

В. Ф. Болюх, В. Г. Данько

**ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОНІКИ
ТА
МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ
ТЕХНІКИ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

2011

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

В. Ф. Болюх, В. Г. Данько

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

для студентів усіх неелектротехнічних
спеціальностей

За редакцією В. Г. Данька

Харків 2011

ББК 32.85 : 32.973.26-04

Б 79

УДК 621.38 : 004.272.4 (07)

Рецензенти:

Б. Т. Кононов, д-р техн. наук, проф., Харківський університет Повітряних сил,

В.К. Марігодов, д-р техн. наук, проф., Севастопольський національний технічний університет,

О. І. Яковлев, д-р техн. наук, проф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Б 79 Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.

ISBN

Подано матеріал розділу “Основи електроніки та мікропроцесорної техніки” дисципліни «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка», що викладається для студентів усіх неелектротехнічних спеціальностей. Викладено теоретичний матеріал, що описує фізичні основи електронної техніки, будову і принцип дії основних напівпровідникових приладів, роботу основних електронних пристроїв, таких як джерела вторинного живлення, електронні підсилювачі, елементи імпульсної, цифрової і мікропроцесорної техніки, пристрої відображення інформації.

Призначено для самостійної роботи студентів, для чого після кожного розділу вміщено запитання для самоконтролю.

Іл. 174; Табл. 15; Бібліогр.: 33 назви.

ББК 32.85 : 32.973.26-04

ISBN

© Болюх В. Ф., Данько В. Г., 2011 р.

ВСТУП

Внаслідок розвитку електротехніки наприкінці XIX сторіччя виникли передумови для використання в системах передачі інформації і перетворення електричного струму малоінерційних електровакуумних приладів. Так було започатковано новий напрямок науки і техніки, який отримав згодом назву *електроніка* за видом основного носія електричних зарядів. На основі електровакуумних приладів були створені і розвинуті радіо- і телеапаратура, перші цифрові обчислювальні машини, різного роду вторинні джерела електропостачання як для названих систем, так і для технологічного використання.

Але всеохоплюючий наступ електроніки безумовно пов'язаний з появою у середині XX сторіччя напівпровідникових приладів. Вони дозволили на багато порядків збільшити діапазон можливих значень струмів, напруг і потужностей електронних пристроїв як з метою створення потужних перетворювачів електричної енергії (струм крізь один напівпровідниковий прилад становить більше 10^3 А), так і в напрямку широкого впровадження швидкодійних малогабаритних надчутливих систем інформації, обчислення і керування (поріг чутливості – на рівні 10^{-18} А щодо струму, 10^{-14} В щодо напруги, 10^{-25} Вт щодо потужності).

Реалізація програм, які потребують надзвичайно високої швидкодії, стала можливою тоді, коли з'явилися інтегральні мікросхеми. На їх базі почала розвиватися мікропроцесорна техніка, що дозволяє керувати інформаційними потоками і технологічними процесами за допомогою логічних операцій всередині самих інтегральних мікросхем. І це можна вважати одним з найбільших досягнень людства у XX сторіччі.

Таким чином, електроніка і мікропроцесорна техніка, з одного боку, є самостійною, широко розвинутою галуззю науки і техніки, а з іншого боку, розрахунки та аналіз роботи електронних і мікропроцесорних пристроїв та систем базуються на законах і поняттях електротехніки, в першу чергу, теорії електри-

чних кіл.

Тому електроніка як наука складається із двох основних частин:

– *фізичної електроніки*, яка вивчає процеси, пов'язані з проходженням електричних зарядів у вакуумних і напівпровідникових середовищах, а також останнім часом все більше уваги приділяється вивченню середовища біосфери, де діють особливі, ще мало вивчені біополя і способи передачі інформації;

– *технічної електроніки*, яка займається питаннями створення і роботи електровакуумних і напівпровідникових приладів та дослідженням їхніх характеристик, а також питаннями схемотворення, компонування та роботи електронних і мікропроцесорних пристроїв і систем, визначенням і дослідженням їхніх характеристик.

Основними функціональними напрямками реалізації досягнень технічної електроніки можна визначити наступні.

1. *Інформаційна електроніка*, яка охоплює зв'язок, електронно-обчислювальну та електронно-вимірювальну техніку. До неї належать електронні пристрої отримання, обробки, передачі, збереження і використання інформації, у тому числі з метою керування різного виду об'єктами і технологічними процесами.

2. *Енергетична електроніка*, яка використовується при перетворенні потоків електричної енергії середньої і великої потужності. До неї належать випрямлячі, інвертори, потужні перетворювачі частоти та інші подібні пристрої.

3. *Медична електроніка*, що пов'язана з системами діагностики та лікування захворювань біологічних об'єктів або їх окремих органів за допомогою електричних струмів, електромагнітних полів.

4. *Електронна технологія*, що пов'язана з безпосереднім або опосередкованим (за допомогою електронних генераторів) здійсненням технологічних процесів, в основі яких лежить використання електромагнітних хвиль різної довжини, електронних та іонних пучків. У першу чергу, це високочастотні нагрівання і плавка, ультразвукові та електронні плавка, різання і зварювання.

Наприкінці варто нагадати, що електроніка і мікропроцесорна техніка постійно прогресують, особливо інформаційна електроніка. Кожні *два-три* роки створюється нова база напівпровідникових приладів і мікросхем, які дозволяють на порядок підвищувати чутли- чутливість, швидкодію та, відповідно,

ефективність використання одиниці маси й об'єму електронних пристроїв та систем.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Робота електровакуумних, напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем базується на керуванні розподілом і рухом електронів або інших заряджених чи нейтральних частинок, які взаємодіють з фізичними полями.

Треба зазначити, що левову частину електронних приладів (~90 %) складають так звані “твердотільні”, а серед них домінують напівпровідникові на основі кремнію (~90 %).

Тому у подальшому основна увага буде приділятися фізичним основам саме твердотільної електроніки, а функціональні особливості електровакуумних, рідкокристалічних, біофізичних та інших структур розглядатимуться у відповідних розділах у міру необхідності.

1.1. Енергетична структура твердих тіл

1.1.1. Енергетичні зони

Тверде тіло – це сукупність нерухомих атомів, електрони яких, з одного боку, пов’язані з атомними ядрами, а з іншого боку, внаслідок їх малої маси можуть пересуватися під впливом як своєї, так і сторонньої енергії. Чим ближче до ядра атома розташовані електрони, тим нижче їх енергетичний рівень і менша залежність від інших атомів. Найбільшу енергію мають електрони на зовнішній орбіті, саме їх кількість визначає валентну групу хімічного елемента. Всі разом енергетичні рівні, зайняті всіма електронами при температурі близькій до абсолютного нуля, і за відсутності зовнішніх енергетичних впливів, створюють у твердому тілі *заповнену* енергетичну зону, верхня частина якої – *валентна зона*. Друга енергетична зона, так звана *вільна*, відповідає тим рівням енергії, які повинен мати електрон, щоб не тільки відірватись від атома, а й мати можливість вийти за межі твердого тіла. Нижня частина цієї зони називається *зоною провідності*, тому що їй відповідають енергетичні рівні, за яких електрони, які

звільнюються з атомів, можуть створювати електричний струм, одержуючи енергію від зовнішнього електричного поля (рис.1.1, *a*).

Для переходу електрона з валентної зони у вільну він повинен витратити енергію ΔW (свою або отриману ззовні) на подолання так званої *заборонної зо-*

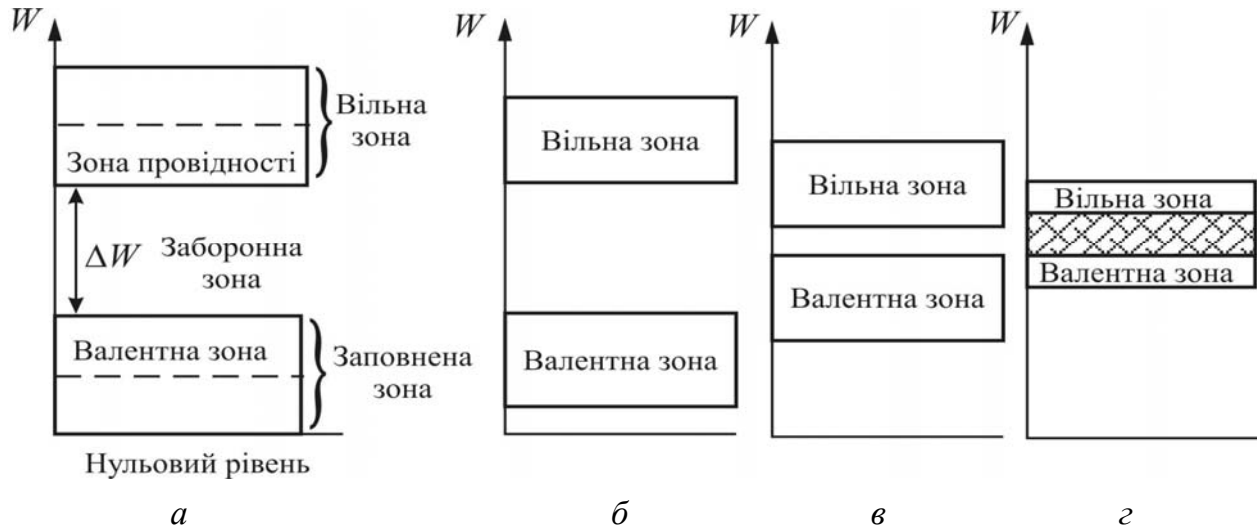


Рисунок 1.1 – Загальний характер розташування енергетичних зон за рівнем енергії W у твердому тілі (*a*) і взаємне розташування енергетичних зон у матеріалах: діелектричному (*б*), напівпровідниковому (*в*) і провідниковому (*г*)

ни. Чим менша ця зона, тобто чим енергетично ближче вільна зона до валентної, тим легше перейти валентному електрону у нижню частину вільної зони (зону провідності). Якщо різниця енергетичних рівнів зон провідності і валентності занадто велика, то такий перехід стає неможливим і подібні матеріали електричний струм не проводять. Тому залежно від величини енергетичного бар'єра ΔW , який створює заборонна зона, розрізняють три види матеріалів: діелектричні, напівпровідникові і провідникові (рис. 1.1, *б*, *в*, *г*). Як бачимо, в провідниках заборонної зони взагалі немає.

У діелектриках заборонна зона занадто велика, тому навіть значні зовнішні енергетичні впливи не спроможні перевести помітну кількість електронів у вільну зону. Провідність діелектриків близька до нуля.

Заборонна зона напівпровідників набагато вужча порівняно із діелектриками, тому їхня електропровідність дуже чутлива до зовнішніх факторів (тепло, світло, електричне поле тощо). У той же час відсутність заборонної зони у провідниках робить їхню електропровідність менш залежною від наведених факторів (найбільше впливає магнітне поле). Це пояснюється тим, що всі валентні

електрони металів є практично вільними й істотна зміна їхньої кількості неможлива. Більш вірогідним є їх перерозподіл, наприклад, під впливом магнітного поля, яке зумовлює зміну умов руху вільних електронів і, відповідно, зміну електропровідності.

1.1.2. Електронна емісія

У провідникових матеріалах і, меншою мірою, у напівпровідникових енергетичний рівень електронів може бути настільки підвищений, що вони вийдуть за межі цього матеріалу – створиться так звана *електронна емісія*. Енергія W_0 , яка при цьому витрачається, називається *роботою виходу*. Якщо емісія створюється у вакуумі (тиск менше 100 мкПа), то

$$W_0 = W_a - W_F = e\phi_0, \quad (1.1)$$

де W_a – повна енергія електрона; W_F – енергія, яка відповідає рівню розташування електрона в матеріалі; e – заряд електрона; ϕ_0 – пройдена різниця потенціалів електричного поля (рис. 1.2).

Потік вільних електронів в електровакуумних приладах створюється за допомогою металевого або напівпровідникового електрода – *катода*. Залежно від способу передачі електронам додаткової енергії розрізняють такі види електронної емісії:

- *термоелектронну*, що виникає при нагріві катода;
- *фотоелектронну*, що виникає під впливом електромагнітного опромінювання поверхні катода;
- *вторинну електронну*, що виникає як наслідок бомбардування катода потоком електронів або іонів, які рухаються з великою швидкістю;
- *електростатичну*, що виникає за допомогою сильного електричного поля поблизу поверхні катода, спрямованого на відрив електронів.

