

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

**В. П. Олійник**

## **ЕЛЕМЕНТНА БАЗА РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2022

УДК 621.31(075.8)  
О-54

Рецензенти: д-р фіз.-мат. наук З. Є. Єременко,  
канд. техн. наук, доц. В. І. Огар

**Олійник, В. П.**

О-54 Елементна база радіоелектроніки [Текст] : навч. посіб. /  
В. П. Олійник. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського  
«Харків. авіац. ін-т», 2022. – 88 с.

ISBN 978-966-662-894-0

Наведено структуру елементної бази радіо- та електронної апаратури. Розглянуто функціональне призначення, основні електричні й експлуатаційні параметри й особливості застосування пасивних та активних напівпровідникових елементів, окремих зразків функціональної електроніки.

Для студентів спеціальностей 172 «Телекомунікації та радіотехніка», 163 «Біомедична інженерія» і фахівців, що проєктують, розробляють, експлуатують радіоелектронні технічні засоби широкого спектра застосування включно з авіаційною й медичною галузями.

Іл. 77. Табл. 18. Бібліогр.: 15 назв

**УДК 621.31(075.8)**

© Олійник В. П., 2022  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2022

ISBN 978-966-662-894-0

## ВСТУП

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

Компоненти (електрорадіоеlementи) 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 досконалість, необхідність урахування й непорушення сформованих зальновизнаних стилів і традицій, в іншому – якість відтворення переданої інформації, надійність, споживану потужність, масу й габарити пристрою, дизайн.

Радіоінженер, розпочинаючи розроблення принципової схеми, вирішує, які стандартизовані елементи, що випускаються промисловістю, доцільно використовувати. У деяких випадках він може ставити завдання з розроблення 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 – запроваджуються різні системи позначень, маркувань, що утруднює роботу радіоінженера з вибору оптимальної елементної бази для конкретного виробу.

Тому в навчальному посібнику особливу увагу приділено групам електричних параметрів, які однозначно характеризують властивості, призначення, особливості використання елементів незалежно від конкретного виробника (фірми, країни), але за наявності достовірної технічної документації. Першою при вивченні логічно розглянути групу основних пасивних елементів – резисторів, конденсаторів, індуктивних компонентів, пристроїв комутації. Для подальшого розгляду виділено напівпровідникові активні елементи, що набули найбільшого поширення в сучасній електроніці і є компонентною основою мікросхем.

# 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТІВ

Розроблення й промислове виробництво електрорадіоелементів здійснюють в основному підприємства електронної промисловості. Вибір компонентів часто неоднозначний, а отже, проєктування – 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 більшого значення у практичній діяльності радіоінженерів набувають системи автоматизованого проєктування (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 та оптичних носіях. Потрібну інформацію також можна одержати з мережі Інтернет безпосередньо з сайтів фірм-виробників. Усі радіоелементи, що випускаються промисловістю, можна поділити на класи, групи за найважливішими ознаками – фізичними, функціональними, технологічними тощо.

До найбільш загальної структури елементної бази радіоелектроніки належать матеріали, електронні компоненти, пристрої.

*Матеріали* – елементи, у яких домінуючою ознакою є електричні й магнітні властивості речовин. Це – з'єднувальні провідники, ізолятори, корпуси приладів, каркаси, магнітопроводи, осердя тощо.

*Електронні компоненти* – елементи, які мають дискретну будову та призначені для виконання конкретної функції. До цієї групи належать резистори, конденсатори, діоди, транзистори, радіолампи та інші дискретні елементи.

*Пристрої* – елементи, побудовані з використанням матеріалів та електронних компонентів, об'єднаних у закінчену конструкцію, що виконує цільову функцію, наприклад: усі різновиди мікросхем, панелі відображення інформації, модулі телекомунікацій тощо.

У сучасній структурі елементної бази електронні компоненти та пристрої об'єднані одним терміном – «*електрорадіоелементи*».

Електрорадіоелементи можна поділити на два принципово відмінних класи: активні й пасивні (рис. 1.1). *Активні елементи* — це різноманітні електронні прилади, що розрізняються за принципом дії й призначенням. Їх називають активними, тому що їх функціонування пов'язане зі споживанням енергії від зовнішніх джерел живлення. Зазвичай у радіоелектронних пристроях – це електрична енергія. Напруга таких джерел може бути постійною або змінною. Постійною напругою забезпечується живлення

анодних і сіткових кіл електровакуумних приладів, емітерних, колекторних та інших кіл транзисторних схем. Цим створюється заданий режим роботи активних приладів. Джерела постійної (високої) напруги використовуються для живлення електронних приладів надвисоких частот, телевізійних та осцилографічних трубок. Джерела змінної напруги застосовуються для підігрівання катодів електровакуумних приладів, перетворювачів напруги, випрямлячів.

Активні компоненти характеризуються специфічними властивостями, завдяки яким можливим є створення генераторів коливань, підсилювачів потужності, модуляторів, пристроїв оброблення сигналів та ін. Серед цих властивостей треба насамперед зазначити властивості невзаємності й нелінійності.

Щоб зрозуміти *властивість невзаємності*, слід уявити, що активний елемент відіграє роль керованого електричного клапана, який дозує надходження у вихідне коло електричної енергії, але не від вхідного керовального джерела, а від зовнішнього джерела постійної напруги. При цьому витрата енергії на керування є істотно меншою від керованої енергії (від джерела постійної напруги).

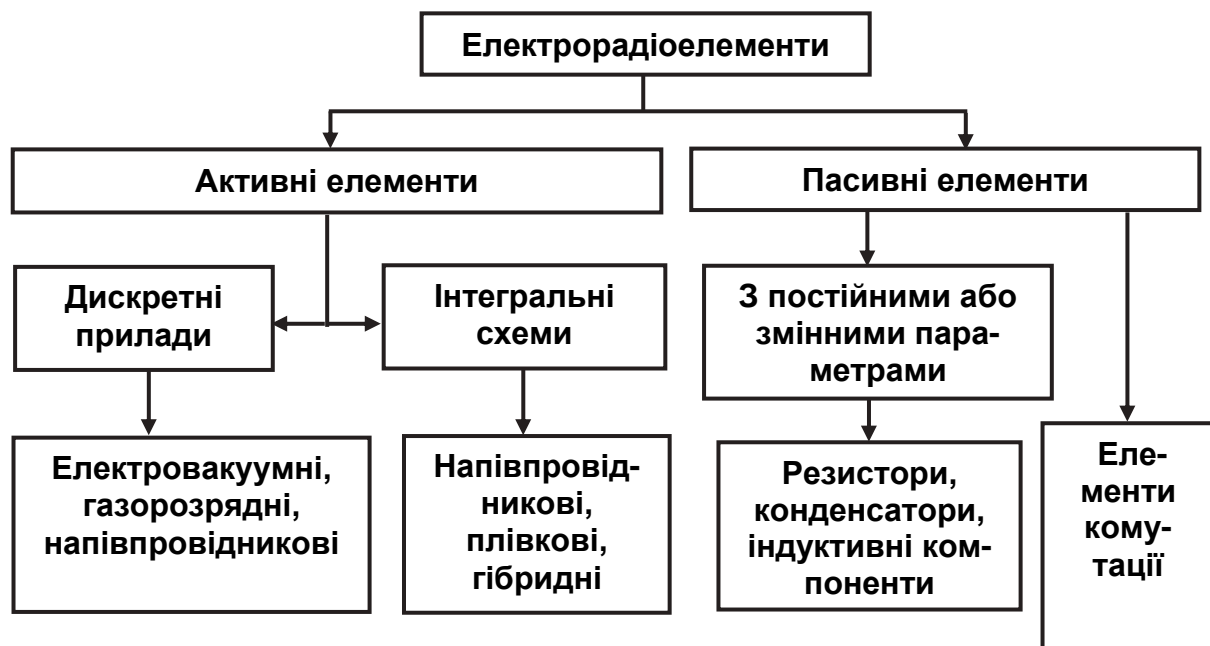


Рис. 1.1. Класифікація електрорадіоелементів

*Властивість нелінійності* пов'язують з непропорційністю вихідного ефекту вхідному впливу – кілька окремих одночасних впливів спричиняють 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 виокремлюють: 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 оброблення 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 колами»). 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 прилеглому шарі якого в єдиному технологічному циклі сформовано області, еквівалентні елементам електричної схеми (транзистори, діоди, резистори, конденсатори та ін.), а також з'єднання між ними. Технологічні процеси виготовлення напівпровідникових мікросхем мають груповий характер, тобто одночасно виготовляється велика кількість ІС.

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

За допомогою друкованого монтажу поєднують дуже малі за розмірами елементи ІС: конденсатори, індуктивні елементи, напівпровідникові прилади (діоди, транзистори). Резистори формуються як сполучні лінії необхідної площі перерізу 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 таких належать резистори, конденсатори, індуктивні компоненти, елементи комутації та пасивні елементи функціональної електроніки.

Пасивні елементи можна класифікувати за такими ознаками: призначення, діапазони частот, допустима потужність розсіювання, матеріали й технологія виготовлення, точність відтворення номінальних значень параметрів. Вони можуть мати постійні й змінні (регульовані) параметри. З цією ознакою пов'язані принципові відмінності в їх конструкціях. Елементи зі змінними параметрами зазвичай є значно дорожчими, 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 змінним опором; залежно від призначення поділяються на підстроювальні й регулювальні. Підстроювальні резистори застосовують 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 будови *резистивного елемента* резистори поділяють на дротяні й недротяні.

У дротяних резисторах 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 застосовуються 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 дає змогу 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 (великою латинською «R») з порядковим цифровим (іноді буквеним) індексом. Наприклад: R1, R2, R3, ..., R<sub>c</sub>. У деяких видах технічної документації й видань також указують 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 кількістю кілоомів з додаванням малої літери «к», наприклад, опір 3,3 кОм позначається як 3,3 к;

- опори резисторів від 1 МОм і вище позначаються кількістю мегаомів з додаванням великої літери «М», наприклад, опір 5 МОм позначається як 5 М;
- величина опору, яка становить частки або кількості з частками омів, позначається в омах із позначенням одиниці виміру, наприклад, опір 0,5 Ом позначається як 0,5 Ом;
- для змінного резистора вказується тільки максимальна його величина.

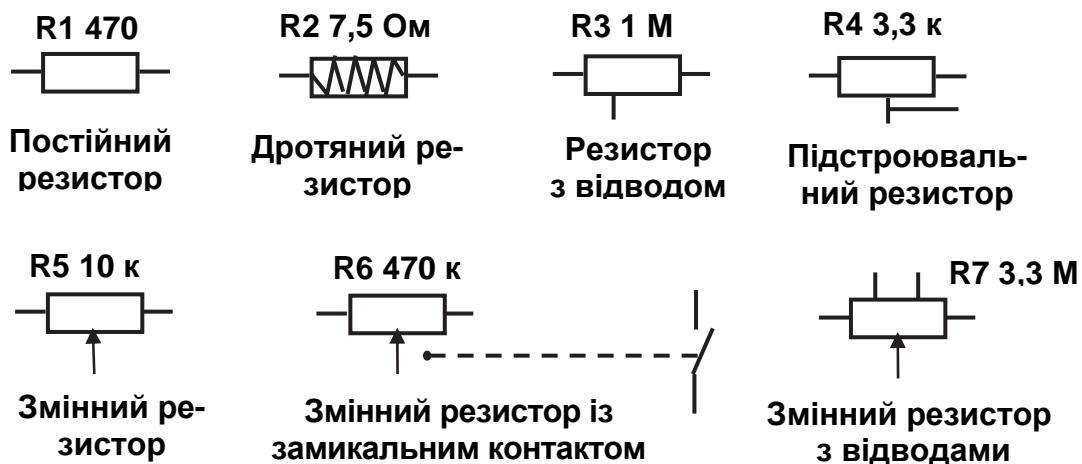


Рис. 2.1. Позначення резисторів на принципових схемах

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).

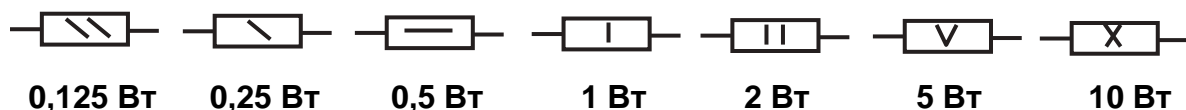


Рис. 2.2. Позначення номінальної потужності резисторів

## 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 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 наведено в 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 «безвідходна» шкала. При цьому номінал і допуск одного резистора примикають до номіналу й допуску сусіднього. Тому виготовлений резистор обов'язково потрапляє в одну з номінальних груп.

*Номінальна потужність розсіювання ( $P_{ном}$ )* указує допустиме електричне навантаження протягом тривалого часу при заданій стабільності опору. Номінальні потужності розсіювання у ватах 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 (зазвичай) резисторів – 5, 8, 10, 16, 25, 50, 75, 100, 160, 250, 500.

Потужність розсіювання визначається розмірами резистора, конструкцією й властивостями резистивного елемента. Часто користуються *питомою потужністю розсіювання*

$$P_{пит} = P_{ном} / S_R,$$

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

$$\Delta T = P_{пит} / K,$$

де  $K$  – коефіцієнт теплопередачі.

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

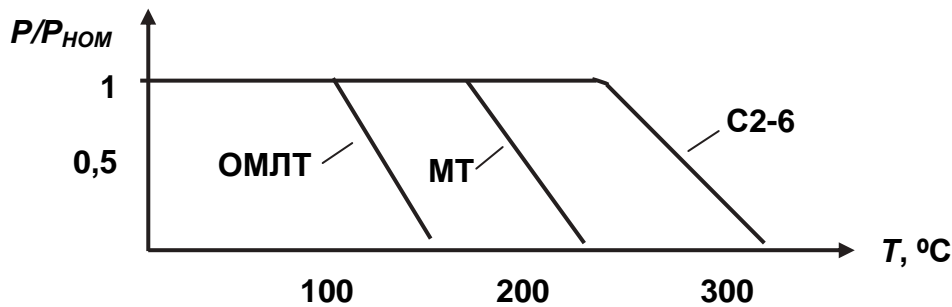


Рис. 2.3. Залежність потужності розсіювання від температури

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

$$U_{max} = \sqrt{P_{ном} R_{ном}}.$$

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

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

де  $p$  – тиск навколишнього середовища, Па;  $\ell$  – довжина резистора, см.

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

$$\alpha_R = (1/R_0)(dR/dT),$$

де  $R_0$  – опір резистора при номінальній температурі. Коефіцієнт  $\alpha_R$  вважають постійною величиною в усьому інтервалі робочих температур або у двох інтервалах від 25 °C і вище та від 25 °C і нижче. Абсолютне значення ТКО для різних типів резисторів може бути як  $\alpha_R > 0$  (товстоплівкові резистори), так і  $\alpha_R < 0$  (тонкоплівкові резистори). Значення опору резистора можна обчислити за формулою

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

де  $\Delta T$  – зміна температури відносно 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 резисторів характеризується безперервним, широким,

практично рівномірним спектром. ЕРС теплового шуму в смузі частот від  $f_1$  до  $f_2$  і температурі  $T = 300$  К визначається формулою

$$E_m = (\sqrt{R(f_2 - f_1)})/8,$$

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

*Струманий шум* виникає внаслідок випадкового змінення опору провідника й зумовлюється дискретною структурою струмопровідного елемента. Електричний струм у резистивному елементі створює локальні нагрівання, що супроводжуються порушенням контактів між одними частинками й утворенням контактів унаслідок спікання між іншими. Через це виникає флуктуація опору й струму, і на резисторі виникає шумова складова напруги.

Струманий шум має безперервний спектр, інтенсивність якого збільшується в області низьких частот. Оскільки ЕРС (або потужність) шуму залежить від струму, то вона має 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 плівкових, і є їх істотним недоліком при використанні в РЕА. За абсолютною величиною струманий шум може становити сотні мікрівольтів.

*Вологостійкість резисторів* визначається відносною зміною опору, що виникає після перебування резистора в камері вологості при  $T = 40$  °С і відносній вологості 95...98 % протягом заданого інтервалу часу.

Захисні покриття (лаки, емалі, пластмаси) повністю не захищають резистор від впливу вологи, а лише затримують проникнення вологи на час, приблизно пропорційний квадрату товщини матеріалу покриття. Повний захист може бути забезпечений тільки за допомогою вакуумно-щільної герметизації.

Після припинення впливу вологи номінальний опір резистора може не відновитися.

*Коефіцієнт старіння  $\beta_R$*  характеризує стабільність опору резисторів залежно від терміну експлуатації та зберігання  $t$ .

$$\beta_R = (1/R_0)(dR/dt).$$

Коефіцієнт  $\beta_R$  вважають незмінною величиною, що не залежить від часу контрольного спостереження.

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

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

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

Для резисторів застосовують 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 метало-плівкові, 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 ставлять на місце коми десяткового дробу, що виражає значення опору, наприклад: 5 кОм маркують як 5к; 500 Ом – к5; 4,7 кОм – 4к7.

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

Номінальну потужність вказують тільки на недротяних 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 до російськомовних термінів), наприклад, У – вуглецевий; М – металоплівковий; Б – боровуглецевий; К – композиційний. Друга буква позначає вид захисту резистивного елемента: Л – лакований; Г – герметичний; Э – емальований, ізолюваний, вакуумований. Третя буква позначає особливі властивості резистора: Т – теплостійкий; П – прецизійний; В – високоомний; М – малогабаритний; ОБ – об'ємний; Н – низькоомний.

Таблиця 2.3

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

*Дротяні резистори* характеризуються підвищеною стабільністю величини опору, термостійкістю, вологостійкістю й малим рівнем шумів, витримують значні перевантаження. Унаслідок високої індуктивності їх частотний діапазон не перевищує 1...2 МГц. Дріт, який використовується 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, а за призначенням – на *підстроювальні* для одноразового або періодичного підстроювання апаратури й *регулювальні* для багаторазового регулювання в процесі експлуатації.

*Функціональна характеристика* змінного резистора визначає залежність опору між рухомим контактом та 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 оберненологіфічною залежністю (група В) характеризуються плавним змінням опору на початку регулювання:  $R_B(\varphi) = R_{max}(1 - e^{-k\varphi})$ , де  $R_{max}$  – максимальний опір резистора.

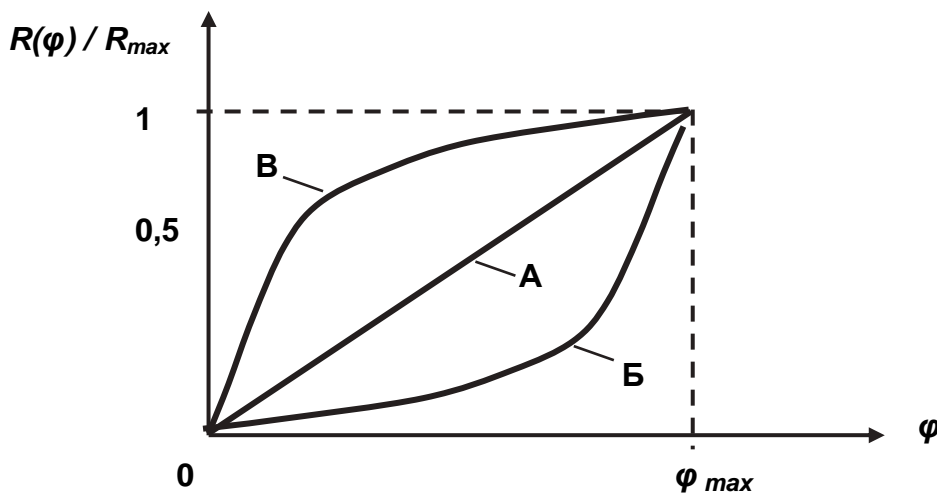


Рис. 2.4. Функціональні характеристики змінних резисторів

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

Змінні резистори мають кілька специфічних характеристик:

- *початковий стрибок опору* – мінімальний опір при зрушенні рухомого контакту з нульового положення;
- *точність установки*, що визначається роздільною здатністю резистора (зернистістю резистивного елемента, величиною площі контакту);
- *шуми обертання* (переміщення) – шуми, що виникають у процесі переміщення рухомого контакту;
- *момент обертання*, що визначає зусилля, яке необхідно прикласти до осі обертання для регулювання.

Дротяні резистори змінного опору характеризуються 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 є 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 змінням прикладеної напруги (рис. 2.5). Основне їх призначення – стабілізація й обмеження напруги.

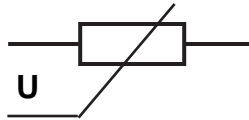


Рис. 2.5. Позначення варисторів на принципових схемах

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

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

Нелінійність характеристики обумовлена тим, що при збільшенні напруги відбувається перекриття дрібних зазорів між кристалами карбїду, опір зменшується, сила струму збільшується. Варистори виготовляють на напругу від 15 В до 25 кВ і струм від 50 мкА до 10 мА потужністю від 0,8 до 3 Вт.

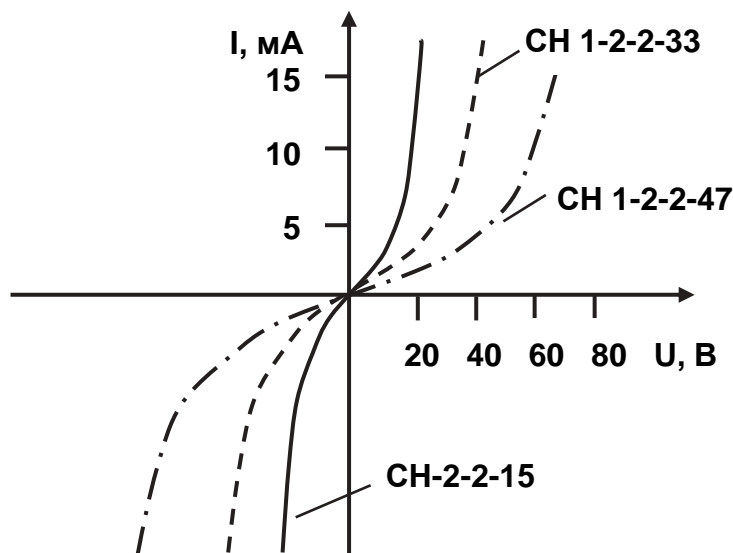


Рис. 2.6. Вольт-амперні характеристики варисторів

Опір варистора значно залежить від частоти струму й може відрізнятися від значення на постійному струмові до 10 разів. Для параметрів ва-

ристорів характерними є великі відхилення й нестабільність. Наприклад, струм при заданій напрузі може мати відхилення від  $\pm 10$  до  $\pm 20$  %. Температурний коефіцієнт опору може набувати значень  $10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

**Терморезистори** – це термочутливі резистори, опір яких значно змінюється зі зміненням 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 НВЧ-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 їх робоче тіло нагрівається струмом, що проходить через нього. Застосовуються 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 температурна залежність опору в робочому інтервалі температур визначається співвідношенням

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

де  $T_0$  – абсолютна температура, при якій опір терморезистора дорівнює  $R_0$ ;  $T$  – абсолютна температура, при якій 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 при різкому змінненні температури навколишнього повітря від 120 до 20  $^\circ\text{C}$ .

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

*Інтервал робочих температур* становить  $-60 \dots +180$   $^\circ\text{C}$  (залежно від типу). Основні типи термісторів із прямим підігрівом: КМТ, ММТ, СТ1, СТ3.

**Позистори** – терморезистори з великим позитивним ТКО. В інтервалі робочих температур  $-60 \dots +200$   $^\circ\text{C}$  кратність зміни опору може становити  $10^4$ . Основні типи позисторів: СТ5, СТ6.



