

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики
та інформаційно-вимірювальних технологій**

Андрій Кевшин, Олексій Новосад, Сергій Федосов

ЕЛЕКТРОНІКА

Задачі

Луцьк

2020

УДК 539.2
К-33

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки (протокол № 1 від 23.09.2020 р.).

Рецензенти: *Ящинський Л. В.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра фундаментальних наук, Луцький НТУ;

Шигорін П. П. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра теоретичної та математичної фізики імені А. В. Свідзинського, СНУ імені Лесі Українки.

К 33 Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. **Електроніка** : задачі. Луцьк, 2020. 48 с.

Задачі з «Електроніки» – складова комплексу робочих матеріалів написаних на українській мові, створених для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузей знань 01 Освіта/Педагогіка, 10 Природничі науки, галузей знань технічних наук. Задачі збірника охоплюють курси «Електроніка», «Радіоелектроніка», «Електротехніка та основи електроніки», «Основи теорії кіл, сигнали та процеси в електроніці», «Основи комп'ютерної фізики». Видання містить набір задач необхідних для організації повноцінної аудиторної та самостійної роботи студентів, базовим для подальшого вивчення навчальних дисциплін «Архітектура ЕОМ», «Цифрова електроніка», «Елементи напівпровідникових пристроїв» та інших спецкурсів і рекомендовано використовувати після засвоєння матеріалу навчальних дисциплін «Електрика і магнетизм», «Вища математика».

Навчально-методичне видання відповідає чинним навчальним програм підготовки й рекомендовано студентам спеціальностей 014 Середня освіта (Фізика), 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали, 125 Кібербезпека, 161 Хімічні технології та інженерія, 193 Геодезія та землеустрій, спеціальностей галузей технічних наук.

УДК 539.2

© Кевшин А. Г. та ін., 2020

© Вежа-Друк, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ТЕМА 1. ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА	5
1.1. Резистори	5
1.2. Конденсатори	10
1.3. Котушки індуктивності та дроселі	11
Задачі для самостійного розв'язання	13
ТЕМА 2. ЕЛЕМЕНТИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	17
2.1. Електронно-дірковий перехід (<i>p-n</i> перехід)	17
2.2. Загальні відомості про діоди	19
2.3. Будова та принцип дії біполярних транзисторів	22
2.4. Статичні вольт-амперні характеристики біполярних транзисторів	24
Задачі для самостійного розв'язання	27
ТЕМА 3. АНАЛОГОВІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ. ЕЛЕКТРИЧНІ ФІЛЬТРИ	32
3.1. Випрямлячі	32
3.2. Підсилювачі електричних сигналів	36
3.3. Електричні фільтри	38
Задачі для самостійного розв'язання	41
ДОДАТКИ	44
ЛІТЕРАТУРА	47

ВСТУП

Електроніка – це галузь фізики та техніки, в якій досліджуються електронні процеси, що пов'язані з утворенням та керуванням руху вільних електронів та/або інших заряджених частинок в різноманітних середовищах (вакуум, тверде тіло, газ, плазма) та на їх границях, а також проблеми і методи розробки електронних приладів різного призначення.

Предметом дисципліни «Електроніка» є розгляд фізичних явищ та процесів, які лежать в основі роботи напівпровідникових приладів, принципів роботи радіоелектронних пристроїв, у тому числі й цифрових, побудованих на базі напівпровідникових приладів.

Метою даної дисципліни є вивчення фізичних явищ та процесів, що мають місце в електротехнічних пристроях та лежать в основі роботи напівпровідникових пристроїв, а також вивчення загальних принципів побудови та роботи підсилювачів, генераторів на напівпровідникових приладах, а також принципів радіозв'язку і цифрових пристроїв, які є складовими частинами сучасних електронно-обчислювальних машин.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Електроніка» є:

- формування знань, вмінь та навичок, необхідних для раціонального використання сучасних методів вимірювання при розв'язуванні задач пов'язаних з отриманням та опрацюванням інформації у сучасному виробництві, науці, повсякденній практиці;
- освоєння науки про вимірювання;
- знайомство студентів із перспективами у цій галузі знань;
- подальше становлення і вдосконалення професійної культури майбутніх фахівців.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

знати:

- суть фізичних явищ, які мають місце в електротехнічних пристроях; суть фізичних явищ, які лежать в основі роботи напівпровідникових приладів;
- класифікацію, фізичний зміст, принципи функціонування та умовні позначення елементів електротехнічних пристроїв;
- класифікацію, принципи функціонування, призначення та умовні позначення напівпровідникових приладів; класифікацію, призначення та принципи функціонування радіоелектронних пристроїв (підсилювачів, генераторів), а також цифрових, побудованих на базі напівпровідникових приладів;

вміти:

- реалізувати метод вимірювань з використанням елементарних операцій та елементарних засобів вимірювань;
- визначати метрологічні характеристики засобів вимірювання;
- проводити метрологічну атестацію засобів вимірювання;
- проводити вимірювання електричних параметрів.

ТЕМА 1. ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

1.1. Резистори.

Пасивні елементи, в залежності від функцій, що вони виконують, діляться на такі групи:

- 1) резистори;
- 2) конденсатори;
- 3) котушки індуктивності.

Резистори – це радіоелементи, які служать для зміни струму та напруги в електричних колах. Розрізняють два основні типи резисторів: постійні та змінні. Постійні резистори задають зміну струму на деяку певну фіксовану величину, а змінні мають можливість регулювати зміну струму і напруги у широких межах.

Резистори працюють як з постійними, так і з змінними видами електричних сигналів. У загальному випадку опір резистора знаходиться згідно закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}.$$

При цьому потужність резистора визначається з виразу:

$$P = UI = I^2 R.$$

Постійні, діляться на дві групи: загального та спеціального призначення.

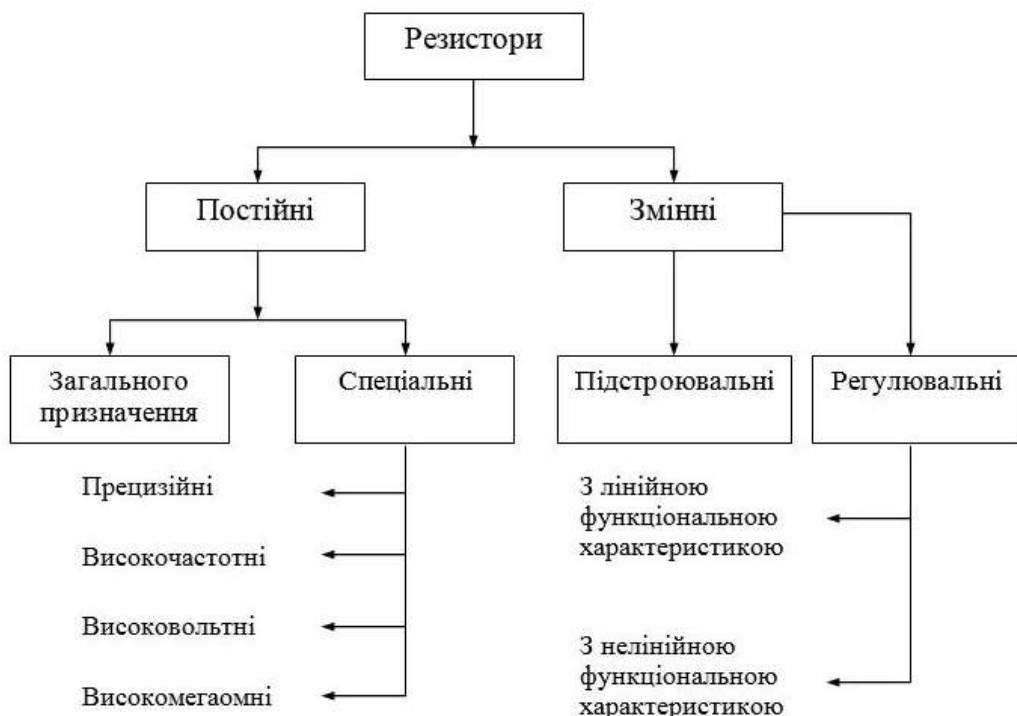


Рис. 1.1. Поділ резисторів за призначенням

До резисторів загального призначення не ставляться високі вимоги щодо точності виготовлення і стабільності параметрів. Ці резистори

використовуються, в основному, як елементи побутової техніки. До резисторів спеціального призначення відносяться елементи підвищеної стабільності, високочастотні, високоомні, а також резистори для мікромодулів та мікрозбірок.

Прецизійні – відрізняються значною точністю виготовлення – допуск від 0,001 % до 1 %. Стабільність параметрів дуже висока. Використовують такі резистори в вимірювальних приладах, обчислювальній техніці, системах автоматики. Потужність прецизійних резисторів не більше 2 Вт, при більших потужностях розсіювання складно виконати вимоги стабільності параметрів.

Високочастотні (ВЧ) резистори мають малу власну ємність та індуктивність. Використовують в ВЧ колах, кабелях та хвилеводах – це узгодження навантажень або сигналів, в атенюаторах, відгалужувачах, працюють як еквіваленти різноманітних антен (в основному передавальних). ВЧ резистори (не дротяні) використовують на частотах від одиниць МГц до десятків ГГц, дротяні – до 1 МГц.

Високовольтні резистори розраховані на значні робочі напруги – до десятків кіловольт. Використовуються як діляники напруги, іскрогасників, поглиначів в зарядних (розрядних) високовольтних колах та ін.

Високомегаомні резистори мають діапазон номінальних опорів від десятків МОм до сотень тераом (ТОм), робочі напруги до 400 В, потужності розсіювання $\leq 0,5$ Вт. Область використання – електричні кола з незначними струмами, прилади нічного бачення, дозиметри, вимірювальна апаратура.

Змінні резистори діляться на: а) підстроювальні, б) регулюючі.

Підстроювальні резистори розраховані на періодичне підстроювання апаратури. Зносостійкість підстроювальних резисторів незначна – до 1000 циклів переміщення рухомої системи резистору.

2. Регулюючі резистори використовуються для багаторазового регулювання апаратури – ≥ 5000 циклів. Функціональна характеристика резисторів може бути: А – лінійна; Б – логарифмічна; В – обернено логарифмічна, або типів Е, И, S, Н та ін.

До основних параметрів резисторів відносяться:

- номінальний опір;
- номінальна потужність;
- допустиме відхилення номінального опору.

Номінальний опір R – це опір резистора в омах у відповідності з нормативною документацією.

Номінальна потужність P – це максимальна потужність (Вт), яка може розсіюватись резистором на протязі тривалого часу при заданих умовах роботи.

Допустиме відхилення ΔR – це відхилення номінального опору резистора (%) в бік збільшення чи зменшення, задане у технічній документації:

$$\Delta R = \frac{R_{\text{дàèò}} - R_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} 100\% .$$

Значення номінального опору, номінальної потужності та допустимого відхилення наносяться на корпусі резистора.

Для позначення опору й одиниць його вимірювання на резисторах наносять відповідні марки з букв та цифр. Наприклад, резистори 220 Ом, 680 Ом, 3,3 МОм, 4,7 ГОм позначають як 220R, 680K, 3M3, 4G7. Тобто буква одночасно позначає множник 1, 10^3 , 10^6 , 10^9 і розташування коми десяткового знака. Числові значення є стандартизованими, зокрема, встановлено шість рядів: E6, E12, E24, E48, E96, E192, у яких цифра після букви E вказує на кількість номінальних значень у кожному десятковому інтервалі.

Тип маркування, при якому на корпус резистора наноситься фарба у вигляді кольорових кілець або точок (рис. 1.2) називають колірним кодом. Кожному кольору відповідає певне цифрове значення (рис. 1.3).

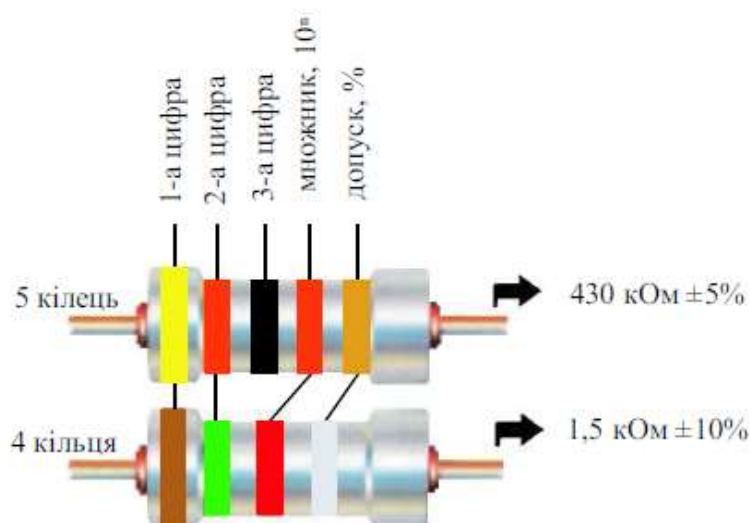


Рис. 1.2. Маркування (колірний код) резисторів

Резистори. Кольорове маркування						
Колір	1 елемент	2 елемент	3 елемент	множник	допуск	ТКО %/С
Золотий				0,01 Ом	5%	
Срібний				0,1 Ом	10%	
Чорний		0	0	1 Ом	20%	
Коричневий	1	1	1	10 Ом	1%	100
Червоний	2	2	2	100 Ом	2%	50
Помаранчевий	3	3	3	1 кОм		15
Жовтий	4	4	4	10 кОм		25
Зелений	5	5	5	100 кОм	0,50%	
Блакитний	6	6	6	1 МОм	0,25%	10
Фіолетовий	7	7	7	10 МОм	0,10%	5
Сірий	8	8	8	100 МОм	0,05%	
Білий	9	9	9			<u>1</u>

Рис. 1.3. Кольорове маркування резисторів

На резистори з малою величиною допуску (0,1...10 %), маркування проводиться п'ятьма кольоровими кільцями. Перші три кільця відповідають

чисельній величині опору в омах, четверте кільце множник, а п'яте кільце – допуск. Резистори з величиною допуску 20 % маркуються чотирма кольоровими кільцями і на них величина допуску не наноситься. Перші три кільця – чисельна величина опору в омах, а четверте кільце – множник. Іноді резистори з допуском 20 % маркують трьома кольоровими кільцями. У цьому випадку перші два кільця – чисельна величина опору в омах, а третє кільце – множник. Незначущий нуль на третьому розряді не маркується.