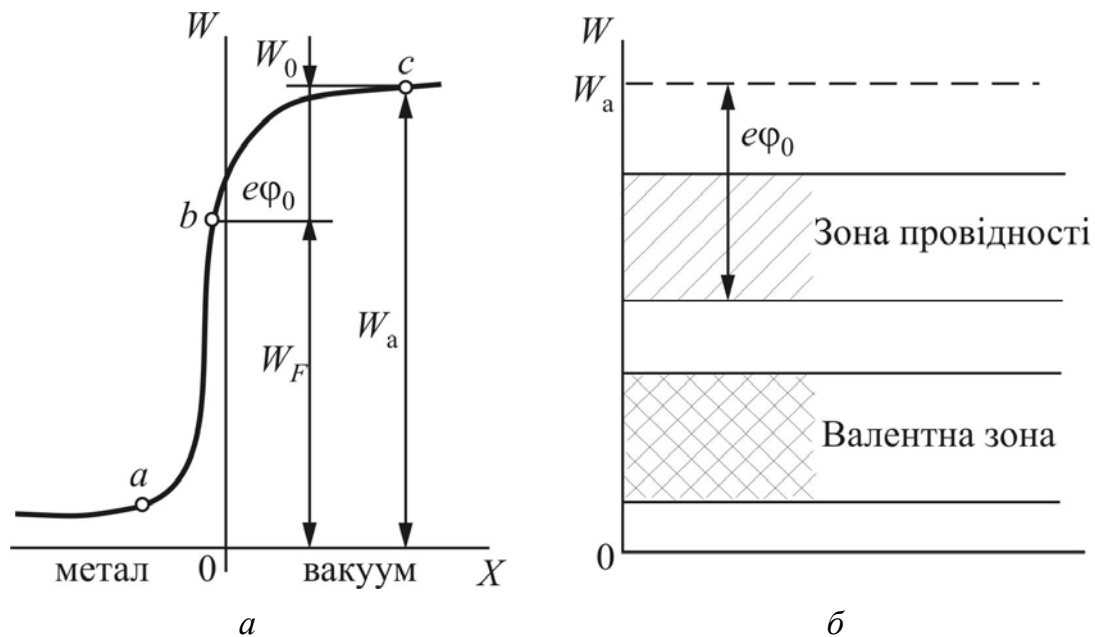


Рисунок 1.2 – Енергетичні діаграми виходу електронів:
з металу (а); з напівпровідника (б)

Наявність достатньої кількості вільних електронів дозволяє організувати їхній рух у вигляді електричного струму або пучка електронів і керувати цим рухом за допомогою електричних і магнітних полів.

1.2. Напівпровідникові матеріали

1.2.1. Власна провідність напівпровідників

Як вже акцентувалося, формальною ознакою належності речовини до класу напівпровідників можна вважати рівень провідності, який відповідає питомому опору $\rho = 10^{-2} \dots 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. До провідників належать матеріали з $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а до діелектриків – з $\rho > 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

У напівпровідниковій техніці застосовують хімічні елементи III валентної групи (індій In), IV валентної групи (кремній Si та германій Ge), V валентної групи (фосфор P та арсен As), VI валентної групи (селен Se та телур Te), а також цілий ряд сполук типу оксидів міді Cu_2O і цинку ZnO , арсеніду галію GaAs, карбіду кремнію SiC, сульфїду кадмію CdS та ін.

Найбільш поширені серед цих напівпровідників – кремній (до 90 %) та германій, для яких характерна кристалічна будова, тобто системне розташування

атомів у просторі.

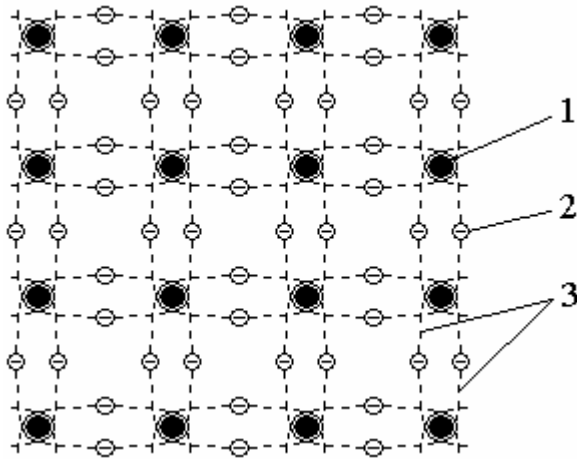


Рисунок 1.3 – Кристалічні ґратки германію: 1 – атом; 2 – електрон; 3 – електронна оболонка

На рис.1.3 показано, що в кристалічній ґратці елемента IV валентної групи, наприклад, германію чотири валентних електрона кожного атому разом з сусідніми такими ж електронами утворюють навколо кожного атому стійку електронну оболонку з восьми електронів, завдяки чому атоми міцно зв'язуються один з одним, утворюючи елементарний кристал речовини. Доки цей так званий *двоелектронний* або *ковалентний* зв'язок існує,

електрони не можуть переносити електричний заряд у матеріалі.

Зв'язок між двома сусідніми атомами здійснюється двома валентними електронами – по одному від кожного атома. Схематично це показано на рис. 1.4, *a*.

Під впливом зовнішніх факторів (наприклад, при будь-яких температурах, вищих за абсолютний нуль) валентні електрони отримують енергію, достатню для звільнення від ковалентних зв'язків і переходу в зону провідності. При цьому виникає ніби то вільне місце з позитивним зарядом (відсутність від'ємного заряду електрона), дорівнюючим за величиною заряду електрона. Таке місце умовно називають *діркою*, а процес утворення пари «електрон – дірка» отримав назву *генерації зарядів*.

Дірка, як позитивний заряд, може приєднати до себе електрон з ближньої повної ковалентної пари (відбудеться *рекомбінація*), але при цьому одночасно утвориться нова дірка. Такий генераційно-рекомбінаційний процес безупинно повторюється, і дірка пересуватиметься в напівпровіднику, що є рівнозначним умовному пересуванню позитивного заряду такого ж розміру, як і в електрона.

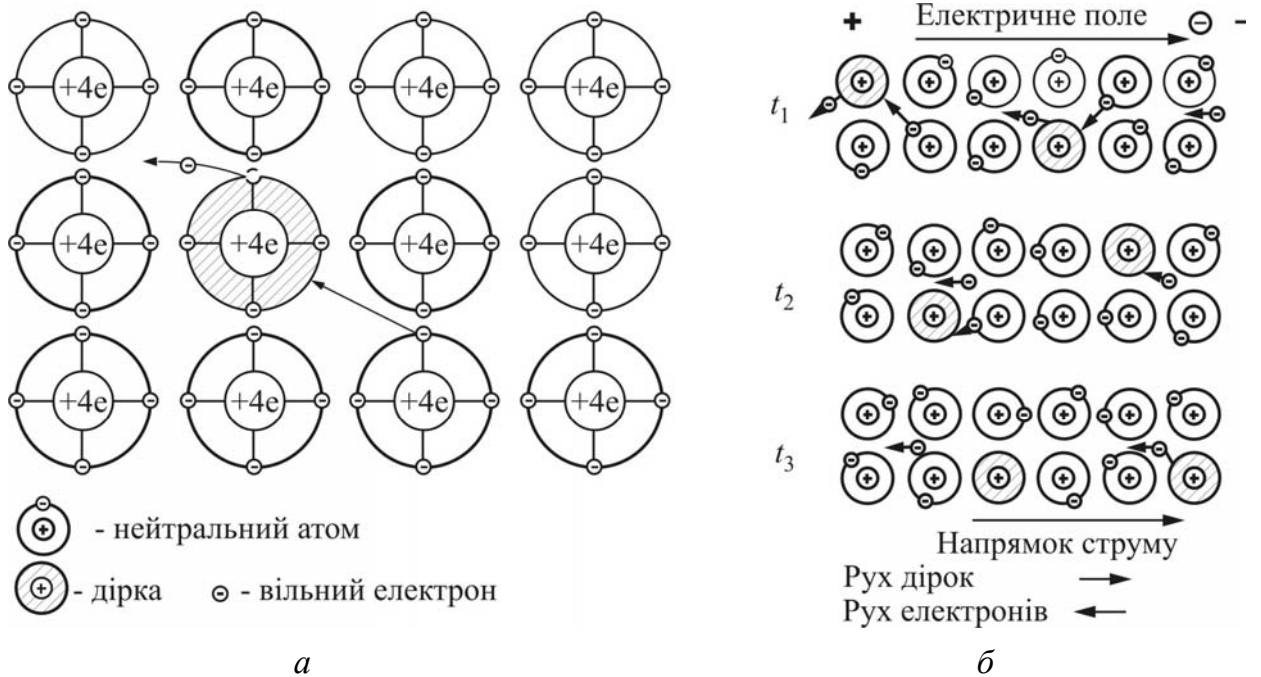


Рисунок 1.4 – Ковалентний зв’язок та утворення вільних електронів і дірок у чистому кремнії (а), а також їх пересування під впливом електричного поля у послідовні $t_1... t_3$ миттєвості часу (б)

Якщо до напівпровідника прикласти електричне поле, то рух дірок і електронів упорядковується і виникає електричний струм, напрямок якого збігається з напрямком зменшення потенціалу електричного поля (рис. 1.4, б). У хімічно чистому кристалі напівпровідника число дірок завжди дорівнює числу вільних електронів, і загальний струм у напівпровіднику складається з електронного та діркового струмів. Така електронно-діркова провідність називається *власною провідністю напівпровідника*.

1.2.2. Домішкова провідність напівпровідників

Наявність домішок у напівпровіднику істотно змінює як значення, так і характер його провідності. Навіть невелика домішка (до 10 атомів на 10^6 атомів напівпровідника) наближає провідність напівпровідникового матеріалу до провідності металів. А залежно від того, атоми якої речовини домішані у кристал, можуть переважати або електрони, або дірки.

Домішки, які сприяють збільшенню у напівпровіднику електронів, називаються *донорними*, а ті, що сприяють збільшенню дірок – *акцепторними*. Механізм їхньої дії пояснюється наступним чином.

Якщо у напівпровідник IV валентної групи (наприклад, кремній Si) додати речовину V валентної групи (наприклад, фосфор P), то чотири валентні електрони цієї речовини створять міцні ковалентні зв'язки з атомами напівпровідника, а п'ятий валентний електрон звільниться і стане основним носієм електричного заряду отже зможе прийняти участь в перенесенні струму. Провідність речовини зросте. Утвориться напівпровідник *n*-типу, в якому *основними носіями* (ОН) електричних зарядів стануть вільні електрони (*електронна провідність*), а атоми домішки, які звільняються від «зайвого» електрона, перетворяться на нерухомі позитивні іони. Кількість дірок, яка була в початковому напівпровіднику, у більшості своїй рекомбінує з надлишковими електронами, а ті, що залишаться, стануть *неосновними носіями* (НН) електричних зарядів (рис.1.5).

Домішка у напівпровідник IV валентної групи (той же кремній Si) речовини III валентної групи (наприклад, індій In, який має лише три валентних елект-

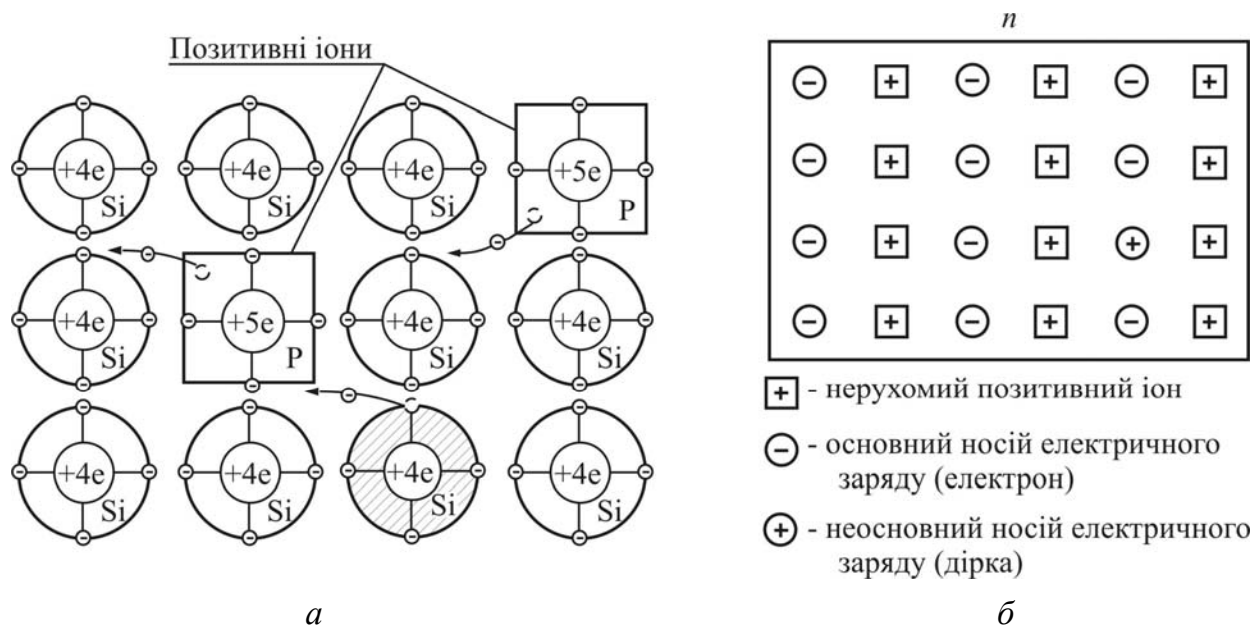


Рисунок 1.5 – Кристалічна структура чистого кремнію Si з домішкою фосфору P (a) і схематичне зображення напівпровідника *n*-типу (б)

рони) спричинить утворення міцних ковалентних зв'язків між атомами домішаної речовини і атомами основного матеріалу. Один зв'язок виявиться вільним, замість електрона тут буде «дірка». Це місце може бути заповнене електроном з меншою енергією, який зможе спрямовано рухатись в речовині. При цьому на його бувшому місці знову утвориться дірка, яка теж заповниться сусіднім електроном. Електрони переходять лише від атома до атома, а вздовж всієї речовини)

ни начебто рухаються дірки, які стануть *основними носіями* електричних зарядів (позитивних) (рис. 1.6). Невелика кількість нерекомбінованих електронів будуть *неосновними носіями* електричних зарядів (негативних). Такий напівпровідник з *дірковою провідністю* називається напівпровідником *p*-типу.