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

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

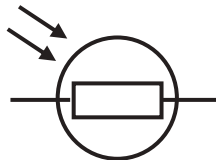


Рис. 2.7. Умовне графічне зображення фоторезисторів

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 відсутності випромінювання, що на нього падає (при прикладеній робочій напрузі  $U_p$  і темновому струмі  $I_T$   $R_T = U_p / I_T$ ).

**Світловий струм  $I_{CB}$**  – струм, що проходить 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  $\tau_n$  і стала часу за спадом струму  $\tau_{сп}$  (рис. 2.8).

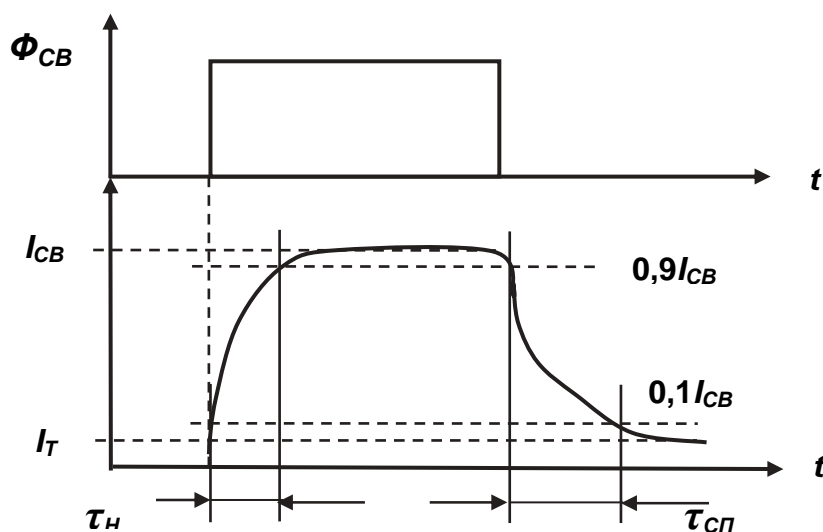


Рис. 2.8. Залежність струму фоторезисторів від освітленості в імпульсному режимі

Люкс-амперна характеристика фоторезисторів (рис. 2.9) відображає залежність світлового струму, що проходить через фоторезистор, від освітленості. Звичайно ця залежність має нелінійний характер.

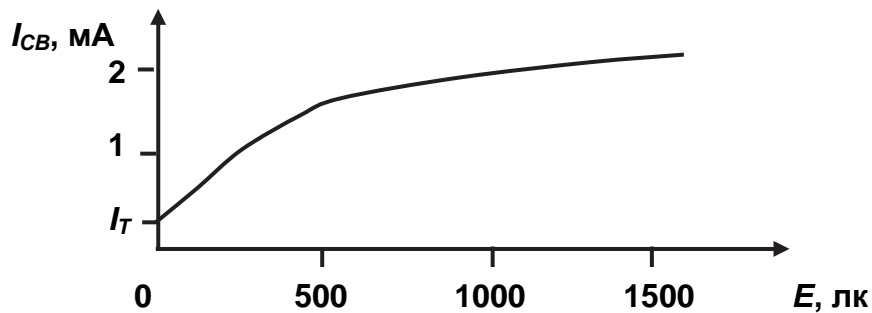


Рис. 2.9. Люкс-амперна характеристика фоторезисторів

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

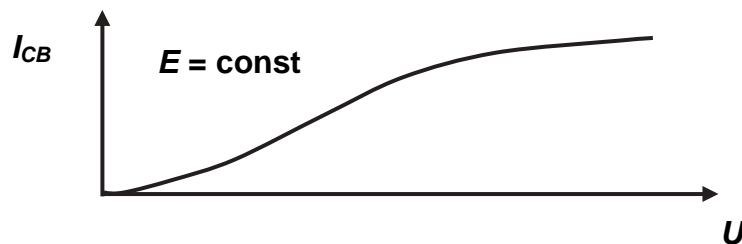


Рис. 2.10. Вольт-амперна характеристика фоторезисторів

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

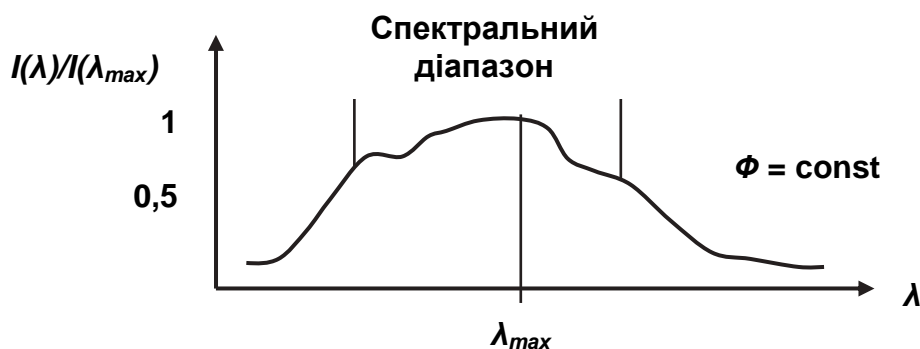


Рис. 2.11. Спектральна характеристика фоторезисторів

Температурний коефіцієнт світлового струму ( $TKI_{CB}$ ) фоторезистора характеризує відносне змінення струму  $I_{CB}$  залежно від температури при незмінності інших параметрів.

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

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

Цифри, 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. Дає змогу здійснювати передавання сигналів за відсутності електричного з'єднання в колі. Використовують для гальванічної розв'язки в сигнальних колах.

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

- дротяні тензорезистори, чутливим елементом яких є ґрати з тонкого дроту діаметром 2...30 мкм;
- фольгові тензорезистори, що мають ґрати з фольги завтовшки 5...10 мкм;
- напівпровідникові тензорезистори високої чутливості, чутливим елементом яких є напівпровідник завтовшки 20...50 мкм.

*Тензочутливість резистора S* визначається співвідношенням

$$S = (\Delta R) / (R \Delta l),$$

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).

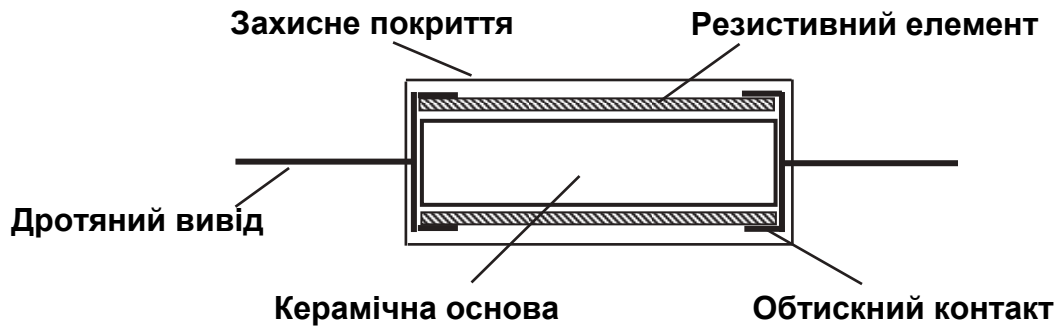


Рис. 2.12. Елементи конструкції резисторів загального призначення

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 резистивним елементом є спіраль із дроту.

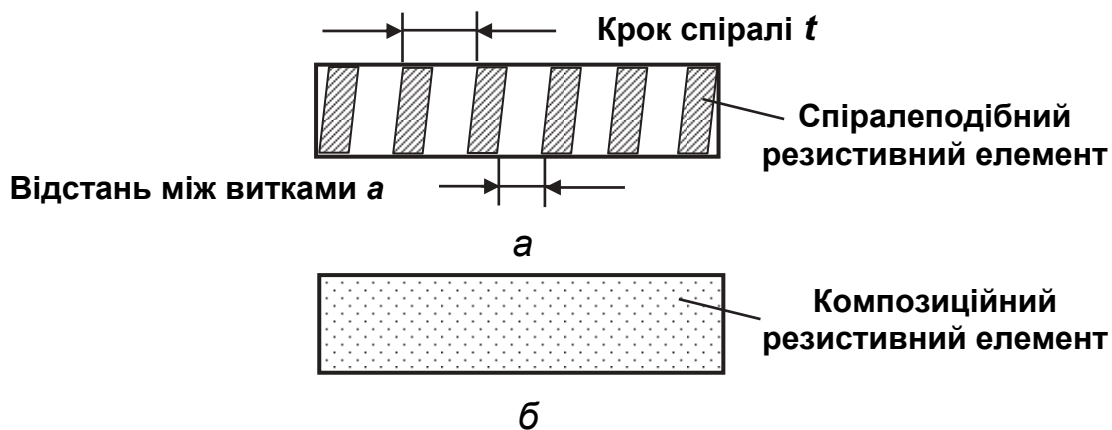


Рис. 2.13. Резистивні елементи недротяних резисторів

*Резистори в колі постійного струму.* У загальному випадку опір резистора постійному струму визначається не тільки опором резистивного елемента  $R_H$ , але й кількома іншими компонентами:  $R_K$  – контактним опором,  $R_O$  – опором основи,  $R_{ЗП}$  – опором захисного покриття. Покажемо це на схемі заміщення резистора, увімкненого в коло постійного струму (рис. 2.14).

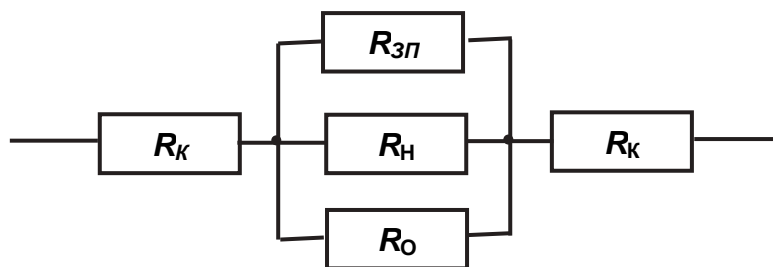


Рис. 2.14. Схема заміщення резистора на постійному струмі

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

$$R_{\Sigma} = 2R_K + R_H / [1 + (tR_H (R_{3П} + R_O)) / (a R_{3П} R_O)],$$

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

При нормальних температурі 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 виявлятися при невідчутному нагріванні резистивного елемента в цілому. Збільшення провідності резистивного шару пов'язують з електричним пробом 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).

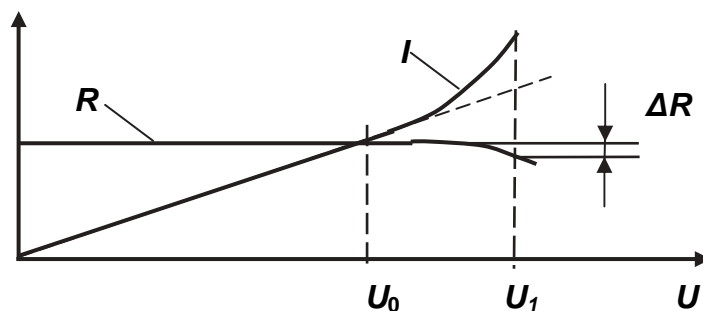


Рис. 2.15. Вольт-амперна характеристика реального резистора

Нелінійні властивості резисторів відображає *коефіцієнт напруги*  $K_H = \Delta R / R_0$ , де  $R_0 = R(U_0)$ ,  $R_1 = R(U_1)$ ,  $\Delta R = R_1 - R_0$ . Унаслідок таких властивостей резистор може бути джерелом нелінійних спотворень, як показано на рис. 2.16.

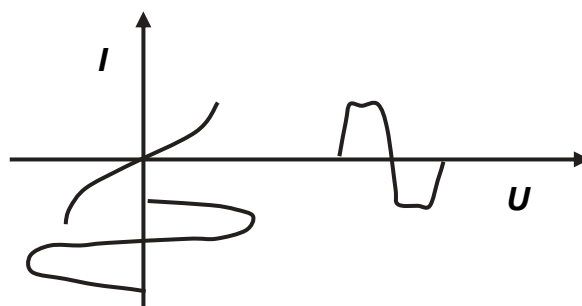


Рис. 2.16. Спотворення форми синусоїдального сигналу

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

$$K_{НВ} = K_H + \Delta T \cdot TCO.$$

*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.

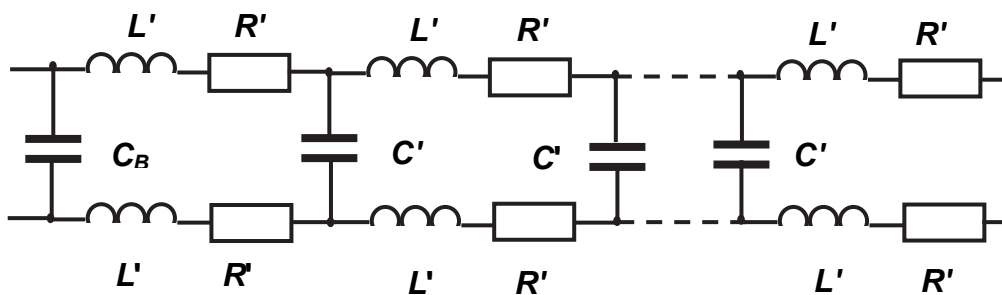


Рис. 2.17. Еквівалентна схема резистора на змінному струмі

Робота за такою еквівалентною схемою є вкрай незручною. У більшості випадків раціонально користуватися спрощеною схемою заміщення, зображеною на рис. 2.18.

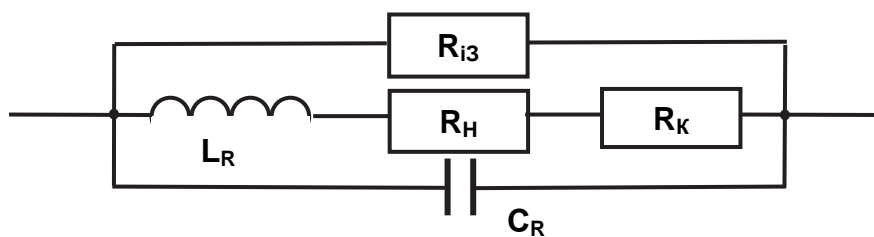


Рис. 2.18. Спрощена еквівалентна схема резистора для ВЧ-кіл

До *високоомних резисторів* можна віднести резистори, величина опору яких  $R > (L' / C')^{1/2}$ . Для реальних резисторів ця умова виконується, коли їх опір становить 300...3000 Ом. При таких величинах 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. Варто зазначити, що у величині  $R_f$  урахуються активні втрати, пов'язані з поверхневим ефектом і втратами в ізоляційних матеріалах на робочій частоті.

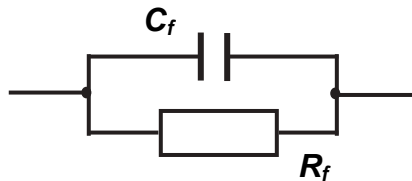


Рис. 2.19. Еквівалентна схема високоомного резистора у ВЧ-колах

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



Рис. 2.20. Еквівалентна схема низькоомного резистора у ВЧ-колах

Дротяні резистори через велику власну індуктивність у високочастотних 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, що складається з двох провідників (обкладинок), розділених діелектриком, і 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] = Ф (фарада);  $10^{-6}$  Ф = 1 мкФ (мікрофарада);  $10^{-9}$  Ф = 1 нФ (нанофарада);  $10^{-12}$  Ф = 1 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, пФ:

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

де **d** – товщина діелектрика, мм; **S** – площа обкладинок, мм<sup>2</sup>; **ε** – відносна діелектрична проникність діелектрика.

Для циліндричного конденсатора ємність розраховують за формулою

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

де  $D_1$  і  $D_2$  – діаметри зовнішньої і внутрішньої циліндричних обкладинок, мм;  $l$  – їх довжина, мм.

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

*Конденсатори постійної ємності* – це конденсатори з фіксованою ємністю, що в процесі експлуатації не регулюється. Застосовуються в ланцюгах блокування і розв'язки по колах живлення як перехідні і роздільні між каскадами підсилення, як елементи фільтрів і коливальних контурів. Існує велика кількість типів постійних конденсаторів. Значна частина їх є стандартизованою, налагоджено їх масове виробництво.

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

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

*Спеціальні (нелінійні) конденсатори* – це конденсатори, ємність яких визначається прикладеною напругою (вариконди) або температурою (термоконденсатори).

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

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

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

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

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

- ємності від 1 до 999 пФ позначають без зазначення одиниці виміру, наприклад: ємність 3300 пФ буде позначено 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;



- для оксидних (електролітичних, полярних) конденсаторів поруч з позначенням ємності вказують знак «х» і робочу напругу конденсатора у вольтах, наприклад: конденсатор ємністю 100 мкФ на робочу напругу 25 В позначають як 100 мк х 25 В.

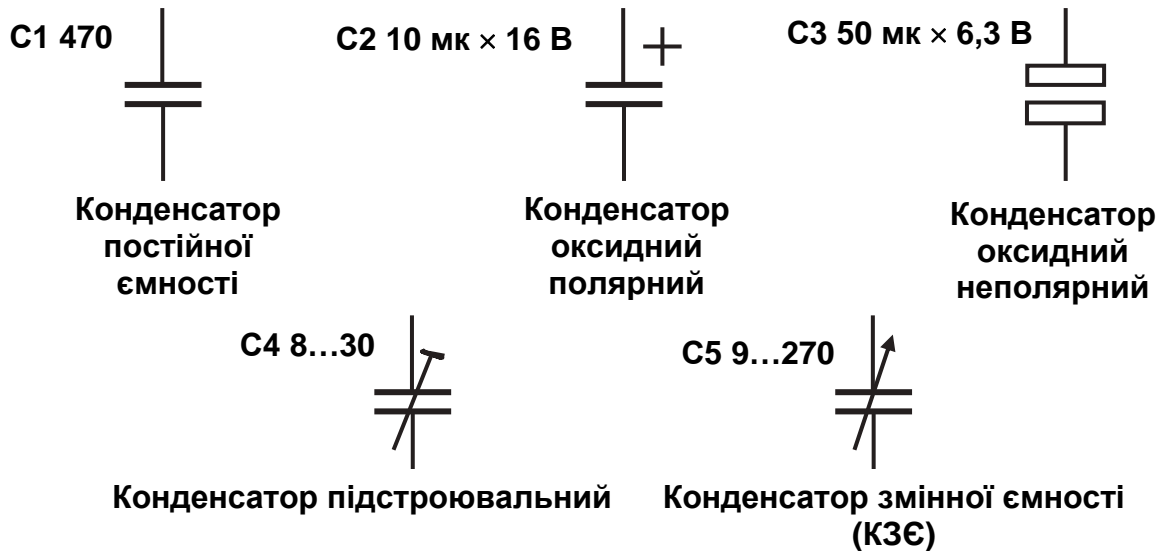


Рис. 3.1. Умовні позначення конденсаторів на схемах

### 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 конденсатора відповідно до нормативної документації. Номінальні ємності всіх типів конденсаторів постійної ємності є стандартизованими і з точністю до множника відповідають рядам Е6–Е192 (докладно розглянуто в розд. 2).

*Допустиме відхилення ємності від номінальної (допуск)* характеризує точність задавання ємності. Значення цих відхилень є стандартизованими, 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.

*Номінальна робоча напруга* (номінальна напруга  $U_{ном}$ ) – максимальна напруга, при якій конденсатор може працювати в заданих умовах експлуатації протягом гарантованого терміну використання. Зазвичай її вказують на конденсаторі. Номінальні напруги та їх кодування (в основному для малогабаритних конденсаторів) наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.1

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

Таблиця 3.2

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

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

Таблиця 3.3

$U_{\text{ном}}, \text{В}$	Код	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	Код
1,0	I	63	K
1,6	P	80	L
2,5	M	100	N
3,2	A	125	P
4,0	C	160	Q
6,3	B	200	Z
10	D	250	W
16	E	315	X
20	F	350	T
25	G	400	Y
32	H	450	U
40	S	500	V
50	J		

*Пробивна напруга* – мінімальна напруга, при якій відбувається електричний пробій конденсатора при швидкому випробуванні. Ця напруга перевищує номінальну в 1,5–3 рази.

*Опір ізоляції* – опір конденсатора постійному струму:

$$R_{I3} = U_{НОМ} / I_{ВТ} ,$$

де  $I_{ВТ}$  – струм витоку або провідності. Найбільший опір ізоляції (десятки тисяч мегаомів) мають плівкові конденсатори, найменший – електролітичні оксидні.

*Стала часу конденсатора* – добуток опору ізоляції та ємності конденсатора:  $\tau_c = R_{I3}C$ . Величина  $\tau_c$  є основною характеристикою якості конденсатора на постійному струмі. Розмірність:  $[\tau_c] = c$  (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  $e$  разів (або до 37 % від початкового значення).

*Реактивна потужність конденсатора* характеризує «навантажувальну» здатність конденсатора на змінному струмі:

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

Звідси отримуємо допустиме значення амплітуди  $U_a$  змінної напруги на конденсаторі, В, при заданій потужності  $P_p$ , вар (реактивні вольт-ампери):

$$U_a = (P_p / \omega C)^{1/2}, \text{ або } U_a \approx 565(P_p / fC)^{1/2},$$

де  $f$  – частота струму, МГц;  $C$  – ємність конденсатора, мкФ.

*Тангенс кута втрат ( $\text{tg}\delta$ )* характеризує втрати енергії у конденсаторі на змінному струмі. Втрати відбуваються в обкладинках і діелектрику. Основні втрати припадають на діелектрик. Наявність активних втрат ( $P_a = I^2 R_{I3}$ ) приводить до того, що вектор повного струму відхиляється на кут  $\delta$  відносно вектора ємнісного струму. Тоді відношення потужності активних втрат до реактивної потужності можна записати як

$$P_a / P_p = (UI \sin\delta) / (UI \cos\delta) = \sin\delta / \cos\delta = \text{tg}\delta.$$

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

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

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

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

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

$$\text{ТКЄ} = \alpha_c = (C_0 - C_T) / (T_0 - T)C_0 = \Delta C / \Delta T C_0,$$

де  $C_0$  – ємність конденсатора при номінальній температурі  $T_0$ ;  $C_T$  – ємність конденсатора при температурі  $T$ .

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 на практиці  $\alpha_\epsilon \ll |\alpha_s| + |\alpha_d|$ , 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 °С.

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.

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	U
М1500	-1500	V
М2200	-2200	К
М3300	-3300	Y

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
Буквенний код	B	Z	D	X	E	F

*Необоротні зміни ємності* конденсатора  $\Delta C$  під дією температури характеризують коефіцієнтом температурної нестабільності ємності (КТНЄ):

$$КТНЄ = \beta_c = \Delta C / C.$$

З підвищенням температури зменшуються також електрична міцність конденсатора та термін його експлуатації.

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.

**Маркування конденсаторів.** Повне маркування конденсаторів містить такі позначення: тип конденсатора, номінальна ємність і напруга, допустиме відхилення ємності від номінальної (у відсотках), група ТКЄ, місяць і рік випуску. Маркування може бути буквено-цифровим або виконаним за допомогою кольорів.

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

Трапляються 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 зборки.

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 «п», наприклад, ємність 0,022 мкФ – 22 п.

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 «т», наприклад, 2000 мкФ – 2 т.

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

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

Таблиця 3.7

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

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

### 3.2. Конденсатори змінної ємності

Конденсатори змінної ємності (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 обертального або поступального руху ротора; струмознімачі. Зазвичай 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, вимірвальна апаратура тощо;
- *застосовуваний діелектрик* – твердий, рідкий, газоподібний, вакуумний;
- *закон змінення 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 змінення ємності* – змінення площі перекриття пластин, змінення зазорів між пластинами, змінення 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 оцінювання можливості перестроювання коливального контуру за частотою розглянемо характерну схему вмикання, зображену на рис. 3.2.

