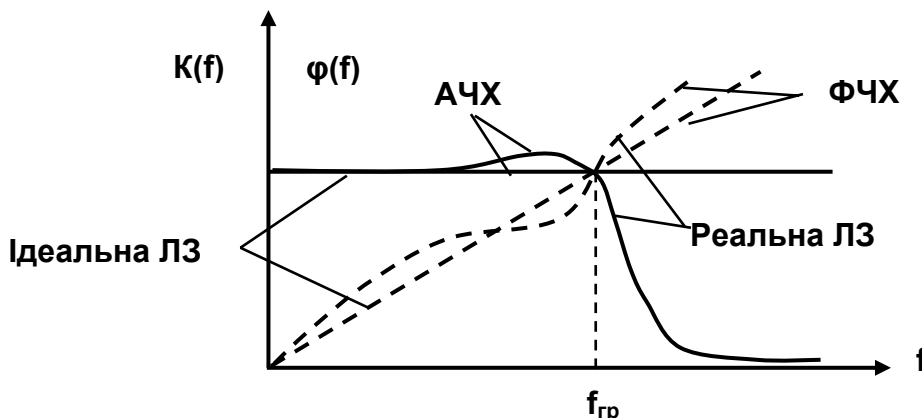


Рис. 4.17. Частотні характеристики ідеальної й реальної ЛЗ



Кількісний опис частотних властивостей ЛЗ адекватний співвідношенням для багатоланкових фільтрів низької частоти.

Спотворення форми прямокутних імпульсів при проходженні їх через ЛЗ характеризує тривалість фронту вихідного імпульсу.

Якщо задано необхідне значення тривалості фронту вихідного імпульсу  $\tau_{\phi}$ , то припустима кількість ланок  $k = 1,2 (T/\tau_{\phi})^{3/2}$ , а смуга пропускання  $\Delta f = 1/(\tau_{\phi} \cdot (L_{\text{я}} \cdot C_{\text{я}})^{1/2} \cdot k^{1/3})$ .

Рівність за величиною вихідного опору джерела сигналу й опору навантаження хвильовому опору ЛЗ відповідає узгодженому режиму роботи лінії затримки ( $R_{\text{д}} = W$ ;  $R_{\text{н}} = W$ ).

Якщо умова узгодження не виконується, то в лінії затримки виникають відбиті хвилі з коефіцієнтами відбиття на вході

$$K_{\text{вх}} = (R_{\text{д}} - W) / (R_{\text{д}} + W)$$

і виході

$$K_{\text{вих}} = (R_{\text{н}} - W) / (R_{\text{н}} + W).$$

При  $R_{\text{д}} = W$ ,  $R_{\text{н}} = 0$   $K_{\text{вих}} = -1$  одержують відбитий сигнал негативної полярності; коли ж  $R_{\text{д}} = W$ , а  $R_{\text{н}} = \infty$  (лінія розімкнена на виході)  $K_{\text{вих}} = 1$ , одержують відбитий сигнал позитивної полярності. Ці властивості ЛЗ використовують для аналогового формування імпульсів складної форми.

*Ультразвукові лінії затримки* застосовують, коли необхідно одержати  $T_3$  від десятків мікросекунд до одиниць милісекунд. У цих ЛЗ послідовно відбуваються перетворення електричних коливань в акустичні, створення затримки  $T_3 = L / V_{\text{сер}}$  ( $L$  - шлях хвилі в середовищі,  $V_{\text{сер}}$  - швидкість поширення хвилі в середовищі), зворотне перетворення в електричний сигнал (рис. 4.18).

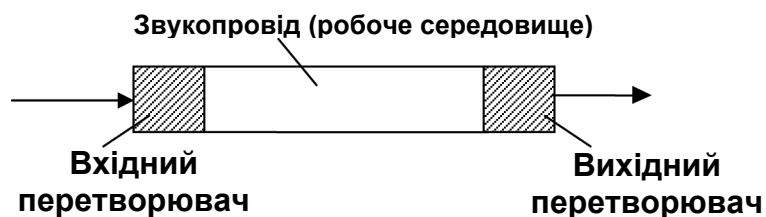


Рис. 4.18. Основні елементи ультразвукової ЛЗ

Перетворювачі з пластин п'єзокераміки або кварцу використовують прямий і зворотний п'єзоелектричні ефекти й позначаються на принципових схемах, як показано на рис. 4.19.