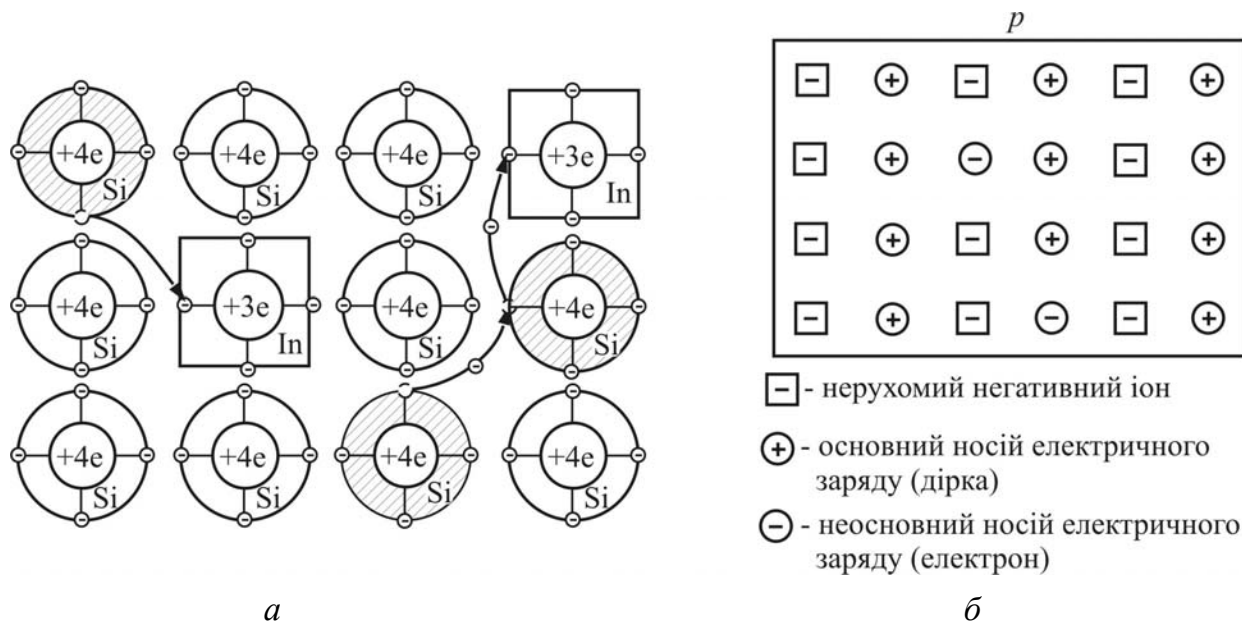


Рисунок 1.6 – Кристалічна структура чистого кремнію із домішкою індію In (а) і схематичне зображення напівпровідника *p*-типу (б)

Таким чином, якщо у напівпровідник IV валентної групи додати домішку – речовину V валентної групи, маємо так звану «електронну» провідність, або *n*-провідність, а домішка зветься *донорною*. Якщо у напівпровідник IV валентної групи додати домішку – речовину III валентної групи, провідність буде «дірковою», або *p*-провідністю, а домішка зветься *акцепторною*. За донорні домішки приймають фосфор, арсен та стійий, тоді як акцепторними можуть бути бор, алюміній, індій.

Добавка лише одного атому арсену на 10^8 атомів кремнію зменшує питомий опір у $2,4 \cdot 10^4$ разів, тобто з $2,3 \cdot 10^5$ до $9,6$ Ом·см. Але добавка акцепторної домішки, скажімо, алюмінію, зменшує питомий опір лише в $9 \cdot 10^3$ разів, тобто він становить в даному випадку 25 Ом·см. Це пояснюється тим. Що рухомість дірок в 2,6 разів менша, ніж електронів. Що стосується ширини забороненої зони, то донорні домішки зменшують її з $0,72$ еВ (у германію) або з $1,12$ еВ (у кремнію) до $0,01$ еВ та $0,07$ еВ відповідно.

1.3. Напівпровідникові контактні переходи

1.3.1. Електронно-дірковий перехід напівпровідників

У напівпровідникових приладах різного рівня і призначення найбільш поширеним є перехід, який утворюється в місці контакту напівпровідників p - і n -типів. Такий електричний перехід називається *електронно-дірковим* або p - n -переходом. Його особливості пов'язані з тим, що у місці контакту напівпровідників різного типу відбувається взаємна дифузія й активна рекомбінація основних носіїв електричних зарядів – електронів і дірок. Внаслідок цього у контактній зоні залишаються нерухомі позитивні і негативні іони, між якими виникає запираюче електричне поле $E_{\text{зап}}$, якому відповідає так званий *потенціальний бар'єр* $\Delta\phi$, спрямований проти напрямку руху основних носіїв електричних зарядів. Тому подальша їхня дифузія призупиняється, а дифузія неосновних носіїв електричних зарядів унаслідок їх невеликої кількості ситуацію не змінює.

Пояснемо це більш детально. Розглянемо напівпровідник, одна частина об'єму якого завдяки відповідним домішкам має діркову провідність, друга частина – електронну, а між ними є межа розподілу (рис. 1.7). В цілому матеріал є електрично нейтральним. Але у лівій частині основними носіями є дірки, а у правій – електрони. Носії під дією температури перебувають у хаотичному русі. Деяка частина їх переходить через межу розподілу в зону з протилежною провідністю, змінюючи заряд об'єму у відповідному напрямку. Концентрація «чужих» носіїв найбільша на межі розподілу, а далі від неї спадає до нуля. Таким чином на межі розподілу утворюється так званий *потенціальний бар'єр*, що заважає подальшій дифузії носіїв в «чужу» зону. Природно, що цей бар'єр заважає перетинати межу розподілу лише основним носіям, а неосновним, навпаки, сприяє, які й утворюють так званий «дрейфовий» струм I_0 .

Ширина утвореного p - n -переходу l в більшості випадків є істотно меншою одного мікрметра. До того ж p - n -переходу притаманні ємнісні властивості. Зовнішнім електричним полем $U_{\text{пр}}$, прикладеним до p - n -переходу, можна як зменшити аж до нуля потенціальний бар'єр, так і навпаки – збільшити його. В першому випадку звужується ширина переходу і відкривається шлях для проходження основних носіїв електричних зарядів, в другому – перепона на їхньо-

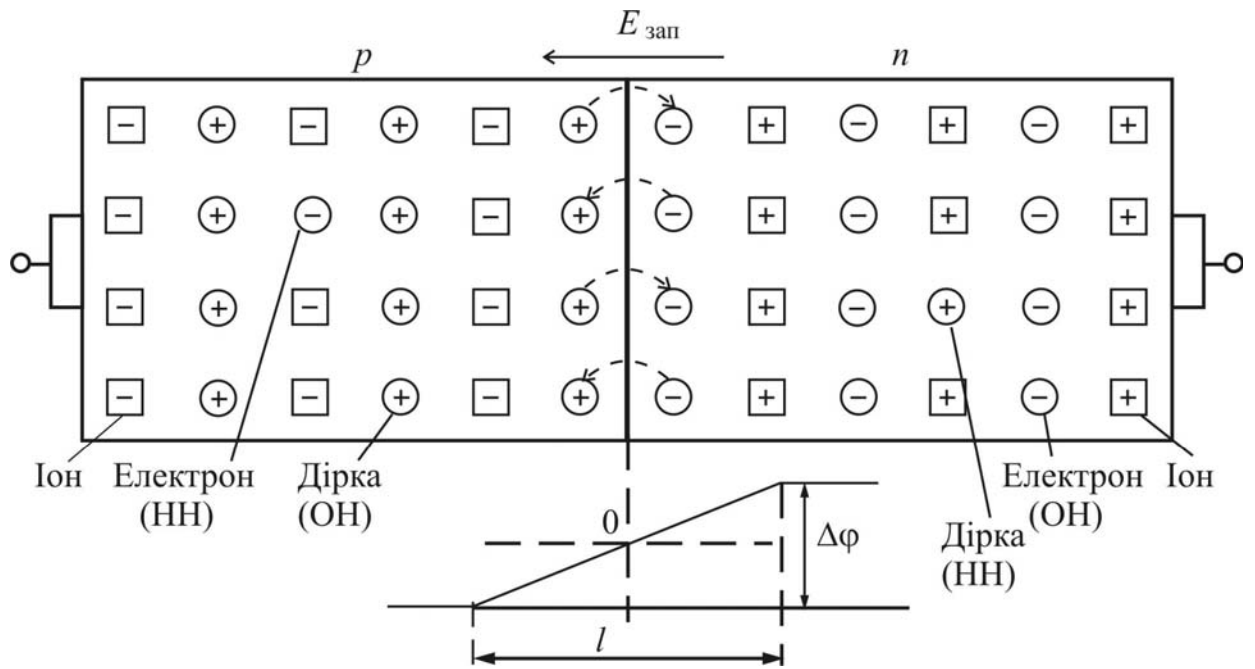


Рисунок 1.7 – Структура електронно-діркового переходу (*p-n*-перехід)

му шляху збільшується і проходилимуть тільки неосновні носії електричних зарядів.

Таким чином, якщо «плюс» джерела електричної енергії підключити до *p* напівпровідника, а «мінус» – до *n* напівпровідника (це так зване *пряме включення*), то, як тільки буде знятий потенціальний бар'єр ($\Delta\varphi = 0$), основні носії електричних зарядів почнуть рухатися, тобто у них з'явиться можливість дифундувати в «чужу» зону, що й спричинить появу струму у напівпровіднику (рис. 1.8, а). Виникне так званий *прямий струм*, який буде тим більше, чим вище буде пряма напруга на *p-n*-переході.

Встановлено, що цей дифузний струм I_δ залежить від прикладеної напруги відповідно з законом

$$I_\delta = I_0 \exp(U/\varphi_m), \quad (1.2)$$

де φ_m – так званий «тепловий потенціал», що дорівнює приблизно 25 мВ.