Колірне маркування на резисторах зміщена до одного з виводів і читається зліва направо (рис. 1.4). Якщо маркування не можна розмістити біля одного з виводів, то перший знак робиться смугою шириною в два рази більше, ніж інші. Одне з кілець може бути відсутнім, зазвичай передостаннє. Тоді перше це те, біля якого є пара.



Рис. 1.4. Колірне маркування на резисторах

Інший варіант, коли маркувальні кільця розташовані рівномірно, тобто заповнюють поверхню рівномірно (рис. 1.5). Тоді перше кільце визначають за кольорами. Одне з крайніх кілець (перше) не може бути золотого кольору, тоді можна визначити з якого боку йде маркування.

	1 кільце	2 кільце	3 кільце	множник	допуск
чорний	0	0	0	1	
коричневий	1	1	1	10	1%
червоний	2	2	2	100	2%
оранжевий	3	3	3	1000	
жовтий	4	4	4	10000	
зелений	5	5	5	100000	0,5%
блакитний	6	6	6	1000000	0,25%
фіолетовий	7	7	7	10000000	0,1%
сірий	8	8	8	0,1% золото	5% золото
білий	9	9	9	0,01% сріб	10% сріб

Рис. 1.5. Колірне маркування на резисторах

Наприклад, визначимо параметри двох резисторів, зображених на рисунку. Візьмемо верхній резистор. Перше кільце червоного кольору, це 2,

друге фіолетового – це 7, третє, множник червоне – це 100, а допуск у нас коричневий – це 1 %. Тоді: $R = 27 \cdot 100 = 2700 \hat{\Omega}$ або 2,7 кОм з допуском відхилення в 1 % в обидва боки.

Другий резистор має кольорове маркування з 5 смуг. У нас: 2, 7, 2, 100, 1 %, тоді: $R = 272 \cdot 100 = 27200 \hat{\Omega}$ або 27,2 кОм з допуском в 1 %.

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

Найбільша робоча напруга U обмежується значеннями номінального опору резистора $R_{ном}$ та його номінальною потужністю розсіювання $P_{ном}$:

$$U \leq \sqrt{R_{ном} \times P_{ном}} .$$

Важливою характеристикою резистора є температурний коефіцієнт опору (α) – відносна зміна опору при зміні його температури на 1 К:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} .$$

Чим менший α , тим кращу температурну стабільність забезпечує резистор. Температурний коефіцієнт опору вимірюють у величинах $10^{-6}/\text{К}$.

В електронних схемах часто потрібно отримати частину від якоїсь величини напруги. Це завдання вирішує дільник напруги (рис. 1.6). При цьому вхідна напруга подається на два послідовно з'єднаних резистори, а вихідна знімається з одного з них.

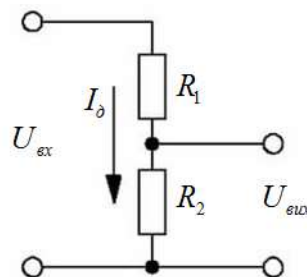


Рис. 1.6. Схема дільника напруги

Відповідно до закону Ома,

$$I_{\hat{a}} = \frac{U_{\hat{a}\hat{o}}}{R_1 + R_2}, \quad U_{\hat{a}\hat{o}} = I_{\hat{a}} R_2 .$$

Звідси:

$$U_{\hat{a}\hat{o}} = U_{\hat{a}\hat{o}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} .$$

Величина $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ називається коефіцієнтом передачі подільника (який завжди менше одиниці). Тому вихідна напруга завжди менша вхідної.

1.2. Конденсатори.

Конденсатор – це система з двох електродів, розділених між собою діелектриком, яка має здатність запасати електричну енергію. У техніці розрізняють полярні і неполярні конденсатори постійної та змінної ємності.

Конденсатори класифікують за:

– робочою напругою: низьковольтні ($U_{\text{д\i a}} < 1600 \text{ В}$), високовольтні ($U_{\text{д\i a}} \geq 1600 \text{ В}$);

– областю застосування – при малих струмах і малих напругах та при великих струмах і високих напругах;

– видом діелектрика – твердим, рідким, газоподібним, окисним, органічним;

– діапазоном робочих частот – для постійної або пульсуючої напруги; для напруги звукових частот ($100 \div 10000 \text{ Гц}$); для напруги радіочастотного діапазону (вище 100 кГц);

– призначенням – широкого застосування і спеціальні.

Основними параметрами конденсаторів є:

– номінальна ємність,

– допустиме відхилення від номінального значення ємності,

– номінальна робоча напруга,

– частотні властивості,

– допустима амплітуда змінної напруги.

Номінальна ємність C – це відношення накопиченого заряду до прикладеної напруги.

$$C = \frac{q}{U}.$$

Ємність вимірюється у фарадах, мікро-, нано-, і пікофарадах.

Допустиме відхилення від номінального значення ємності ΔC (%) характеризує точність значення ємності конденсатора.

Номінальна робоча напруга конденсатора $U_{\text{д\i a}}$ – це максимальна напруга, при якій конденсатор може працювати на протязі мінімального часу до відмови. Значення робочої напруги встановлюється технічною документацією на виріб.

Частотні властивості характеризують зміну ємності конденсатора від частоти прикладеної змінної напруги.

Допустима амплітуда змінної напруги на конденсаторі – це напруга, при якій втрати енергії в конденсаторі не перевищують допустимих. Її значення обчислюється за формулою:

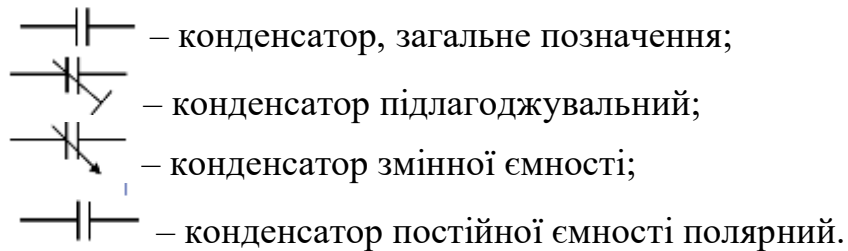
$$U_{m.\ddot{u}\ddot{u}} = \sqrt{\frac{P_{p.\ddot{u}\ddot{u}}}{\tilde{N}f\pi}}.$$

де $P_{p.\ddot{u}\ddot{u}}$ – допустима реактивна потужність, ВА; f – частота змінної напруги на конденсаторі, Гц; C – ємність конденсатора, Ф.

Для напівпровідникових і електролітичних (полярних) конденсаторів $U_{m.äü}$ повинна становити не більш ніж 20 % від значення робочої напруги, яка вказана на корпусі конденсатора.

Позначення конденсаторів наноситься на їхніх корпусах і складається з букви К, двозначного числа, що вказує вид діелектрика, умовного індексу, який визначає призначення конденсатора, і порядкового номеру розробки. Нижче вказується номінальна ємність і рік випуску елемента.

Умовні графічні позначення конденсаторів на електричних принципових схемах наведені нижче:



Кодова маркування конденсаторів часто використовується на маленьких конденсаторах, на яких важко розмістити повне числове значення ємності конденсатора. Перша цифра означає першу цифру ємності Друга цифра – другу цифру ємності, третя цифра означає число нулів, які необхідно додати до перших двох цифр, щоб отримати значення ємності конденсатора в pF . Наступні знаки означають допуск і напругу. Наприклад: 152 означає 1500 pF (не 152 pF) Наприклад: 512J означає 5100 pF (J означає 5 % допуск).

На деяких типах значення ємності конденсатора надруковано безпосередньо на корпусі без всякого множника. Наприклад: 0.1 означає 0.1 μF = 100 nF. Іноді множник використовують замість коми, наприклад: 5n6 означає 5.6 nF.

1.3. Котушки індуктивності та дроселі.

Котушки індуктивності (КІ) – це намоточні вузли радіоапаратури, які застосовуються як елементи коливальних контурів, для фільтрації сигналів різних частот, отримання магнітного зв'язку між окремими елементами електричних ланок, для створення на окремих ділянках електричної ланки заданих індуктивних опорів.

КІ поділяються на КІ для коливальних контурів та дроселі. *Дроселем* називається котушка індуктивності, яка вмикається в коло для створення опору струмам високої або низької частоти. Опір дроселя постійному струмові повинен бути мінімальним, а повний опір – достатньо високим і мати індуктивний характер. Чим вища частота фільтрації – тим розміри дроселя є меншими.

Котушки індуктивності бувають двох видів – з постійною та змінною індуктивністю.

Основними параметрами дроселів та котушок індуктивності є:

- індуктивність;
- допустиме відхилення індуктивності;
- добротність;

– власна ємність.

Індуктивність L – це відношення потокозчеплення Ψ самоіндукції котушки до струму I , що протікає через неї.

$$L = \frac{\Psi}{I}.$$

Чим більша індуктивність котушки або дроселя, тим більша енергія магнітного поля, якими вони запасуються при заданному значенні струму. Індуктивність вимірюється у генрі, мілі-генрі, мікро-генрі ($1 \text{ Гн} = 10^3 \text{ мГн} = 10^6 \text{ мкГн}$).

Індуктивність котушки в мкГн визначається співвідношенням:

$$L = L_0 W^2 D \cdot 10^{-3},$$

де W – число витків; D – діаметр котушки, см; L_0 – коефіцієнт, залежний від відношення довжини котушки l до її діаметру D . Для одношарових котушок величина L_0 визначається співвідношенням:

$$L_0 = \frac{1}{0,1 \cdot \left(\frac{l}{D} + 0,45 \right)}.$$

Оптимальними в цьому випадку являються відношення $\frac{l}{D} = 0,6 \dots 1,0$, а діаметр котушки в межах від 1 до 2 см. При розрахунку діаметр котушки D приймають рівним діаметру каркаса D_0 .

Для багатшарових котушок величина L_0 залежить не лише від відношення $\frac{l}{D}$, але і від відношення товщини намотування t до діаметру котушки D . У цьому випадку величину L_0 визначають по графіках (рис. 1.7), а зовнішній діаметр котушки приймають рівним

$$D = D_0 + 2t.$$

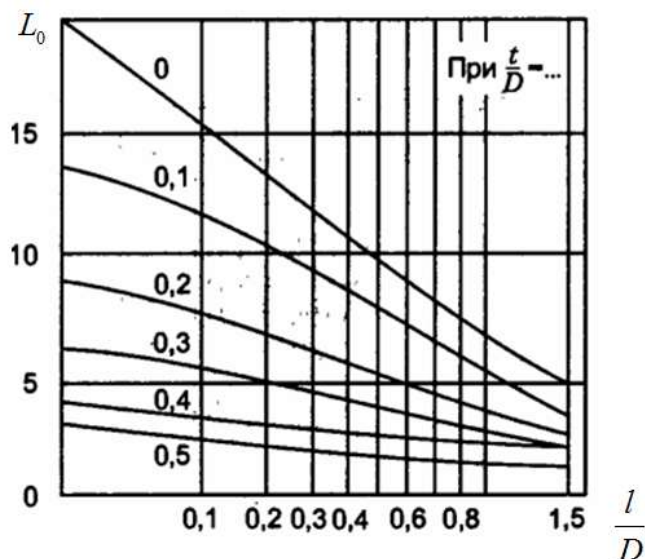


Рис. 1.7. Графіки для розрахунку котушок індуктивності

При розрахунку котушки індуктивності заздалегідь задають геометричні розміри котушки і визначають коефіцієнт L_0 , а потім за заданою величиною індуктивності L знаходять число витків:

$$W = \sqrt{\frac{L \cdot 10^3}{L_0 D}},$$

де L вказується в мікрогенрі, а D – в сантиметрах. Для намотування котушки зазвичай застосовують дріт оптимального діаметру, що дозволяє створити котушку індуктивності з найменшими втратами.

Допустиме відхилення індуктивності – це відношення у (%) відхилення індуктивності котушки чи дроселя від заданого значення, наведене у технічній документації.

Добротність Q – це відношення реактивного опору котушки до її активного опору.

$$Q = \frac{\omega L}{R}.$$

Добротність визначає ККД та резонансні властивості контурів.

Власна ємність – це ємність, яка виникає між витками та шарами обмотки котушки. Власна ємність є паразитним параметром, який збільшує втрати енергії і зменшує стабільність роботи коливальних контурів.

В основному, КІ бувають 2-ох типів – об'ємні (циліндричні, квадратного і інших перерізів) та площинні (спіральні).