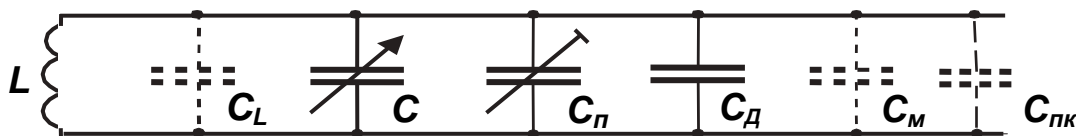


Рис. 3.2. Еквівалентна схема коливального контуру

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

Усі ємності визначають мінімальну ємність контуру:

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

Тоді максимальна ємність контуру

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

Коефіцієнт перекриття за частотою знаходимо за співвідношенням

$$K_f = f_{макс} / f_{мін} = (C_{к. макс})^{1/2} / (C_{к. мін})^{1/2} = (C_{к. мін} + C_{змін})^{1/2} / (C_{к. мін})^{1/2}.$$

Звідси можна одержати залежність

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

У табл. 3.8 наведено рекомендовані в межах робочого діапазону частот значення ємностей  $C_{к.мін}$  і  $C_{змін}$ , що є оптимальними для забезпечення коефіцієнта перекриття за частотою та необхідних величин чутливості приймача або потужності передавача.

Таблиця 3.8

Діапазон	$C_{к. мін}$ , пФ	$C_{змін}$ , 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 електровимірювальній техніці іноді застосовують конденсатори з максимальною ємністю – 3000...5000 пФ.

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

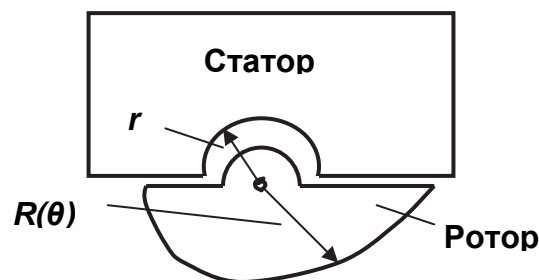


Рис. 3.3. Елементи конденсатора змінної ємності



Функціональну залежність радіуса ротора від кута повороту  $\theta$  конденсатора, що має  $n$  пар пластин, з відстанню  $d$  між пластинами описує вираз

$$R(\theta) = [r^2 + (1440d/1,11(n-1))dC/d\theta]^{1/2}.$$

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

Для прямокутного конденсатора

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

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

Для прямохвильового типу конденсатора

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

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

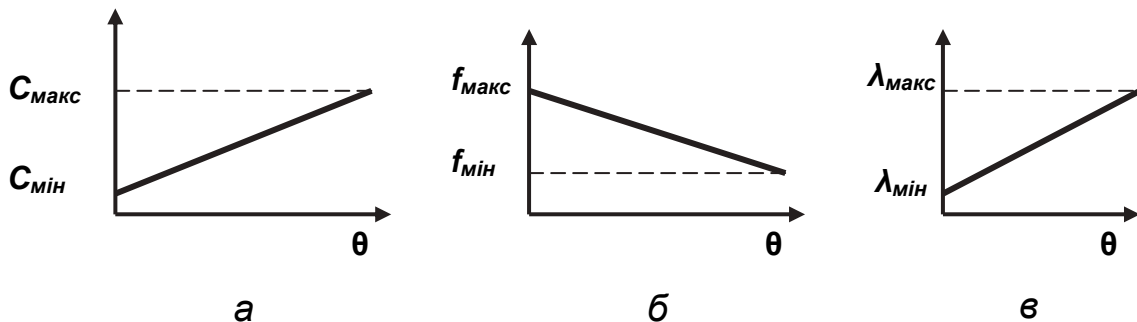


Рис. 3.4. Графіки функціональних залежностей для КЗЄ

Температурний коефіцієнт конденсатора змінної ємності. З огляду на те, що ТКЄ всього конденсатора описується виразом

$$\alpha_c = \alpha_c(C_{мін}) + \alpha_c(C_{змін}),$$

причому  $\alpha_c(C_{мін}) \ll \alpha_c(C_{змін})$ , можна припустити, що  $\alpha_c \approx \alpha_c(C_{змін})$ . Для практичних цілей останній коефіцієнт можна знайти за формулою

$$\alpha_c = \alpha_\epsilon + [\alpha_{мп}(2d + h) - \alpha_B(2d + h)]/d,$$

де  $h$  – товщина пластини;  $d$  – відстань між пластинами;  $\alpha_{мп}$  – температурний коефіцієнт розширення матеріалу пластин;  $\alpha_B$  – температурний коефіцієнт розширення матеріалу втулки.

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

### 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.

Номинальні значення ємності варикондів визначаються при нарузі 5 В і частоті 50 Гц (в інших випадках умови вимірювання наводяться) і для різних типів знаходяться в інтервалі значень 100 пФ...0,1 мкФ. При збільшенні напруги ємність варикондів збільшується, набуває максимального значення, а потім зменшується.

Ця властивість дає змогу застосовувати вариконди у параметричних підсилювачах, помножувачах частоти, стабілізаторах напруги, генераторах періодичних коливань та інших пристроях. 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 при частоті 50 Гц. Спеціальні вариконди призначені для роботи на надвисоких частотах.

Конструктивно вариконди виготовляють у вигляді дисків завтовшки 0,4...0,6 мм, покритих червоною емаллю.

*Термоконденсатори* призначено для роботи як вбудовані елементи в колах термостабілізації й термокомпенсації електронної апаратури. Серійно випускаються 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) характеризуються 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 завтовшки 0,2...0,6 мм. Обкладинки виготовляють 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.

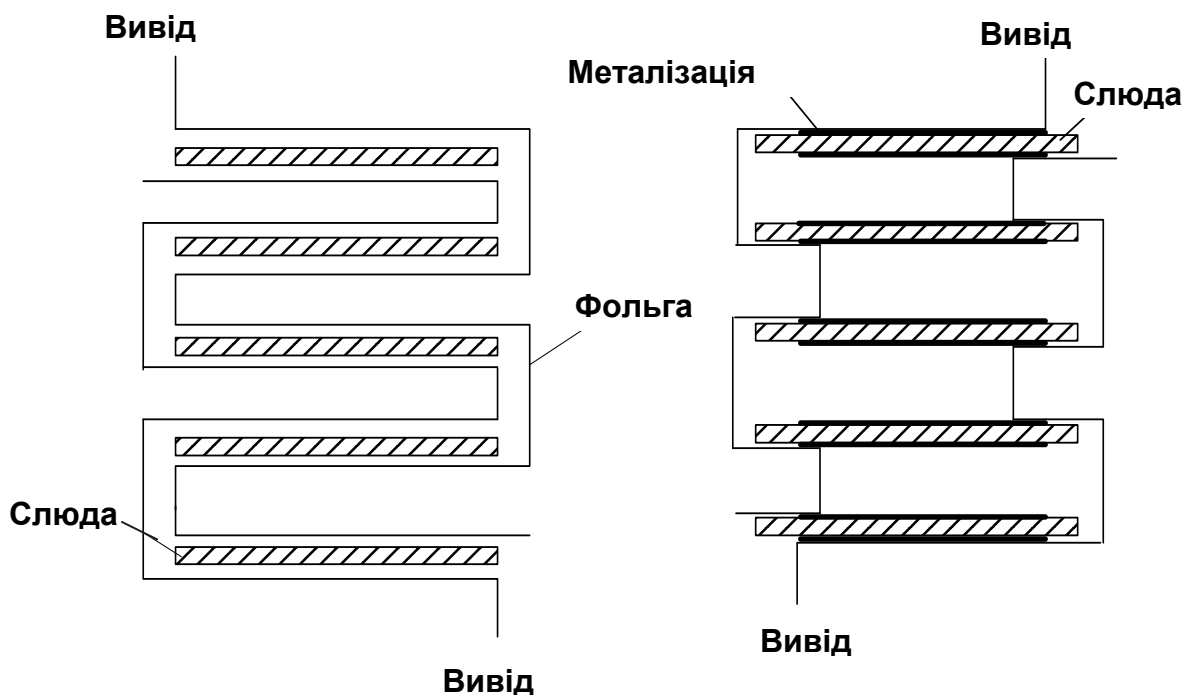


Рис. 3.5. Конструкція слюдяних конденсаторів

Слюдяні конденсатори за способом захисту пакета від впливу зовнішнього середовища поділяють на відкриті, опресовані в пластмасу, герметизовані. Опір ізоляції слюдяних конденсаторів становить 7,5...50 ГОм, добротність перевищує 1000. Застосовуються як контурні, перехідні, розділові, блокувальні конденсатори, а також як елементи різних фільтрів.

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

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

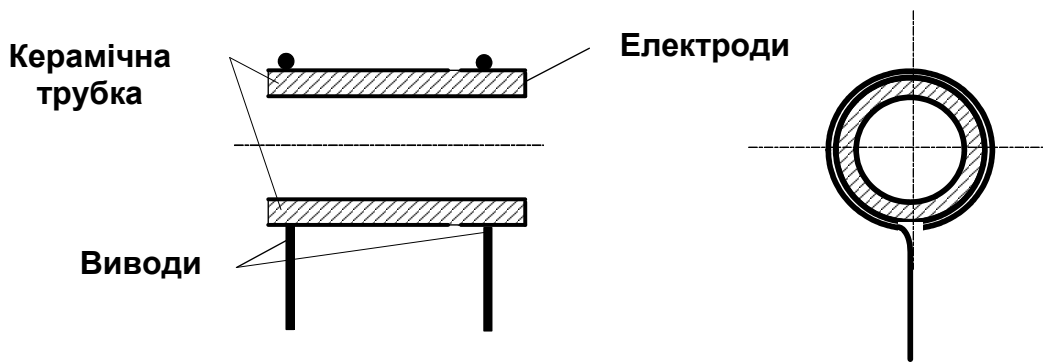


Рис. 3.6. Конструкція трубчастого керамічного конденсатора

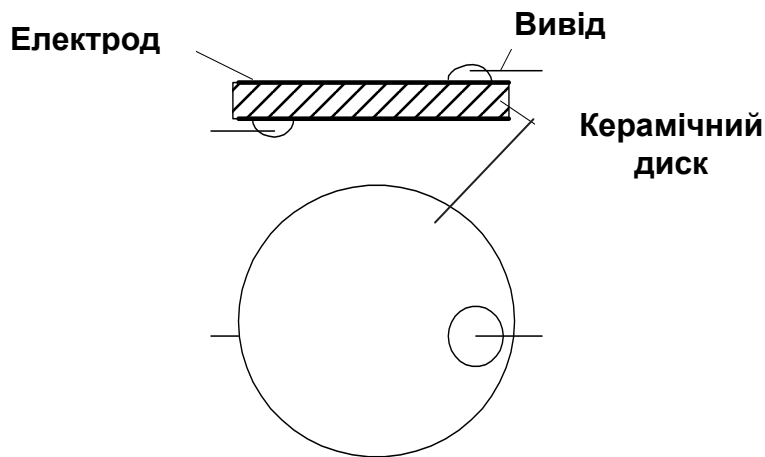


Рис. 3.7. Конструкція дискового конденсатора

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. Цього недоліку немає в литому й монолітному керамічному конденсаторах.

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

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

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

Керамічні конденсатори застосовуються як контурні, блокувальні, розділові, прохідні й опорні елементи.

*Скляні конденсатори* являють собою монолітні спечені блоки з шарів скляної плівки й алюмінієвої фольги, що чергуються. Мають підвищені теплостійкість і добротність. Опір ізоляції становить 10...50 ГОм. Призначення й основні параметри такі самі, що й керамічних конденсаторів.

*Склокерамічні конденсатори* за конструкцією подібні до скляних. Діелектриком є скло з домішкою високочастотної кераміки. За електричними параметрами близькі до керамічних і скляних.

*Склоемалеві конденсатори* за конструкцією подібні до скляних. Діелектриком у них є 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 завтовшки 4...15 мкм, згорнутих у вигляді круглого або овального рулону. Для підвищення електричної міцності й стабільності конденсатор просочують парафіном, церезином, вазеліном, маслом або спеціальними компаундами.

У *металопаперових конденсаторах* металеві обкладинки наносять методом вакуумного випаровування безпосередньо на лаковану основу паперової стрічки (рис. 3.8). Їх особливістю є здатність до самовідновлення після пробою.

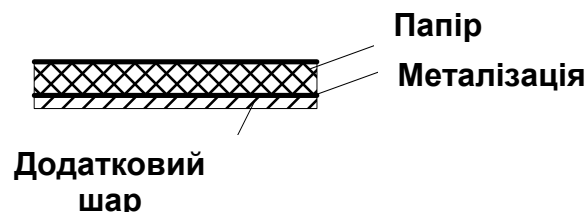


Рис. 3.8. Структура металопаперових конденсаторів

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

У *плівковкових і металоплівкових конденсаторах* діелектриком є тонка плівка з пластмаси (полістиролу, фторопласту), 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.

В *оксидних електролітичних й оксидно-напівпровідникових конденсаторах* діелектриком є оксидний шар (завтовшки 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. При однакових електричних параметрах танталові конденсатори мають менший об'єм, ніж конденсатори з алюмінієвими електродами.

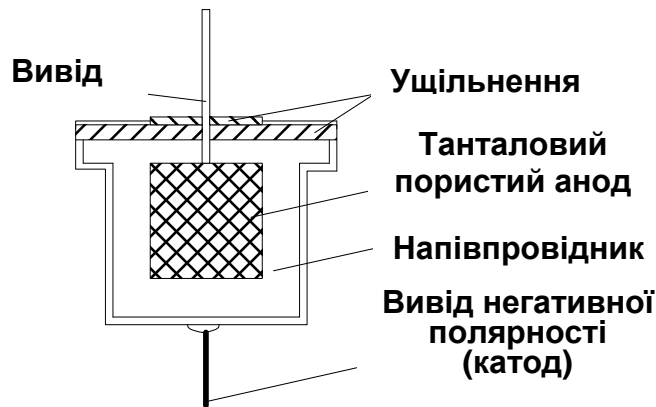


Рис. 3.9. Будова оксидно-напівпровідникового конденсатора

Оксидні конденсатори характеризуються великою питомою ємністю. Використовуються в колах постійного й імпульсного струму, фільтрах випрямлячів, як блокувальні й перехідні елементи 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.

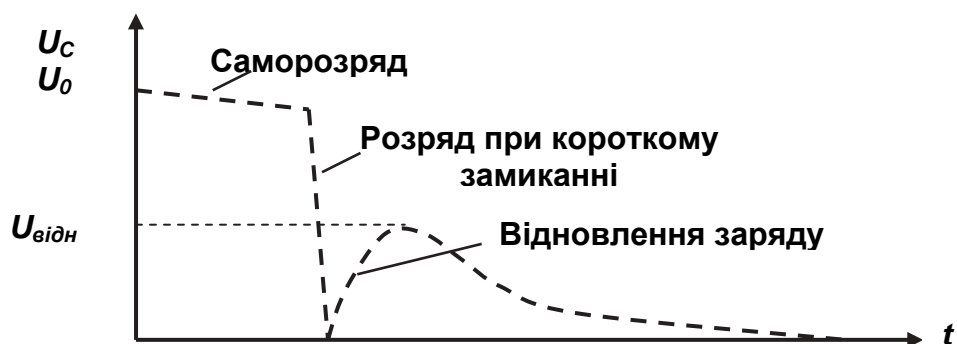


Рис. 3.10. Зміна заряду на конденсаторі при абсорбції

Як наслідок при проведенні ремонтних робіт у високовольтних колах виникають небезпечні (уражальні) 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.

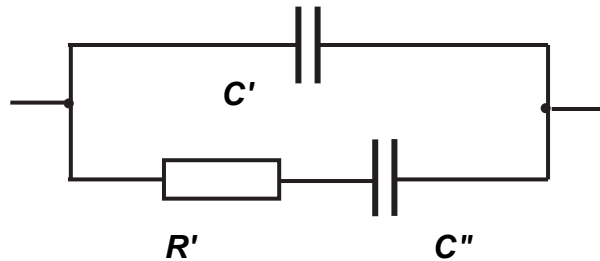


Рис. 3.11. Еквівалентна схема для моделювання абсорбції

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 діелектрик – провідник. 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  $C''$  унаслідок абсорбції. Цей процес характеризує коефіцієнт абсорбції

$$K_a = U_{\text{відн}} / U_0.$$

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

**Робота конденсаторів у високочастотних (ВЧ) 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).

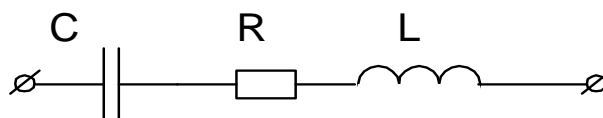


Рис. 3.12. Еквівалентна схема конденсатора на ВЧ

Наявність індуктивності призводить до нехарактерної залежності повного опору конденсатора  $Z_c$  від частоти й спричиняє появу резонансних явищ у конденсаторі. На резонансній частоті опір конденсатора є

мінімальним 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. 3.13.

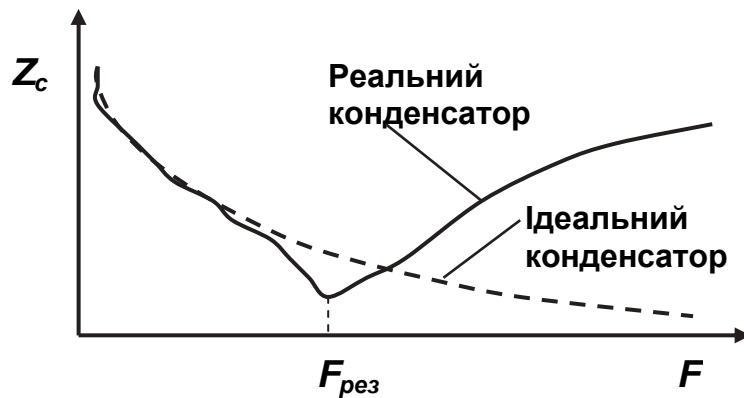


Рис. 3.13. Резонансні явища в конденсаторах

Коректне використання конденсатора є можливим 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. При наближенні 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, якщо можливо, більш короткими, а іноді виготовляти безвивідні конденсатори (зазвичай керамічні) з металізованими торцями, якими їх безпосередньо впаюють у 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 й 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, шляхом покриття 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 є 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 належать повітряні включення, що сприяють іонізації й коронним розрядам з виділенням вуглецю навіть при напругах 300...500 В.

Ще один вид специфічних відмов – втрата контакту між обкладинками й виводами, що виникає лише при малих напругах. Таке явище є властивим алюмінієвим обкладинкам з накладними виводами й зумовлено виникненням на алюмінієвій поверхні тонкої окисної плівки.

Поступові відмови спричиняються в основному процесами старіння й окиснювання внаслідок збільшення втрат і зменшення опору ізоляції.

Можна показати, що інтенсивність відмов і термін експлуатації конденсаторів при різних напругах і температурах оцінюють із таких співвідношень:

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

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 за виразом

$$D = D_n (K_n)^{-n} \exp(-0,693\Delta T),$$

де  $D_n$  – термін експлуатації при нормальних умовах;  $\Delta T$  – температура перегріву над нормальною ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ );  $n$  – показник степеня (для керамічних конденсаторів  $n = 3$ , для паперових  $n = 5...15$ ).

При роботі РЕА на космічних апаратах, об'єктах атомної енергетики, медичній апаратурі передбачається вплив на них іонізувальних випромінювань. Вплив останніх призводить до порушення структури матеріалів, погіршення електричної й механічної міцності.

Конденсатори з органічними діелектриками є більш чутливими до впливів іонізувального випромінювання, ніж конденсатори з неорганічними діелектриками. Найбільш стійкими до впливу іонізувального випромінювання є 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, комплексний 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 можна поділити на циліндричні, спіральні, тороїдальні, одношарові, багатшарові, із осердям або без нього, екрановані, з постійною або змінною індуктивністю.

На принципових електричних схемах поруч з умовним графічним зображенням катушки індуктивності поміщають її символічне літерне позначення (латинська прописна буква «L») з порядковим цифровим (іноді буквеним) індексом. Значення індуктивності на схемі зазвичай не вказують (рис. 4.1).

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

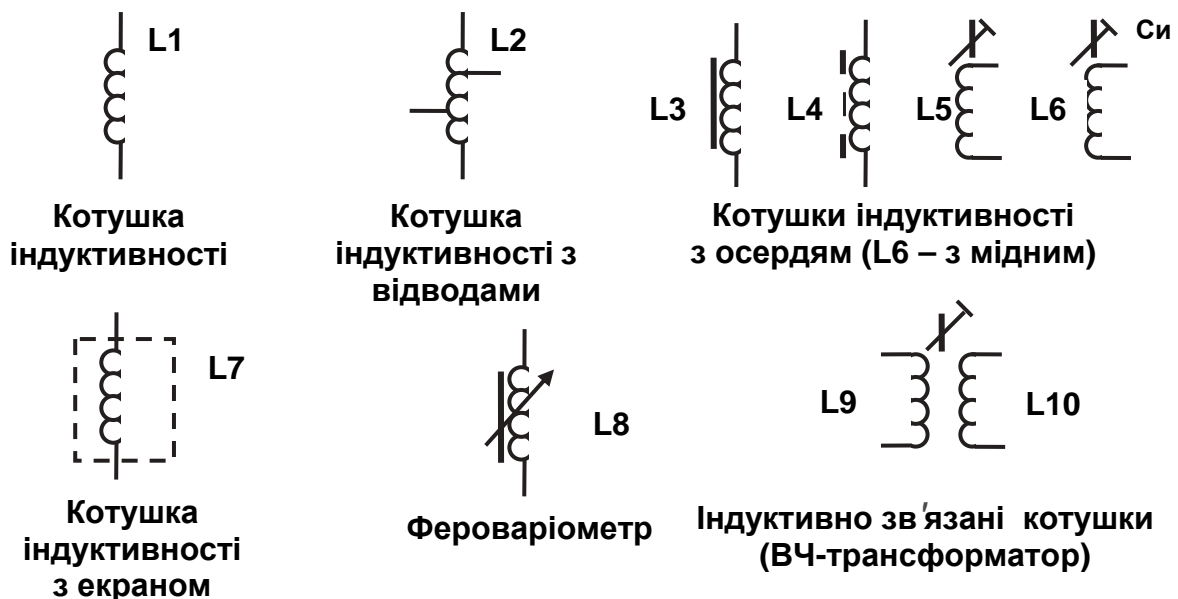


Рис. 4.1. Позначення катушок індуктивності на схемах

Розглянемо основні параметри високочастотних котушок.

*Індуктивність* характеризує кількість енергії магнітного поля, що запасється котушкою, при проходженні по ній електричного струму. Одиниця виміру індуктивності – генрі (Гн) та її частки: мілігенрі (1 мГн =  $10^{-3}$  Гн), мікрогенрі (1 мкГн =  $10^{-6}$  Гн), наногенрі (1 нГн =  $10^{-9}$  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 осердя або екрана.

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

$$Q_L = (2\pi fL) / r ,$$

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:

$$\operatorname{tg}\delta = r / (2\pi fL) = 1/Q_L .$$

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

*Власна ємність* є паразитним (побічним) параметром котушки індуктивності, що збільшує втрати, зменшує стабільність і коефіцієнт перестроювання контуру за частотою.

*Температурний коефіцієнт індуктивності* (ТКІ) характеризується відносною зміною індуктивності котушки при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$ :

$$\text{TKI} = \alpha_L = (L_0 - L_T) / (T_0 - T)L_0 = \Delta L / \Delta T L_0 .$$

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

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

Зазвичай промисловістю не випускаються типові високочастотні котушки, тому для апаратури різного призначення виготовляються, якщо можливо, оптимальні індуктивні елементи.

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

*Індуктивність прямолінійного провідника з круглим перерізом*  $L_{\text{пр}}$ , мкГн, розраховують за формулою

$$L_{\text{пр}} = 0,002 [\ln(4l/d) - 1],$$

де  $l$  – довжина провідника, см;  $d$  – діаметр провідника без ізоляції, см.