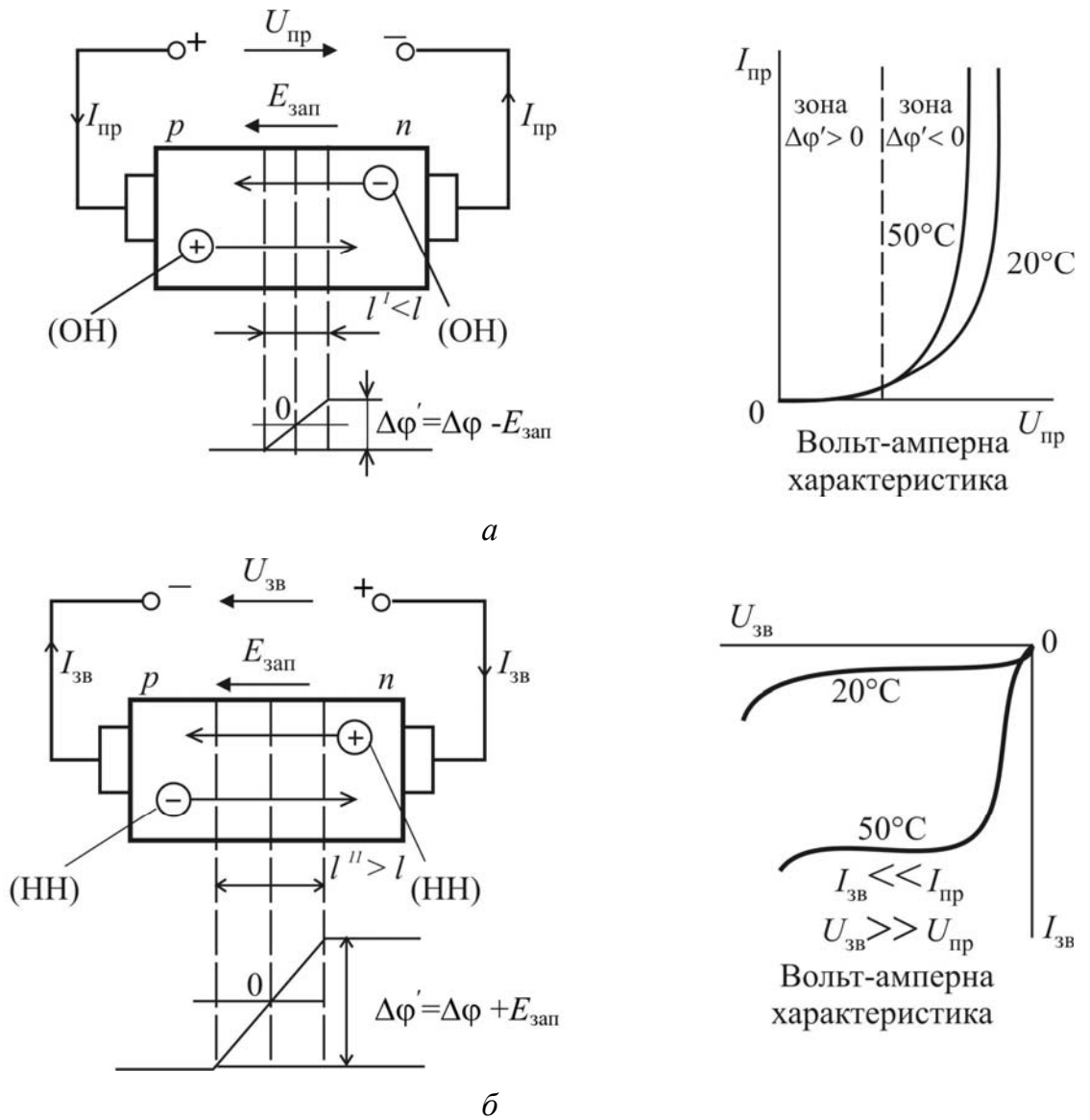


Рисунок 1.8 – Пряме (а) і зворотне (б) підключення електронно-діркового переходу

В кремнієвих напівпровідниках струм досягає великих значень вже при $\Delta U = 0,8 \div 1,2$ В. Дрейфовий струм у кремнію дуже малий. У германієвих напівпровідників $\Delta U = 0,3 \div 0,6$ В, зате дрейфовий струм I_0 дещо більший. Оскільки основні носії, що утворюють дифузний струм, і неосновні (дрейфовий струм) мають протилежні знаки, загальний струм в напівпровіднику дорівнює їх різниці

$$I = I_\delta - I_0 = I_0 [\exp(U/\phi_m) - 1]. \quad (1.3)$$

Це рівняння описує так звану вольт-амперну характеристику p - n -переходу (рис. 1.9).

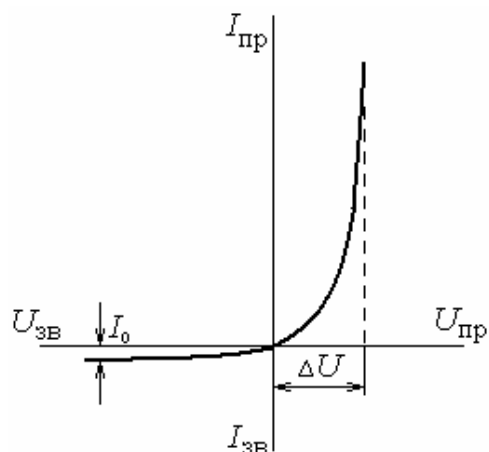


Рисунок 1.9 – Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

При зворотному підключенні p - n -переходу до джерела електричної енергії («мінус» на p , «плюс» на n) на p - n -переході збільшиться напруга, спрямована проти руху основних носіїв електричних зарядів. Тому через нього будуть проходити тільки неосновні носії електричних зарядів, чисельність яких на кілька порядків менша порівняно з основними носіями. Відповідно зворотний струм, який утворюється під впливом зворотної напруги, буде дуже малим і практично незмінним при збільшенні цієї напруги. Це пояснюється тим, що на кількість неосновних носіїв електричних зарядів, на відміну від основних, джерело електричної енергії не впливає. Кількість їх збільшується тільки з підвищенням температури: приблизно у 2–2,5 рази на кожні 10°C . Зрозуміло, що такою ж мірою збільшується і зворотний струм (рис. 1.8, б).

Електронно-дірковий перехід використовується в напівпровідникових випрямних діодах – приладах, які добре проводять струм в одному напрямку і майже не проводять у зворотному. Ця особливість необхідна при побудові випрямлячів змінного струму, про що мова піде далі.

В ідеальному випрямному діоді вольт-амперна характеристика співпадає з тою, що наведена на рис. 1.9. Але реально співпадає лише та її вітка, що розташована в першому квадранті. Що до іншої її частини, то зворотний струм буде сталим і дорівнювати I_0 лише теоретично. На практиці ця вітка характеристики діода має вигляд, наведений на рис. 1.10.

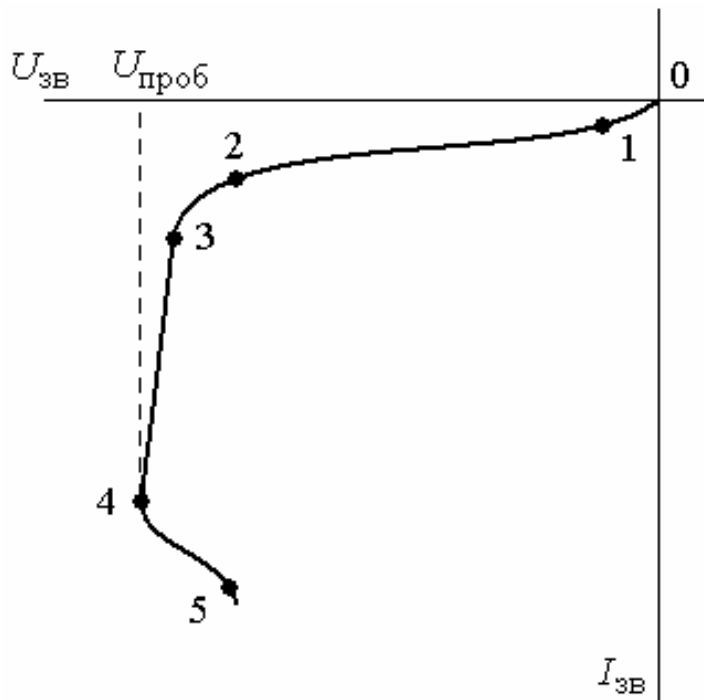


Рисунок 1.10 - Реальна зворотна характеристика $p-n$ -переходу

При невеликих значеннях зворотної напруги реальна характеристика співпадає з ідеальною (ділянка 0–1), потім струм зростає пропорційно напрузі за рахунок поверхневої провідності (ділянка 1–2). При подальшому збільшенні напруги електрони набирають в електричному полі значної енергії, і стикаючись з атомами у вузлах кристалічної решітки, передають її іншим електронам. Відбувається так звана лавинна генерація вільних носіїв, струм значно зростає (ділянка 2–3). Далі відбувається лавинне зростання струму при незначному підвищенні напруги (ділянка 3–4). Це так званий електричний пробій $p-n$ -переходу. Цей пробій не руйнує перехід, і якщо знизити напругу, струм зменшиться і знову перейде до ділянки 1–2. Існують два різновиди *електричного пробою*:

лавинний, що має місце при достатньо великій площі $p-n$ -переходу і пояснюється лавинним зростанням кількості носіїв при ударній іонізації атомів;

тунельний, що виникає при малій площі $p-n$ -переходу; при цьому зростає напруженість електричного поля, і електрони рухаються вздовж ліній електричного поля начебто в тунелі, не зустрічаючи майже ніякого опору.

При подальшому зростанні струму (ділянка 4–5) температура $p-n$ -переходу різко підвищується і перехід руйнується. Його опір падає і слідом падає прикладена до нього напруга. Відбувається *тепловий пробій*, що повністю виводить прилад з ладу.

Щоб уникнути теплового пробою, зворотна напруга на діоді повинна бути меншою, ніж напруга $U_{\text{проб}}$, при якій виникає електричний пробій. На практиці найбільша зворотна напруга $U_{\text{макс}}$ становить близько 70% від $U_{\text{проб}}$.

Реальна зворотна характеристика залежить від температури – при її підвищенні вона зміщується праворуч, відповідно зменшується і $U_{\text{макс}}$.

Як впливає з щойно розглянутих особливостей роботи *p-n*-переходу, він являє собою якісно новий вид *нелінійного опору*, значення якого, перш за все, залежить від полярності прикладеної напруги. За однієї полярності (пряме включення) його опір малий і близький до нуля (утворюється начебто закороення електричного кола). За іншої полярності (зворотне включення) його опір великий – на рівні діелектриків, і можна вважати, що в цьому місці електричне коло є розірваним.

1.3.2. Контактний перехід метал – напівпровідник

Окрім розглянутого *p-n*-переходу, у всіх напівпровідникових приладах вживаються контактні переходи типу «метал – напівпровідник», властивості яких залежать від матеріалів контактної пари. При цьому місце контакту «метал – напівпровідник» можна уявити як поверхню, крізь яку електрони з металу або напівпровідника виходять ніби то у вакуум. Тому напрямок перегону електронів може бути тільки один, його визначатиме співвідношення роботи виходу електронів з металу і напівпровідника. Якщо робота виходу з металу вища порівняно з роботою виходу з напівпровідника, то зрозуміло, що при утворенні контакту рух електронів з напівпровідника в метал буде переважати. Метал отримує надлишок електронів (негативний заряд), а приконтактний шар напівпровідника збідниться на електрони, й у зоні контакту утвориться різниця потенціалів. Зняти цю контактну різницю потенціалів можна тільки зовнішнім електричним полем відповідної полярності. Отже, така контактна пара отримує властивість випрямляти електричний струм, а її вольт-амперна характеристика аналогічна вольт-амперній характеристиці *p-n*-переходу, за винятком притаманній *p-n*-переходу затримки прямого струму, поки не буде подолано потенціальний бар'єр (рис. 1.11).

Якраз відсутність цієї затримки й робить контактну пару «метал – напівпровідник» з відповідних матеріалів дуже привабливою для надвисокочастотних напівпровідникових приладів.

В контактній парі «метал – напівпровідник» з меншою роботою виходу електронів з металу переважати буде перехід електронів з металу в напівпровідник. Внаслідок цього приконтактний шар напівпровідника збагатиться на електрони, а його опір впаде і буде залишатися низьким при будь-якій полярності зовнішнього електричного поля. Тому такого виду контакти використовують як для з'єднання в напівпровідникових приладах і мікросхемах, так і для приєднання їх до зовнішнього кола.