Задачі для самостійного розв'язання

1. На резисторі є чотири кольорові кільця: 1-ше – оранжевого кольору, 2-ге – сірого кольору, третє – червоного кольору, четверте – золотого кольору. Визначте величину опору (в кОм) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 3 кОм. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

2. На резисторі є чотири кольорові кільця: 1-ше – червоного кольору, 2-ге – жовтого кольору, третє – зеленого кольору, четверте – блакитного кольору. Визначте величину опору (в кОм) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 2200 Ом. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

3. На резисторі є чотири кольорові кільця: 1-ше – жовтого кольору, 2-ге – червоного кольору, третє – фіолетового кольору, четверте – коричневого кольору. Визначте величину опору (в МОм) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 419 МОм. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

4. На резисторі є чотири кольорові кільця: 1-ше – білого кольору, 2-ге – зеленого кольору, третє – оранжевого кольору, четверте – срібного кольору. Визначте величину опору (в Ом) та його встановіть його допустиме

відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 90 кОм. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

5. На резисторі є чотири кольорові кільця: 1-ше – блакитного кольору, 2-ге – жовтого кольору, третє – зеленого кольору, четверте – золотого кольору. Визначте величину опору (в МОм) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 6,0 МОм. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

6. На резисторі є п'ять кольорових кілець: 1-ше – сірого кольору, 2-ге – червоного кольору, третє – зеленого кольору, четверте – фіолетового кольору, п'яте – коричневого кольору. Визначте величину опору (в МОм) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 8200 МОм. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

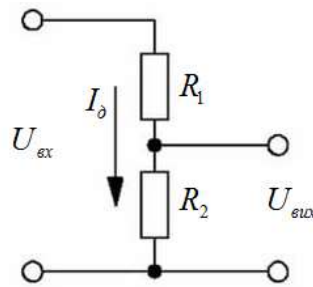
7. На резисторі є п'ять кольорових кілець: 1-ше – блакитного кольору, 2-ге – фіолетового кольору, третє – червоного кольору, четверте – золотого кольору, п'яте – сірого кольору. Визначте величину опору (в Ом) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 68,2 Ом. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

8. На резисторі є п'ять кольорових кілець: 1-ше – зеленого кольору, 2-ге – жовтого кольору, третє – червоного кольору, четверте – срібного кольору, п'яте – блакитного кольору. Визначте величину опору (в Ом) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 5,1 Ом. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

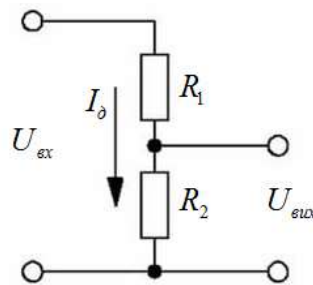
9. На резисторі є п'ять кольорових кілець: 1-ше – блакитного кольору, 2-ге – червоного кольору, третє – зеленого кольору, четверте – жовтого кольору, п'яте – сірого кольору. Визначте величину опору (в кОм) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 6200 кОм. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

10. На резисторі є п'ять кольорових кілець: 1-ше – зеленого кольору, 2-ге – червоного кольору, третє – коричневого кольору, четверте – зеленого кольору, п'яте – блакитного кольору. Визначте величину опору (в МОм) та його встановіть його допустиме відхилення. При безпосередньому вимірюванні мультиметром значення його опору виявилось рівним 52 МОм. Чи попадає дане значення в межі допустимого відхилення зазначеного в паспортних даних?

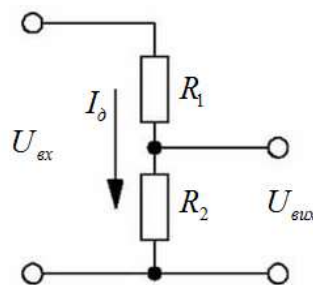
11. Визначити величину напруги на вході дільника напруги (U_{ex}), зображеного на рисунку, якщо: $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $U_{вих} = 12 \text{ В}$.



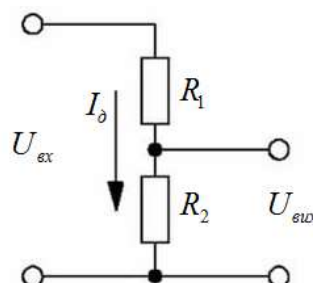
12. Розрахувати величину опору R_1 у дільнику напруги, зображеного на рисунку, якщо: $R_2 = 9 \text{ Ом}$, $U_{ex} = 20 \text{ В}$, $U_{вих} = 8 \text{ В}$.



13. Розрахувати величину опору R_2 у дільнику напруги, зображеного на рисунку, якщо: $R_1 = 16 \text{ Ом}$, $U_{ex} = 18 \text{ В}$, $U_{вих} = 6 \text{ В}$.



14. Визначити величину сили струму I_0 , який протікає через дільник напруги, зображеного на рисунку, якщо коефіцієнт передачі подільника 0,8, а $R_1 = 6 \text{ Ом}$, $U_{вих} = 12 \text{ В}$.



15. Визначити допустиму амплітуда змінної напруги частотою 50 Гц на плоскому слюдяному конденсаторі, якщо площа його пластин 12 см^2 , відстань між пластинами 2 мм, а допустима реактивна потужність 50 ВА.

16. На одношарову котушку діаметром 1,8 см та довжиною 1 см намотано 20 витків дроту. Визначити індуктивність котушки.

17. Необхідно виготовити одношарову котушку діаметром 2 см, довжиною 1,2 см та індуктивністю 120 мкГн. Визначити скільки витків дроту необхідно намотати на каркас котушки.

18. Необхідно виготовити багатошарову котушку індуктивністю 6 мкГн з діаметром каркасу 2 см, довжиною 1,6 см, яка має товщину обмотки 1 см. Визначити скільки витків дроту необхідно намотати на каркас котушки.

19. Багатошарова котушка має 120 витків дроту. Визначити кількість витків дроту, намотаних на каркас котушки довжиною 1,4 см, якщо діаметр каркасу 2,2 см, а товщина обмотки 0,8 см.

20. Через одношарову котушку діаметром 1,9 см, довжиною 1,6 см та індуктивністю 80 мкГн проходить струм частотою 50 Гц. Опір котушки 0,5 Ом. Визначити добротність котушки.

ТЕМА 2. ЕЛЕМЕНТИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

2.1. Електронно-дірковий перехід (p - n перехід).

Робота переважної кількості напівпровідникових приладів ґрунтується на явищах, які виникають при контакті двох монокристалічних напівпровідників з різними типами провідності. Такий контакт p - і n -напівпровідників називають p - n переходом. Він має ряд цінних властивостей, використання яких і обумовлює широчезний спектр можливостей напівпровідникових приладів.

Розглянемо процес, який утворюється у місці дотику напівпровідника, що має електронну n -провідність з напівпровідником, що має p -провідність. Кожному рухомому позитивному носію заряду в області p (дірці) відповідає негативно заряджений іон нерухомої акцепторної домішки, що знаходиться у вузлі кристалічної решітки, а в області n кожному вільному електрону відповідає позитивно заряджений іон донорної домішки, в результаті чого весь монокристал залишається електрично нейтральним.

Вільні носії електричних зарядів під дією градієнта концентрації починають переміщатися з місць з великою концентрацією в місця з меншою концентрацією. Так, дірки будуть дифундувати з області p в область n , а електрони, навпаки, з області n в область p (рис. 2.1).

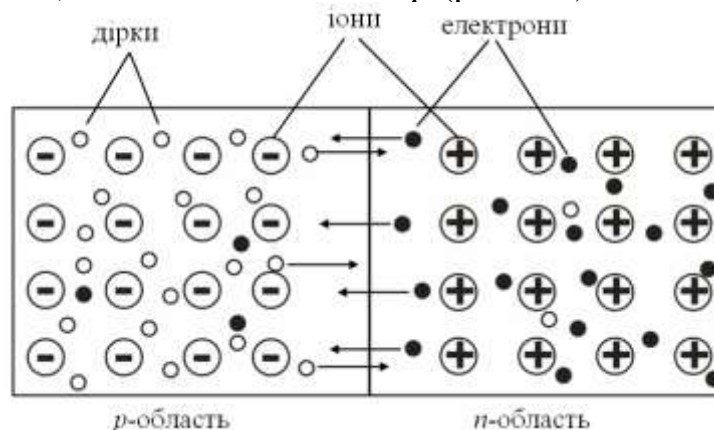


Рис. 2.1. Початковий момент утворення p - n переходу

Це спрямоване назустріч один одному переміщення електричних зарядів утворює дифузійний струм p - n -переходу. Але як тільки дірка з області p перейде в область n , вона виявляється в оточенні електронів, які є основними носіями електричних зарядів в області n . Тому є велика ймовірність того, що відбудеться явище рекомбінації, в результаті якої не буде ні дірки, ні електрона, а залишиться електрично нейтральний атом напівпровідника. Але якщо раніше позитивний електричний заряд кожної дірки компенсувався негативним зарядом іона акцепторної домішки в області p , а заряд електрона – позитивним зарядом іона донорної домішки в області n , то після рекомбінації дірки і електрона електричні заряди нерухомих іонів домішок, що створили цю дірку і електрон, залишаться некомпенсовані. І, в першу чергу, некомпенсовані заряди іонів домішок виявляють себе поблизу межі розділу, де утворюється шар просторових

зарядів, розділених вузьким проміжком δ . Між цими зарядами виникає електричне поле з напруженістю \vec{E} , яке називають *полем потенціального бар'єру*, а різниця потенціалів на межі поділу двох зон, що обумовлюють це поле, називають *контактною різницею потенціалів* $\Delta\varphi_k$ (рис. 2.2).

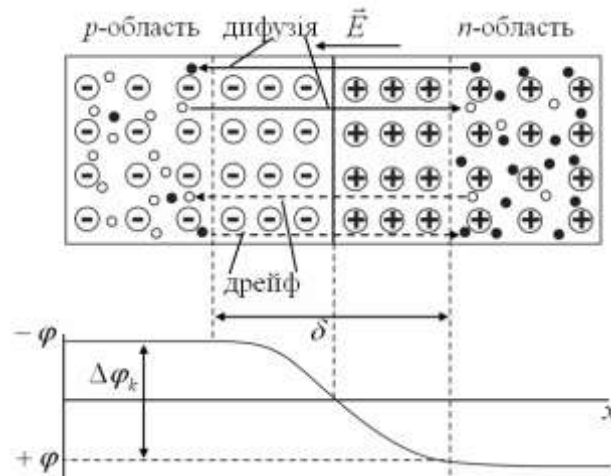


Рис. 2.2. Електронно-дірковий перехід при відсутності зовнішньої напруги

Це електричне поле видаляє носії зарядів з перехідного шару: електрони в n -область, а дірки в p -область. Внаслідок цього перехідний шар δ збіднюється носіями і набуває властивостей діелектрика. Глибина проникнення поля у напівпровідник залежить від його провідності: чим вона менша, тим більшою буде глибина. Тому, коли ступінь легування p - і n -областей неоднакова, збіднений носіями заряду шар утворюється переважно в напівпровіднику, котрий зазнав слабшого легування. При намаганні носіїв проникнути в „чужу” область їм доводиться долати потенціальний бар'єр досить значної висоти. Тому, хоч деякий обмін зарядами між p - і n -областями існує, проте він дуже незначний.

При відсутності зовнішнього електричного поля встановлюється динамічна рівновага між потоками основних і неосновних носіїв електричних зарядів, тобто між дифузійною і дрейфовою складовими струму p - n -переходу, тому що ці складові спрямовані назустріч один одному.

Потенціальна діаграма p - n -переходу зображена на рис. 2.2, причому за нульовий потенціал прийнятий потенціал на межі поділу областей. Контактна різниця потенціалів утворює на межі розділу потенціальний бар'єр з висотою $\Delta\varphi_k$. На діаграмі зображено потенціальний бар'єр для електронів, які прагнуть за рахунок дифузії переміщатися справа наліво (з області n в область p). Якщо відкласти вгору позитивний потенціал, то можна отримати зображення потенціального бар'єру для дірок, які дифундують зліва направо (з області p в область n).

Справа змінюється, якщо до переходу прикладена зовнішня напруга $U_{\text{за}}$ так, що до області p -типу подається „+”, а до області n -типу – „-” (рис. 2.3). Таке підключення називають прямим включенням p - n -переходу (або прямим зміщенням p - n -переходу). Напруженість електричного поля зовнішнього джерела $E_{\text{зв}}$ буде спрямована назустріч напруженості поля

потенціального бар'єру E а, отже, призведе до зниження результуючої напруженості $E_{рез}$:

$$E_{\delta a \zeta} = E - E_{\zeta a}.$$

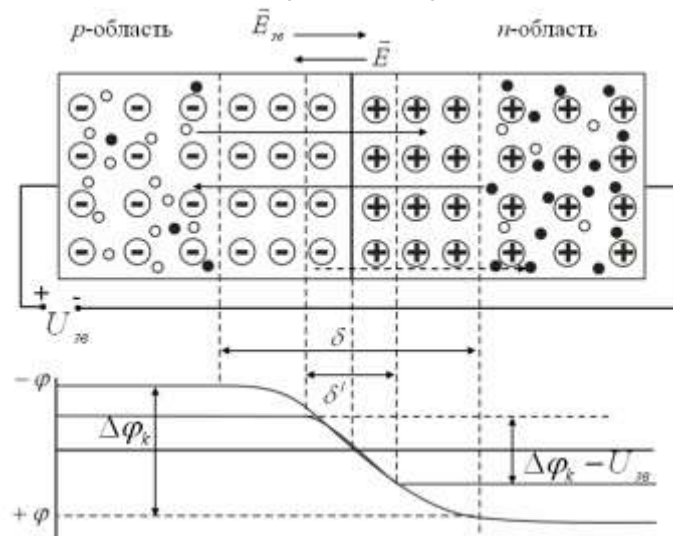


Рис. 2.3. Пряме зміщення p - n -переходу

Це призводить до зниження висоти потенціального бар'єру і збільшення кількості основних носіїв, що дифундують через межу розділу в сусідню область, які утворюють так званий прямий струм I p - n -переходу. При цьому внаслідок зменшення гальмуючої дії поля потенціального бар'єру на основні носії, ширина заперного шару δ зменшується ($\delta' < \delta$) і, відповідно, зменшується його опір.

У міру збільшення зовнішньої напруги прямий струм p - n -переходу зростає. Основні носії після переходу межі розділу стають неосновними в протилежній частині напівпровідника і, заглибившись в неї, рекомбінують з основними носіями цієї області. Але, поки підключене зовнішнє джерело, струм через перехід підтримується безперервним надходженням електронів із зовнішнього кола в n -область і відходом їх з p -області в зовнішнє коло, завдяки чому відновлюється концентрація дірок в p -області.

2.2. Загальні відомості про діоди.

Напівпровідниковий діод – це двохполюсний електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, що має один p - n перехід і два електроди: катод та анод.

Всі напівпровідникові діоди можна розділити на дві групи: *випрямні і спеціальні*. Випрямні діоди призначені для випрямлення змінного струму. Залежно від частоти і форми змінної напруги вони діляться на високочастотні, низькочастотні та імпульсні. У спеціальних типах напівпровідникових діодів використовують різні властивості p - n -переходу: явище пробою, бар'єрну ємність переходу і т.д.

Спрощена структура діода показана на рис. 2.4а, а його умовне графічне зображення – на рис. 2.4б.