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

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

Індуктивність круглого витка з провідника круглого перерізу знаходять за допомогою формули

$$L_{кр} = 0,00628D[\ln(8D/d) - 1,75],$$

де  $D$  – діаметр витка, см.

Розрахунок  $L_{кр}$  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. Найбільшою є індуктивність 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). Якщо довжина намотки  $l = \tau N$  ( $N$  – кількість витків) відповідає нерівності  $l \gg D$ , то можна використовувати формулу

$$L = 10^{-3}(\pi DN)^2/l.$$

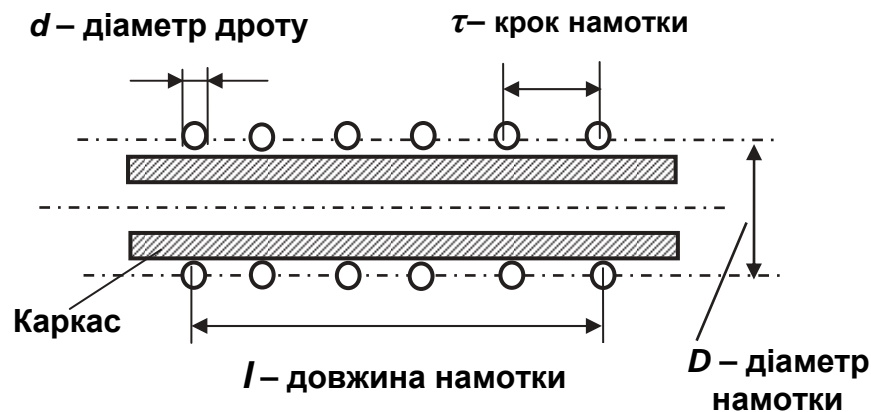


Рис. 4.2. Елементи одношарової циліндричної котушки

Якщо довжина намотки котушки є порівнянною з її діаметром, то вводиться поправковий коефіцієнт  $L_0$ . Значення цього коефіцієнта знаходять за графіком, який зображено на рис. 4.3, а величину індуктивності  $L$ , мкГн, визначають за формулою

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

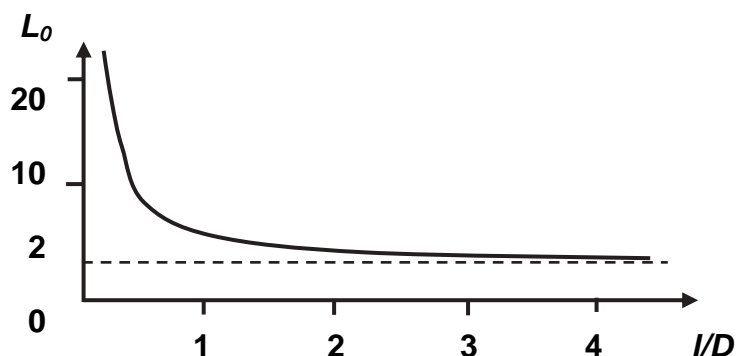


Рис. 4.3. Графік залежності поправкового коефіцієнта від  $I/D$

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

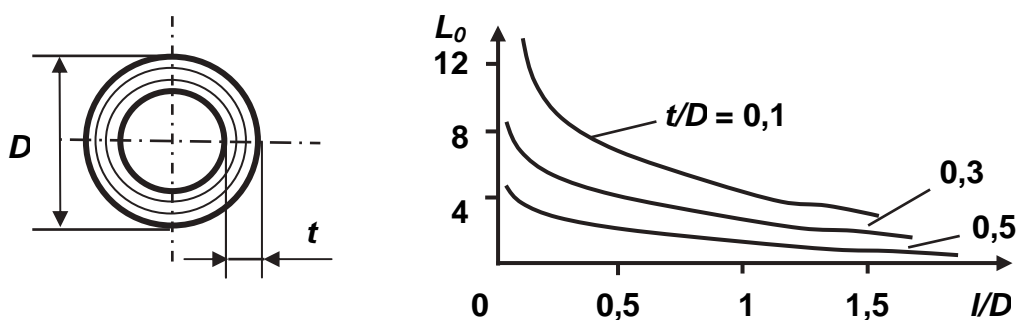


Рис. 4.4. Поправковий коефіцієнт для багат шарової котушки

*Індуктивність котушки з осердям.* Одержати оптимальні значення індуктивності й добротності, забезпечити регулювання індуктивності дає змогу застосування осердь. Індуктивність котушки з осердям  $L_c = \mu_c L$ , де  $L$  – індуктивність тієї ж котушки без сердечника;  $\mu_c$  – діюча магнітна проникність. Якщо  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлено осердя, то  $K_\mu = \mu_c / \mu$  – коефіцієнт використання магнітних властивостей, який залежить від конструкції котушки й визначається експериментально.

Для феромагнетиків (ферити, карбонільне залізо)  $\mu_c > 1$ , для діамагнетиків (латуні, міді, алюмінію)  $\mu_c < 1$ . Таким чином, використовуючи феромагнетики, підвищують індуктивність котушки, а використовуючи діамагнетики, знижують її.

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

$$L_{тор} = 0,00628 \mu N^2 [D - (D_T^2 - D_B)^{1/2}],$$

де  $D_T$  – діаметр осьової лінії тора, см;  $D_B$  – середній діаметр витка;  $\mu$  – початкова магнітна проникність матеріалу тора.

*Індуктивність екранованої котушки.* Екранування виконують або шунтуванням магнітного поля феромагнітним екраном з великою відносною магнітною проникністю або витисненням магнітного поля екраном з діамагнетика (міді, латуні, алюмінію). Для екранування ВЧ-котушок використовують зазвичай другий спосіб.

Індуктивність циліндричної котушки з алюмінієвим циліндричним екраном визначається формулою

$$L_e = L[1 - (D/D_e)^3][1 - (l/2l_e)^2],$$

де  $L$  – індуктивність котушки без екрана;  $D$  – діаметр обмотки;  $D_e$  – діаметр екрана;  $l$  – довжина намотки;  $l_e$  – довжина екрана. Добротність екранованої котушки завжди є нижчою, а власна ємність вищою, ніж ці показники для котушки без екрана.

**Оптимізація добротності котушок індуктивності.** Не менш важливим параметром, ніж індуктивність, при розрахунках індуктивних компонентів контурів, фільтрів, ліній затримки є їх добротність.

На заданій частоті добротність котушки індуктивності визначають за формулою

$$Q_L = (2\pi fL)/r,$$

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

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

де  $r_0$  – опір обмотки постійному струму;  $r_f$  – високочастотні втрати;  $r_k$  – втрати в матеріалі каркаса;  $r_{\epsilon m}$  – ємнісні втрати;  $r_{\text{екр}}$  – втрати в матеріалі екрана;  $r_c$  – втрати в матеріалі осердя.

Опір високочастотних втрат в обмотці складається з втрат, зумовлених поверхневим (скін) ефектом та 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 дроту намотки.

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.

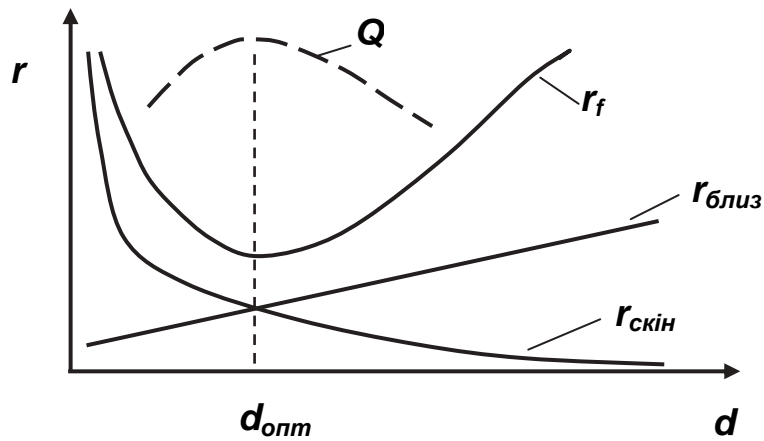


Рис. 4.5. Оптимальний діаметр дроту намотки

*Дроселем високої частоти* називають котушку індуктивності, що вводить до електричного кола для збільшення опору струмам високої частоти. Основні параметри:  $z_{др}$  – повний опір,  $L_{др}$  – індуктивність,  $R$  – активний опір (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 інтервал робочих частот.

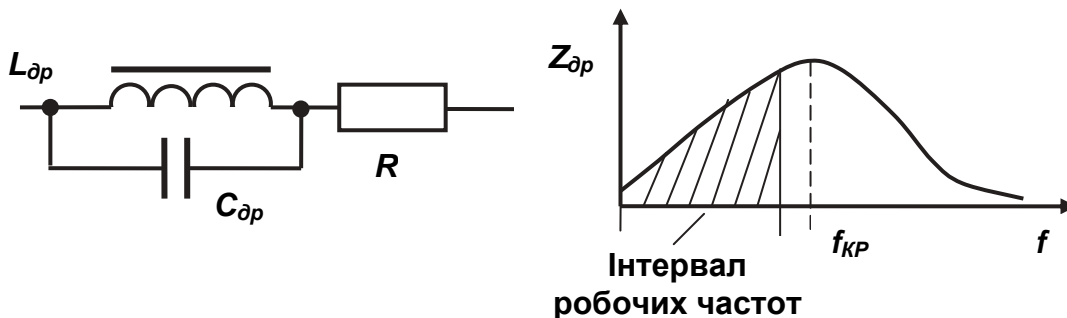


Рис. 4.6. Еквівалентна схема й повний опір дроселя

Серійно випускаються ВЧ-дроселі типу ДМ із феритовим осердям. Інтервал індуктивностей 1...500 мкГн. Максимальне значення струму 60 мА.

## 4.2. Трансформатори

*Трансформатором* називається елемент РЕА, призначений для одержання різних за амплітудою, потужністю й фазою змінних напруг, а також здійснення гальванічної розв'язки в електричному колі.

Трансформатори поділяють на трансформатори живлення (силові), сигнальні (узгоджувальні), імпульсні.

Основними елементами трансформатора є магнітопровід (осердя) і розміщені на ньому обмотки (рис. 4.7).

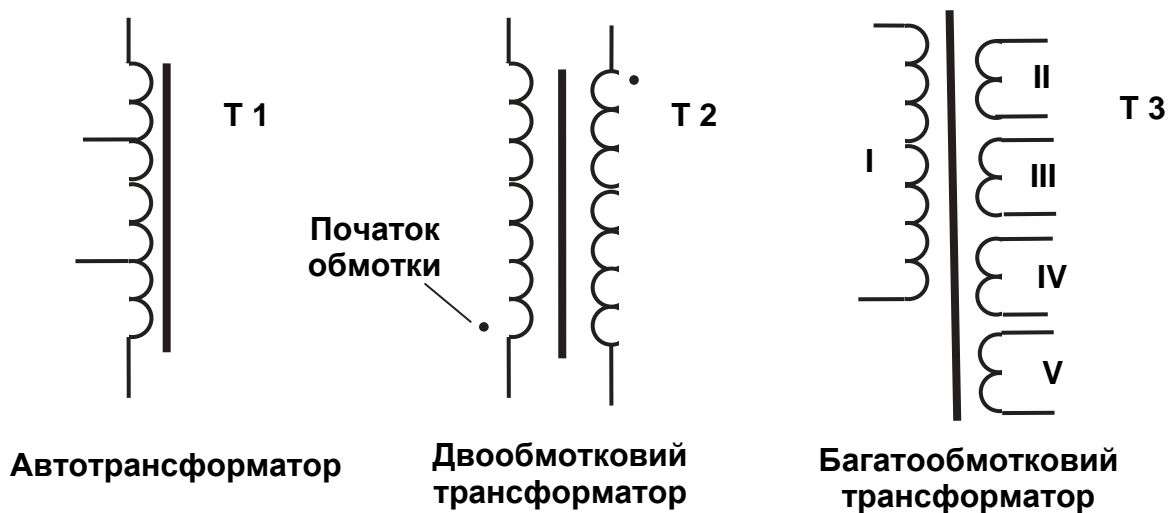


Рис. 4.7. Позначення трансформаторів на принципових схемах

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

**Маркування трансформаторів:**

1. *Трансформатори живлення:* перший елемент – буква «Т»; другий елемент – 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 – усе кліматичного виконання, ТС – для сухого тропічного клімату, ТВ – для вологого тропічного клімату), наприклад: ТА5-127/220-50-В.

2. *Сигнальні трансформатори:* перший елемент – буква «Т»; другий елемент – сполучення букв (ВТ – вхідний для транзисторної апаратури, М – міжкаскадний, ОТ – вихідний трансформатор для транзисторних пристроїв); третій елемент – порядковий номер розробки, наприклад: ТОТ-1 – вихідний трансформатор для транзисторної апаратури.

3. *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.

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



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

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

### 4.3. Твердотілі аналоги LC-кіл

Принцип роботи твердотільних аналогів LC-кіл базується на явищі механічного резонансу в діапазоні ультразвукових частот у пружних твердотілих структурах. За виконуваною функцією їх поділяють на фільтри й резонатори.

Розрізняють фільтри п'єзоелектричні й електромеханічні.

П'єзоелектричні фільтри виготовляють 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 кілогерців до декількох мегагерців, які використовують в аналогових трактах радіо- й телевізійної апаратури (рис. 4.8).

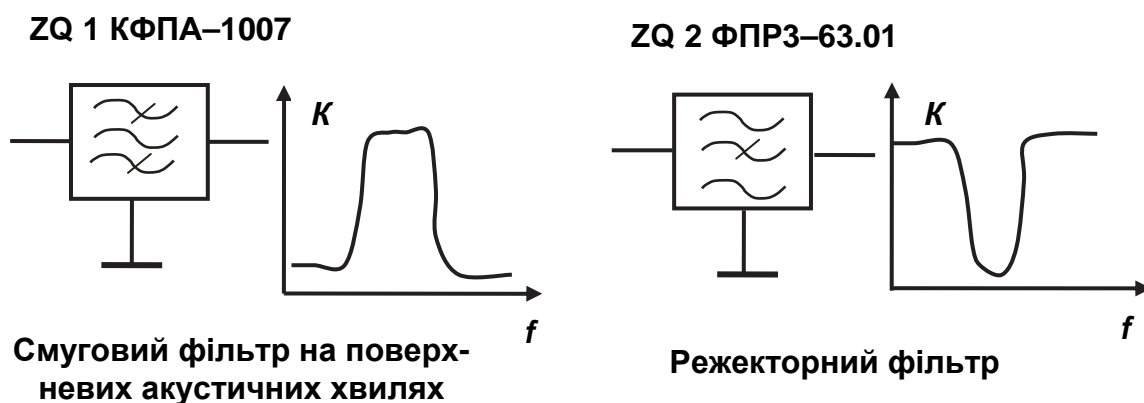


Рис. 4.8. Позначення й частотні характеристики ПКФ

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

Для побудови вузькосмугових фільтрів, а також для стабілізації частоти автогенераторів застосовують кварцові резонатори, що характеризуються високою добротністю до частот у десятки мегагерців.

В *електромеханічних фільтрах* використовуються магнітострикційні (рис. 4.9) 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. 4.9. Елементи магнітострикційного перетворювача

Резонатори зазвичай виготовляють із пластин кварцу, завдяки їх механічним властивостям отримують дуже високу добротність елемента.

#### 4.4. Магнітні головки

*Магнітні головки* – це елементи РЕА, призначені для запису, зчитування й стирання інформації на магнітному носії. Вони є тороїдальними котушками індуктивності, магнітопровід яких має зазор (рис. 4.10).

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

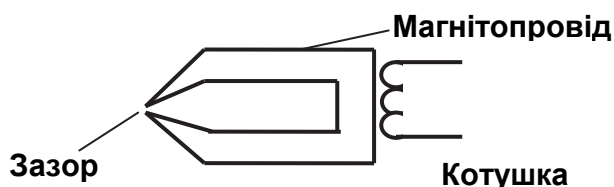


Рис. 4.10. Будова магнітної головки

*Основні параметри магнітних головок:*

- *індуктивність головки*, що характеризує повний імпеданс (від 1 Гн до часток мікрогенрі);

- *струм запису* – величина струму, що проходить 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 відносно наступного (від 30 дБ і більше);

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

- *робочий діапазон частот*, що характеризує АЧХ тракту запис – відтворення.

За виконуваною функцією в електронній апаратурі розрізняють такі головки: записувальні, відтворювальні, універсальні, стиральні (рис. 4.11).

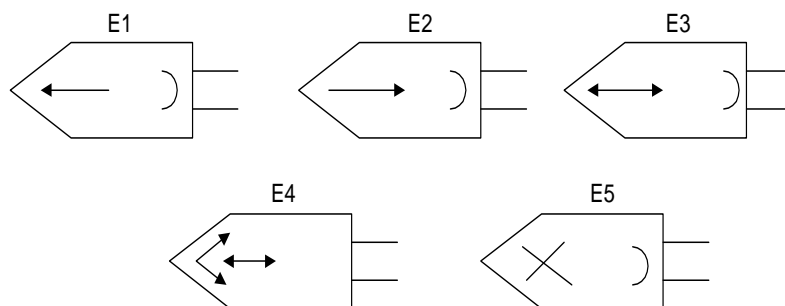


Рис. 4.11. Позначення магнітних головок на схемах: E1 – записувальна; E2 – відтворювальна; E3, E4 – універсальна; E5 – стиральна

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 записувальних або відтворювальних доріжок одночасно; цифра – максимальній кількості доріжок; буква – опору головки (Н – низький, П – високий); цифровий код модифікації виробу.

#### 4.5. Штучні лінії

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

*Формувальні лінії* застосовуються зазвичай у модуляторах потужних імпульсних станцій для одержання стабільних за тривалістю імпульсів високої напруги.

*Лінії затримки* (ЛЗ) – елементи РЕА, призначені для нормованої часової затримки ( $T_3$ ) вихідних відеоімпульсів відносно вхідних (рис. 4.12).

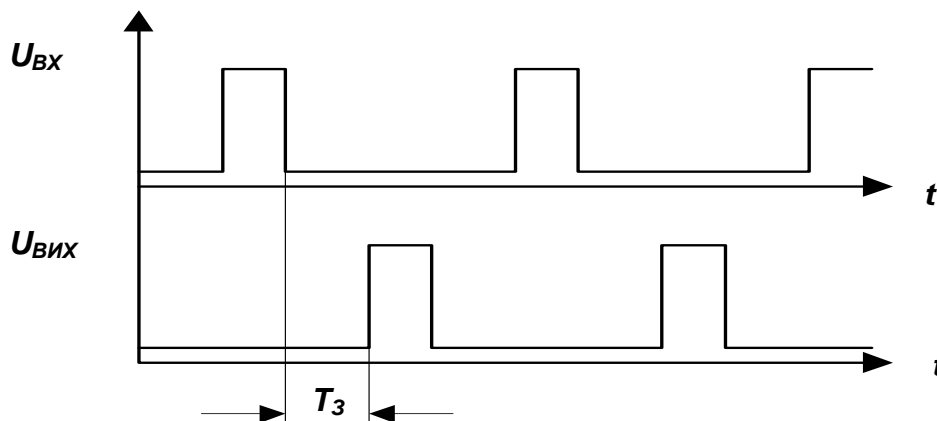


Рис. 4.12. Затримка відеоімпульсів

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

На принципових електричних схемах ЛЗ позначають великими буквами «ЕТ» з порядковим числовим або буквеним індексом (рис. 4.13). Зазвичай указується марка ЛЗ.

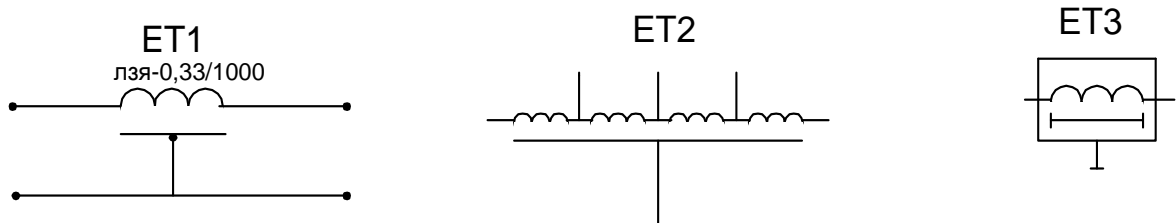


Рис. 4.13. Позначення ліній затримки на схемах

Для створення затримок наносекундної тривалості використовуються лінії з розподіленими елементами (двопровідникові, коаксіальні, спіральні). Для цих ліній вводиться поняття розподілених (погонних) індуктивності ( $L_0$ ) та ємності ( $C_0$ ) (рис. 4.14). Якщо довжина лінії  $l$ , то сумарна індуктивність  $L = lL_0$  і сумарна ємність  $C = lC_0$ .

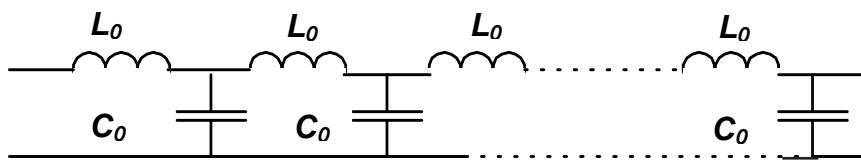


Рис. 4.14. Еквівалентна схема однорідної лінії затримки

До основних параметрів ліній затримок відносять хвильовий опір однорідної лінії  $W = (L/C)^{1/2}$ , а також час затримки  $T_3 = (LC)^{1/2} = l(L_я C_я)^{1/2}$ .

Для збільшення часу затримки й хвильового опору використовуються 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. 4.15).

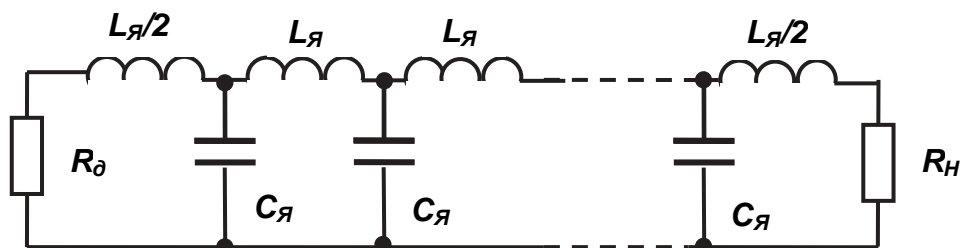


Рис. 4.15. Лінія затримки із зосередженими параметрами

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

Частотні властивості ЛЗ характеризують амплітудно-частотна (АЧХ) і фазочастотна (ФЧХ) характеристики (рис. 4.16).

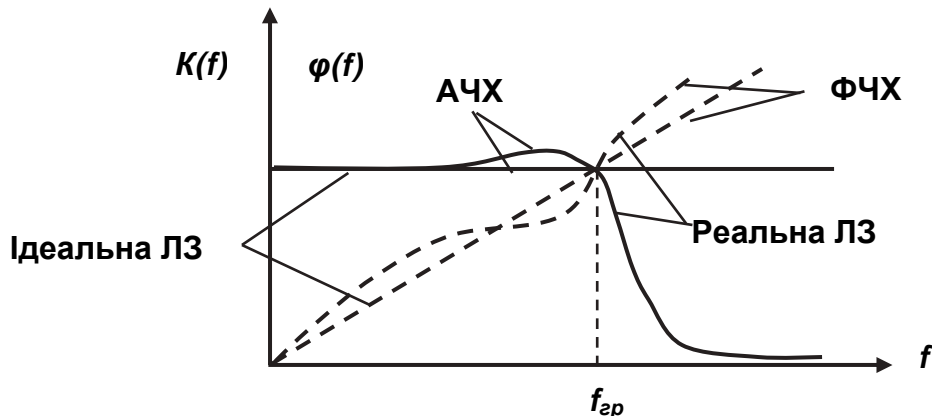


Рис. 4.16. Частотні характеристики ідеальної й реальної ЛЗ

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 допустима кількість ланок  $k = 1,2 (T/\tau_{\phi})^{3/2}$ , а смуга пропускання  $\Delta f = 1/(\tau_{\phi} (L_{я} C_{я})^{1/2} k^{1/3})$ .