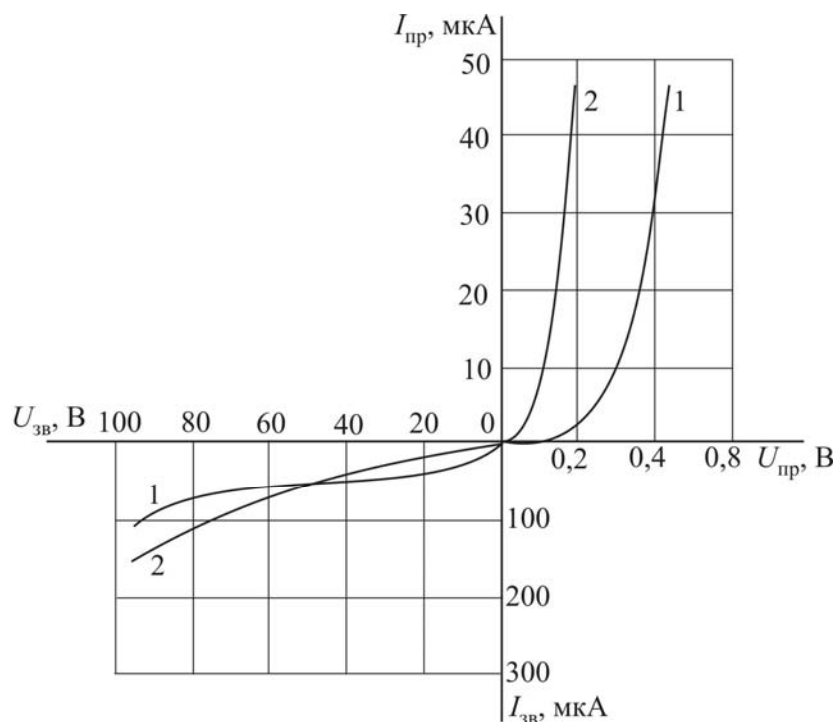


Рисунок 1.11 – Вольт-амперні характеристики: 1 – *p-n*-переходу; 2 – контактної пари «метал – напівпровідник» з випрямними властивостями

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Назвіть енергетичні зони в твердому тілі і дайте їм характеристику.
2. Чим відрізняються енергетичні зони у провідниках, діелектриках і напівпровідниках?
3. Поясніть явище електронної емісії.
4. Назвіть види електронної емісії і дайте їм характеристику.
5. Що таке напівпровідники? Чим вони відрізняються від провідників і діелектриків?
6. Назвіть напівпровідникові матеріали. До яких груп таблиці Менделєєва належать ці хімічні елементи?
7. Поясніть явище власної провідності напівпровідників.

8. Які носії заряду існують у напівпровідниках?
9. Поясніть явища генерації і рекомбінації зарядів у напівпровідниках.
10. Охарактеризуйте явище домішкової провідності напівпровідників.
11. Поясніть, як утворюються напівпровідники n -типу і p -типу.
12. Поясніть властивості напівпровідників n -типу і p -типу. Які носії електричних зарядів у них є основними, а які – неосновними?
13. Що називають електронно-дірковим або p - n -переходом? Поясніть структуру й основні властивості цього переходу.
14. Що таке пряме та зворотне включення електронно-діркового переходу?
15. Як змінюється потенціальний бар'єр і ширина електронно-діркового переходу залежно від прямого та зворотного включення?
16. Поясніть, що являє собою електричний та тепловий пробої p - n -переходу.
17. Опишіть властивості контактного переходу типу «метал – напівпровідник».
18. Поясніть особливості вольт-амперних характеристик p - n -переходу та контактної пари «метал – напівпровідник» з випрямними властивостями.

РОЗДІЛ 2

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

Усі базові напівпровідникові прилади умовно можна поділити на дві основні групи: *резистори*, що створюють певний опір на шляху електричного струму, але не можуть перекрити його, і *вентилі*, які, використовуючи властивості *p-n*-переходу, можуть пропускати або не пропускати електричний струм.

Залежно від кількості *p-n*-переходів у напівпровідникових приладах вентиляльної групи розрізняють:

- діоди (один *p-n*-перехід);
- біполярні транзистори (два *p-n*-переходи);
- тиристори (три *p-n*-переходи).

Дещо не вписуються у цю класифікацію транзистори, в яких вплив електричного поля на рух електронів може здійснюватись не лише за допомогою *p-n*-переходів.

Принцип дії, характеристики і способи включення базових напівпровідникових приладів істотно не змінюються при їх об'єднанні в інтегральні мікросхеми. Вони також є основою всієї електронно-логічної схемотехніки. Тому знання механізмів роботи наведених напівпровідникових приладів є необхідним для розуміння принципів функціонування електронних структур і схем різного рівня складності та різного призначення.

2.1. Напівпровідникові резистори

Напівпровідниковий резистор являє собою електричний опір з двома виводами, виготовлений з рівномірно легованого напівпровідникового матеріалу.

Він може бути лінійним, тобто не змінювати пропорційний зв'язок між струмом і напругою під впливом зовнішніх факторів, і нелінійним, тобто залежати від напруги, температури, освітлення та інших керуючих параметрів. Класифікація та умовні графічні позначення напівпровідникових резисторів наведені на рис. 2.1.

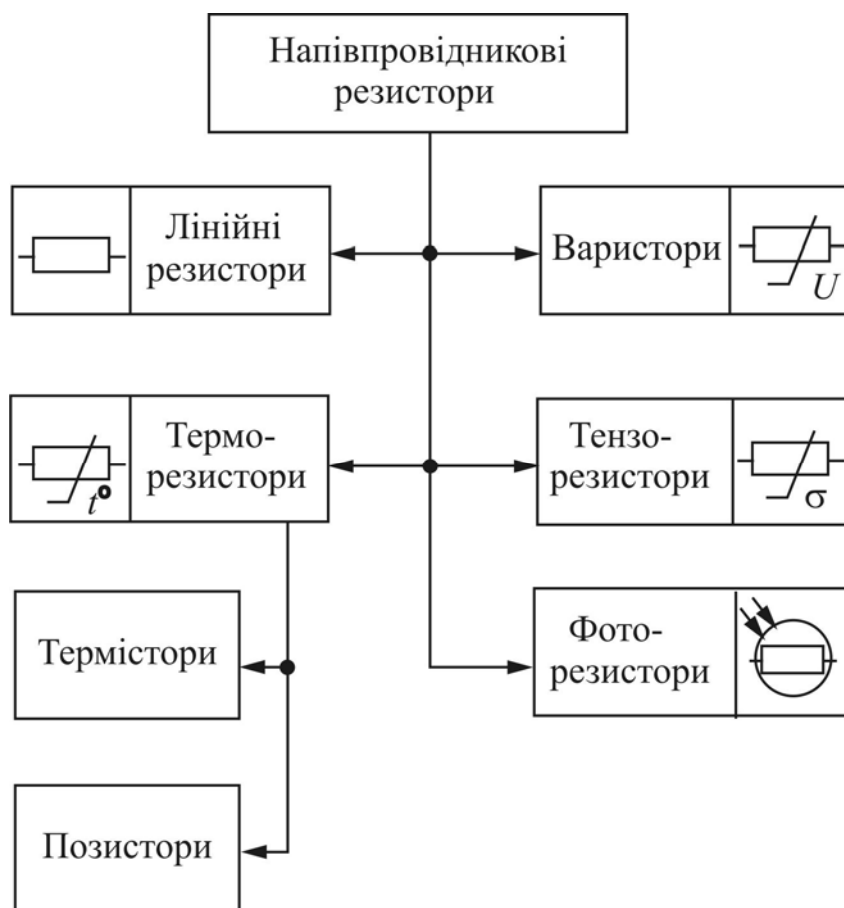


Рисунок 2.1 – Класифікація та умовні позначення напівпровідникових резисторів

Нелінійні резистори позначені тим параметром, який найбільш істотно впливає на їхній опір і вольт-амперні характеристики: для *варисторів* – це електрична напруга, для *терморезисторів* – температура, для *тензорезисторів* – механічна напруга, для *фоторезисторів* – освітлення.

2.1.1. Лінійні резистори

Лінійні резистори виготовляють зі слабологованого кремнію або арсеніду галію, питомий опір яких мало залежить від напруженості електричного поля та густини електричного струму. Тому опір лінійного резистора залишається практично незмінним у широкому діапазоні напруг і струмів. Такі резистори поширені в інтегральних мікросхемах.

2.1.2. Варистори

Варистор – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги, тому його вольт-амперна характеристика нелінійна і симетрична відносно початку координат (рис. 2.2).

Виготовляють варистори з порошкоподібного кристалічного карбїду кремнію, змішаного з глиною. З цієї маси пресують заготовки циліндричної або дискової форми та обпалюють їх при високій температурі. Потім гарячим напиленням додають електроди і покривають електроізоляційним лаком для захисту від зовнішнього впливу.

Головним параметром, яким характеризується варистор, є коефіцієнт нелінійності

$$\lambda = \frac{R}{R_d} = \frac{U/I}{dU/dI}, \quad (2.1)$$

де R , R_d – статичний і динамічний опори варистора; U , I – напруга і струм варистора.

Коефіцієнт нелінійності для різних типів варисторів знаходиться в діапазоні 2...6, що дозволяє використовувати їх для захисту приладів та елементів електричних схем від перенапруги, стабілізації напруги і струму, регулювання та перетворення електричних сигналів.

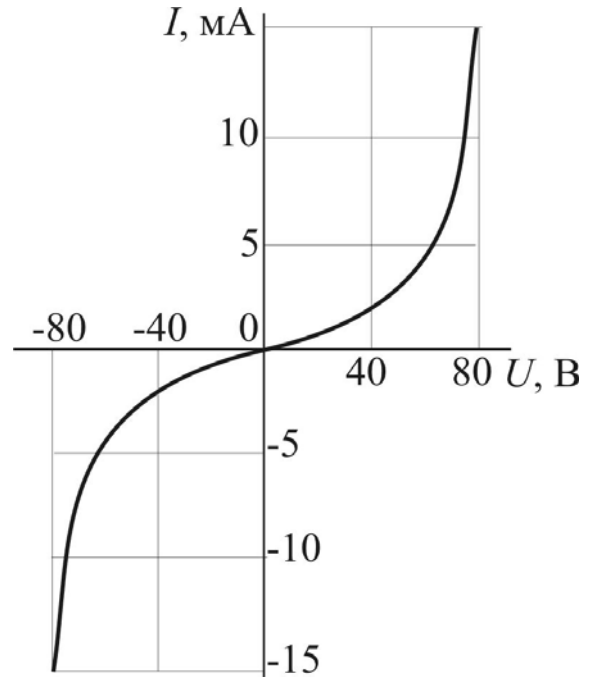


Рисунок 2.2 – Вольт-амперна характеристика варистора

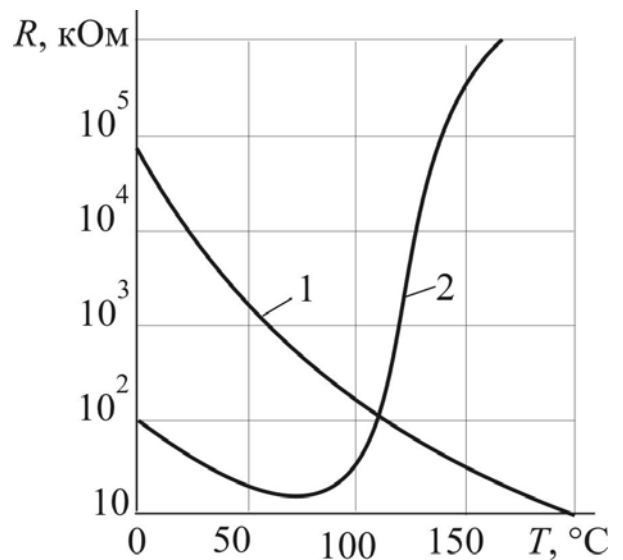


Рисунок 2.3 – Температурні характеристики терморезисторів: 1 – термістора; 2 – позистора

2.1.3. Терморезистори

Терморезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого істотно залежить від температури. Розрізняють два види терморезисторів: *термістор*, опір якого зі зростанням температури різко зменшується, і *позистор*, опір якого при досягненні певного рівня температури різко збільшується (рис. 2.3).

Для виготовлення термісторів найчастіше використовуються напівпровідники *n*-типу, як правило, оксиди металів та їх суміші. Конструктивно термістори мають вигляд намистин, шайб, дисків. У ряді випадків їх розміщують у скляних балонах і підігрівають струмом за допомогою спеціальної обмотки. Такий термістор називається *термістором посереднього підігріву*.

Позистори виготовляють з титано-барієвої кераміки з домішками рідкісноземельних елементів. Такому матеріалу притаманна аномальна температурна залежність, тобто підвищення температури вище точки Кюрі збільшує його опір на декілька порядків. Конструктивно позистори подібні до термісторів.

Головним параметром, що характеризує роботу терморезистора, є *температурний коефіцієнт опору*

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} \cdot 100, \quad (2.2)$$

що показує відсоткову зміну опору при зміні температури.

Для термісторів $\alpha = -(3..7)\% / ^\circ\text{C}$, для позисторів (близько точки Кюрі) $\alpha = (10..50)\% / ^\circ\text{C}$.

Терморезистори використовуються в системах регулювання температури, термокомпенсації різних елементів електричного кола, теплового захисту, протипожежної сигналізації. За допомогою термісторів можна в широкому діапазоні вимірювати температуру.

2.1.4. Тензорезистори

Тензорезистор – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від його механічної деформації.

Найчастіше для виготовлення тензорезисторів використовують кремній з провідністю як *n*-типу, так і *p*-типу. Заготовки такого кремнію, порізані на не-

великі пластинки, шліфують до отримання бездефектної гладкої поверхні і приварюють до їх кінців контактні виводи.