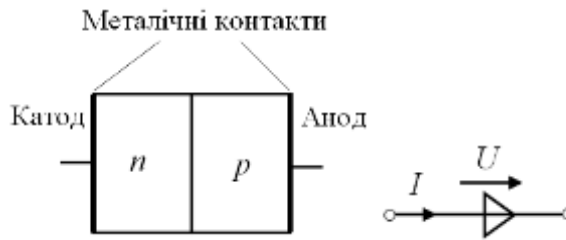


Рис. 2.4. Спрощена структура (а) та схематичне зображення (б) діода

Електрод діода, який підключений до p -області, називають анодом (А), а електрод, що підключений до n -області – катодом (К). Якщо анод позитивний по відношенню до катода, то на діод подано пряме зміщення; струм діода при цьому називають *прямим*. При зворотному зсуві катод більш позитивний, ніж анод. Зворотний струм при цьому обмежений малим струмом насичення.

Як правило, напівпровідникові діоди виконують на основі несиметричних p - n -переходів. У цьому випадку в одній з областей концентрація домішки, що визначає тип провідності, значно більше, ніж в іншій області. Область з високою концентрацією домішки називають *емітером*. Функції емітера може виконувати як катод, так і анод. Область з низькою концентрацією домішки називають *базою*. База має значно більший об'ємний опір, ніж емітер.

Напівпровідникові діоди класифікуються:

1) за призначенням: випрямні, високочастотні і надвисокочастотні (ВЧ- і НВЧ-діоди), імпульсні, напівпровідникові стабілітрони, тунельні, обернені, варикапи та ін.;

2) за конструктивно – технологічними особливостями: площинні і точкові;

3) за типом вихідного матеріалу: германієві, кремнієві, арсеніде-галієві та ін.

Опір R_0 діода постійному струмові визначається виразом:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a},$$

де U_a – анодна напруга в прямому напрямку; I_a – анодний струм у прямому напрямку.

Диференційний опір діода

$$R_{\dot{a}} = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a},$$

де ΔU_a – зміна прямої анодної напруги; ΔI_a – зміна прямого анодного струму.

Стабілітроном називається напівпровідниковий діод, вольт-амперна характеристика якого має область різкої залежності струму від напруги на зворотній ділянці вольт-амперної характеристики.

Стабілітрони використовують для роботи при напрузі, що перевищують напругу пробою діода. У цьому випадку область зворотних

напруг, при якій настає пробій, називається областю стабілізації. Коли зворотна напруга досить велика, щоб викликати пробій стабілітрона, через нього тече високий зворотний струм. До настання пробією зворотний струм невеликий, після різко зростає. Це відбувається тому, що опір стабілітрона зменшується при збільшенні зворотної напруги.

Стабілітрони випускають з певною напругою пробією, яку називають напругою стабілізації. На рис. 2.5 показана вольт-амперна характеристика стабілітрона: де $U_{ст}$ – номінальна напруга стабілізації, $I_{ст}$ – номінальний струм стабілізації. Номінальний означає нормальний параметр, при якому можлива довготривала робота радіоелемента. I_{max} та I_{min} відповідно максимальний та мінімальний струм стабілітрона (струм, який тече через стабілітрон при його роботі).

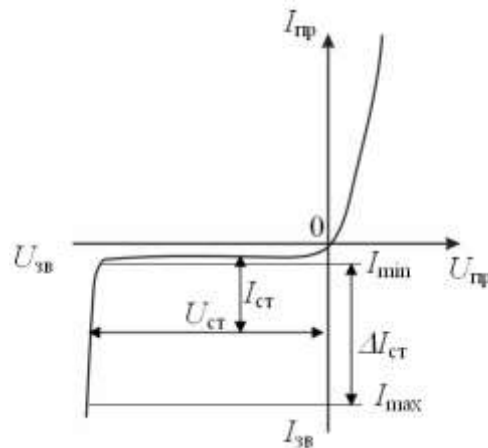


Рис. 2.5. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

На рис. 2.6 показане типове регулююче коло із стабілітроном. Стабілітрон VD з'єднаний послідовно з резистором R. Резистор обумовлює проходження через стабілітрон робочого струму (при якому стабілітрон працює в режимі пробією (стабілізації)). Вхідна постійна напруга $U_{вх}$ повинна бути вище напруги стабілізації U_C стабілітрона. Падіння напруги на стабілітроні дорівнює напрузі стабілізації стабілітрона: $U_{вих} = U_C$. Падіння напруги на резисторі дорівнює різниці вхідної напруги і напруги стабілізації: $U_R = U_{вх} - U_C$.

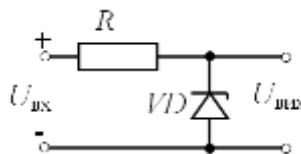


Рис. 2.6. Стабілізація напруги

Вхідна напруга може збільшуватися або зменшуватися, що обумовлює відповідне збільшення або зменшення струму через стабілітрон. Коли стабілітрон працює при напрузі стабілізації (в області пробією), при збільшенні вхідної напруги через нього може йти великий струм. Однак напруга на стабілітроні залишиться незмінною. Стабілітрон здійснює протидію збільшенню вхідної напруги, оскільки при збільшенні струму його питомий опір падає, що дозволяє вихідній напрузі на стабілітроні залишатися

постійною при змінах вхідної напруги. Зміна вхідної напруги проявляється тільки в зміні спаду напруги на послідовно включеному резисторі. Сума спадів напруги на цьому резисторі і стабілітроні дорівнює вхідній напрузі. Вихідна напруга знімається зі стабілітрона і може бути збільшена або зменшена шляхом заміни стабілітрона і включеного послідовно з ним резистора.

Основні параметри стабілітрона.

Номинальна напруга стабілізації $U_{\text{ст. ном}}$ – напруга на стабілітроні в робочому режимі (при заданому струмі стабілізації).

Мінімальний струм стабілізації $I_{\text{ст. min}}$ – найменше значення струму стабілізації, при якому режим пробою стійкий.

Максимально допустимий струм стабілізації $I_{\text{ст. max}}$ – найбільший струм стабілізації, при якому нагрів стабілітронів не виходить за допустимі межі.

Диференціальний опір $r_{\text{диф}}$ – відношення приросту напруги стабілізації до приросту струму стабілізації, що викликає його: $r_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{ст}} / \Delta I_{\text{ст}}$.

Температурний коефіцієнт напруги стабілізації – відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютної зміни температури навколишнього середовища:

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}} \Delta T}$$

2.3. Будова та принцип дії біполярних транзисторів.

Біполярним транзистором називають напівпровідниковий прилад, що має два *p-n* переходи і три виводи та здатний підсилювати потужність сигналу. Біполярні транзистори дозволяють підсилювати, генерувати та перетворювати електричні коливання в широкому діапазоні частот і потужностей. Відповідно до цього їх можна розділити на низькочастотні (до 3 МГц), середньочастотні (3-30 МГц), високочастотні (30-300 МГц), надвисокочастотні (більше 300 МГц). За потужністю їх можна розділити на малопотужні (не більше 0,3 Вт), середньої потужності (0,3-1,5 Вт) і великої потужності (більше 1,5 Вт).

Основним елементом біполярного транзистора є кристал напівпровідника (германію чи кремнію), у якому створено три області з різною провідністю. Дві крайні області завжди мають провідність однакового типу, що є протилежною провідності в середній області. Схематична будова площинного біполярного транзистора наведена на рис. 2.7. Внутрішня область монокристала транзистора, яка розташована між *p-n* переходами називається *базою*. Зовнішня область, яка призначена для інжектування носіїв у базу, називається *емітером*. Інша область яка втягує носії з бази (екстракція носіїв), називається *колектором*. Перехід між емітером і базою називається емітерним переходом, а перехід між базою і колектором – колекторним. Існує два типи біполярних транзисторів: *n-p-n* (рис. 2.7а) та *p-n-p* (рис. 2.7б).

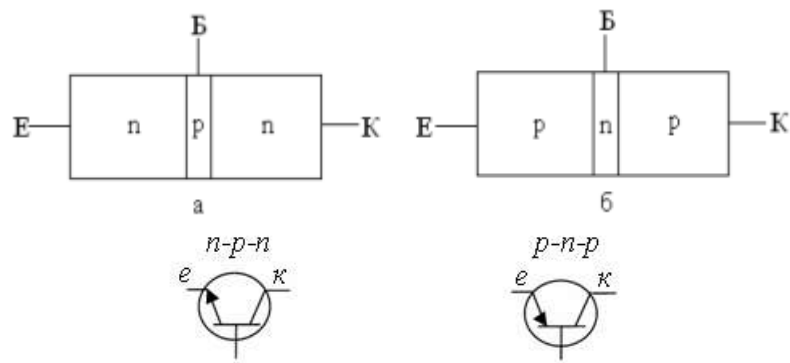


Рис. 2.7. Схематичне зображення біполярного транзистора: а – транзистор типу *n-p-n*, б – транзистор типу *p-n-p*

Залежно від того, який з виводів є спільним для вхідного і вихідного електричних кіл, розрізняють три схеми вмикання біполярного транзистора: з спільною базою (СБ), з спільним емітером (СЕ), з спільним колектором (СК) (рис. 2.8). При будь-якій схемі вмикання транзистора (при роботі в активному режимі) полярність включення джерел живлення повинна бути вибрана такою, щоб емітерний перехід був зміщений в прямому напрямку, а колекторний – в зворотному.

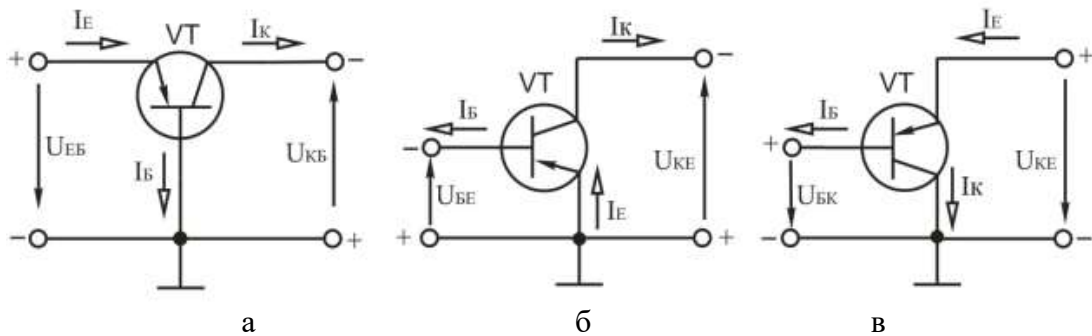


Рис. 2.8. Схеми вмикання біполярних транзисторів: а) СБ; б) СЕ; в) СК

Схему із спільною базою використовують для підсилення по напрузі, з спільним емітером – по струму і по напрузі, з спільним колектором (емітерний повторювач) – для підсилення по струму.

Вхідний опір $R_{\hat{a}\hat{o}}$ транзистора змінному струмові визначається виразом:

$$R_{\hat{a}\hat{o}} = \frac{\Delta U_{\hat{a}\hat{o}}}{\Delta I_{\hat{a}\hat{o}}},$$

де $\Delta U_{\hat{a}\hat{o}}$ – зміна вхідної напруги; $\Delta I_{\hat{a}\hat{o}}$ – зміна вхідного струму.

Коефіцієнт підсилення транзистора по струмові в схемі із спільною базою:

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\hat{E}}}{\Delta I_{\hat{A}}}$$

Коефіцієнт підсилення транзистора по струмові в схемі із спільним емітером:

$$\beta = \frac{\Delta I_{\hat{E}}}{\Delta I_{\hat{A}}}$$

де $\Delta I_{\hat{E}}$, $\Delta I_{\hat{A}}$, $\Delta I_{\hat{A}}$ – зміни струмів відповідно колектора, емітера і бази.

Оскільки

$$\Delta I_A = \Delta I_E - \Delta I_E = \Delta I_E - \alpha \Delta I_E = \Delta I_E (1 - \alpha),$$

тоді

$$\beta = \frac{\alpha \Delta I_E}{\Delta I_E (1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Потужність втрат на колекторі:

$$D_{\hat{E}} = U_{\hat{E}} I_{\hat{E}},$$

де $U_{\hat{E}}$ – напруга на колекторі; $I_{\hat{E}}$ – струм колектора.

До основних параметрів біполярних транзисторів відносять: U_{EK} – напругу між емітером і колектором, величина якої може призвести до пробією колекторного р-n-переходу; I_K – величину струму колектора, яка визначає нагрівання емітерного р-n-переходу; P_K – потужність розсіювання колекторного р-n-переходу, що впливає на його нагрівання. Тому, під час вибору транзисторів, ці розрахункові величини порівнюють з допустимими значеннями, поданими в паспортних даних для кожного з типів транзисторів:

$$U_{\hat{A}\hat{E}} \leq U_{\hat{A}\hat{E}.\hat{a}\hat{a}\hat{i}}; I_{\hat{E}} \leq I_{\hat{E}.\hat{a}\hat{a}\hat{i}}; P_{\hat{E}} \leq P_{\hat{E}..\hat{a}\hat{a}\hat{i}}.$$

До параметрів транзисторів відносять також граничну частоту $f_{гр}$, на якій передатний коефіцієнт за струмом h_{21E} дорівнює одиниці.

2.4. Статичні вольт-амперні характеристики біполярних транзисторів.

Для розрахунку електричних кіл, що містять транзистори, необхідно знати залежності між струмами і напругами на їх входах та виходах.

Ці залежності є *вольт-амперними характеристиками (ВАХ)* транзистора. Вони можуть бути *статичними* і *динамічними*. *Статичні* характеристики визначаються при постійних напругах на електродах і за відсутності опору навантаження. *Динамічні* – при змінних напругах і за наявності опору навантаження.

ВАХ містять інформацію про властивості транзистора у всіх режимах роботи при великих і малих сигналах, у тому числі про зв'язки між параметрами. З вольт-амперних характеристик можна визначити ряд параметрів, що не наводяться в довідковій літературі, а також розрахувати кола зміщення, стабілізації режиму, оцінити роботу транзистора в широкому діапазоні імпульсних і постійних струмів, потужностей і напруг. В основному використовуються два сімейства статичних вольт-амперних характеристик: вхідні та вихідні.

Вхідна статична характеристика – це залежність вхідного струму від вхідної напруги $I_{\hat{a}\hat{o}} = f(U_{\hat{a}\hat{o}})$, *вихідна* – залежність вихідного струму від вихідної напруги $I_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} = f(U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}})$.

Характеристики і параметри біполярного транзистора (БТ) як чотириполюсника розподіляються між системами залежно від того, які напруги і струми беруть за аргументи, а які за значення функції. Найбільш поширеними є три системи характеристик і параметрів: Y-, Z- та H- системи (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1.