Рівність за величиною вихідного опору джерела сигналу й опору навантаження хвильовому опору ЛЗ відповідає узгодженому режиму роботи лінії затримки ( $R_d = W$ ;  $R_n = W$ ).

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

$$K_{вх} = (R_d - W) / (R_d + W)$$

і виході

$$K_{вих} = (R_n - W) / (R_n + W).$$

Якщо  $R_d = W$ , а  $R_n = 0$ , то  $K_{вих} = -1$  й одержують відбитий сигнал негативної полярності; якщо ж  $R_d = W$ , а  $R_n = \infty$  (лінія розімкнена на виході), то  $K_{вих} = 1$  й 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 мілісекунд. У цих ЛЗ послідовно відбуваються: перетворення електричних коливань на акустичні, створення затримки  $T_3 = L / V_{сер}$  ( $L$  – шлях хвилі в середовищі,  $V_{сер}$  – швидкість

поширення хвилі в середовищі), зворотне перетворення на електричний сигнал (рис. 4.17).

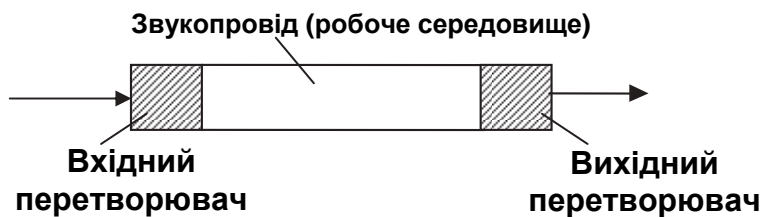


Рис. 4.17. Основні елементи ультразвукової ЛЗ

Для побудови ультразвукових ЛЗ використовують перетворювачі з пластин п'єзокераміки або кварцу, принцип роботи яких базується на прямому і зворотному п'єзоелектричних ефектах. На принципових схемах п'єзоелектричні ЛЗ позначають так, як показано на рис. 4.18.

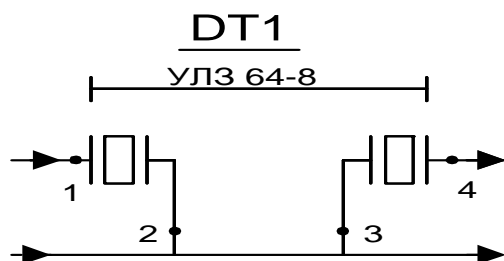


Рис. 4.18. Позначення п'єзоелектричних ЛЗ

Принцип роботи *магнітострикційних ліній затримки* ґрунтується на прямому й зворотному явищах магнітострикції у феромагнетиках. Позначення магнітострикційних ЛЗ на схемах показано на рис. 4.19.

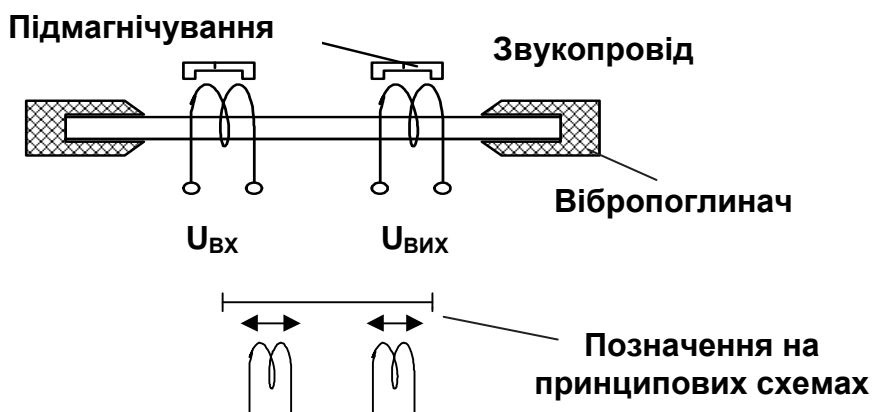


Рис. 4.19. Магнітострикційні ЛЗ

Для цього типу ліній затримки характерними є 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 дає змогу значно поліпшити масогабаритні характеристики електронних виробів.

За електричними характеристиками електронні компоненти для поверхневого монтажу в більшості випадків відповідають своїм аналогам звичайного виконання, відрізняючись від них тільки конструкцією виводів. 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 немає ніяких проблем з виготовленням друкованої плати. Складніше виготовити друковану 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 допустиму робочу напругу пристрою. Тому ті вузли, що працюють при великій напрузі, краще виконувати звичайним монтажем.

Через мініатюрність багатьох SMD-деталей виникають цілком зрозумілі проблеми щодо їх маркування. Для цього існують спеціальні стандарти, але оскільки вони мають 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). Усе це призводить до ускладнень при ремонті й технічному обслуговуванні апаратури.

SMD-компоненти невеликих розмірів потребують набагато більшої уважності й акуратності при монтажі, ніж звичайні. Паяльник має бути обов'язково з регулятором температури. Унаслідок нагрівання деталі в ній може порушитися контакт із виводами, а оскільки помітити це важко, пошук несправності є досить трудомістким.

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

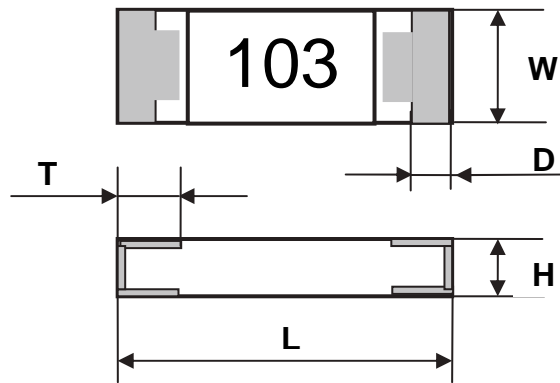


Рис. 5.1. Основні елементи SMD-резисторів

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

Багато фірм застосовують «власні» позначення типорозміру резисторів. Деякі з них наведено в табл. 5.2.

Для позначення номіналу опору широко використовується 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.

Таблица 5.1

Типорозмір		Розміри й допуски, мм				
дюймо-вий	метрич-ний	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	$6,35 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$	$0,55 \pm 0,05$	$0,4 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,25$

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

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

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 перекладок-замикачів, які можна розглядати як резистори нульового опору. Такі перекладки при поверхневому монтажі є більш зручними, ніж звичайні дротяні. Найпоширеніші типорозміри перекладок – 0805 (2012) і 1206 (3216). Маркують перекладки завжди однаково – 000.

## 6. КОМУТАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ

*Комутаційні пристрої* (КП) – елементи, які мають властивість з'єднувати та роз'єднувати електричні кола під дією керувального 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 несної 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.

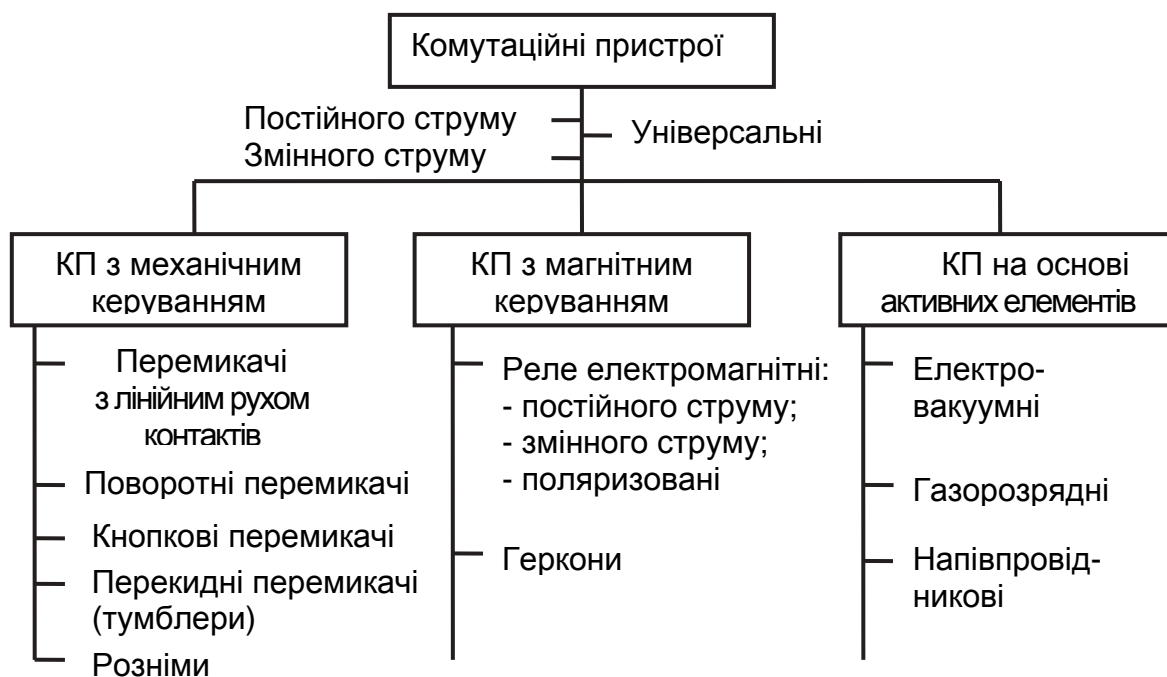


Рис. 6.1. Структура комутаційних пристроїв

*Рознімні з'єднувачі* призначено для технологічного з'єднання вузлів, блоків, пристроїв, приладів у радіоелектронній системі для забезпечення виконання її цільової функції. З'єднання забезпечується механічним (зазвичай 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.

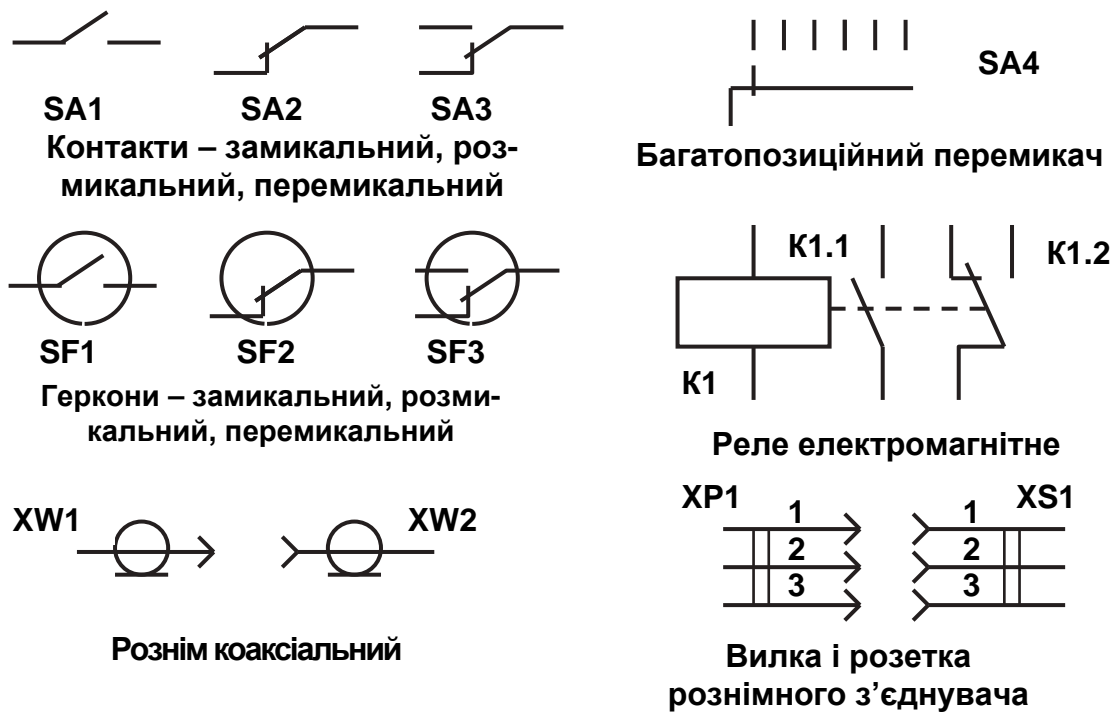


Рис. 6.2. Приклади позначень КП на принципових схемах

*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 керувальної напруги.

*Геркони* – елементи, контактна група яких розміщена в герметичному скляному балоні, а пружна частина рухомого контакту містить магнітні матеріали. Керування з'єднанням здійснюють за допомогою магнітного поля постійного магніту або електромагніту.

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

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

## 7. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

### Загальні відомості про напівпровідникові діоди

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з двома виводами, між якими розташовано кристал з одним  $p-n$ -переходом.

Для виготовлення напівпровідникових діодів найчастіше використовують кремній або германій. Залежно від способу утворення  $p-n$ -переходу розрізняють *площинні* і *точкові* діоди.

У площинних діодах  $p-n$ -перехід утворюється внаслідок послідовних дифузій при високій температурі домішок елементів III і V валентних груп з середовищ з їх парами. У точкових діодах  $p-n$ -перехід утворюється в пластинці кремнію або германію з електропровідністю  $n$ -типу, коли в неї вплавляють стальний загострений тонкий дрітчик, короткочасно пропускаючи великий струм. Пластинка невелика: площа поверхні близько  $1 \text{ мм}^2$ , товщина  $0,1 \dots 0,6 \text{ мм}$ .

Класифікацію й умовні зображення основних напівпровідникових діодів показано на рис. 7.1.

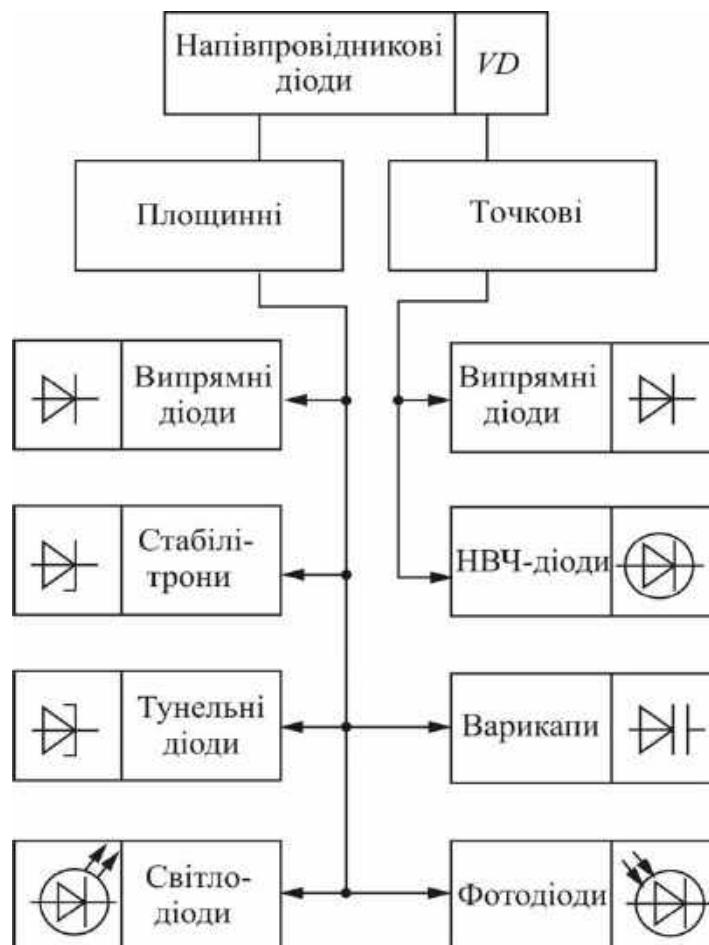


Рис. 7.1. Класифікація й умовні позначення напівпровідникових діодів

## 7.1. Випрямні діоди

На рис. 7.2, а, б зображено конструктивну схему випрямного діода та його умовне позначення. Робота напівпровідникового діода, призначеного для випрямлення змінного струму, базується на здатності  $p$ - $n$ -переходу пропускати струм практично тільки в одному напрямку. Ту частину напівпровідника, що має діркову провідність, називають анодом, а ту, що має електронну, – катодом. Так званому *прямому ввімкненню* діода (див. рис. 7.2, б) відповідає режим, коли на аноді А «плюс», а на катоді К «мінус». Відповідно, при іншій полярності буде *зворотне ввімкнення*. Таким чином, для проходження струму до аноду слід прикласти позитивний потенціал, а до катода – негативний.

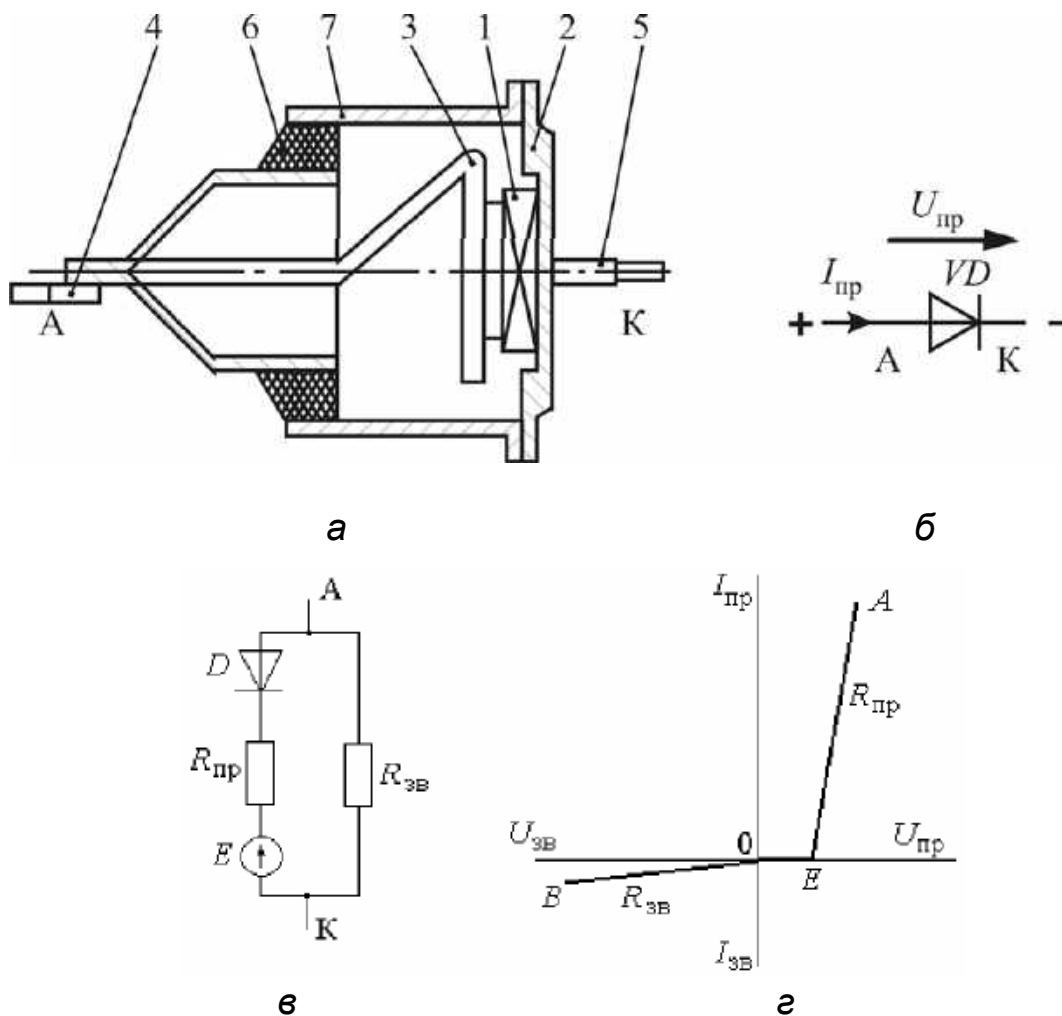


Рис. 7.2. Конструкція (а), умовне позначення (б), еквівалентна схема (в) та ідеалізована вольт-амперна характеристика (г) напівпровідникового випрямного діода: 1 – пластина кристала напівпровідника; 2 – кристалоутримувач; 3 – електрод; 4,5 – виводи (А – анод, К – катод); 6 – прохідний ізолятор; 7 – корпус

Як видно з рис. 7.2, *г*, характеристика випрямного діода є нелінійною, тому під час розрахунку електричних кіл, що містять діоди, останні заміщують на схемі лінійними еквівалентами, щоби була змога застосувати методи аналізу лінійних кіл. На рис. 7.2, *в* зображено еквівалентну схему випрямного діода, до складу якої входять ідеальний діод  $D$ , джерело напруги  $E$  і два резистори. Якщо замінити реальну вольт-амперну характеристику випрямного діода ламаною лінією, як це зроблено на рис. 7.2, *г*, то нахил лінійного відрізка  $AE$  відповідатиме прямому опору діода  $R_{пр}$ , нахил відрізка  $OB$  – зворотному опору  $R_{зв}$ , точка перетину відрізка  $AE$  з горизонтальною віссю визначатиме величину джерела напруги  $E$ . Діод  $D$  вказує на те, що при позитивній полярності на аноді і негативній на катоді працює ліва частина еквівалентної схеми, а при зворотній полярності напруги – права.

Основною характеристикою напівпровідникових діодів є вольт-амперна характеристика. На рис. 7.3 для порівняння показано реальні вольт-амперні характеристики германієвого і кремнієвого діодів.

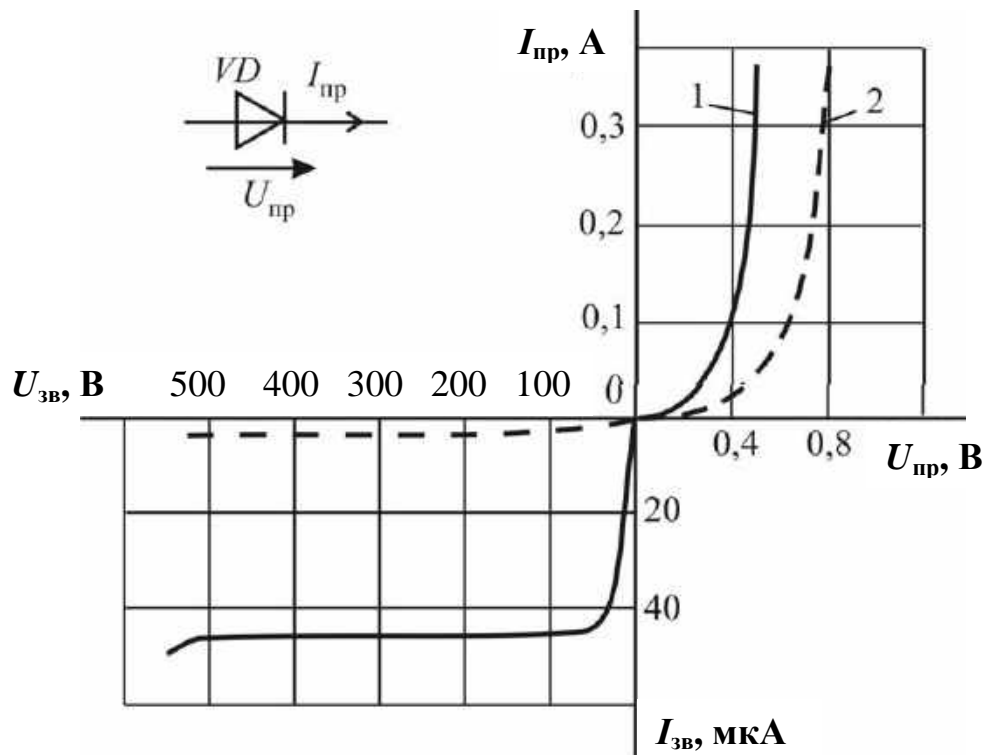


Рис. 7.3. Вольт-амперні характеристики германієвого (1) і кремнієвого (2) випрямних діодів

Покажемо, що кремнієві діоди пропускають набагато менші зворотні струми і водночас допускають набагато більші зворотні напруги порівняно з германієвими. Також є ширшим і температурний діапазон роботи кремнієвих діодів: від  $-60$  до  $+150$  °C, тоді як германієвих – від  $-60$  до  $+85$  °C. Однак унаслідок того, що в германієвих діодах пряме падіння

напруги є меншим, ніж у кремнієвих, такою ж мірою є меншою й потужність, яка виділяється в діоді й нагріває його. Тому у випрямних пристроях низької напруги доречніше використовувати германієві діоди. Для зменшення нагрівання потужних випрямних діодів застосовують більш ефективні способи їх охолодження: монтаж на радіаторах, обдування тощо. Якщо до діода прикласти пряму напругу  $U_{пр}$  у декілька десятків вольтів, то виникне недопустимо великий прямий струм  $I_{пр}$  і за декілька секунд діод розжариться та зруйнується. Але при одноразовому короткочасному вмиканні діод не встигне перегрітися і зруйнуватися. Зазвичай для напівпровідникових діодів допускається 50–100-разове перевантаження за струмом протягом 0,1 с.