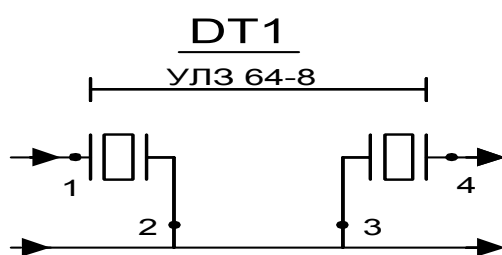


Рис. 4.19. Позначення п'єзоелектричних ЛЗ

Магнітострикційні лінії затримки використовують пряме й зворотне явища магнітострикції у феромагнетиках. Принцип роботи й позначення на схемах показано на рис. 4.20.

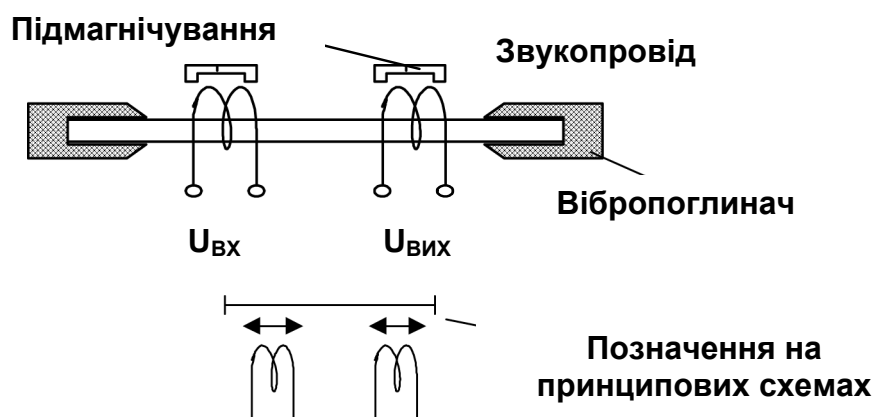


Рис. 4.20. Магнітострикційні ЛЗ

Для цього типу ліній затримки характерні значні втрати на перетворення й вузька смуга частот. Переваги - можливість плавно змінювати час затримки, простота конструкції, малі температурні впливи, мала вартість.

## 5. ЕЛЕКТРОННІ КОМПОНЕНТИ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО МОНТАЖУ

Поверхневий монтаж (ПМ) завдяки своїм перевагам широко застосовується в сучасній електроніці. Використання цього виду монтажу дозволив значно поліпшити масогабаритні характеристики електронних виробів.

За електричними характеристиками електронні компоненти для поверхневого монтажу у більшості випадків відповідають своїм аналогам звичайного виконання, відрізняючись тільки конструкцією виво-

дів. Для позначення цих елементів використовують термін Surface Mounted Device - SMD.

Найбільший інтерес для використання становлять елементи з двома виводами (SMD резистори, SMD конденсатори, SMD діоди й інші елементи), оскільки вони не викликають ніяких проблем з виготовленням печатної плати. Складніше виконати печатну плату під транзистори, мікросхеми та інші багатовивідні деталі, але й для цього існують відповідні прийоми (наприклад використання трафаретів).

При виборі виду монтажу варто враховувати, що малі розміри SMD деталей і відповідно малі зазори між контактними площадками для них на платі обмежують припустиму робочу напругу пристрою. Тому ті вузли, які працюють при великій напрузі, краще виконувати звичайним монтажем.

Мініатюрність багатьох SMD деталей викликає цілком зрозумілі проблеми щодо їхнього маркування. Для цього існують спеціальні стандарти, але оскільки вони носять лише рекомендаційний характер, багато фірм застосовують свої власні системи позначень або взагалі не маркують виріб.

Для особливо дрібних деталей, наприклад резисторів, відсутність маркування узаконена. Не прийнято наносити позначення номіналів і на керамічні конденсатори малої ємності (хоча й для них є стандарти). Все це призводить до ускладнень при ремонті й технічному обслуговуванні апаратури.

Невеликі розміри SMD компонентів потребують набагато більшої уважності й акуратності при монтажі, ніж звичайні. Паяльник повинен бути обов'язково з регулятором температури. Внаслідок нагрівання деталі в ній може порушитися контакт із виводами, а оскільки помітити це важко, пошук несправності виявляється досить трудомістким.

Розглянемо специфіку SMD компонентів на прикладі резисторів. Зовнішній вигляд постійного SMD резистора зображено на рис. 5.1 (на цьому рисунку виводи виділені сірим кольором).