Характеристики і параметри біполярного транзистора

Система	Y	Z	H
Аргумент	$U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВИХ}}$	$I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВИХ}}$	$I_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВИХ}}$
Функції	$I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВИХ}}$	$U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВИХ}}$	$U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВИХ}}$

Оскільки найбільше прикладне значення має H-система характеристик і параметрів (так звана гібридна система), то їй приділяється максимальна увага в інженерній практиці, в довідниках та іншій спеціальній літературі. Тому надалі розглядатимемо саме її.

Припустимо, що при вимірюваннях будуть задаватись вхідний струм та вихідна напруга і вимірюватись вхідна напруга та вихідний струм, після чого результуючі вольтамперні характеристики транзистора будуть записані у вигляді:

$$U_1 = f_1(I_1, U_2), \quad I_2 = f_2(I_1, U_2).$$

Повні диференціали вхідної напруги та вихідного струму запишуться в наступному вигляді:

$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2, \quad dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2.$$

Відповідні диференційні прирости будемо розглядати як сигнали, а похідні – як деякі коефіцієнти. Перейшовши до запису малих сигналів, останнє рівняння перетворимо до виду:

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2, \quad i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2.$$

Задаючи змінні сигнали струму у вхідне та напруги у вихідне кола, можна виконати вимірювання відповідних значень напруг у вхідному колі та струмів у вихідному, на основі яких можна розрахувати малосигнальні h -параметри транзистора, які будуть як безрозмірними, так і з розмірністю провідності та опору.

Для визначення h -параметрів необхідно створити режим короткого замикання у вихідному ланцюзі і режим холостого ходу у вхідному. Таким чином, h -параметри виражаються через струми і напруги в такий спосіб:

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{– вхідний опір транзистора при короткому замиканні}$$

вихідного кола;

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{– коефіцієнт зворотного зв'язку транзистора за напругою}$$

при холостому ході у вхідному колі;

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{– коефіцієнт передачі струму при короткому замиканні}$$

вихідного кола;

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{– вихідна провідність транзистора при холостому ході у}$$

вхідному колі.

Вхідні й вихідні ВАХ транзистора ввімкненого з спільним емітером, наведені на рис. 2.9. На рис. 2.9а, крива 1 відповідає напрузі $U_{ке1}=0$, а $U_{ке2}$ та $U_{ке3}$ напругам більшим нуля.

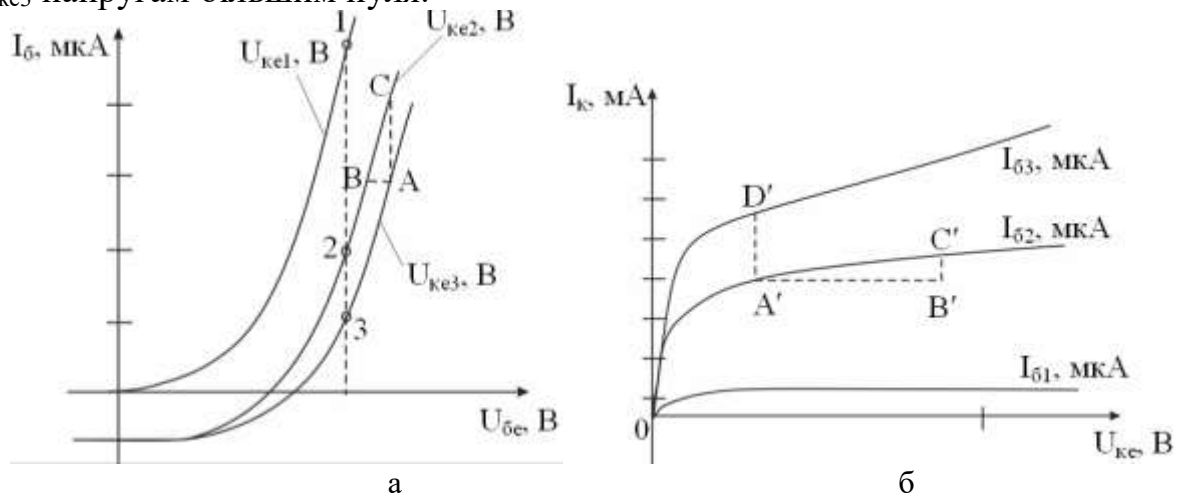


Рис. 2.9. ВАХ транзистора в схемі СЕ: а) вхідні; б) вихідні

Розглянемо визначення h -параметрів для транзистора в схемі СЕ. Для цього в робочій точці А на вхідних характеристиках будують трикутник АВС (із А проводять прямі, паралельні осі абсцис і осі ординат до перетину з другою характеристикою в точках В і С, а на вихідних характеристиках – трикутник А'В'С').

Із трикутника АВС отримують усі необхідні величини для визначення h_{11e} , h_{12e} :

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{\hat{a}\hat{a}}}{\Delta I_{\hat{a}}} = \frac{\hat{A}\hat{A}}{\hat{A}\hat{N}}; \quad h_{12e} = \frac{\Delta U_{\hat{a}\hat{a}}}{\Delta U_{\hat{e}\hat{a}}} = \frac{\hat{A}\hat{A}}{U_{\hat{e}\hat{a}3} - U_{\hat{e}\hat{a}2}}.$$

У робочій точці А' вихідної ВАХ визначають параметри h_{21e} і h_{22e} :

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_{\hat{e}}}{\Delta I_{\hat{a}}} = \frac{\hat{A}'\hat{D}'}{I_{\hat{a}3} - I_{\hat{a}2}}; \quad h_{22e} = \frac{\Delta I_{\hat{e}}}{\Delta U_{\hat{e}}} = \frac{\hat{B}'\hat{C}'}{\hat{A}'\hat{B}'}$$

Приклади розв'язання задач.

Задача 1. Вибрати тип діода для електротехнічного пристрою, щоб забезпечити струм у навантаженні $I = 0,27$ А. Напруга, що пригадається до діода у закритому стані $U = 40$ В.

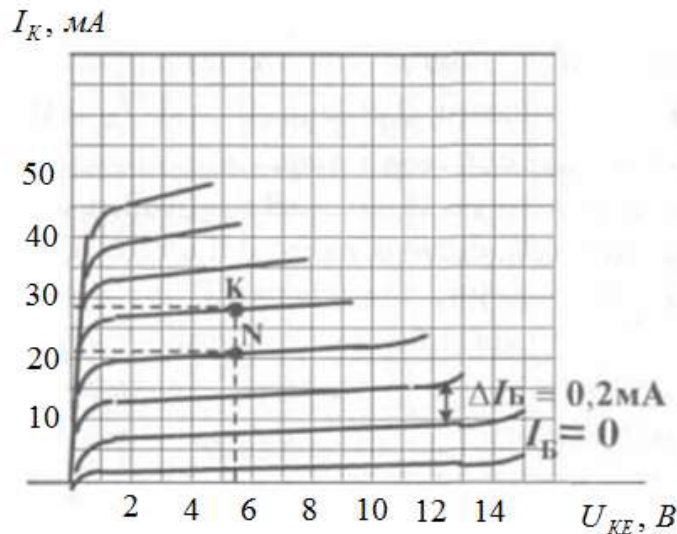
Розв'язок. Основними параметрами, за якими вибирають діод є $I_{пр.доп}$ та $U_{зв.доп}$, тому для вибору типу діода (додаток 1) необхідно, щоб допустимий прямий струм діода був більший за струм навантаження $I_{пр.доп} \geq I$ допустима зворотна напруга перевищувала напругу, прикладену до діода у закритому стані $U_{зв.доп} \geq U$. Як видно, таким умовам задовольняє діод типу Д7А, $I_{пр.доп} = 0,3$ А; $U_{зв.доп} = 50$ В.

Задача 2. Визначити струм бази біполярного транзистора КТ501Г, увімкненого за схемою із спільним емітером, якщо у відкритому стані струм колектора 240 мА.

Розв'язок. В паспортних даних транзистора КТ501Г (додаток 2) задано статичний передатний коефіцієнт за струмом транзистора, увімкненого із спільним емітером $h_{21E}=20\div 60$ (приймаємо $h_{21E}=40$) На підставі залежності струмів бази та колектора обчислюємо струм бази за виразом

$$I_B = \frac{I_K}{h_{21E}} = \frac{240}{40} = 6 \text{ мА}$$

Задача 3. За вихідними характеристиками біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером, визначити коефіцієнт підсилення за струмом для $U_{KE}=5,5 \text{ В}$, $I_B=0,7 \text{ мА}$.



Розв'язок. На вихідній характеристиці проводимо вертикальну лінію, що відповідає напрузі $U_{KE}=5,5 \text{ В}$ і знаходимо точки перетину К і N з вихідними характеристиками для $I_{B1}=0,6 \text{ мА}$, $I_{B2}=0,8 \text{ мА}$. Далі знаходимо значення струму колектора в цих точках: $I_{K(K)}= 32\text{мА}$, $I_{K(N)}=21 \text{ мА}$ і визначаємо зміну струму колектора:

$$\Delta I_K = I_{K(K)} - I_{K(N)} = 11 \text{ мА}$$

Оскільки вихідні характеристики транзистора побудовані для струмів бази з кроком 0,2 мА, то зміна струму бази $\Delta I_B=0,2 \text{ мА}$. Визначаємо коефіцієнт підсилення транзистора за струмом:

$$K_i = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=5,5} = 55$$

Задачі для самостійного розв'язання

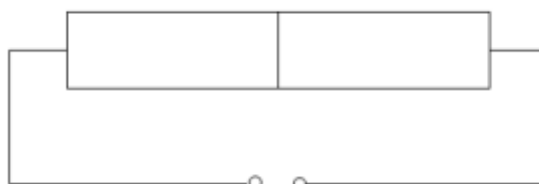


Рисунок до задач 1-8

1. На рисунку схематично зображено р-п перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному р-п переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразіть на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений р-п перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразіть вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню р-п переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – основні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «-»; напрямок переміщення – справа наліво.

2. На рисунку схематично зображено р-п перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному р-п переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразіть на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений р-п перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразіть вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню р-п переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – основні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «+»; напрямок переміщення – зліва направо.

3. На рисунку схематично зображено р-п перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному р-п переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразіть на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений р-п перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразіть вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню р-п переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – неосновні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «-»; напрямок переміщення – справа наліво.

4. На рисунку схематично зображено р-п перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному р-п переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразіть на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений p - n перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразіть вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню p - n переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – основні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «-»; напрямок переміщення – зліва направо.

5. На рисунку схематично зображено p - n перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному p - n переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразіть на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений p - n перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразіть вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню p - n переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – неосновні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «+»; напрямок переміщення – зліва направо.

6. На рисунку схематично зображено p - n перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному p - n переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразіть на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений p - n перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразіть вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню p - n переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – основні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «+»; напрямок переміщення – справа наліво.

7. На рисунку схематично зображено p - n перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному p - n переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразіть на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений p - n перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразить вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню р-п переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – неосновні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «→»; напрямок переміщення – зліва направо.

8. На рисунку схематично зображено р-п перехід з підключеним до нього джерела живлення.

а) нанесіть на зображеному р-п переході задані носії заряду з позначенням напрямку їх переміщення;

б) зобразить на рисунку тип провідностей обох областей (p або n) і полярність джерела живлення, що відповідає заданому переміщенню носіїв заряду;

в) позначте, в якому напрямку включений р-п перехід (в прямому чи зворотному);

г) зобразить вольт-амперну характеристику, що відповідає такому включенню р-п переходу.

Дані до задачі: тип носіїв заряду – неосновні; знак зарядів носіїв, які переміщуються – «→»; напрямок переміщення – зліва направо.

9. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм $I_{np} = 10\text{A}$; а напруга, що прикладається до діода $U_{ze} = 160\text{V}$.

10. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм $I_{np} = 12\text{A}$; а напруга, що прикладається до діода $U_{ze} = 80\text{V}$.

11. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм $I_{np} = 45\text{mA}$; а напруга, що прикладається до діода $U_{ze} = 45\text{V}$.

12. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм $I_{np} = 650\text{mA}$; а напруга, що прикладається до діода $U_{ze} = 90\text{V}$.

13. В схемі, транзистор КТ807А увімкнено із спільним емітером. Струм бази транзистора дорівнює 10mA . Визначити вихідний струм транзистора, якщо $h_{21E} = 30$.

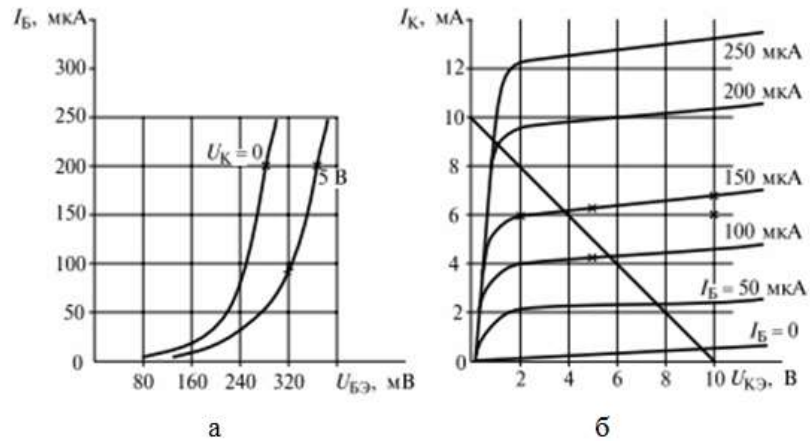
14. Вибрати тип тиристора для електротехнічного пристрою, якщо у відкритому стані через нього проходить струм $I_{np} = 15\text{A}$, а зворотна напруга $U_{ze} = 220\text{V}$.

15. Визначити струм бази біполярного транзистора КТ815А, увімкненого за схемою зі спільним емітером, якщо у відкритому стані струм колектора $1,2\text{A}$, передатний коефіцієнт за струмом 50 .