Якщо до напівпровідникового діода прикласти зворотну напругу  $U_{зв}$ , то в ньому виникає незначний зворотний струм  $I_{зв}$ , зумовлений неосновними носіями електричних зарядів. Надмірне підвищення зворотної напруги може призвести до теплового пробою  $p$ - $n$ -переходу й руйнування діода, тому більшість випрямних діодів надійно працюють при зворотних напругах, не вищих за 0,7...0,8 від пробивних. Навіть короткочасне перевищення пробивної напруги виводить діод з ладу.

Залежно від того, на яку напругу розраховано напівпровідниковий прилад, визначається його клас. На кожні 100 В надається один клас. Наприклад, прилад 15-го класу може витримувати напругу до 1500 В. У табл. 7.1 наведено параметри випрямних діодів залежно від потужності й умов роботи.

НВЧ-діоди мають аналогічні характеристики, але працюють при надзвичайно високих частотах.

Таблиця 7.1

Тип діода	Параметри		
	Допустимий прямий струм $I_{пр. max}$ , А	Допустима зворотна напруга $U_{зв. max}$ , В	Зворотний струм $I_{зв}$ , мкА, при $U_{зв. max}$
Точкові	0,01...0,1	25...150	0,1...10
Площинні малопотужні	0,1...1,0	200...1000	10...200
Площинні потужні	1,0...2000	200...4000	1000...5000
Імпульсні	0,01...0,5	10...100	0,1...50

Для роботи з більш високими зворотними напругами виготовляють так звані *діодні стовпи*, у яких послідовно з'єднано від 5 до 50 діодів. Зворотна напруга  $U_{зв}$  таких стовпів становить 2...40 кВ.

У випадку, коли збільшувати треба не тільки зворотну напругу, а й прямий струм, використовують *силові діодні зборки*, у яких діоди з'єднують і послідовно, і паралельно.

Групи ідентичних малопотужних діодів часто виготовляють у вигляді *діодних матриць* і *діодних зборок*. У діодних матрицях діоди приєднують до одного спільного виводу, що полегшує їх використання в логічних пристроях і дешифраторах, а в діодних зборках застосовуються паралельні, послідовні, мостові та інші види з'єднань.

## 7.2. Напівпровідникові стабілітрони

Напівпровідниковий стабілітрон відрізняється від випрямного діода тим, що його зворотна напруга в зоні електричного пробоя мало залежить від значення струму. Отже, за його допомогою можна підтримувати стабільну напругу  $U_{ст}$  (рис. 7.4).

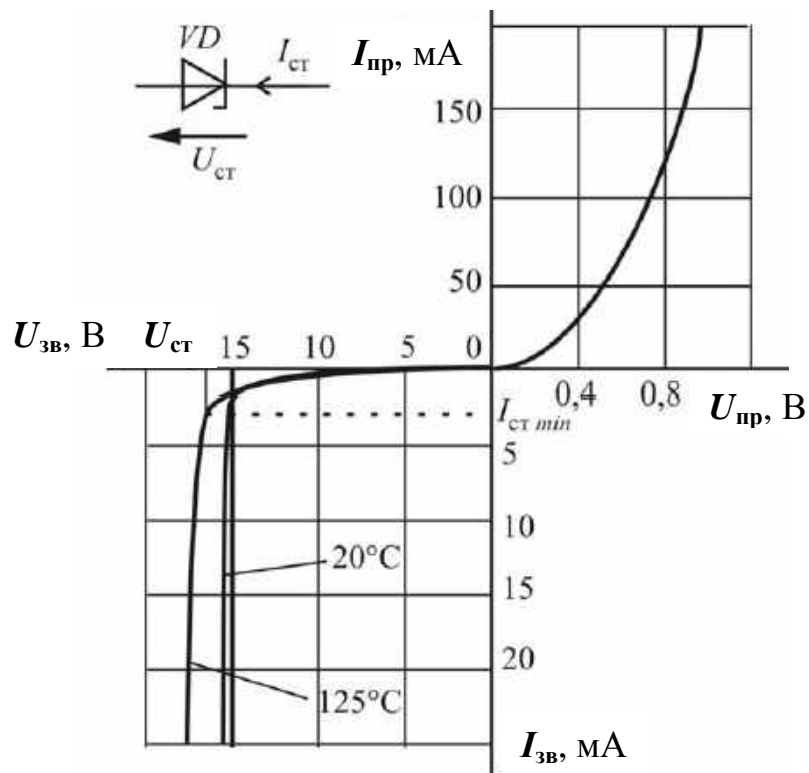


Рис. 7.4. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

Основні параметри стабілітрона: практично незмінна напруга  $U_{ст}$  і диференціальний опір  $R_d = dU_{ст} / dI_{ст}$  на ділянці стабілізації; мінімальний  $I_{ст min}$  і максимальний  $I_{ст max}$  струм стабілізації; температурний коефіцієнт напруги на ділянці стабілізації



$$TK_U = (dU_{cm} / dT)(1/U_{cm}) \cdot 100 \%$$

Стабілітрони виготовляють на напруги стабілізації від 1 до 1000 В, за зворотними струмами на ділянці стабілізації від  $I_{min} \approx 1...10$  мА до  $I_{max} \approx 50...2000$  мА, тобто  $I_{max} / I_{min} \approx 50...200$ . Значення мінімального струму  $I_{min}$  обмежене нелінійною ділянкою характеристики, значення максимального струму  $I_{max}$  – допустимою температурою напівпровідника.

На ділянці стабілізації  $R_d \approx const$  і для більшості стабілітронів  $R_d = 0,5...200$  Ом.

Температурний коефіцієнт напруги  $TK_U$ , що показує, на скільки відсотків змінюється напруга стабілітрона при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$ , для більшості стабілітронів дорівнює  $(-0,05...+0,2) \%/^\circ\text{C}$ , а для прецизійних стабілітронів, наприклад КС196В, набуває значення  $\pm 0,0005 \%/^\circ\text{C}$  у діапазоні температур від  $-60$  до  $+60^\circ\text{C}$ . Такі стабілітрони використовуються в перевірних електровимірювальних приладах високого класу.

### 7.3. Напівпровідникові варикапи

Варикап – це напівпровідниковий діод, у якому ємність  $C$   $p$ - $n$ -переходу залежить від зворотної напруги  $U_{зв}$ . Унаслідок цього його використовують як елемент з електрично керованою ємністю (рис. 7.4).

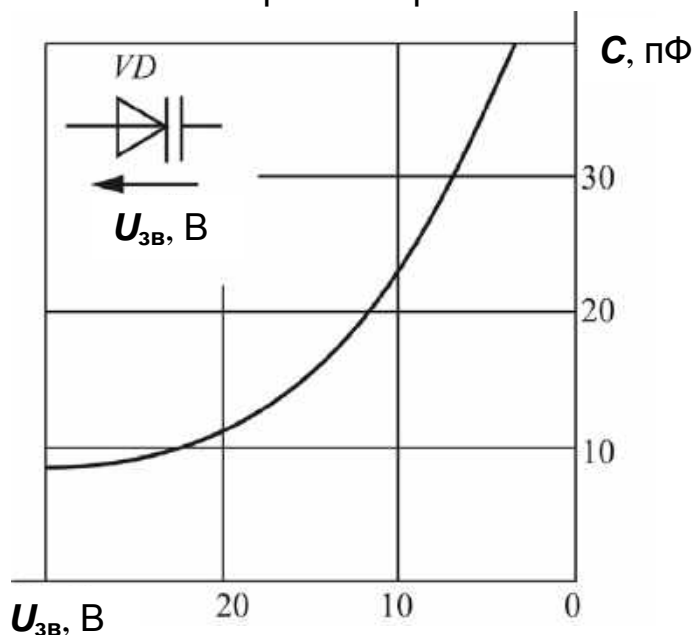


Рис. 7.5. Залежність ємності варикапа від зворотної напруги  $U_{зв}$

Основними параметрами варикапа є загальна ємність  $C$ , яку він має при невеликій зворотній нарузі  $U_{зв} = 2...5$  В, і коефіцієнт перекриття за ємністю  $Kc = C_{max} / C_{min}$ . Для більшості варикапів  $C = 10...500$  пФ,  $Kc = 2...20$ .

Найчастіше варикапи використовують в системах дистанційного керування й автоматичного підстроювання частоти.

## 7.4. Фото- і світлодіоди

Взаємодія оптичного випромінювання (видимого, інфрачервоного або ультрафіолетового) з носіями електричного заряду в контактному шарі *p-n*-переходу визначає роботу фотодіодів і світлодіодів.

У фотодіоді внаслідок освітлення *p-n*-переходу збільшується зворотний струм. У світлодіоді при проходженні прямого струму виникає інфрачервоне або видиме випромінювання.

Світлодіоди з інфрачервоним випромінюванням використовуються в оптоелектроніці. У видимому діапазоні широко застосовуються індикаторні світлодіоди (СІД), побудовані на основі арсеніду галію. Розміри кристала становлять приблизно  $0,3 \times 0,3 \times 0,2$  мм<sup>3</sup>, а колір проміння – червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий залежно від домішок.

Ефективність світлодіода  $\eta$  – це відношення енергії випромінювання до електроенергії, що споживається:

$$\eta = \eta_{ке} [(h\nu)/(eU)],$$

де  $h$  – стала Планка ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $\nu$  – частота випромінювання;  $e$  – електричний заряд електрона ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $U$  – прикладена напруга;  $\eta_{ке} = \eta_{ен} \eta_i \eta_o$  – квантовий вихід (тут  $\eta_{ен}$  – внутрішній квантовий вихід люмінесценції, що залежить від матеріалу кристала;  $\eta_i$  – коефіцієнт інжекції;  $\eta_o$  – коефіцієнт виходу світла, тобто ефекту оптичної системи виводу світла за межі кристала).

Зазвичай коефіцієнт виходу світла  $\eta_o \leq 1,5$  %. Але ускладнення оптичної системи й удосконалення форми кристала (перехід від плоскої поверхні до сферичної або еліпсоїдальної, запресовування або заливання кристала прозорою пластмасою з утворенням лінзи тощо) дає змогу збільшити коефіцієнт виходу світла  $\eta_o$  до 10...30 %. Тим самим відкрилась перспектива заміни освітлювальних ламп розжарювання і люмінесцентних ламп в їх традиційних галузях використання світлодіодами. Це дасть змогу на порядок зменшити споживання електроенергії при одночасному підвищенні надійності.

## 8. ТРАНЗИСТОРИ

*Транзистором* називають напівпровідниковий прилад, у якому можна змінювати значення струму, що проходить крізь нього, за допомогою багато меншого струму або електричного поля. Залежно від способу керування струмом транзистори поділяють на *біполярні*, *польові* та *IGBT* (рис. 8.1).

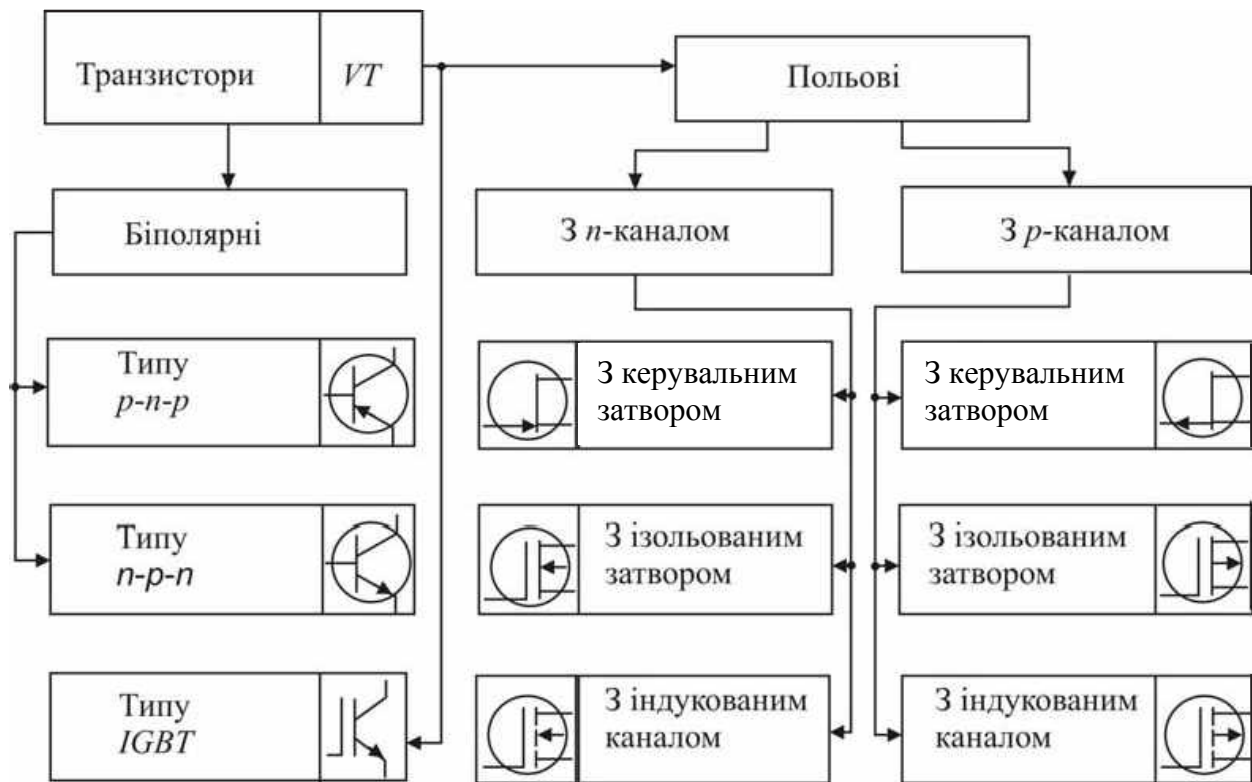


Рис. 8.1. Класифікація й умовні позначення транзисторів

### 8.1. Біполярні транзистори

Біполярний транзистор структурно складається з трьох шарів, що мають провідність  $p$ - і  $n$ -типів і чергуються в напівпровідниковому кристалі (рис. 8.2).

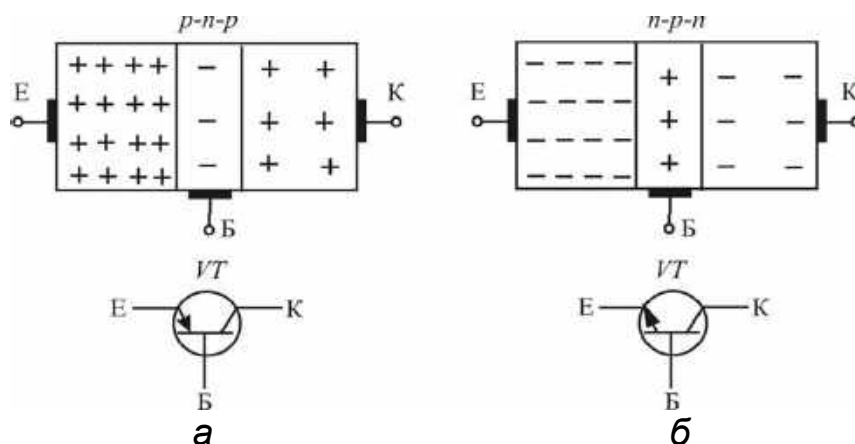


Рис. 8.2. Структура й умовне позначення біполярних транзисторів типів  $p-n-p$  (а) і  $n-p-n$  (б)

Частину кристала, найбільш насичену основними носіями електричних зарядів (дірками або електронами), називають *емітером Е*. Мало насичений зарядами того ж знака (слабо легований) шар називають *колектором К*. Розділяє емітер і колектор дуже вузький слабо легований шар з основними носіями електричних зарядів протилежного знака, – так звана *база Б*. Кожен з цих шарів має відповідний вивід. На рис. 8.2 дірки позначено «+», а електрони «–».

Найчастіше кристал біполярного транзистора розташовується на основі з ізолювальними втулками для виводів і закривається корпусом (рис. 8.3).

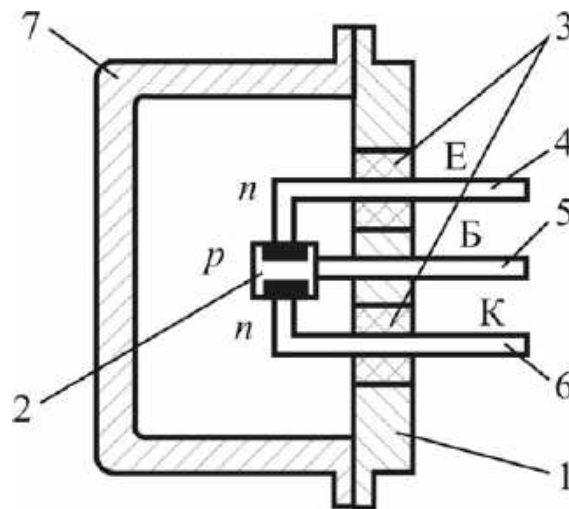


Рис. 8.3. Конструкція малопотужного біполярного транзистора: 1 – основа; 2 – кристал напівпровідника; 3 – ізолювальні втулки; 4, 5, 6 – виводи емітера Е, бази Б, колектора К; 7 – корпус

Основний струм проходить між емітером і колектором. В активному режимі вони вмикаються таким чином, що пряма напруга подається на емітер, *p-n*-перехід між емітером і базою відкривається й основні носії електричних зарядів долають вузький шар бази та збираються на межі *p-n*-переходу між базою і колектором, потенціальний бар'єр на якому заважає їх подальшому руху. Тому достатньо подати невелику напругу відповідного знака на базу, щоб подолати цей потенціальний бар'єр і відкрити шлях основним носіям електричних зарядів. Утворюється емітерний струм  $I_E$ , більша частина якого  $I_K$  пройде через колектор.

Пояснимо цей процес більш детально на прикладі *p-n-p*-транзистора (рис. 8.4). Під'єднання транзистора до зовнішніх джерел живлення  $U_{EB}$  і  $U_{BK}$  приводить до змінення висоти потенціальних бар'єрів *p-n*-переходів. Потенціальний бар'єр емітерного переходу зменшується, а колекторного – збільшується.

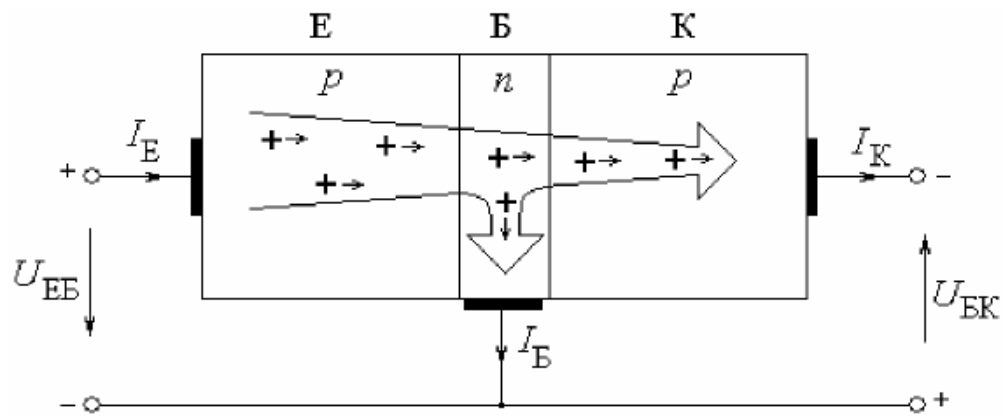


Рис. 8.4. Пояснення принципу роботи біполярного транзистора (дірки позначено «+»)

Струм  $I_E$ , що проходить через емітерний перехід, дорівнює сумі діркової  $I_{Ep}$  та електронної  $I_{En}$  складових:

$$I_E = I_{Ep} + I_{En} .$$

Якби концентрація дірок та електронів у базі і в емітері була однаковою, то прямий струм через емітерний перехід утворювався би переміщенням однакової кількості дірок та електронів у протилежних напрямках. Але в транзисторах, як було зазначено вище, концентрація носіїв заряду в базі є значно меншою, ніж в емітері. Це приводить до того, що кількість дірок, інжектованих з емітера в базу, у багато разів перевищує кількість електронів, що рухаються в протилежному напрямку. Отже, майже весь струм через емітерний  $p$ - $n$ -перехід зумовлюється дірками.

Інжектовані через емітерний перехід дірки проникають углиб бази. Залежно від механізму проходження носіїв заряду в області бази розрізняють *бездрейфові* і *дрейфові* транзистори. У бездрейфових транзисторах перенесення неосновних носіїв заряду через область бази здійснюється в основному внаслідок дифузії. У дрейфових транзисторах в області бази після відповідного розподілу домішок утворюється внутрішнє електричне поле, і перенесення неосновних носіїв заряду через базу здійснюється в основному внаслідок дрейфу. Дірки, потрапивши до бази, для якої вони є неосновними носіями заряду, починають рекомбінувати з електронами. Але рекомбінація – це процес не миттєвий. Тому майже всі дірки встигають пройти через тонкий шар бази й потрапити до колекторного  $p$ - $n$ -переходу, перш ніж відбудеться рекомбінація. Наблизившись до колектора, дірки зазнають дії електричного поля колекторного переходу. Це поле для дірок є прискорювальним, тому вони внаслідок екстракції швидко втягуються з бази в колектор та беруть участь у створенні струму колектора  $I_K$ .

Ті дірки, що все ж таки рекомбінують в області бази з електронами, беруть участь у створенні струму бази  $I_B$ . Беручи до уваги малий рівень

рекомбінації дірок з електронами в області бази, можна вважати, що струм колектора  $I_K$  приблизно дорівнює струму емітера:  $I_E = I_K + I_B \approx I_K$ .

Необхідно зазначити, що хоча електрони й дірки рухаються в протилежних напрямках, струми в колах транзистора проходять в одному напрямку, що збігається з напрямком руху носіїв заряду позитивної полярності – дірок. Це легко зрозуміти, якщо врахувати, що протилежний напрямок руху електронів і дірок компенсується їх протилежним знаком. Отже, при утворенні струму в колах транзистора йдеться не про різницю, а саме про суму електронної та діркової складових.

Для сучасних біполярних транзисторів коефіцієнт передачі струму з емітера до колектора  $\alpha = I_K / I_E$  дорівнює 0,9...0,995.