Тензорезистор, закріплений належним чином на деталях різного роду машин і механізмів, дозволяє вимірювати деформацію цих деталей і визначати за допомогою закону Гука механічні напруги в них. Тому найважливішою для тензорезисторів є їх деформаційна характеристика, яка показує залежність відносного опору тензорезистора $\Delta R/R$ від його відносної деформації $\Delta l/l$, де l – довжина робочого тіла тензорезистора (рис. 2.4).

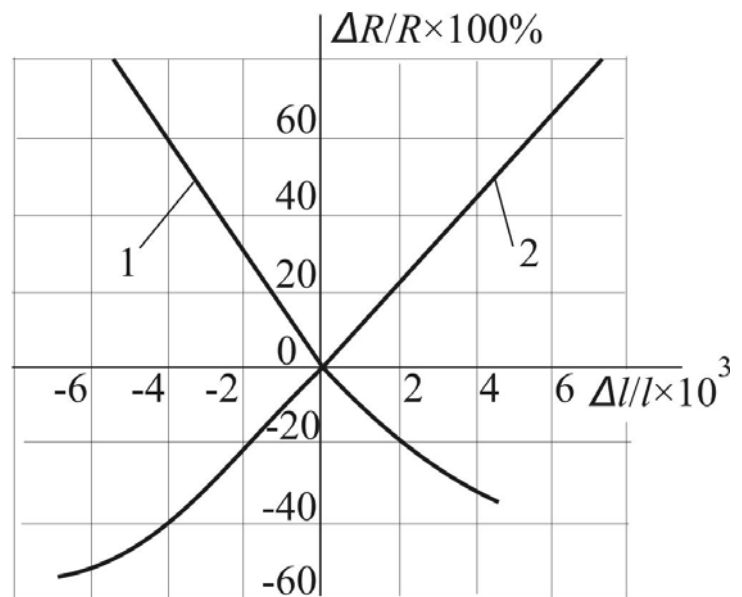


Рисунок 2.4 – Деформаційні характеристики тензорезисторів: *n*-типу (1), *p*-типу (2)

До основних параметрів тензорезистора належать його номінальний опір $R_{\text{ном}} = 100 \dots 500$ Ом і коефіцієнт тензочутливості

$$K_{\sigma} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (2.3)$$

значення якого знаходиться в діапазоні від -150 до $+150$.

2.1.5. Фоторезистори

Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого змінюється залежно від параметрів освітлення.

Матеріалом для виготовлення фоторезисторів може бути сульфід кадмію, селенід кадмію, сірковий свинець, а також полікристалічні прошарки сіркового і селенистого кадмію. Світлочутливі елементи в більшості своїй розташовують у пластикових або металевих корпусах з відповідним отвором для освітлення, але в окремих випадках, коли потрібні невеликі розміри, їх виготовляють без корпусу.

До основних характеристик фоторезисторів належать наступні:

Світлова (люкс-амперна) характеристика, що показує, як змінюється фотострум I_{ϕ} при збільшенні освітлення E з поступовим переходом у зону насичення (рис. 2.5, а).

Вольт-амперна характеристика як для темрявого струму (світловий потік $(\Phi = 0)$), так і при різному рівні освітлення $(\Phi > 0)$ (рис. 2.5, б).

Спектральна характеристика, що показує залежність чутливості фоторезистора $I_{\phi}/I_{\phi_{\max}} \cdot 100\%$ від довжини хвилі світлового потоку λ . При цьому діапазон чутливості визначається також матеріалом, з якого виготовлено фоторезистор (рис. 2.5, в).

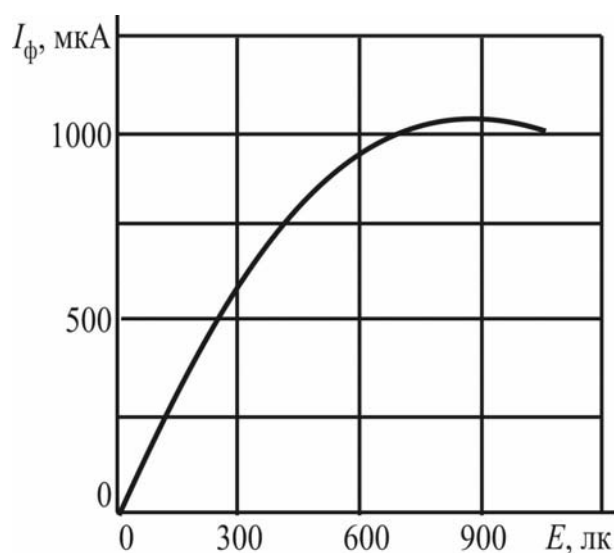
Частотна характеристика, що показує, як внаслідок інерційності фоторезистора зменшується його чутливість при збільшенні частоти струму f (рис. 2.5, г).

Загальна чутливість фоторезистора характеризується відношенням фотоструму до світлового потоку:

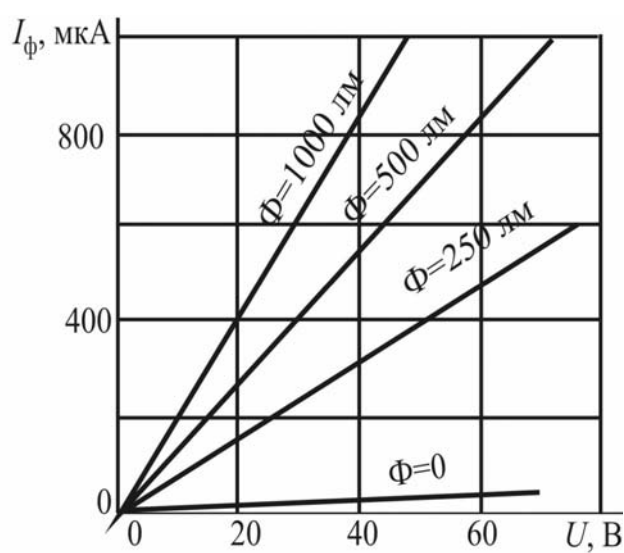
$$S = I_{\phi} / \Phi, \quad (2.4)$$

і може досягати 20 А/лм.

В останні роки фоторезистори широко застосовуються у багатьох галузях науки і техніки. Особливий інтерес викликає їх використання в оптоелектроніці.



а



б

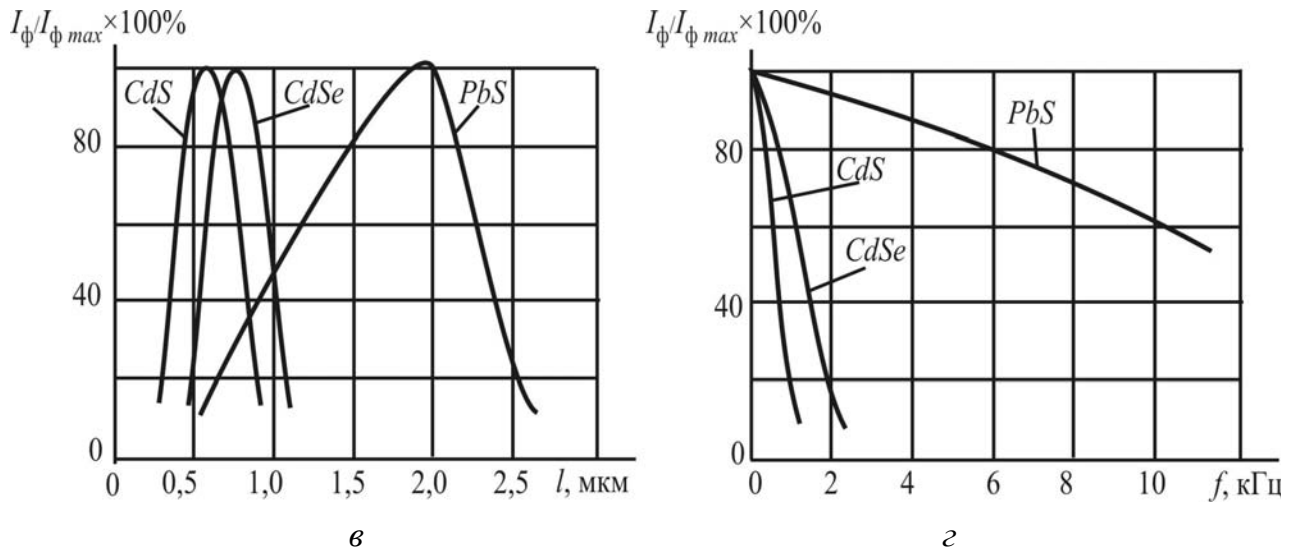


Рисунок 2.5 – Характеристики фоторезисторів: (а) – світлова; (б) – вольт-амперна; (в) – спектральна; (г) – частотна

2.2. Напівпровідникові діоди

2.2.1. 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 валентної групи з середовищ з їхніми парами. У точкових діодах $p-n$ -перехід утворюється в пластинці кремнію або германію з електропровідністю n -типу, коли в неї вплавляють сталний загострений тонкий дротик, короткочасно пропускаючи великий струм. Пластинка невелика: площа поверхні близько 1 мм^2 , товщина $0,1 \dots 0,6 \text{ мм}$.

Класифікація й умовні зображення основних напівпровідникових діодів показані на рис. 2.6.

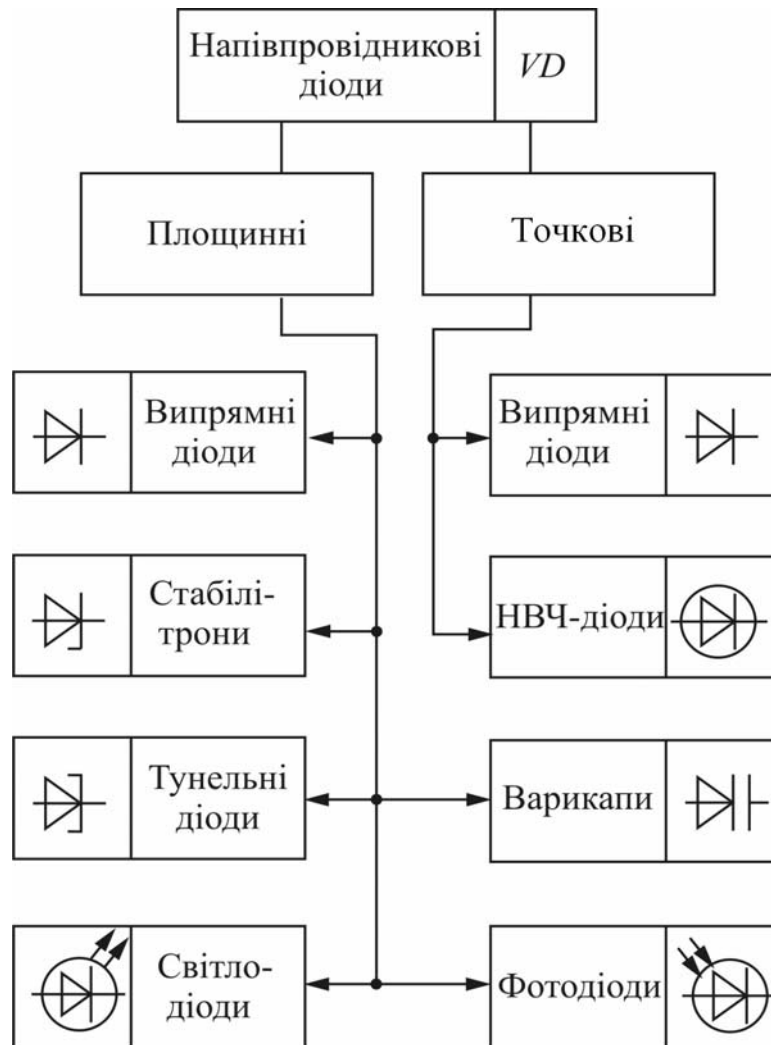


Рисунок 2.6 – Класифікація і умовні позначення напівпровідникових діодів

2.2.2. Випрямні діоди

На рис. 2.7, *а,б* наведено конструктивну схему випрямного діода разом з його умовним позначенням. Робота напівпровідникового діода, призначеного для випрямлення змінного струму, заснована на здатності *p-n*-переходу пропускати струм практично тільки в одному напрямку. Та частина напівпровідника, що має діркову провідність, зветься анодом, а та, що має електронну – катодом. Це відповідає так званому *прямому включенню* діода (рис. 2.7, *б*), коли на аноді А «плюс», а на катоді К «мінус». Відповідно, за іншої полярності буде *зворотнє включення*. Таким чином, для протікання струму до аноду слід прикласти позитивний потенціал, а до катоду – негативний.