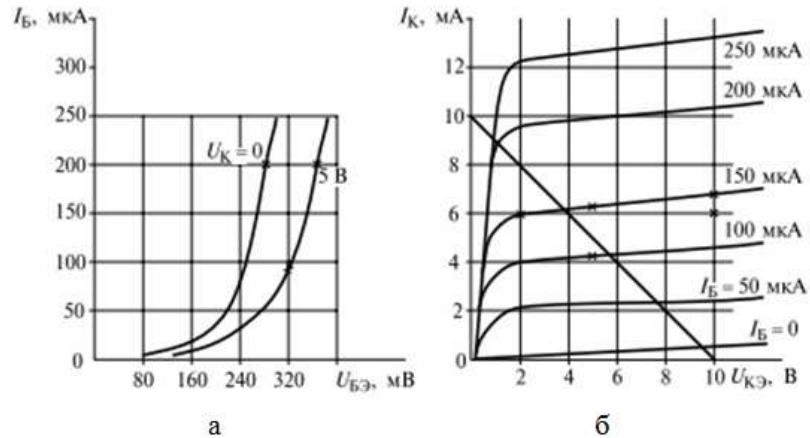
16. Біполярний транзистор, увімкнений за схемою зі спільною базою рівний $0,96$. Обчислити коефіцієнт підсилення за струмом цього ж транзистора, якщо його увімкнути за схемою зі спільним емітером.

17. Біполярний транзистор, який увімкнений за схемою зі спільним емітером рівний 49 . Яке значення матиме коефіцієнт підсилення за струмом цього ж транзистора, якщо його увімкнути за схемою зі спільною базою?

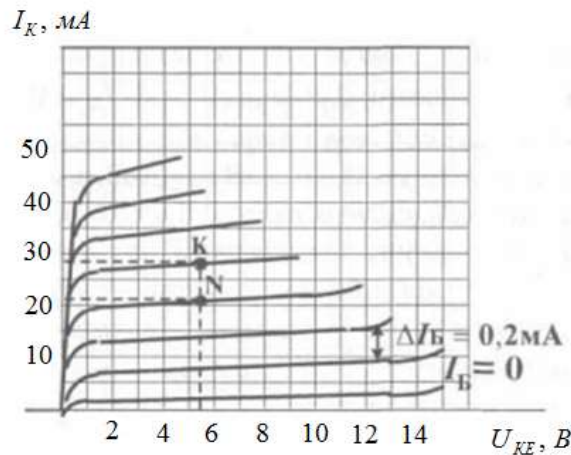
18. Визначити h -параметри транзистора ГТ322Б по його вхідній (а) і вихідній (б) характеристиках, що відповідають схемі із спільним емітером для $U_K=5$ В, $I_B=150$ мкА.



19. Визначити h -параметри транзистора ГТ322Б по його вхідній (а) і вихідній (б) характеристиках, що відповідають схемі із спільним емітером для $U_K=0$ В, $I_B=100$ мкА.



20. За вихідними характеристиками біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером, визначити коефіцієнт підсилення за струмом для $U_{KE}=6$ В, $I_B=0,9$ мА.



ТЕМА 3. АНАЛОГОВІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ. ЕЛЕКТРИЧНІ ФІЛЬТРИ

3.1. Випрямлячі.

Випрямляч – це пристрій, який призначений для перетворення енергії джерела змінного струму в постійний струм. Необхідність в подібному перетворенні виникає, коли живлення споживача здійснюється постійним струмом, а джерелом електричної енергії є джерело змінного струму, наприклад промислова мережа частотою 50 Гц.

Випрямлячі підрозділяють на *некеровані* та *керовані*. За допомогою некерованих випрямлячів отримують випрямлену напругу незмінної величини. При необхідності змінювати (регулювати) величину випрямленої напруги або струму застосовують керовані випрямлячі.

За числом фаз випрямленої напруги змінного струму випрямлячі підрозділяють на *однофазні*, *трифазні* та *багатофазні*.

За величиною потужності випрямлячі підрозділяють на випрямлячі *малої*, *середньої* та *великої потужності*. Випрямлячі малої потужності є, зазвичай, однофазними; випрямлячі середньої та великої потужності – трифазними.

Однофазні випрямлячі діляться на:

- *однопівперіодні*, в яких струм через вентиль (випрямний діод) проходить лише протягом одного півперіоду змінної напруги в мережі;
- *двопівперіодні*, в яких струм проходить через вентиль протягом обох півперіодів;
- *схеми з множенням напруги*.

Для випрямлення трифазного струму застосовують *трифазні випрямлячі*, які зазвичай розраховані на отримання відносно великої потужності (десятки кіловат). Ці випрямлячі підключаються до мережі за допомогою трифазних трансформаторів, вторинні обмотки яких мають три або шість фаз.

Випрямлячі характеризуються наступними параметрами:

- 1) середнє значення випрямленої напруги U_0 , В;
- 2) середнє значення випрямленого струму I_0 , А;
- 3) потужність у колі випрямленої напруги $P_0=U_0I_0$, Вт;
- 4) коефіцієнт пульсацій k_{γ} , що дорівнює відношенню амплітуди 1-ї гармоніки U_{m1} пульсацій на навантаженні до напруги U_0 ,

$$k_{\gamma} = \frac{U_{m1}}{U_0};$$

- 5) діюче і амплітудне значення струму випрямлення I, I_m , А;
- 6) максимальна зворотна напруга на діодах $U_{зв.мах}$;
- 7) коефіцієнт використання трансформатора

$$k = \frac{P_0}{S_{\text{об}}},$$

де $S_{\text{дв}} = \frac{S_1 + S_2}{2}$ – габаритна потужність трансформатора, S_1, S_2 – відповідно повні потужності первинної та вторинної обмоток.
Коефіцієнт згладжування:

$$q = \frac{k_{\text{вв}}}{k_{\text{вв}}},$$

де $k_{\text{вв}}, k_{\text{вв}}$ – коефіцієнти пульсацій на вході і виході згладжувального фільтра.

Схема однопівперіодного випрямляча з активним навантаженням представлена на рис. 3.1.

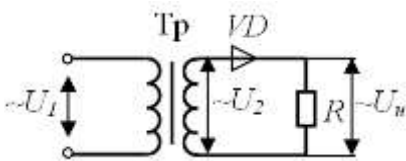


Рис. 3.1. Схема однофазного однопівперіодного випрямляча

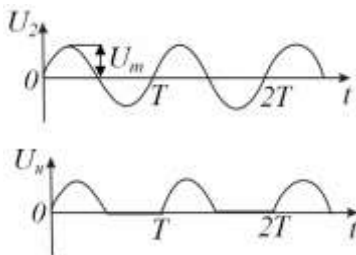


Рис. 3.2. Форма напруг на вході ($U_2(t)$) та на виході ($U_n(t)$) однофазного однопівперіодного випрямляча

Однофазний однопівперіодний випрямляч пропускає на вихід тільки одну півхвилю вхідної напруги (рис. 3.2). Період сигналу на виході однопівперіодного випрямляча рівний періоду вхідного сигналу.

Робота однопівперіодної схеми випрямляча визначається властивостями напівпровідникового діода. Коли на вторинній обмотці трансформатора додатна півсинусоїда напруги, додатний потенціал прикладено до анода діода й він переходить у відкритий стан, тоді струм проходить через діод та навантаження і це триває до моменту, коли синусоїда напруги вторинної обмотки трансформатора змінює знак на протилежний, тобто половину періоду змінної напруги. Від'ємний потенціал на аноді діода приводить до його закриття, відповідно струм через діод і навантаження не проходить. Таким чином, струм в навантаженні R має пульсуючий характер, тобто

з'являється лише в один з півперіодів напруги U_2 . Коефіцієнт пульсації такого випрямляча дорівнює – $K_{\text{П}}=1,7$.

Умови для вибору діода за струмом та за напругою:

$$I_{\text{дв}} \geq I_{\text{н}}, \quad U_{\text{обр}} \geq U_{\text{д}}$$

де $I_{\text{дв}}$ – допустимий струм діода, А; $I_{\text{н}}$ – струм споживача, А; $U_{\text{обр}}$ – зворотна допустима напруга діода, В; $U_{\text{д}}$ – напруга, що діє на діод в непровідний період, В.

Стала складова випрямленої напруги на резисторі навантаження R_n визначається за законом Ома:

$$U_0 = I_0 R_f,$$

де U_0 і I_0 – величина пульсації випрямленої напруги та струму.

При цьому:

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2.$$

Коефіцієнт трансформації силового трансформатора:

$$n = \frac{U_2}{U_1},$$

де U_1 – напруга мережі.

Найбільша зворотна напруга, прикладена до клем:

$$U_{\text{за}} = U_{2m} = U_0 \cdot \pi = 3,14U_0.$$

Двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом складається з трансформатора Тр, діодів VD1, VD2 та резистора навантаження R . При прикладенні півхвилі напруги U_1 позитивної полярності на вторинних обмотках трансформатора діють напруги U_{2-1} та U_{2-2} з полярністю відносно нульової точки, показаної на рисунку 3.3а без дужок (інтервал $0 - T/2$ на рисунку 3.3б). До анода діода VD1 відносно нульової точки прикладається напруга позитивної полярності, а до анода діода VD2 – негативної.

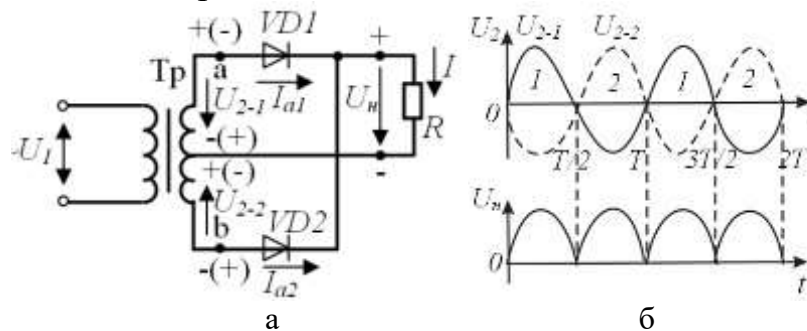


Рис. 3.3. Однофазний двоівперіодний випрямляч з нульовим виводом: а – схема, б – часові діаграми

При вказаній полярності напруги на анодах діод VD1 на інтервалі $0-T/2$ відкритий, а діод VD2 закритий. Практично вся напруга U_{2-1} прикладається до навантаження R (оскільки падіння напруги на діоді у відкритому стані мале), створюючи на ньому напругу U_n . На даному інтервалі анодний струм діода дорівнює струму навантаження

$$I_{a1} = I = \frac{U_{2-1}}{R}.$$

При прикладенні напруги U_1 негативної полярності полярність напруги на вторинних обмотках стає зворотною (інтервал $T/2-T$). У провідному стані знаходиться діод VD2, а діод VD1 закритий. До навантаження R прикладається напруга U_{2-2} , що визначає напругу U_n тієї ж полярності, що і на попередньому інтервалі. Тепер струми в схемі визначаються півхвилею напруги позитивної полярності U_{2-2} :

$$I_{a2} = I = \frac{U_{2-2}}{R}.$$

У подальшому процесі в схемі повторюються.

Випрямлений струм на резисторі навантаження R_n :

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_{2m} = 0,636 I_{2m} = 0,9 I_2.$$

Випрямлена напруга на резисторі навантаження R_n :

$$U_0 = \frac{2}{\pi} U_{2m} = 0,636 U_{2m} = 0,9 U_2.$$

Зворотна напруга, прикладена до діода в мостовій схемі:

$$U_{\zeta\hat{a}} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2.$$

Зворотна напруга, прикладена до діода в схемі двопівперіодного випрямляча з середньою точкою:

$$U_{\zeta\hat{a}} = 2U_{2m}.$$

Середнє значення струму, що проходить через кожний діод:

$$I_{\bar{n}\hat{a}\delta} = 0,5I_0.$$

Струм у вторинній обмотці трансформатора:

$$I_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi I_0}{2\sqrt{2}} = 1,11I_0.$$

Найбільш розповсюджений *містковий випрямляч* (рис. 3.4), в якому випрямні діоди *VD1-VD4* ввімкнені за містковою схемою. При цьому навантажувальний резистор R_f підключений до однієї діагоналі містка, а вторинна обмотка трансформатора – до іншої.

Протягом першого півперіоду напруги U_2 , коли точка *a* вторинної обмотки трансформатора має додатний потенціал по відношенню до потенціалу точки *b*, діоди *VD1, VD3* відкриті, і в навантаженні виникає струм. В цей час діоди *VD2, VD4* закриті. В інший півперіод напруги U_2 потенціал точки *a* більш від'ємний, ніж потенціал точки *b*, діоди *VD2, VD4* відкриті, а діоди *VD1, VD3* закриті. При цьому в навантаженні струм має той же напрям, що і в перший півперіод напруги U_2 .

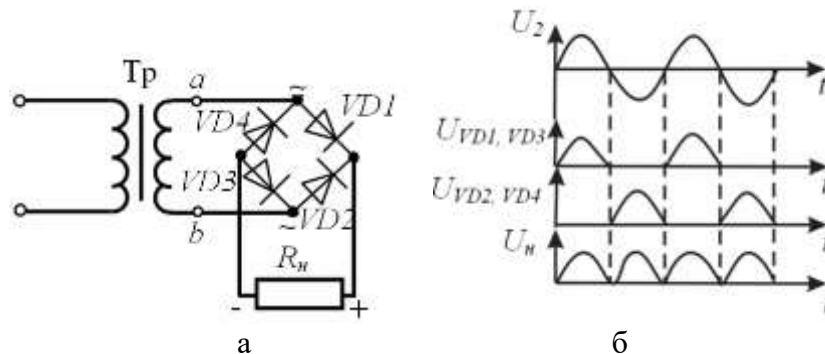


Рис. 3.4. Схема місткового випрямляча (а) та його часова діаграма (б)

Коефіцієнт пульсації за діючим значенням – $K_{\Pi} = 0,48$. Умови для вибору діодів за струмом та за напругою:

$$I_{\bar{n}\hat{a}\delta} \geq \frac{1}{2} I_{\text{доп.д}}, \quad U_{\zeta\hat{a}\delta} \geq U_{\text{зв.доп.}}$$

де $I_{\text{доп.д}}$ – допустимий струм діода, А; $I_{\text{сп.}}$ – струм споживача, А; $U_{\text{зв.доп.}}$ – зворотна допустима напруга діода, В; $U_{\text{с}}$ – напруга, що діє на діод в неспіввіднесеному періоді, В.