Поширеними є три схеми включення біполярного транзистора з використанням одного з виводів для приєднання до входу й виходу: зі спільною базою (СБ), зі спільним емітером (СЕ), зі спільним колектором (СК). Найчастіше вживається та схема, де спільним для входу і виходу є емітер (рис. 8.5).

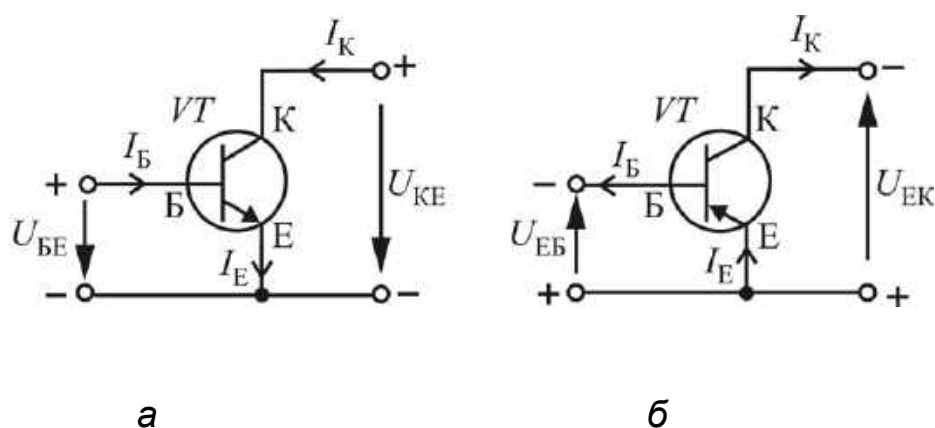


Рис. 8.5. Під'єднання біполярних транзисторів типів  $n-p-n$  (а) і  $p-n-p$  (б) за схемою зі спільним емітером

У такій схемі вхідний контур проходить через перехід «база – емітер» і в ньому виникає струм бази

$$I_B = I_E - I_K = (1 - \alpha) I_E ; I_B \ll I_E \approx I_K .$$

Особливість схеми СЕ полягає в тому, що вхідним струмом у ній є малий струм бази, а вихідним – струм колектора. Відповідно коефіцієнт передачі струму для схеми СЕ визначається як  $\beta = I_K / I_B$ .

Невелике значення струму у вхідному контурі й зумовило широке застосування схеми зі спільним емітером.

Розрізняють вхідну (базову) і вихідну (колекторну) вольт-амперні характеристики біполярного транзистора. Вхідна ВАХ показує залежність

базового струму від напруги між базою та емітером  $I_B(U_{BE})$  і може вважатися незмінною при різних значеннях напруг  $U_{KE}$ , вихідна – залежність колекторного струму від напруги між колектором та емітером при фіксованому значенні базового струму  $I_K(U_{KE})_{I_B=const}$ . Зазвичай надається набір вихідних характеристик при різних значеннях базового струму (рис. 8.6).

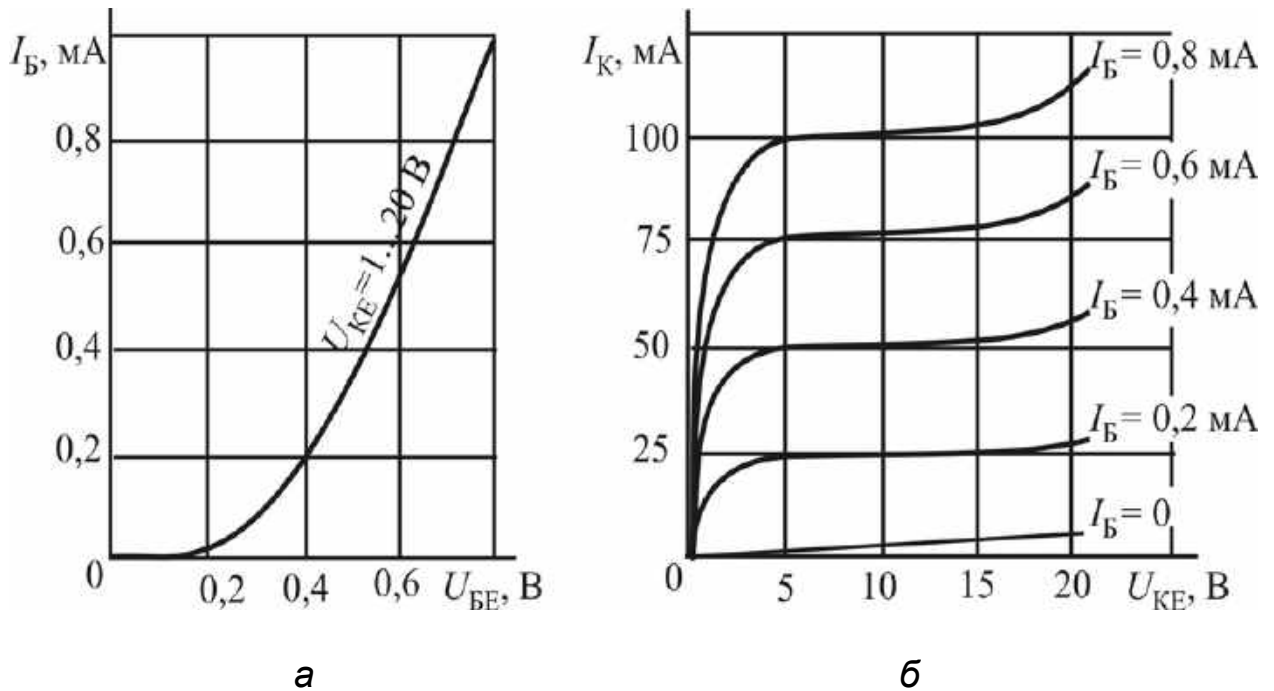


Рис. 8.6. Вольт-амперні характеристики біполярного транзистора:  
а – вхідна; б – вихідні

Для розрахунків та аналізу роботи електронних пристроїв з біполярними транзисторами використовують схему заміщення біполярного транзистора, побудовану на так званих *h-параметрах*. Схема заміщення відображає роботу транзистора на лінійних ділянках вхідної та вихідної характеристик. Розглядаються не повні струми і напруги, а їх лінійні зміни  $\Delta I_B$ ,  $\Delta U_{BE}$ ,  $\Delta I_K$ ,  $\Delta U_{KE}$  (рис. 8.7). Дві з цих величин можна вважати незалежними, а решту – їх функціями:  $U_{BE} = F_1(I_B, U_{KE})$  і  $I_K = F_2(I_B, U_{KE})$ .

У межах лінійних ділянок вольт-амперних характеристик для приростів  $\Delta U_{BE}$  і  $\Delta I_K$  правильними є такі рівняння:

$$\Delta U_{BE} = (\partial F_1 / \partial I_B) \Delta I_B + (\partial F_1 / \partial U_{KE}) \Delta U_{KE};$$

$$\Delta I_K = (\partial F_2 / \partial I_B) \Delta I_B + (\partial F_2 / \partial U_{KE}) \Delta U_{KE},$$

або

$$\Delta U_{BE} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{KE};$$

$$\Delta I_K = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{KE},$$

де  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$  – коефіцієнти, які можна визначити за вхідною і вихідними вольт-амперними характеристиками:

$$h_{11} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B \text{ при } U_{KE} = \text{const} (\Delta U_{KE} = 0);$$

$$h_{12} = \Delta U_{BE} / \Delta U_{KE} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0);$$

$$h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_B \text{ при } U_{KE} = \text{const} (\Delta U_{KE} = 0);$$

$$h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_{KE} \text{ при } I_B = \text{const} (\Delta I_B = 0).$$

Параметр  $h_{11}$  являє собою *вхідний опір* біполярного транзистора. Параметр  $h_{12}$  – *коефіцієнт внутрішнього зворотного зв'язку за напругою*. Його значення близьке до нуля і в більшості випадків ним нехтують. Параметр  $h_{21}$  – *коефіцієнт передачі струму*, що визначає підсилювальні (щодо струму) можливості транзистора. Параметр  $h_{22}$  дорівнює *вихідній провідності* транзистора з незмінним струмом бази.

Визначені  $h$ -параметри є основою схеми заміщення біполярного транзистора, яка містить тільки резистори й кероване джерело струму (рис. 8.7).

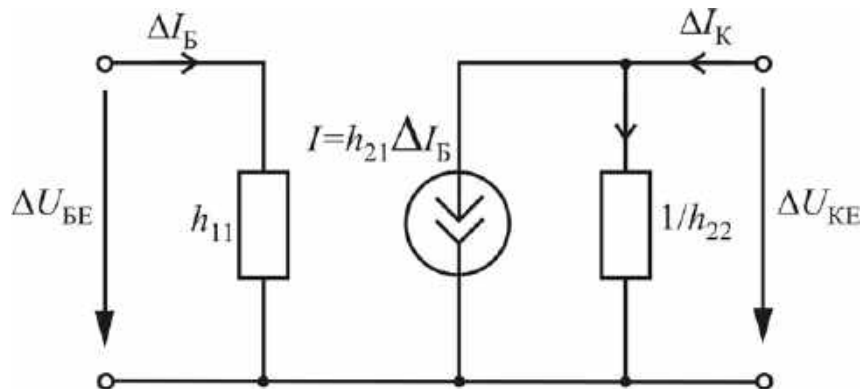


Рис. 8.7. Схема заміщення біполярного транзистора  $p$ - $n$ -типу, під'єданого за схемою зі спільним емітером

Діапазон робочих температур біполярних транзисторів, який визначається властивостями  $p$ - $n$ -переходів, є таким самим, як і напівпровідникових діодів. Особливо сильно на роботу транзисторів впливає нагрівання і менш суттєво – охолодження (до  $-60$  °C). Крім змінення



значення основних параметрів транзистора нагрівання спричиняє зміщення вихідних характеристик і змінення їх нахилу, що також заважає нормальній роботі приладу.

На роботу транзистора при нагріванні дуже суттєво впливає зворотний струм колектора  $I_{КБЗ}$ . Приблизне значення струму при нагріванні можна визначити з рівняння

$$I_{КБЗt} = I_{КБЗн} e^{0,07\Delta t},$$

де  $I_{КБЗt}$  – величина  $I_{КБЗ}$  при підвищеній температурі;  $I_{КБЗн}$  – величина  $I_{КБЗ}$  при нормальній температурі (20 °С);  $\Delta t$  – різниця температур при нагріванні транзистора.

Нестабільність режиму транзистора, зумовлена струмом  $I_{КБЗ}$ , є дуже суттєвою, оскільки зворотний струм колектора значною мірою впливає на струми емітера й колектора, а отже, і на підсилювальні властивості транзистора.

Найчастіше для роботи при підвищеній температурі застосовують кремнієві транзистори. Гранична робоча температура для цих приладів становить 125...150 °С. З цією ж метою використовують і нові напівпровідникові матеріали, серед яких значний інтерес становить карбід кремнію. Прилади, виготовлені на карбіді кремнію, можуть нормально працювати до температур 500...600 °С.

На частотні властивості транзисторів дуже впливають ємності *p-n*-переходів. Зі збільшенням частоти ємнісний опір зменшується і шунтувальна дія ємностей зростає. Тому еквівалентна схема транзистора на високих частотах крім суто активних опорів містить ємності  $C_E$  і  $C_K$ , які шунтують емітерний і колекторний переходи. На роботу транзистора особливо негативно впливає ємність  $C_K$ , оскільки на високих частотах ємнісний опір  $1/(\omega C_K)$  є значно меншим, ніж активний опір  $R_K$ , і колекторний перехід втрачає свої основні властивості.

Другою причиною погіршення роботи транзистора на високих частотах є відставання за фазою змінного струму колектора від змінного струму емітера. Це пов'язано з інерційністю процесу проходження носіїв заряду через базу від емітерного переходу до колекторного, а також інерційністю процесів накопичення й розсіювання зарядів у базі.

Час прольоту носіїв через базу  $\tau_{np}$  у звичайних транзисторах становить приблизно 0,1 нс. Звичайно, цей час дуже малий, але на частотах порядку одиниць – десятків мегагерців стає помітним деякий зсув фаз між змінними складовими струмів  $I_E$  і  $I_K$ . Це призводить до збільшення змінного струму бази і, як наслідок, до зниження коефіцієнта підсилення за струмом.

Оцінюючи частотні характеристики транзистора, слід ураховувати також, що дифузія – це процес хаотичний. Неосновні носії зарядів, інжектвані емітером у базу, рухаються в ній різними шляхами. Тому носії,

які одночасно входять в область бази, досягають колекторного переходу в різний час. Таким чином, закон змінення струму колектора може не відповідати закону змінення струму емітера, що призводить до спотворення підсилюваного сигналу.

Для визначення коефіцієнтів підсилення за струмом на частоті  $f$  можуть бути використані формули

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + (f / f_\alpha)^2)^{1/2}, \quad \beta = \beta_0 / (1 + (f / f_\beta)^2)^{1/2},$$

де  $\alpha_0$  і  $\beta_0$  – коефіцієнти підсилення за струмом при частоті  $f = 0$ ;  $f_\alpha$  і  $f_\beta$  – граничні частоти транзистора в схемах зі спільною базою і спільним емітером відповідно.

Таким чином, з підвищенням частоти струму зменшується коефіцієнт передачі транзистора за струмом  $h_{21}$ . На практиці *граничною* вважається така *частота*  $f_{гр}$ , при якій  $h_{21}$  зменшується в  $2^{-1/2}$  рази.

Для розширення частотного діапазону транзисторів необхідно збільшувати швидкість переміщення неосновних носіїв зарядів через базу, зменшувати товщину шару бази й колекторну ємність.

У табл. 8.1 наведено класифікацію й параметри біполярних транзисторів.

Таблиця 8.1

Тип транзистора	Параметри			
	$U_{KE\ max}$ , В	$I_{K\ max}$ , А	$h_{21}$	$f_{2p}$ , МГц
Малопотужний	5...25	0,01...0,3	20...200	1,0...8000
Середньої потужності	25...100	0,3...3,0	20...200	1,0...1000
Великої потужності	50...1000	0,5...10	20...200	0,5...300

## 8.2. Пільові транзистори

Пільовий транзистор побудовано таким чином, що в напівпровіднику між двома електродами, до яких прикладена напруга, утворюється канал дуже малого перерізу з вільними носіями зарядів (електронів або дірок). Під впливом електричного поля переріз каналу й кількість електричних зарядів можуть змінюватись, завдяки чому здійснюється керування струмом між електродами.

Конструктивно пільові транзистори поділяються на дві групи:

- пільові транзистори з керованими  $p$ - $n$ -переходами (каналні або уніполярні транзистори);
- пільові транзистори з ізольованим затвором (МДН- або

МОН-транзистори), які, своєю чергою, поділяються на польові транзистори із вбудованим каналом та індукованим каналом (назви транзисторів розшифровуються таким чином: МДН – метал-діелектрик-напівпровідник, МОН – метал-оксид-напівпровідник).

Принципову конструктивну схему, умовне позначення й порядок під'єднання польового транзистора з керованими  $p-n$ -переходами зображено на рис. 8.8.

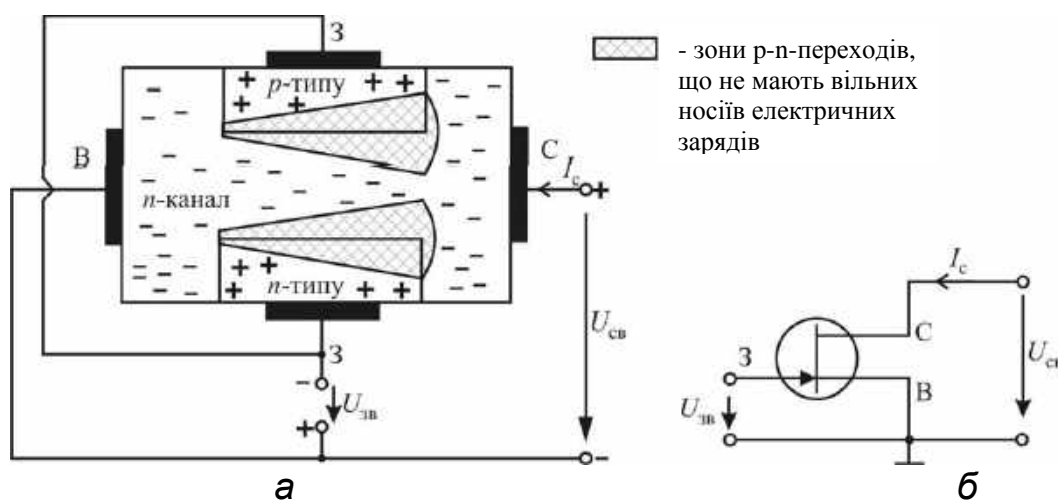


Рис. 8.8. Структура (а), умовне позначення й схема під'єднання (б) польового транзистора з керованими  $p-n$ -переходами і  $n$ -каналом

Тонкий шар напівпровідника  $n$ - або  $p$ -типу, обмежений з обох боків напівпровідником протилежного типу, і є так званим *каналом*. Він під'єднується до електричного кола за допомогою двох електродів: *стік* (С) і *виток* (В). До напівпровідників протилежного типу, завдяки яким канал проходить між двома  $p-n$ -переходами, приєднуються керувальні електроди – *затвори* (З). Значення струму в каналі залежить від напруги між стоком і витком  $U_{св}$  та опору самого каналу, який визначається його шириною, близькою до ширини прилеглих  $p-n$ -переходів. Чим вище зворотна напруга між затвором і витком  $U_{зв}$ , тим більше розширюються вільні від зарядів  $p-n$ -переходи і, відповідно, затискається канал. Зростає його опір, зменшується стоковий струм  $I_c$  (рис. 8.9).

Унаслідок того, що при нормальній схемі роботи польового транзистора до  $p-n$ -переходів прикладена зворотна напруга, його вхідний опір є значним і становить  $10^8 \dots 10^9$  Ом, а струм через затвори є дуже малим (табл. 8.2).

Керування транзистором здійснюється не струмом, а напругою, що зводить енергетичні витрати на керування майже до нуля.

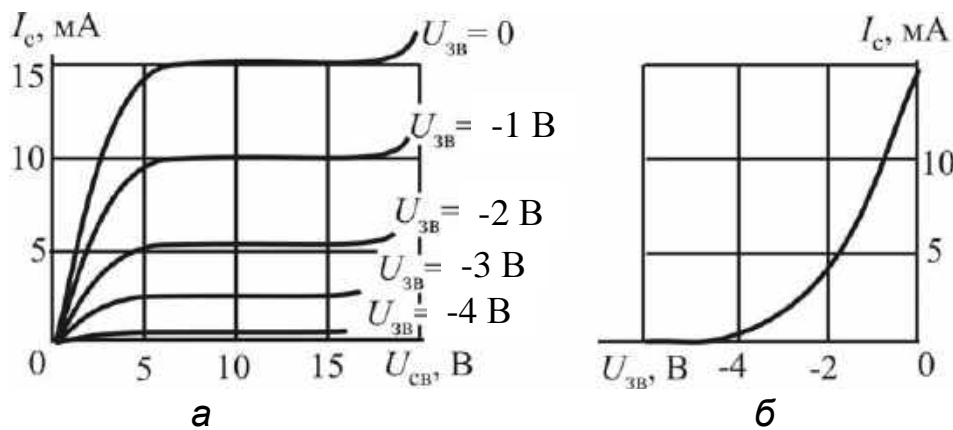


Рис. 8.9. Вольт-амперні характеристики польового транзистора з  $n$ -каналом: а – вихідні; б – передавальні

Таблиця 8.2

Тип транзистора	Параметри		
	$U_{CB \max}$ , В	$I_{C \max}$ , А	$I_3$ , мкА
З керованим $p$ - $n$ -переходом	5...100	$10^{-2}$ ...1,0	$10^{-3}$ ... $10^{-2}$
З ізольованим затвором	10...1000	$10^{-4}$ ...5,0	$10^{-9}$ ... $10^{-4}$
Транзисторні зборки (типу IGBT)	1000...6000	100...3000	$10^{-4}$ ... $10^{-1}$

Ще менший струм проходить через затвор у польовому транзисторі з ізольованим затвором, вхідний опір якого становить  $10^{12}$ ... $10^{14}$  Ом. Як конструктивна основа такого транзистора використовується пластинка (підкладка) з монокристалічного кремнію  $p$ -типу, якщо канал –  $n$ -типу (рис. 8.10), або навпаки. Области стоку С і витоку В сильно легуються домішками протилежного типу до монокристалічного кремнію, а канал – слабо. Відстань між витоком і стоком становить приблизно 1 мкм, а глибина каналу є ще меншою. Затвором З є металева пластинка, ізольована від каналу діелектриком (транзистор типу МДН) або оксидною плівкою (транзистор типу МОН) завтовшки до 0,1 мкм.

Робота транзистора подібної конструкції базується на ефекті впливу електричного поля на електричні заряди. Залежно від полярності напруги, прикладеної до затвора, канал може збіднюватися (заряди витискуються з каналу в підкладку) або збагачуватися (заряди втягуються в канал з підкладки) на вільні носії електричних зарядів.

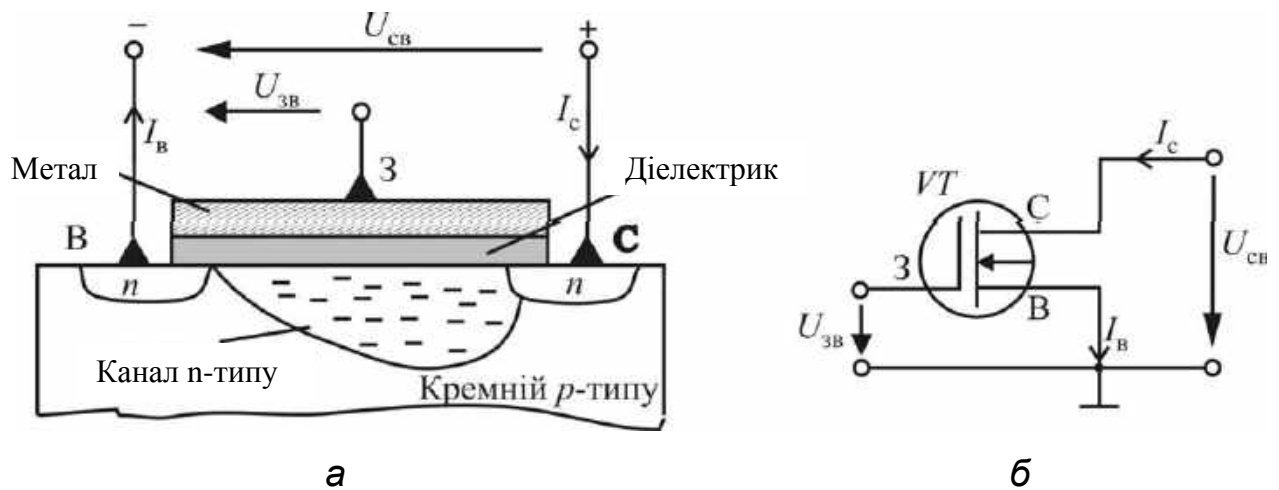


Рис. 8.10. Структура (а), умовне позначення і схема під'єднання (б) польового транзистора з  $n$ -каналом та ізольованим затвором

У режимі збіднення струм в каналі зменшується, у режимі збагачення – збільшується. Таким чином, на відміну від польового транзистора з керованими  $p$ - $n$ -переходами, транзистор з ізольованим затвором може працювати з нульовою, від'ємною або додатною напругою на затворі (рис. 8.11, а).