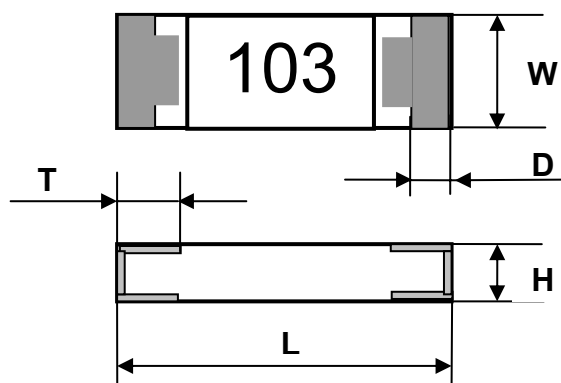


Рис. 5.1. Основні елементи SMD резисторів

Позначення типорозміру складається з чотирьох цифр (табл. 5.1). Дві перші відповідають округлено довжині L у прийнятій системі виміру (метричній або дюймовій), а дві останні - ширині W. Найбільший інтерес для радіоконструкторів становлять типорозміри 0805 і 1206.

Ряд фірм застосовує "особисті" позначення типорозміру резисторів. Деякі з них наведено в табл. 5.2.

Для позначення номіналу опору використовують широко розповсюджене цифрове маркування, у якому перші цифри – значення, а остання – показник степеня числа 10. Резистори з допусками  $\pm 20$ ,  $\pm 10$  і  $\pm 5$  % маркують трьома цифрами, а з допуском  $\pm 1$  % і більш точні - чотирма.

Таблиця 5.1

Типорозмір		Розміри й допуски, мм				
Дюймовий	Метричний	L	W	H	0	T
0402	1005	1 $\pm$ 0,1	0,5 $\pm$ 0,05	0,35 $\pm$ 0,05	0,25 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,1
0603	1608	1,6 $\pm$ 0,1	0,85 $\pm$ 0,1	0,45 $\pm$ 0,05	0,3 $\pm$ 0,2	0,3 $\pm$ 0,2
0805	2012	2,1 $\pm$ 0,1	1,3 $\pm$ 0,1	0,5 $\pm$ 0,5	0,4 $\pm$ 0,2	0,4 $\pm$ 0,2
1206	3216	3,1 $\pm$ 0,1	1,6 $\pm$ 0,1	0,55 $\pm$ 0,05	0,5 $\pm$ 0,25	0,5 $\pm$ 0,25
1210	3225	3,1 $\pm$ 0,1	2,6 $\pm$ 0,1	0,55 $\pm$ 0,05	0,4 $\pm$ 0,2	0,5 $\pm$ 0,25
2010	5025	5 $\pm$ 0,1	2,5 $\pm$ 0,1	0,55 $\pm$ 0,05	0,4 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,25
2512	6332	6,35 $\pm$ 0,1	3,2 $\pm$ 0,1	0,55 $\pm$ 0,05	0,4 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,25

Таблиця 5.2

Код	Позначення типорозмірів резисторів, вироблених різними фірмами							
	AVX	BECKMAN	NEOHM	PANASONIC	PHILIPS	ROHM	SAMSUNG	WELWYH
0603	CR10	BCR1/16	CRG0603	ERJ3	—	MCR03	RC1608	WCR0603
0805	CR21	BCR1/10	CRG0805	ERJ6	RC11/12	MCR10	RC2012	WCR0805
1206	CR32	BCR1/8	CRG1206	ERJ8	RC01/02	MCR18	RC3216	WCR1206

Для резисторів з опором менше 10 Ом з допуском  $\pm 5$  % і більше досить двох цифр, причому між ними ставлять букву R; якщо допуск резистора  $\pm 1$  % і менше, то необхідні три цифри й букву R поміщають перед останньою з них.

Приклади маркування:  $472 = 47 \cdot 10^2 \text{ Ом} = 4700 \text{ Ом} = 4,7 \text{ кОм}$ ;  $105 = 10 \cdot 10^5 \text{ Ом} = 1\,000\,000 \text{ Ом} = 1 \text{ МОм}$ ;  $3482 = 348 \cdot 10^2 = 34800 \text{ Ом} = 34,8 \text{ кОм}$ ;  $8R2 = 8,2 \text{ Ом}$ . Для резисторів опором 10 Ом і більше зручно користуватися простим правилом: до значущих цифр треба приписати кількість нулів, що дорівнює останній цифрі.