Задача. У схемі однопівперіодного випрямляча через діод проходить випрямлений струм $I_0=75$ мА. Визначити опір резистора навантаження R_n , якщо амплітуда напруги вторинної обмотки трансформатора $U_{2m}=200$ В.

Розв'язок. Знайдемо випрямлену напругу однопівперіодного випрямляча:

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi},$$

де U_{2m} – амплітуда напруги вторинної обмотки трансформатора.

Знайдемо опір навантаження:

$$R_n = \frac{U_0}{I_0} = \frac{\frac{U_{2m}}{\pi}}{I_0} = \frac{U_{2m}}{\pi I_0} = \frac{200}{3,14 \cdot 75 \cdot 10^{-3}} = 850 \text{ Ом}$$

Відповідь: $R_n = 850 \text{ Ом}$.

3.2. Підсилювачі електричних сигналів.

Підсилювач електричних сигналів – це електронний пристрій, призначений для збільшення потужності, напруги або струму сигналу, підведеного до його входу, без істотного спотворення його форми. Оскільки потужність сигналу на виході підсилювача більша, ніж на вході, то за законом збереження енергії підсилювальний пристрій повинен включати джерело живлення. Тоді узагальнену структурну схему підсилювального пристрою можна зобразити, як показано на рис. 3.5.

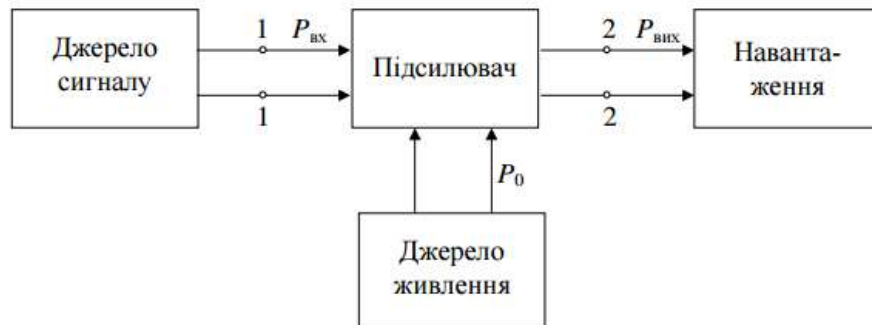


Рис. 3.5. Узагальнена структурна схема підсилювача.

Від джерела живлення підсилювач відбирає потужність P_0 , необхідну для підсилення вхідного сигналу. Джерело сигналу забезпечує потужність на вході підсилювача $P_{вх}$, вихідна потужність $P_{вих}$ виділяється на активній частині навантаження. У підсилювачі для потужностей виконується нерівність: $P_{вх} < P_{вих} < P_0$. Отже, *підсилювач* – це керований вхідним сигналом перетворювач енергії джерела живлення в енергію вихідного сигналу. Перетворення енергії здійснюється за допомогою підсилювальних елементів (ПЕ): біполярних транзисторів, польових транзисторів, електронних ламп, інтегральних мікросхем (ІМС), варикапів та інших.

Якщо джерело живлення включити в підсилювач, то для сигналу відносно двох пар вхідних і вихідних клем підсилювач можна розглядати як нелінійний активний чотирьополісник (рис. 3.6). Вхідні клеми призначені для



Рис. 3.6. Підсилювач електричних сигналів як чотириполюсник

подачі вхідного сигналу, який необхідно підсилити. До вихідних клем підсилювача під'єднують опір навантаження R_n . На вході підсилювача діє вхідна напруга $U_{вх}$ та вхідний струм $I_{вх}$, вихідна напруга $U_{вих}$ знімається з опору навантаження R_n , через який протікає вихідний струм $I_{вих}$.

Основні параметри підсилювачів.

1. *Коефіцієнт підсилення напруги k_U* – відношення напруги вихідного сигналу до напруги вхідного сигналу:

$$k_U = \frac{U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{U_{\hat{a}\hat{o}}}$$

2. *Коефіцієнт підсилення струму k_I* – відношення вихідного струму до вхідного:

$$k_I = \frac{I_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{I_{\hat{a}\hat{o}}}$$

3. *Коефіцієнт підсилення потужності k_P* – відношення потужності вихідного сигналу до потужності вхідного:

$$k_P = \frac{P_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{P_{\hat{a}\hat{o}}} = \frac{U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} I_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{U_{\hat{a}\hat{o}} I_{\hat{a}\hat{o}}} = k_U k_I$$

4. *Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ)* – залежність коефіцієнта підсилення від частоти сигналу (рис. 3.7).

5. *Діапазон підсилюваних частот Δf* – діапазон частот, в межах якого нерівномірність АЧХ Δk не перевищує заданої величини:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$$

6. *Вхідний опір* – опір входу підсилювача для змінного струму.

7. *Вихідний опір* – опір виходу підсилювача для змінного струму.

8. *Амплітудна характеристика підсилювача* – залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного:

$$U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} = k_U U_{\hat{a}\hat{o}}$$

Тому амплітудна характеристика ідеального підсилювача має вид прямої лінії з нахилом, що рівний коефіцієнту підсилення.

Коефіцієнт підсилення напруги k_U та коефіцієнт підсилення потужності k_P часто виражають в спеціальних логарифмічних одиницях – децибелах:

$$k_P (\text{дБ}) = 10 \lg \frac{P_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{P_{\hat{a}\hat{o}}}$$

Враховуючи, що $P \sim U^2$, для k_U отримуємо:

$$k_U (\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{U_{\hat{a}\hat{o}}}$$

3.3. Електричні фільтри.

Однією з поширених операцій, що виконуються в радіоелектричних колах, є виділення певного сигналу або частини його спектра з сукупності інших сигналів та завад. Для цього використовують електричні фільтри. Виділення електричних сигналів можна здійснювати за одним з їхніх параметрів: частотою, амплітудою або тривалістю. Відповідно фільтри можуть бути частотними, амплітудними або часовими. Амплітудні та часові електричні фільтри застосовуються для виділення імпульсних і цифрових сигналів.

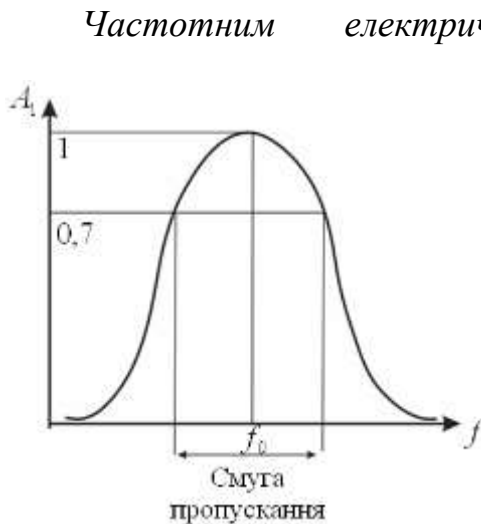


Рис. 3.7. Амплітудно-частотна характеристика фільтра

Частотним електричним фільтром називають вибірний чотиріполюсник, що передає сигнал з найменшим ослабленням у заданій частині спектра частот, яка називається смугою пропускання (прозорості), й максимальним ослабленням за межами цієї смуги. На практиці смугою пропускання вважають діапазон, у якому амплітуда сигналу відрізняється не більше ніж в $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7$ раз від максимальної (рис. 3.7). Частота, що розділяє смугу прозорості та непрозорості фільтра, називається його граничною частотою, або частотою зрізу (частота, на якій U_2 зменшується в порівнянні з U_1 в $\sqrt{2}$ рази).

За типом застосовуваної елементної бази розрізняють *пасивні та активні фільтри*. Пасивні фільтри реалізуються на основі пасивних елементів – резисторів, конденсаторів і котушок індуктивності. Такі фільтри прості в реалізації, не вимагають джерел живлення елементів фільтрів, реалізуються в широкому діапазоні частот (від інфразвукових частот до ультракороткохвильового діапазону радіочастот), володіють великим динамічним діапазоном.

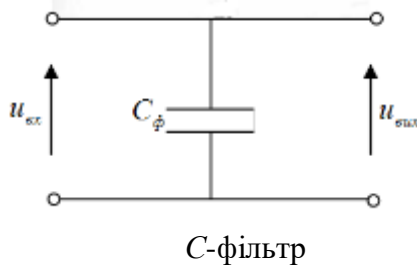
В активних фільтрах присутній один або декілька активних компонентів (транзистор або операційний підсилювач). Активні фільтри здатні підсилювати сигнали, що проходять через них по потужності за рахунок енергії зовнішнього джерела.

Форма напруги на виході випрамлячів не є достатньо гладкою й характеризується пульсаціями, зумовленими наявністю у випрямленій напрузі вищих гармонік. Їх вплив (кількісна характеристика) визначається коефіцієнтом пульсацій K_n . Сучасні пристрої електроніки вимагають такий рівень пульсацій випрямленої напруги, який характеризується $K_n = 10^{-2} \div 10^{-4}$. Тому, для зниження рівня пульсацій, використовують згладжувальні фільтри.

Основною характеристикою згладжувальних фільтрів є коефіцієнт згладжування q , який рівний:

$$q = \frac{\hat{E}_{i.\hat{a}\hat{o}}}{\hat{E}_{i.\hat{a}\hat{e}\hat{o}}},$$

де $\hat{E}_{i.\hat{a}\hat{o}}$ – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги на вході; $\hat{E}_{i.\hat{a}\hat{e}\hat{o}}$ – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги на виході.



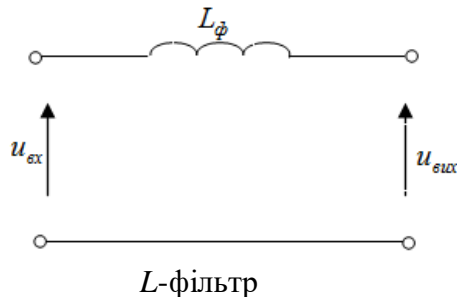
Робота фільтра типу «C» базується на властивості ємності нагромаджувати електричну енергію та явищі заряду-розряду конденсатора. Конденсатор заряджається тоді, коли вхідна напруга $u_{вх}$ більша, ніж напруга на конденсаторі $u_{вих}$ і розряджається через опір навантаження за умови $u_{вх} < u_{вих}$. Фільтр типу «C» застосовують у схемах випрямлячів з потужністю навантаження

<300 Вт. Коефіцієнт пульсацій $\hat{E}_{i.\hat{a}\hat{e}\hat{o}}$ випрямленої напруги на виході такого фільтра рівний:

$$\hat{E}_{i.\hat{a}\hat{e}\hat{o}} = \frac{1}{2\pi f R_i \tilde{N}_\delta},$$

де f – частота основної гармоніки випрямленої напруги; R_i – опір навантаження; \tilde{N}_δ – ємність фільтра.

Для споживачів потужністю, більшою ніж 300 Вт, застосовують фільтр типу «L».



Послідовне з'єднання елементів L_ϕ і R_n зумовлює відставання за фазою струму відносно напруги $u_{вх}$. Індуктивність нагромаджує магнетну енергію, що веде до збільшення тривалості проходження струму порівняно з тривалістю додатної напруги на діоді. Внаслідок цього зменшуються пульсації

випрямленої напруги на навантаженні, а коефіцієнт згладжування у цьому випадку визначається за виразом:

$$q = \frac{2\pi f L_\delta}{R_i},$$

де L_δ – індуктивність фільтра.

За своєю структурною схемою фільтри поділяються на *фільтри Г-, Т- і П-структур*. Найпростішим фільтром є Г-подібний (рис. 3.8). Модель фільтра при цьому складається з двох схемних елементів Z_1 і Z_2 . Параметр Z позначає опір схемного елемента фільтра сигнальним струмом.

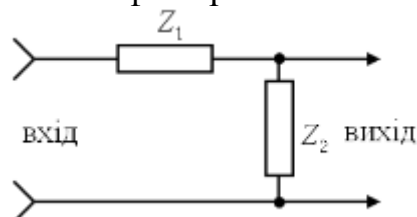


Рис. 3.8. Модель Г-подібного фільтра

Якщо Z_1 і Z_2 є просто активними опорами, то одержимо звичайний дільник напруги з нелінійною АЧХ. За допомогою дільника напруги ми можемо знизити вхідну напругу до необхідного нам рівня.

Якщо Z_1 замінити на L_ϕ , а Z_2 на \tilde{N}_δ , то одержимо Γ -подібний LC -фільтр. Такі фільтри використовують, коли опір навантаження дорівнює десяткам або сотням Ом. Їх принцип роботи базується на одночасному використанні згладжувальних властивостей ємності та індуктивності.

У разі вибору параметрів LC -фільтра рекомендується використовувати такі співвідношення:

$$2\pi fL = (5 \div 10)R_i, \quad \frac{1}{2\pi f\tilde{N}} = (0,1 \div 0,2)R_i.$$

Для ефективнішого згладжування використовуються Π -подібні фільтри (рис. 3.9), які називають багатоланковими.

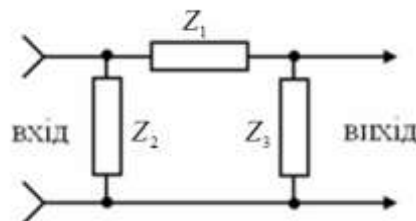


Рис. 3.9. Модель Π -подібного фільтра

Якщо Z_1 замінити на L_δ , Z_2 на $\tilde{N}_{\delta 1}$, а Z_3 на $\tilde{N}_{\delta 2}$, то одержимо ємнісний ($\tilde{N}_{\delta 1}$) і Γ -подібний ($L_\delta C_{\delta 2}$), а коефіцієнт згладжування визначається:

$$q = q_c q_a.$$

Для інженерних розрахунків користуються такою рекомендацією: якщо $R_H \geq 1 \text{ кОм}$, то використовують Π -подібний фільтр типу CRC (замість ланки Z_1 використовується R_ϕ), а якщо менше, то – фільтр типу CLC .