Як видно з рис. 1.9, характеристика випрямного діода нелінійна, тому при розрахунку електричних кіл, що мають у собі діоди, останні заміщують на схемі

лінійними еквівалентами, аби була змога застосувати методи аналізу лінійних кіл. На рис. 2.7,а наведено еквівалентну схему випрямного діода, до якої входить ідеальний діод D , джерело напруги E і два резистори. Якщо замінити реальну вольт-амперну характеристику випрямного діода ломаною лінією, як це зроблено на рис. 2.7,б, то нахил лінійного відрізка AE відповідає прямому опору діода $R_{пр}$, нахил відрізка OB – зворотному опору $R_{зв}$, точка зустрічі відрізка AE з горизонтальною віссю визначає величину джерела напруги E . Діод D вказує на те, що при позитивному аноді і негативному катоді працює ліва частина еквівалентної схеми, а при зворотній полярності напруги – права.

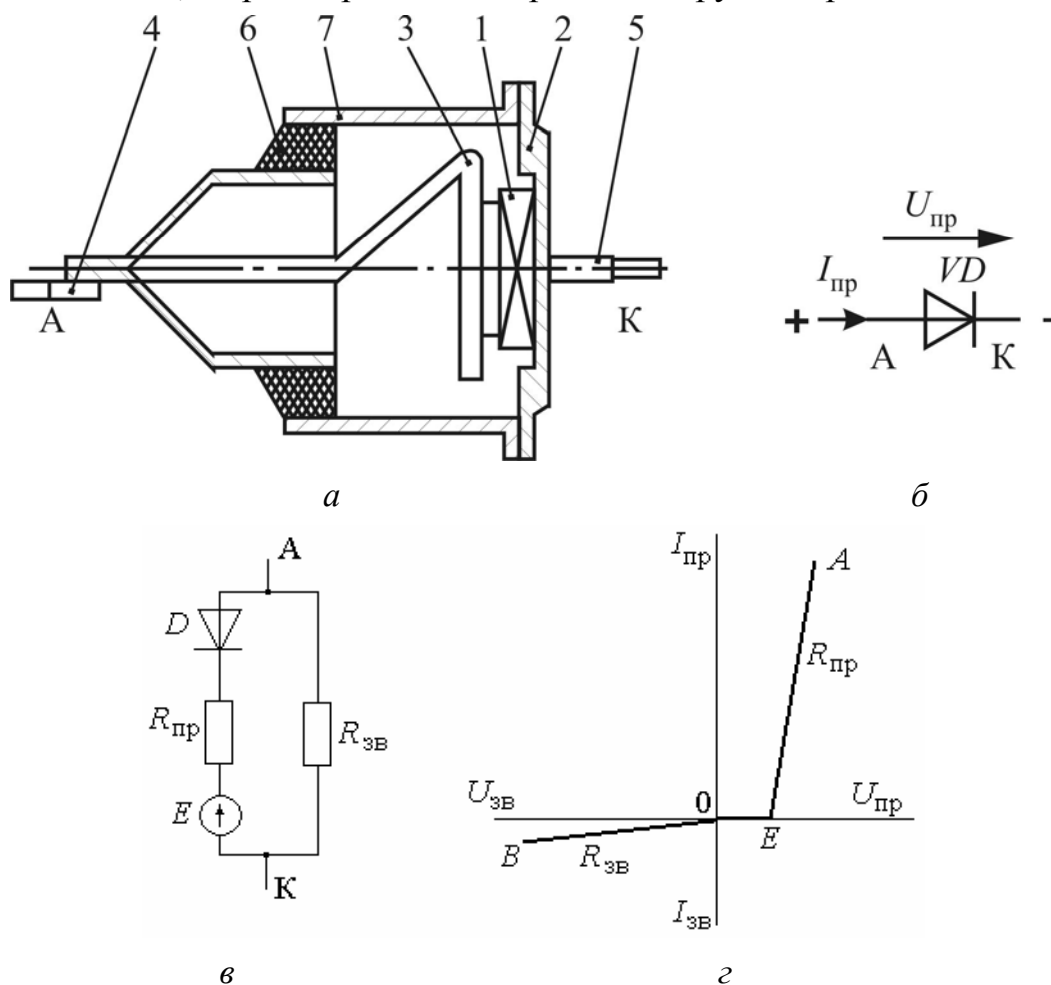


Рисунок 2.7 – Конструкція (а), умовне позначення (б), еквівалентна схема (в) і ідеалізована вольт-амперна характеристика напівпровідникового випрямного діода: 1 – пластина кристалу напівпровідника; 2 – кристалоутримувач; 3 – електрод; 4,5 – виводи (А – анод, К – катод); б – прохідний ізолятор; 7 – корпус

Основною характеристикою напівпровідникових діодів є вольт-амперна характеристика. На рис. 2.8 для порівняння наведено вольт-амперні характеристики германієвого і кремнієвого діодів.

Покажемо, що кремнієві діоди пропускають набагато менші зворотні струми і в той же час допускають набагато більші зворотні напруги порівняно з германієвими. Також є ширшим і температурний діапазон роботи кремнієвих діодів: від -60 до $+150$ $^{\circ}\text{C}$, в той час як германієвих – від -60 до $+85$ $^{\circ}\text{C}$. Однак внаслідок того, що в германієвих діодах пряме падіння напруги менше, ніж у кремнієвих, такою ж мірою менша й потужність, яка виділяється в діоді і гріє його. Тому у випрямних пристроях низької напруги більш доречні 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 $U_{\text{пр}}$ у декілька десятків вольт, то виникне неприпустимо великий прямий струм $I_{\text{пр}}$ і за декілька секунд діод розжариться та зруйнується. Але при одноразовому короткочасному включенні діод не встигне перегрітися і зруйнуватися. Як правило, напівпровідникові діоди допускають 50–100-кратне перевантаження за струмом протягом 0,1 с.

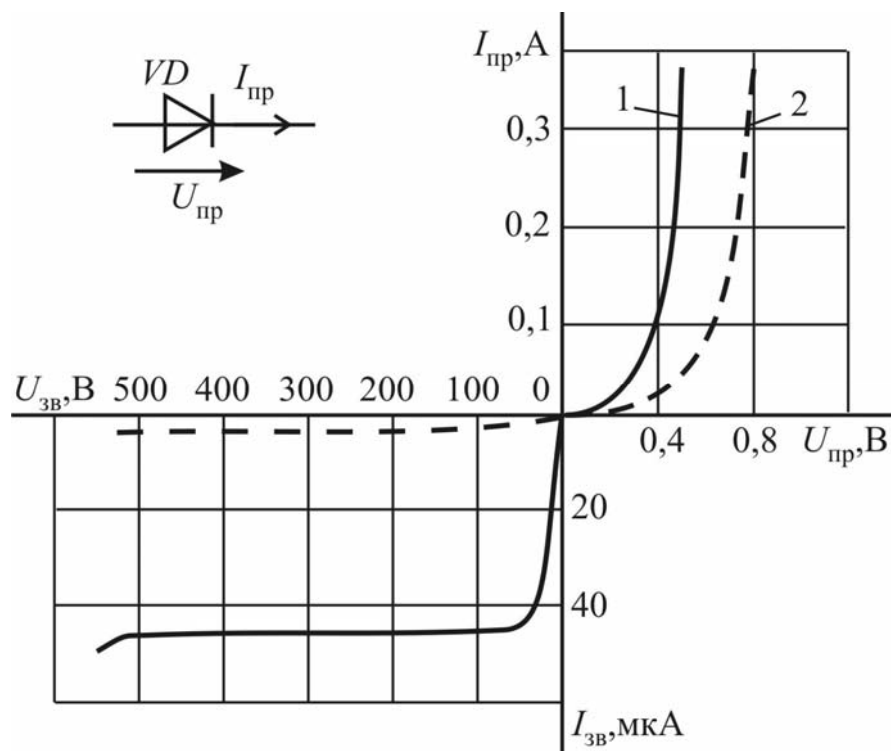


Рисунок 2.8 – Вольт-амперні характеристики германієвого (1) і кремнієвого (2) випрямних діодів

При включенні напівпровідникового діода на зворотну напругу $U_{\text{зв}}$ в ньому виникає незначний зворотний струм $I_{\text{зв}}$, зумовлений неосновними носіями електричних зарядів. Надмірне підвищення зворотної напруги може призвести до теплового пробою p - n -переходу і 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 розрахований напівпровідниковий прилад, визначається його клас. На кожні 100 В дається один клас. Наприклад, прилад 15-го класу може витримувати напругу до 1500 В. В табл. 2.1 наведено параметри випрямних діодів в залежності від потужності й умов роботи.

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

Таблиця 2.1 – Параметри випрямних діодів

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*, в яких послідовно з'єднано від 5 до 50 діодів. Зворотна напруга $U_{зв}$ таких стовпів лежить у межах 2...40 кВ.

В тому разі, коли збільшувати треба не тільки зворотну напругу, а й прямий струм, використовують *силові діодні збірки*, в яких діоди з'єднують і послідовно, і паралельно.

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

2.2.3. Напівпровідникові стабілітрони

Напівпровідниковий стабілітрон відрізняється від випрямного діода тим, що його зворотна напруга в зоні електричного пробою мало залежить від значення струму. Тому за його допомогою можна підтримувати стабільну напругу $U_{ст}$.

Вольт-амперна характеристика стабілітрона наведена на рис. 2.9. 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

$$TKU = \frac{1}{U_{ст}} \cdot \frac{dU_{ст}}{dT} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

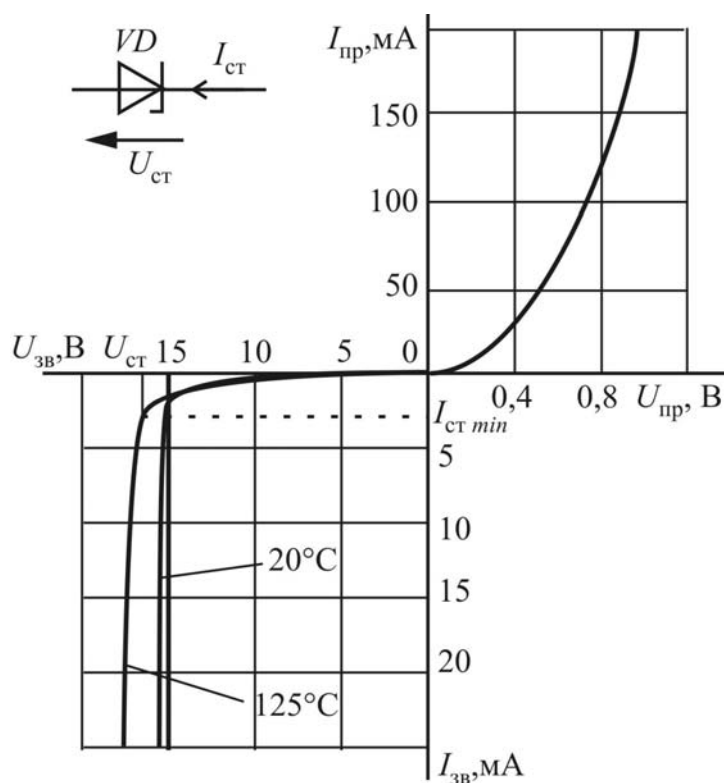


Рисунок 2.9 – Вольт-амперна характеристика стабілітрона

Стабілітрони виготовляють на напруги стабілізації від 1 до 1000 В, за зворотними струмами на ділянці стабілізації від $I_{ст\ min} \approx 1...10$ мА до

$I_{ст\ max} \approx 50...2000$ мА, тобто $\frac{I_{ст\ max}}{I_{ст\ min}} \approx 50...200$. Значення мінімального струму

$I_{ст\ min}$ обмежене нелінійною ділянкою характеристики, значення максимального струму $I_{ст\ max}$ – допустимою температурою напівпровідника.

На ділянці стабілізації $R_d \cong \text{const}$ і для більшості стабілітронів $R_d = 0,5...200$ Ом. Температурний коефіцієнт напруги TKU , що показує на скільки відсотків змінюється напруга стабілітрона при зміні температури на 1°C , для більшості стабілітронів дорівнює $(-0,05...+0,2) \%/^\circ\text{C}$, а для прецизійних стабілітронів, наприклад КС196В, досягає $\pm 0,0005 \%/^\circ\text{C}$ в діапазоні температур від -60 до $+60^\circ\text{C}$. Такі стабілітрони використовуються у перевірочних електровимірювальних приладах високого класу.

2.2.4. Напівпровідникові варикапи

Варикап – це напівпровідниковий діод, в якому ємність C залежить від зворотної напруги $U_{зв}$. Внаслідок цього його використовують як елемент з електрично керованою ємністю.