Резистори типорозміру 0603 (1608) з допуском  $\pm 1\%$  і менше мають кодове маркування з двох цифр і букви, зазначене в табл. 5.3. За цифровим кодом маркування визначають значущі цифри номіналу, а за буквеним – показник степеня числа 10. Приклад: 53С =  $53 \cdot 10^2 \text{ Ом} = 5,3 \text{ кОм}$ .

Таблиця 5.3

Код	S	R	A	B	C	D	E	F
Значення	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$

Крім резисторів випускають кілька типорозмірів перемичок-замикачів, які можна розглядати як резистори нульового опору. Такі перемички при поверхневому монтажі більш зручні, за звичайні дротяні. Найпоширеніші типорозміри перемичок - 0805 (2012) і 1206(3216). Маркують перемички завжди однаково - 000.

## 6. КОМУТАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ

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 елемента. Загальну структуру комутаційних пристроїв показано на рис. 6.1, а приклади позначень на принципових схемах електричних – на рис. 6.2.

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 у вилці й 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.

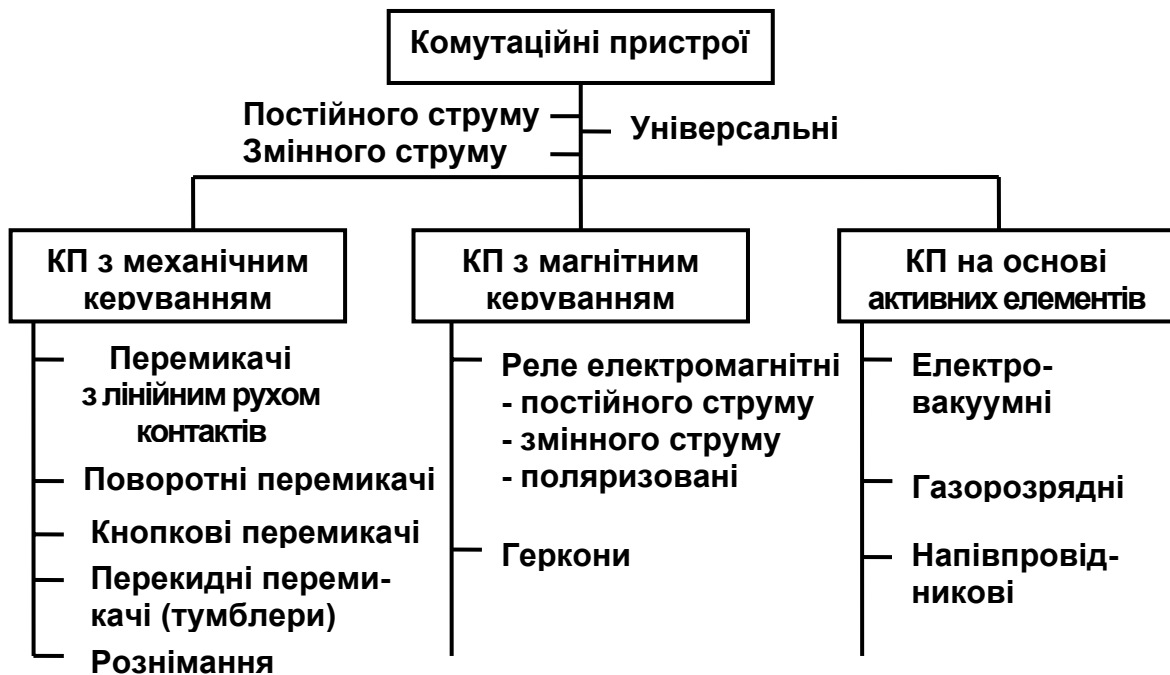


Рис. 6.1. Структура комутаційних пристроїв

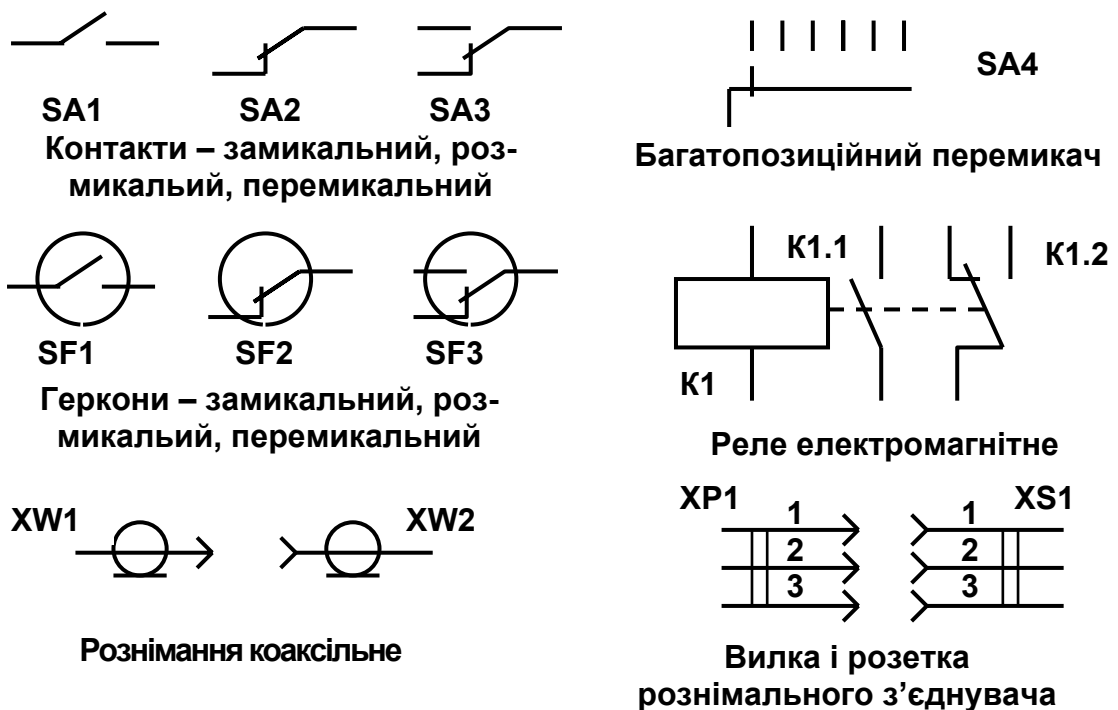


Рис. 6.2. Приклади позначень КП на принципових схемах

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.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Грабовски Б. Краткий справочник по электронике: пер. с фр. / Б. Грабовски. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 416 с.

Матвійків М.Д. Елементна база електронних апаратів: підруч. / М.Д. Матвійків, В.М. Когут, О.М. Матвійків. – 2-ге вид. – Л.: Вид-во Львів. політехн., 2007. – 428 с.

Мукосеев В.В. Маркировка и обозначение радиоэлементов. Системы цветовой и буквенно-цифровой маркировки отечественных и зарубежных радиоэлектронных элементов: справочник / В.В. Мукосеев, И.Н. Сидоров. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 352 с.