Для малопотужних випрямлячів використовують RC -фільтри. Коефіцієнт згладжування такого фільтра рівний:

$$q = (0,5 \div 0,9)2\pi fR_\delta \tilde{N}_\delta,$$

а опір фільтра R_δ вибирають за умовою:

$$\frac{R_i}{R_i + R_\delta} = (0,5 \div 0,9).$$

Задача. Розрахувати Γ -подібний фільтр нижньої частоти з частотою зрізу 2 кГц. Вихідні дані: загальний опір дільника напруги – $R_{заг} = 5 \text{ кОм}$, частота зрізу фільтра – 2 кГц. Вхідну напругу приймаємо за 1, а вихідну за 0,7.

Розв'язок.

1. Так як ми підключили конденсатор замість резистор R_2 , то реактивний опір конденсатора $X_C = R_2$.

2. Визначаємо за формулою дільника напруги опір R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{вих} R_{заг}}{U_{вх}} = \frac{0,7 \cdot 5000}{1} = 3500 \text{ Ом} = 3,5 \text{ кОм}.$$

3. Визначаємо опір резистора R_1 :

$$R_1 = R_{заг} - R_2 = 5 - 3,5 = 1,5 \text{ кОм}.$$

4. Перевіряємо значення вихідної напруги на виході фільтра при розрахованих опорах:

$$U_{вих} = \frac{U_{вх} R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{1 \cdot 3500}{(1500 + 3500)} = 0,7 \text{ U}_{вих} = U_{вх} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 1 \cdot 3500 / (1500 + 3500) = 0,7.$$

5. Визначаємо ємність конденсатора, яку виводимо з формули:

$$C = \frac{1}{2\pi \nu R_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2000 \cdot 3500} = 0,023 \text{ мкФ}.$$

6. Перевіряємо частоту зрізу f_c згідно формули (11.2.1):

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3500 \cdot 0,000000023} = 1978 \text{ Гц}.$$

Таким чином ми визначили, що для побудови фільтра нижньої частоти із заданими параметрами ($R_{заг} = 5 \text{ кОм}$, $f_c = 2 \text{ кГц}$) необхідно застосувати опір $R_1 = 1,5 \text{ кОм}$ і конденсатор ємністю $C = 0,023 \text{ мкФ}$.

Задача. Розрахувати ємність LC -фільтра, якщо відомо коефіцієнт пульсацій на вході випростувача $K_{н.вх} = 0,057$, частоту струму джерела живлення $f = 50 \text{ Гц}$; індуктивність фільтра $L_\phi = 75 \text{ мГн}$; коефіцієнт пульсацій на навантаженні $K_{н.вих} = 0,002$. Випрамляч зібрано за трифазною мостовою схемою.

Розв'язок. Обчислюємо коефіцієнт згладжування

$$q = \frac{K_{н.вх}}{K_{н.вих}} = \frac{0,057}{0,02} = 28,5$$

Ємність фільтра C_ϕ визначаємо з рівняння фільтра:

$$q = (4\pi f)^2 L_\phi C_\phi - 1$$

Звідси:

$$C_\phi = \frac{q+1}{(4\pi f)^2 L_\phi} = \frac{28,5+1}{(4 \cdot 3,14 \cdot 50)^2 \cdot 0,075} = 1000 \text{ мкФ}$$

Вибираємо два конденсатори ємністю 500 мкФ кожний, увімкнені паралельно.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Для схеми однопівперіодного випрамляча (рис. 3.1), зображеного на рисунку, визначити випрямлену напругу U_0 , якщо амплітуда напруги первинної обмотки трансформатора $U_{1m} = 220 \text{ В}$, коефіцієнт трансформації $n = 1,43$.

2. Для схеми однопівперіодного випрямляча (рис. 3.1) визначити напругу на навантаженні, якщо на вторинній обмотці трансформатора $U_{2m}=250$ В.

3. Амплітуда напруги вторинної обмотки трансформатора двопівперіодної схеми випрямляча (рис. 3.3) $U_{2m}=210$ В. Визначити випрямлений струм, що проходить через кожний діод I_0 , якщо опір резистора навантаження $R_H=510$ Ом.

4. Для схеми двопівперіодного випрямляча (рис. 3.3) визначити випрямлену напругу на навантаженні U_0 , якщо діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора $U_2=120$ В.

5. У схемі двопівперіодного випрямляча (рис. 3.3) зворотна напруга, що діє на кожний діод, $U_{зв}=471,2$ В. Визначити випрямлену напругу на навантаженні U_0 .

6. Визначити амплітуду змінної напруги на навантаженні в схемі двопівперіодного випрямляча (рис. 3.3), якщо випрямлений струм, що проходить через кожен діод, $I_0=70$ мА, а опір навантаження $R_H=39$ Ом.

7. Визначити випрямлену напругу U_0 на навантаженні двопівперіодної мостової схеми випрямляча (рис. 3.4), якщо амплітуда напруги первинної обмотки трансформатора $U_{1m}=150$ В, а коефіцієнт трансформації $n = 2$.

8. Визначити діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора в схемі двопівперіодного мостового випрямляча (рис. 3.4), якщо через кожний діод проходить струм $I_0=150$ мА, а опір навантаження $R_H=430$ Ом.

9. Для схеми двопівперіодного мостового випрямляча (рис. 3.4) визначити зворотну напругу на діодах, якщо через кожен діод проходить струм $I_0=250$ мА, а опір резистора навантаження $R=680$ Ом.

10. Коефіцієнт підсилення напруги підсилювача рівний 2. Знайти коефіцієнт підсилення потужності, якщо вхідний струм 1 А, а вихідний 1, 8 А.

11. Розрахувати Г-подібний фільтр нижньої частоти. Вихідні дані: загальний опір дільника напруги – $R_{заг} = 6$ кОм, частота зрізу фільтра – 3 кГц. Вхідну напругу прийняти за 1, а вихідну за 0,7.

12. Знайти частоту зрізу Г-подібного фільтра. Вихідні дані: загальний опір дільника напруги – $R_{заг} = 5$ кОм, $R_1 = 2$ кОм. Вхідну напругу прийняти за 1, а вихідну за 0,7.

13. Розрахувати ємність LC-фільтра, якщо відомо коефіцієнт пульсацій на вході випростувача $K_{н.вх}=0,06$, частоту струму джерела живлення $f=50$ Гц; індуктивність фільтра $L_\phi = 80$ мГн; коефіцієнт пульсацій на навантаженні $K_{н.вих}=0,004$. Випрямляч зібрано за трифазною мостовою схемою.

14. На виході однофазного мостового випростувача встановлено L-фільтр, який забезпечує коефіцієнт пульсацій випростаної напруги $K_{н.вих}=0,02$. Потужність споживача $P_H = 920$ Вт, а напруга на навантаженні $U_H = 38$ В. Визначити індуктивність фільтра.

15. Визначити ємність C -фільтра для забезпечення коефіцієнта пульсацій на навантаженні 0,1. Потужність та напруга навантаження $P_H = 2,6$ Вт; $U_H = 18$ В.

16. На виході однофазного мостового фільтра встановлено RC -фільтр. Визначити ємність цього фільтра, якщо на навантаженні необхідно забезпечити коефіцієнт пульсацій $K_{n.вих} = 0,25$, а опір навантаження $R_H = 38$ Ом.

17. На виході однофазного мостового фільтра встановлено RC -фільтр. Визначити опір навантаження R_H , якщо ємність цього фільтра 1500 мкФ, а на навантаженні необхідно забезпечити коефіцієнт пульсацій $K_{n.вих} = 0,2$.

18. На виході однофазного мостового фільтра встановлено RC -фільтр. Визначити коефіцієнт пульсацій, якщо ємність цього фільтра 1475 мкФ, а опір навантаження $R_H = 40$ Ом.

19. Для згладжування пульсацій випрямленої напруги однофазного мостового випрямляча, що живиться напругою з промисловою частотою, використано ємнісний фільтр. Визначити ємність цього фільтра для забезпечення коефіцієнта пульсацій на виході $K_{n.вих} = 0,2$, якщо опір резистивного навантаження $R_H = 20$ Ом.

20. Для згладжування пульсацій випростаної напруги однофазного мостового випростувача, що живиться змінною напругою частотою 400 Гц, використовується ємнісний фільтр. Визначити ємність цього фільтра для забезпечення коефіцієнта пульсацій $K_{n.вих} = 0,1$, якщо опір резистивного навантаження $R_H = 24$ Ом.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Основні параметри діодів

Тип діода	Допустимий випростаний струм $I_{пр.дон}$ (мА)	Допустима зворотна напруга $U_{зв.дон}$ (В)
КД 104А	10	300
Д 104	30	100
Д 105	30	75
Д 106	30	30
Д 202	50	50
КД 103 А	100	50
Д 7А	300	50
КД 106 А	300	100
Д 229В	400	100
КД 205 А	500	500
КД 205 К	700	100
КД 212А	1000	200
КД 212Б	1000	100
КД 226А	1700	100
КД 202В	5000	100
Д 214	$10 \cdot 10^3$	100
Д 243	$10 \cdot 10^3$	200
Д 104-16	$16 \cdot 10^3$	100
Д 104-20	$20 \cdot 10^3$	200

Основні параметри стабілітронів

Тип стабілітрона	Напруга стабілізації $U_{ст}$ (В)	Допустимий струм		Динамічний опір R_d (Ом)
		Мінімальний $I_{ст.мін}$ (мА)	Максимальний $I_{ст.макс}$ (мА)	
КС 133А	3	3	10	14
КС 139А	3,9	3	10	16
КС 147А	4,7	3	10	15
КС 156А	5,6	3	10	28
КС 168А	6,8	3	10	46
Д 814А	8	3	40	6
Д 814Б	9	3	36	10
Д 814В	10	3	32	12
Д 814Г	11	3	29	15
Д 814Д	13	3	24	18
Д 815Г	10	25	800	1,8
Д 815Е	15	25	550	2,5
КС 520 В	20	3	22	20
Д 816А	22	10	230	7
2С 524 А	24	1	33	30
2С 530 А	30	1	27	45
Д 816В	33	10	150	10
Д 816Д	40	10	110	300
Д 817А	56	5	35	400
Д 817Г	100	5	25	800
2С 920 А	120	5	42	100
КС 630А	130	5	50	180
КС 650А	150	2,5	25	255
КС 680А	180	2,5	25	255

Параметри транзисторів

Тип	$I_{К.доп.}$, мА	$I_{КЕ.доп.}$, мА	$P_{К.макс.}$, мВт	$U_{БЕ}$, В	f , МГц	h_{21E}	$U_{КЕ.нас.}$, В
Транзистори середньої потужності							
<i>n-p-n</i>							
КТ-503А	150	40	350	5	5	40÷120	0,6
ГТ-404А	500	25	600	5	1	30÷80	0,3
ГТ-400Г	500	40	600	5	1	60÷150	0,3
<i>p-n-p</i>							
КТ-104А	50	30	150	2	5	9÷36	1
КТ-208Д	150	30	200	2	5	40÷120	0,4
КТ-502Г	150	60	350	5	5	80÷240	0,6
КТ-501Г	300	30	350	2	5	20÷60	0,4
ІТ-405Г	500	40	600	5	1	60÷150	0,35
Транзистори потужні							
<i>n-p-n</i>							
КТ-807А	500	100	10^4	4	5	15÷45	1
КТ-815А	$1,5 \cdot 10^3$	40	10^4	5	3	40÷70	2
КТ-840А	$6 \cdot 10^3$	400	$6 \cdot 10^4$	5	1	10÷100	3
КТ-819Б	10^4	50	$6 \cdot 10^4$	5	12	20÷30	5
КТ-819Г	10^4	100	$6 \cdot 10^4$	5	10	12÷30	5
КТ-827А	$2 \cdot 10^3$	100	$125 \cdot 10^4$	5	14	750÷1800	2
<i>p-n-p</i>							
КТ626Б	$0,5 \cdot 10^3$	60	$6,5 \cdot 10^3$	5	45	30÷100	1
КТ814Б	$1,5 \cdot 10^3$	50	10^4	5	3	40	0,6
КТ837А	$7,5 \cdot 10^3$	70	$3 \cdot 10^4$	15	0,01	10÷40	2,5
КТ818А	10^4	40	$5 \cdot 10^4$	5	7	15	1,5
ГТ806Б	$15 \cdot 10^3$	100	$3 \cdot 10^4$	1,5	10	10÷100	0,6
КТ825	$2 \cdot 10^4$	90	$125 \cdot 10^3$	5	10	750	2

ЛІТЕРАТУРА

1. Городжа А. Д. Загальна Електротехніка та основи електроніки / А. Д. Городжа. – К.: КНУБА, 2000. – 150 с.
2. Дмитрів В. Т. Електроніка і мікросхемотехніка : навч. посібник / В. Т. Дмитрів В. М. Шиманський. – Львів : Афіша, 2006. – 175 с.
3. Загальна електротехніка та основи електроніки: навчально-методичний посібник / під ред. Глухова Д. Я. – К. : Вища шк., 1970. – 370 с.
4. Вартабелян В.А. Загальна Електротехніка та основи електроніки / В.А. Вартабелян. – К. : Вища шк., 1979. – 160 с.
5. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : Підручник: / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков; За ред. А.Г.Соскова. – К.: Каравела, 2006. – 384 с.
6. Малинівський С.М. Загальна Електротехніка та основи електроніки / С.М. Малинівський. – Львів : Ви-во Львівської політехніки, 2001. – 596 с.
7. Немцов М. В. Электротехника и электроника: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М. В. Немцов, М. Л. Немцова. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2009. – 432 с.
8. Попов В.С. Общая электротехника с основами электроники / В.С. Попов, С.А. Николаев. – М. : Энергия, 1976. – 312 с.
9. Промислова електроніка: Підручник / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.
10. Руденко В. С. Основы промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – К. : Высшая школа, 1985. – 400 с.
11. Стахів П. Г. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування: навч. посіб. / П. Г. Стахів., В. І. Коруд, О. С. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2002. – 120 с.
12. Титаренко М. В. Електротехніка та основи електроніки: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вузів / М.В. Титаренко. – К.: Кондор, 2004. – 240 с.

Навчально-методичне видання

Кевшин Андрій Григорович
Новосад Олексій Володимирович
Федосов Сергій Анатолійович

Електроніка

Задачі

Друкується в авторській редакції