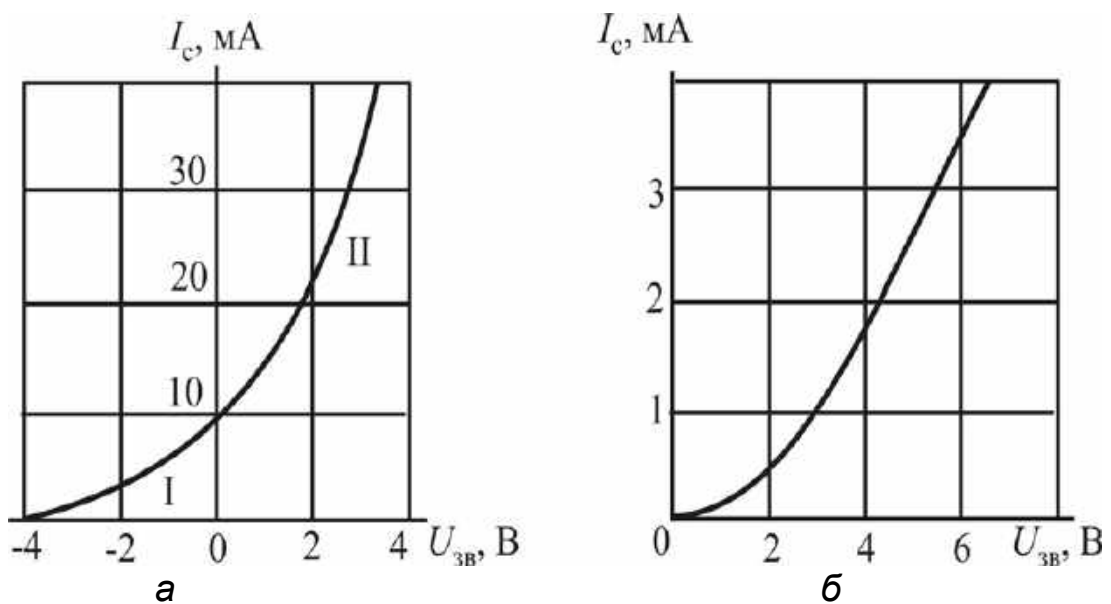


Рис. 8.11. Вольт-амперні характеристики польових транзисторів з ізольованим затвором: а – із початковим каналом  $n$ -типу (I – режим збіднення; II – режим збагачення); б – з індукованим каналом  $n$ -типу

Більш того, якщо зовсім не легувати канал, а індукувати його, втягуючи, наприклад, електричним полем від додатного потенціалу на затворі

електрони з кремнієвої підкладки  $p$ -типу, то транзистор пропускатиме струм тільки в режимі збагачення. Це дуже зручно, тому що при відсутності напруги на затворі транзистор буде гарантовано закритий. Він відкриється тільки після подолання деякого порогового значення напруги (рис. 8.11, б).

### 8.3. IGBT-транзистори

Польовий транзистор індукційного типу в парі з біполярним дає можливість створювати у вигляді інтегральних напівпровідникових мікросхем монолітні транзисторні зборки, параметри яких є не нижчими від параметрів потужних діодів і тиристорів. Ці транзисторні зборки мають назву транзисторів типу *IGBT* (біполярні транзистори з ізольованим затвором, рис. 8.12), їх максимальні параметри: за напругою – 6000 В (60-й клас), за струмом – 3000 А.

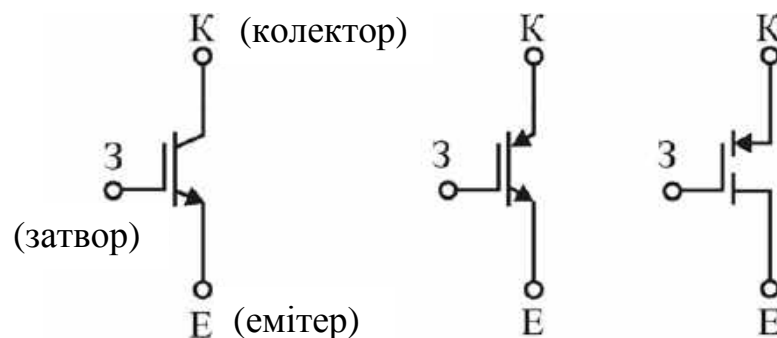


Рис. 8.12. Умовні позначення на схемах *IGBT*-транзисторів

На рис. 8.13 показано базову комірку *IGBT*-транзистора та її дещо спрощену структурну схему. Принцип дії зображеного електронного ключа полягає в тому, що поки на затвор З не подано додатну напругу, канал МДН-транзистора є перекритим і на базу біполярного транзистора  $p-n-p$  не подається струм. Він залишається теж закритим і не пропускає струм від колектора К до емітера Е, між якими утримується велика напруга (*IGBT*-транзистор закритий).

Унаслідок того, що підвищення температури *IGBT*-транзистора по-різному впливає на опори біполярного транзистора і МДН-транзисторів, загальний температурний коефіцієнт у зоні робочих струмів є додатним, завдяки чому переваги польового транзистора зберігаються (збільшення температури не приводить до збільшення струму). При великій кількості паралельно з'єднаних комірок у край важливо, щоб зростання температури не приводило до зменшення їх опору, у противному разі одна з комірок почне пропускати все більший струм, проб'ється і закоротить усю зборку.

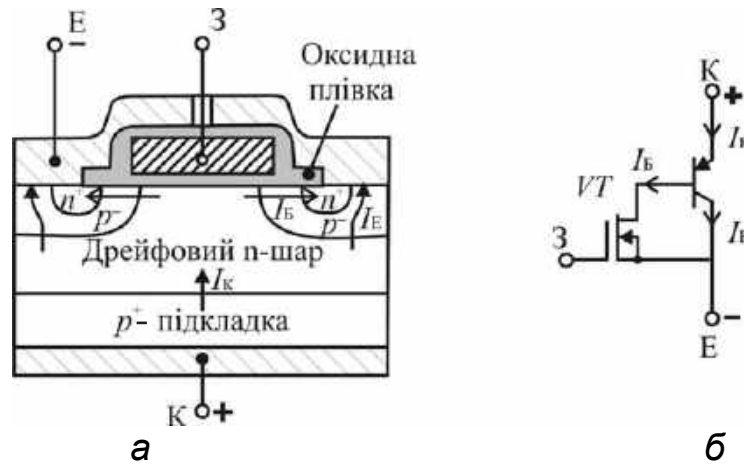


Рис. 8.13. Транзистор *IGBT*: а – структура базової комірки, б – її спрощена схема

## 9. ТИРИСТОРИ

*Тиристором* називають напівпровідниковий прилад вентиляного типу, який відкривається для пропускання електричного струму при досягненні порогового значення напруги між анодом і катодом або за умови подачі невеликої напруги на керувальний електрод.

Для виготовлення тиристорів використовують кремній, у якому створюються прошарки напівпровідників *p*- і *n*-типів, що чергуються. Зазвичай таких прошарків чотири з трьома *p-n*-переходами. Структуру й умовні позначення двох видів тиристорів – діодного з двома виводами (*диністора*) і тріодного з іще одним, керувальним, електродом (*триністора*) – показано на рис. 9.1.

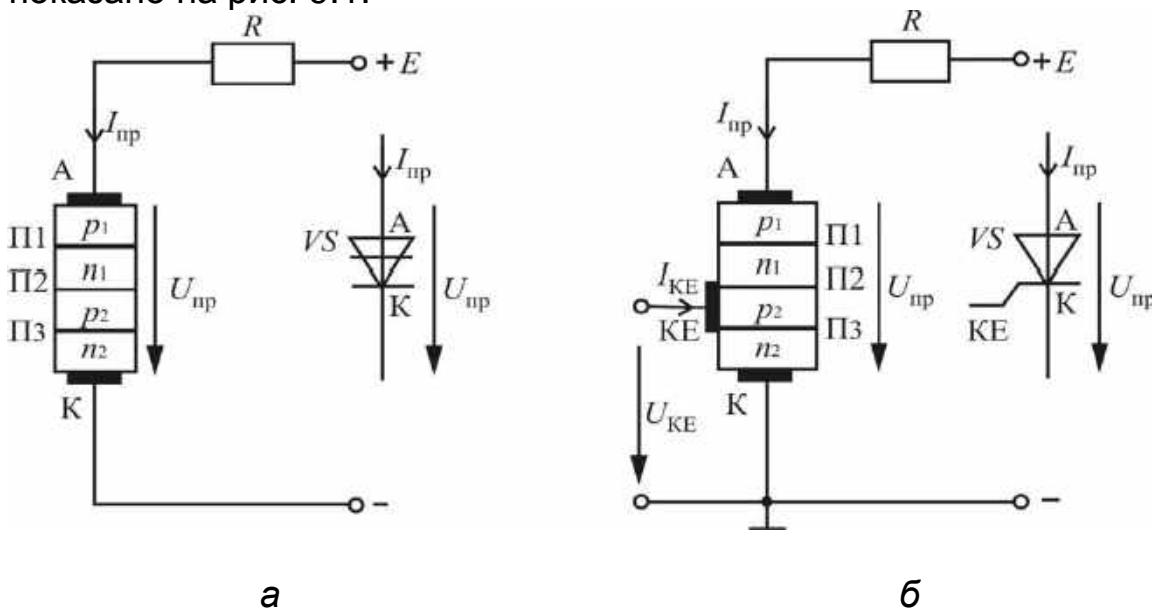


Рис. 9.1. Структура й умовні позначення диністора (а) і триністора (б): А – анод; К – катод; КЕ – керувальний електрод

При ввімкненні тиристора на пряму напругу  $p-n$ -переходи П1 і П3 відкриваються для основних носіїв електричних зарядів. Але для переходу П2 це буде зворотна напруга, і крізь нього будуть проходити тільки неосновні носії електричних зарядів, утворюючи невеликий електричний струм, що потроху збільшується в міру підвищення прямої напруги на тиристорі. Одночасно, проходячи крізь перехід П2, ці заряди сприяють деіонізації домішкових атомів у переході і зменшують тим самим його ширину.

Умовні позначення основних типів тиристорів наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Позначення	Назва
	Діод
	Симетричний діод (діак)
	Тиристор з керуванням за анодом
	Тиристор з керуванням за катодом
	Замикальний анодний триністор
	Замикальний катодний триністор
	Симетричний триністор (симістор)

При досягненні певного рівня прямої напруги  $U_{вкл}$  на тиристорі ширина переходу П2 стає близькою до нуля, і він відкривається для основних носіїв електричних зарядів, концентрація яких зростала з підвищенням напруги. Починається їх лавиноподібний рух, унаслідок якого утворюється великий прямий струм, а напруга, що стримувалась на переході, зникає (її бере на себе опір  $R$ ), і залишається тільки невелике падіння прямої напруги (0,5...1,0 В) на внутрішньому опорі тиристора. Відбувається так зване «ввімкнення» тиристора (рис. 9.2, а).

Напруга  $U_{вкл}$ , при якій відпирається тиристор, може бути зменшена шляхом введення додаткових неосновних носіїв електричних зарядів у будь-який з прошарків біля переходу П2. Це сприятиме актам деіонізації в переході, і чим більше їх відбудеться, тим нижчою буде напруга, при якій



тиристор відкриється. Для введення додаткових носіїв електричних зарядів у тріодному тиристорі використовується керувальний електрод (рис. 9.1, б), який живиться від незалежного джерела напруги.

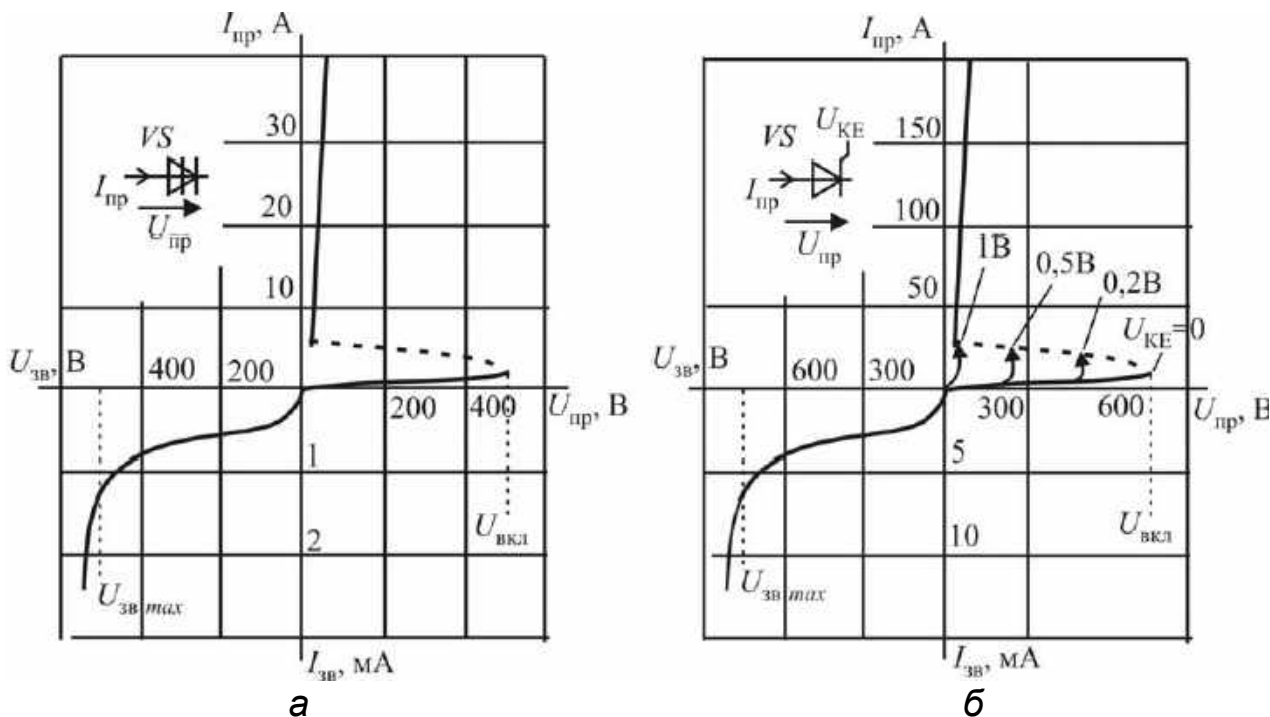


Рис. 9.2. Вольт-амперні характеристики диністора (а) і триністора (б)

Якою мірою знижується пробивна напруга залежно від напруги  $U_{ке}$  на керувальному електроді, ілюструє сім'я кривих на рис. 9.2, б. Якщо буде зменшений до нуля прямий струм і прикладена зворотна напруга, то тиристор закриється і не зможе самовільно відкритись. При цьому через тиристор буде проходити невеликий зворотний струм (переходи П1 і П3 будуть закриті), а щоб уникнути теплового пробою зворотна напруга не повинна перевищувати максимально допустиму напругу  $U_{зв max}$  (рис. 9.2).

Тиристори, що запираються, закриваються коротким імпульсом зворотної напруги, яка подається на керувальний електрод.

Структури некерованих симетричних тиристорів показано на рис. 9.3.

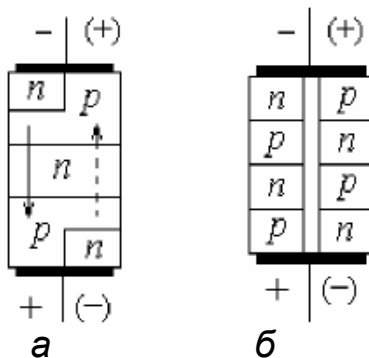


Рис. 9.3. Структури симетричних тиристорів

У п'ятишаровій конструкції тиристора (рис. 9.3, а) при прямій полярності прикладеної напруги (без дужок) працює ліва половина приладу (напрямок руху електронів показано стрілкою зверху вниз). При зворотній полярності напруги (показано в дужках) струм іде в зворотному напрямку через праву половину приладу (напрямок руху електронів показано стрілкою знизу вверху).

Роль симетричного тиристора можуть виконувати два діодних тиристори, які з'єднано зустрічно-паралельно (рис. 9.3, б). Керовані симетричні тиристори мають виводи від відповідних базових областей.

Тиристори використовують у керованих випрямлячах та інверторах як малої, так і великої потужності, у комутаційній апаратурі різного роду. Виготовляють тиристори на струми до 2000 А і робочі напруги до 4000 В, тобто вони спроможні конкурувати з найпотужнішими транзисторами типу *IGBT*, і їх використання в електронній перетворювальній техніці визначається економічними й енергетичними факторами: вартістю напівпровідникових приладів і схем на їх основі, втратами потужності та ККД.

## ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

*До розділів 1–6*

1. Загальна структура елементної бази електронних апаратів.
2. Структура активних елементів, загальні властивості.
3. Структура пасивних елементів, їх загальні властивості.
4. Групи характеристик електрорадіоелементів.
5. Втрати енергії в електрорадіоелементах.
6. Призначення та класифікація резисторів. Будова резисторів постійного опору.
7. Електричні характеристики резисторів.
8. Власні шуми резисторів.
9. Нелінійні властивості недротових резисторів.
10. Робота резисторів на високих частотах.
11. Резистори змінного опору, їх класифікація, специфічні характеристики.
12. Спеціальні резистори: варистори, терморезистори, фоторезистори, тензорезистори, магніторезистори.
13. Призначення, класифікація електричних конденсаторів, будова конденсаторів постійної ємності.
14. Електричні характеристики конденсаторів.
15. Робота конденсаторів на високих частотах.
16. Явище абсорбції.
17. Спеціальні конденсатори: вариконди, термоконденсатори.

18. Конденсатори змінної ємності, класифікація, специфічні параметри.
19. Основні типи конструкцій конденсаторів змінної ємності.
20. Призначення та класифікація індуктивних компонентів. Будова ВЧ-катушок індуктивності.
21. Основні характеристики ВЧ-катушок індуктивності.
22. ВЧ-катушки з осердям, екранування катушок.
23. Дроселі високої частоти.
24. Втрати енергії в катушках індуктивності, поняття найвигіднішого (оптимального) діаметра дроту намотки.
25. Трансформатори. Призначення, будова та фізичні принципи функціонування.
26. Загальні характеристики трансформаторів, класифікації за призначенням і типом магнітопроводу.
27. Призначення електромагнітних ліній затримки сигналів, умови узгодженого з'єднання.
28. Приклади використання твердотільних фільтрів і резонаторів у радіоелектронній апаратурі.
29. Особливості застосування в радіоелектроніці елементів для поверхневого монтажу.
30. Класифікація та основні характеристики комутаційних пристроїв.

### *До розділів 7–9*

1. Назвіть основні типи напівпровідникових приладів та укажіть кількість  $p$ - $n$ -переходів у них.
2. Що таке напівпровідниковий діод? Наведіть класифікацію й умовні позначення напівпровідникових діодів.
3. Що таке випрямний діод? Накресліть його умовне позначення й вольт-амперну характеристику. Де застосовуються випрямні діоди?
4. Що таке напівпровідниковий стабілітрон? Накресліть його умовне позначення і вольт-амперну характеристику. Де застосовуються напівпровідникові стабілітрони?
5. Що таке напівпровідниковий варикап? Накресліть його умовне позначення й графік залежності ємності варикапа від зворотної напруги. Де використовуються варикапи?
6. Що таке фото- і світлодіоди? Накресліть їх умовні позначення. Де використовуються фото- і світлодіоди?
7. Що таке транзистор? Наведіть класифікацію й умовні позначення транзисторів.
8. Накресліть структуру й умовне позначення біполярних транзисторів  $p$ - $n$ - $p$ - і  $n$ - $p$ - $n$ -типів. Позначте основні елементи.

9. Назвіть і накресліть схеми під'єднання біполярного транзистора.
10. Накресліть вхідну й вихідну вольт-амперні характеристики біполярного транзистора, підімкненого за схемою зі спільним емітером.
11. Що являють собою  $h$ -параметри біполярного транзистора?
12. Накресліть структуру, умовне позначення й схему підімкнення польового транзистора з керованими  $p$ - $n$ -переходами.
13. Наведіть структуру, умовне позначення й схему підімкнення польового транзистора з  $n$ -каналом та ізольованим затвором.
14. Що таке  $IGBT$ -транзистор? Наведіть структуру базової комірки і спрощену схему транзистора  $IGBT$ .
15. Що таке тиристор? Наведіть структуру й умовні позначення диністора і триністора. Де використовуються тиристори?
16. Поясніть принцип дії диністора і триністора. Накресліть їх вольт-амперні характеристики.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Барсуков, С. Н. Элементная база радиоэлектроники : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. Полупроводниковые диоды / С. Н. Барсуков. – Харьков : ХАИ, 2002. – 88 с.

Барсуков, С. Н. Элементная база радиоэлектроники : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Биполярные транзисторы. Тиристоры / С. Н. Барсуков, А. С. Кравчук. – Харьков : ХАИ, 2005. – 88 с.

Болюх, В. Ф. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки : навч. посіб. / В. Ф. Болюх, В. Г. Данько. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.

Борисов, О. В. Твердотільна електроніка : підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко ; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.

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

Лишук, В. В. Електрорадіоматеріали : навч. посіб. / В. В. Лишук. – Луцьк : ЛНТУ, 2016. – 324 с.

Матвійків, М. Д. Елементна база електронних апаратів : підручник / М. Д. Матвійків, В. М. Когут, О. М. Матвійків. – Львів : Львівська політехніка, 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.

Основи електроніки з елементами мікроелектроніки : навч. посіб. / П. Г. Стахів, В. І. Коруд, О. Є. Гамола, В. Я. Чернівчан, Н. П. Мусихіна. – Львів : Магнолія 2006, 2007. – 225 с.

Панфілов, І. П. Компонентна база радіоелектронної апаратури : навч. посіб. / І. П. Панфілов, М. П. Савицька, Ю. В. Флейта. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2013. – 180 с.

Пасивні електрорадіоелементи (елементна база радіоелектронних апаратів) : навч. посіб. / В. П. Олійник, Р. В. Колесник, С. М. Куліш, М. В. Долженков. – Харків : ХАІ, 2009. – 65 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. Ващуков, В. А. Прохоренко, С. Н. Ходоренко. – Минск : Беларусь, 1994. – 591 с.

Стахів, П. Г. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування : підручник / П. Г. Стахів, В. І. Коруд, О. Є. Гамола. – Львів : Новий Світ–2000; Магнолія плюс, 2003. – 208 с.

Терещук, Р. М. Справочник радиолюбителя / Р. М. Терещук, К. М. Терещук, С. А. Седов. – Киев : 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.....	13
2.3. Спеціальні резистори.....	15
2.4. Особливості використання резисторів у РЕА.....	19
3. Конденсатори.....	23
3.1. Основні параметри конденсаторів.....	25
3.2. Конденсатори змінної ємності .....	30
3.3. Спеціальні конденсатори.....	34
3.4. Особливості використання конденсаторів у РЕА.....	34
4. Індуктивні компоненти.....	42
4.1. Високочастотні котушки індуктивності.....	42
4.2. Трансформатори.....	47
4.3. Твердотілі аналоги LC-кіл.....	49
4.4. Магнітні головки.....	50
4.5. Штучні лінії.....	51
5. Електронні компоненти для поверхневого монтажу.....	55
6. Комутаційні пристрої.....	57
7. Напівпровідникові діоди.....	60
7.1. Випрямні діоди.....	61
7.2. Напівпровідникові стабілітрони.....	64
7.3. Напівпровідникові варикапи.....	65
7.4. Фото- і світлодіоди .....	66
8. Транзистори.....	66
8.1. Біполярні транзистори.....	67
8.2. Польові транзистори.....	74
8.3. IGBT-транзистори.....	78
9. Тиристори.....	79
Запитання для самоконтролю.....	82
Бібліографічний список.....	85

Навчальне видання

**Олійник Володимир Петрович**

## **ЕЛЕМЕНТНА БАЗА РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2022

Підписано до друку 21.02.2023

Формат 60x84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 4,9. Обл.-вид. арк. 5,5. Наклад 50 пр.

Замовлення 121. Ціна вільна

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

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

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001