Олейник В.П. Элементная база электронных аппаратов (пассивные элементы): учеб. пособие / В.П. Олейник, Н.В. Долженков. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2004. – 61 с.

Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: учеб. пособие / К.С. Петров. – СПб.: Питер, 2004. – 522 с.

Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: справочник / Н.Н. Акимов, Е.П. Вашуков, В.А. Прохоренко, С.Н. Ходоренко. – Минск: Беларусь, 1994. – 591 с.

Терещук Р.М. Справочник радиолюбителя / Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А. Седов. – К.: Наук. думка, 1982. – 672 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Класифікація електрорадіоелементів.....	4
2. Резистори.....	7
2.1. Основні параметри резисторів.....	8
2.2. Резистори змінного опору.....	14
2.3. Спеціальні резистори.....	15
2.4. Особливості використання резисторів у РЕА.....	20
3. Конденсатори.....	24
3.1. Основні параметри конденсаторів.....	26
3.2. Конденсатори змінної ємності (КЗЄ).....	32
3.3. Спеціальні конденсатори.....	36
3.4. Особливості використання конденсаторів у РЕА.....	36
4. Індуктивні компоненти.....	44
4.1. Високочастотні котушки індуктивності.....	44
4.2. Трансформатори.....	50
4.3. Твердотілі аналоги LC кіл.....	52
4.4. Магнітні головки.....	53
4.5. Штучні лінії.....	54
5. Електронні компоненти для поверхневого монтажу.....	58
6. Комутаційні пристрої.....	61
Бібліографічний список.....	63



Олійник Володимир Петрович  
Колесник Роман Вікторович  
Куліш Сергій Миколайович  
Долженков Микола Васильович

**ПАСИВНІ ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТИ**  
**(елементна база радіоелектронних апаратів)**

Редактор С.П. Гевло

Зв. план, 2009

Підписано до друку 14.07.2009

Формат 60 x 84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк.

Ум. друк. арк. 3,6. Обл.-вид. арк. 4,06. Наклад 150 прим.

Замовлення 254. Ціна вільна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул.Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул.Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)