Залежність ємності варикапа від зворотної напруги показано на рис. 2.10. Основними параметрами варикапа є загальна ємність C , яка фіксується при невеликій зворотній напрузі $U_{зв} = 2...5$ В, і коефіцієнт перекриття за ємністю $K_C = C_{max} / C_{min}$. Для більшості варикапів $C = 10...500$ пФ, $K_C = 2...20$.

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

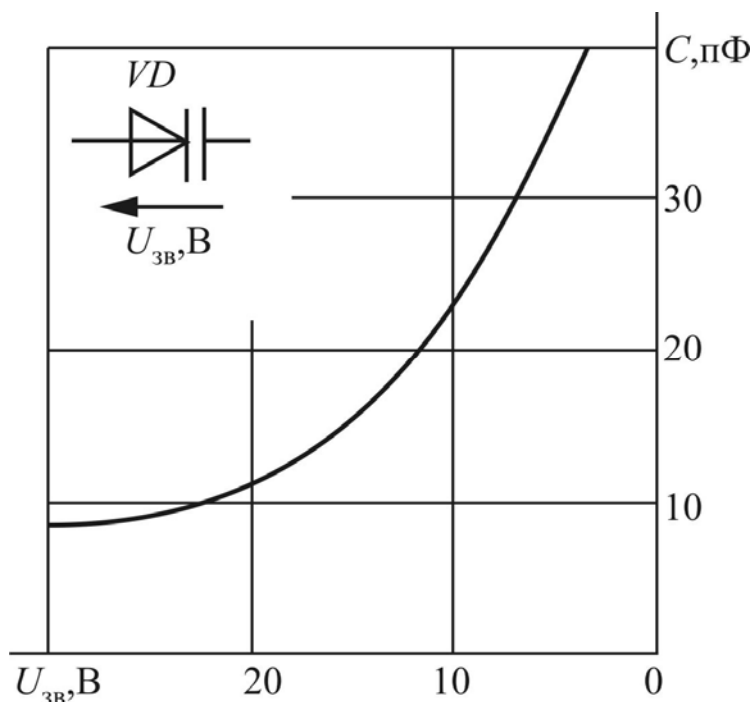


Рисунок 2.10 – Залежність ємності варикапа від зворотної напруги $U_{зв}$

2.2.5. Фото- і світлодіоди

Взаємодія оптичного випромінювання (видимого, інфрачервоного або ультрафіолетового) з носіями електричного заряду в замикаючому 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 складають приблизно $0,3 \times 0,3 \times 0,2$ мм³, а колір випромінювання залежно від домішок може

відповідати будь-якому кольору веселки: СІД – червоний; ОСІД, ЖСІД, ЗСІД, ГСІД, ССІД, ФСІД – оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий.

Ефективність світлодіода η – це відношення енергії випромінювання до електроенергії, що споживається:

$$\eta = \frac{h \cdot \nu}{e \cdot U} \eta_{\text{КВ}}, \quad (2.6)$$

де h – стала Планка ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν – частота випромінювання; e – електричний заряд електрона ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл); U – прикладена напруга;

$\eta_{\text{КВ}} = \eta_{\text{вн}} \cdot \eta_i \cdot \eta_0$ – квантовий вихід (тут $\eta_{\text{вн}}$ – внутрішній квантовий вихід люмінесценції, залежний від матеріалу кристала; η_i – коефіцієнт інжекції; η_0 – коефіцієнт виходу світла, тобто ефекту оптичної системи виводу світла за межі кристала).

Зазвичай коефіцієнт виходу світла $\eta_0 \leq 1,5$ %. Але ускладнення оптичної системи й удосконалення форми кристала (перехід від плоскої поверхні до сферичної чи еліпсоїдальної, запресовування або заливка кристала прозорою пластмасою з утворенням лінзи тощо) дозволяє збільшити коефіцієнт виходу світла η_0 до 10...30 %. Тим самим відкривається перспектива заміни освітлювальних ламп розжарювання і люмінесцентних ламп в їх традиційних галузях використання світлодіодами. Це дозволить на порядок зменшити споживання електроенергії при одночасному підвищенні надійності.

2.3. Транзистори

Транзистором називається напівпровідниковий прилад, в якому можна змінювати значення струму, що тече крізь нього, за допомогою набагато меншого струму або електричного поля. Залежно від способу керування струмом транзистори діляться на *біполярні*, *польові* та *IGBT* (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Класифікація та умовні позначення транзисторів

2.3.1. Біполярні транзистори

Біполярний транзистор структурно складається з трьох шарів з провідністю p - і n -типів, які чергуються в напівпровідниковому кристалі (рис. 2.12). Частина кристала, найбільш насичена основними носіями електричних зарядів (дірками або електронами), називається *емітером* Е. Мало насичений зарядами того ж знаку (слабо легований) шар називається *колектором* К. Розділяє емітер і колектор дуже вузький слабо легований шар з основними носіями електричних зарядів протилежного знаку. Він називається *базою* Б. Кожен з цих шарів має відповідний вивід. На рис.2.12 дірки позначені «+», а електрони «-».

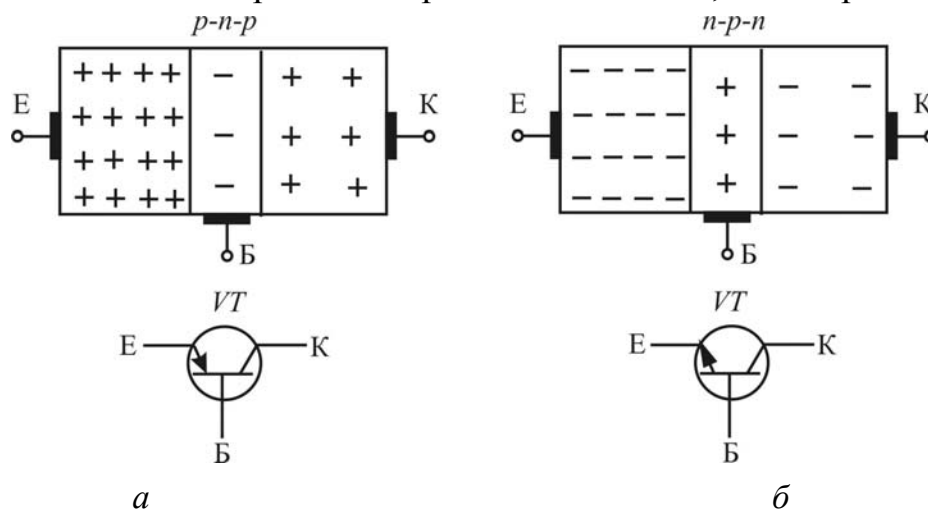


Рисунок 2.12 – Структура та умовне позначення біполярних транзисторів типів $p-n-p$ (а) і $n-p-n$ (б)

Найчастіше кристал біполярного транзистора розташовується на основі з ізолюючими втулками для виводів і закривається корпусом (рис. 2.13).

Основний струм проходить між емітером і колектором. В активному режимі вони вмикаються таким чином, що пряма напруга припадає на емітер, p - n -перехід між емітером та базою відкривається й основні носії електричних зарядів долають вузький шар бази та збираються проти p - n -переходу між базою і колектором, потенціальний бар'єр на якому заважає їхньому подальшому руху. Тому достатньо подати невелику напругу відповідного знаку 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. Поясним цей процес більш детально на прикладі p - n - p транзистора (рис.2.14).

Підключення транзистора до зовнішніх джерел живлення U_{EB} та U_{BK} призводить до зміни висоти потенціальних бар'єрів p - n -переходів. Потенціальний бар'єр емітерного переходу зменшується, а колекторного – збільшується.

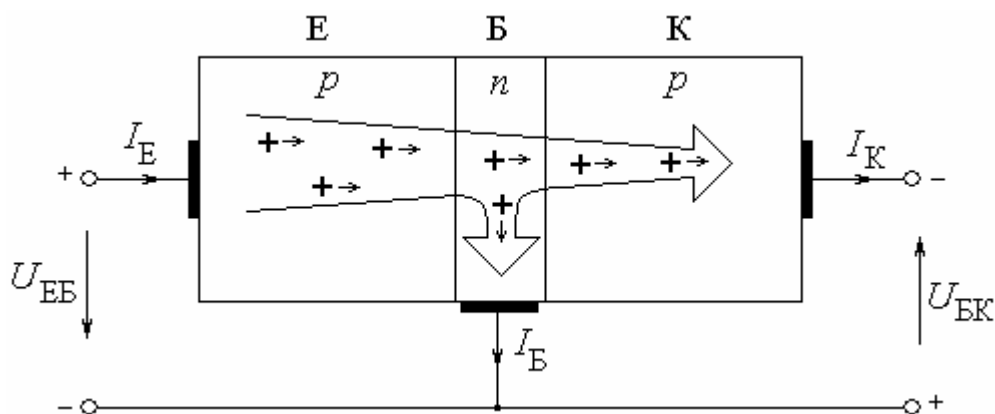


Рисунок 2.14 – До пояснення принципу роботи біполярного транзистора; дірки позначені «+»

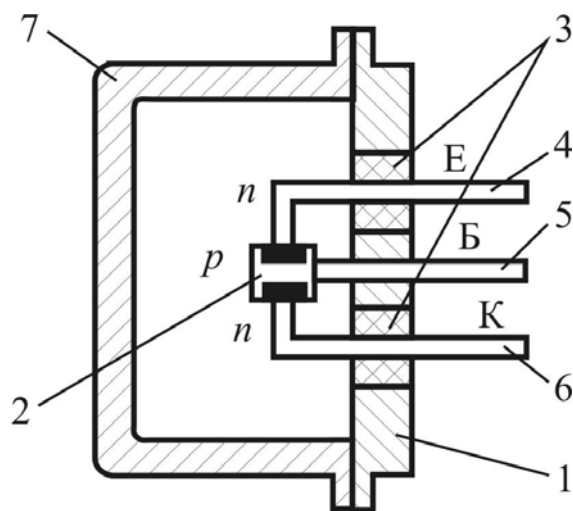


Рисунок 2.13 – Конструкція малопотужного біполярного транзистора: 1 – основа; 2 – кристал напівпровідника; 3 – ізолюючі втулки; 4, 5, 6 – виводи емітера Е, бази Б, колектора К; 7 – корпус

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

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}. \quad (2.7)$$

Якщо б концентрація дірок і 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 у транзисторах, як було зазначено вище, концентрація носіїв заряду у базі значно менша, аніж в емітері. Це призводить до того, що кількість дірок, інжектованих з емітера у базу, у багато разів перевищує кількість електронів, що рухаються у протилежному напрямку. Отже, майже увесь струм через емітерний p - n -перехід зумовлений дірками.

Інжектовані через емітерний перехід дірки проникають вглибину бази. В залежності від механізму проходження носіїв заряду в області бази відрізняють *бездрейфові* і *дрейфові* транзистори. У бездрейфових транзисторах перенесення неосновних носіїв заряду через область бази здійснюється в основному за рахунок дифузії. У дрейфових транзисторах в області бази шляхом відповідного розподілу домішок утворюється внутрішнє електричне поле і перенесення неосновних носіїв заряду через базу здійснюється в основному за рахунок дрейфу.

Дірки, потрапивши до бази, для якої вони є неосновними носіями заряду, починають рекомбінувати з електронами. Але рекомбінація – це процес не миттєвий. Тому майже усі дірки встигають пройти через тонкий шар бази і дістатися колекторного p - n -переходу, перш ніж відбудеться рекомбінація. Наблизившись до колектора, дірки підпадають під дію електричного поля колекторного переходу. Це поле для дірок є прискорювальним, тому вони у результаті екстракції швидко втягуються з бази у колектор та приймають участь у створенні струму колектора.

Взявши до уваги малий рівень рекомбінації дірок з електронами в області бази, можна вважати струм колектора I_K приблизно рівним струму емітера I_E : $I_K \approx I_E$. Ті дірки, які все ж таки рекомбінують в області бази з електронами, беруть участь у створенні струму бази I_B .

Необхідно звернути увагу на те, що хоча електрони і дірки рухаються у протилежних напрямках, струми у колах транзистора проходять в *одному напрямку*, що збігається з напрямком руху носіїв заряду позитивної поля-

лярності – дірок. Це легко зрозуміти, якщо врахувати, що протилежний напрямок руху електронів і дірок компенсується їх протилежним знаком. Отже, при утворенні струму в колах транзистора мова може іти не про різницю, а саме про суму електронної та діркової складових.

Для сучасних біполярних транзисторів коефіцієнт передачі струму з емітера до колектора

$$\alpha = I_K / I_E \quad (2.8)$$

дорівнює 0,9...0,995.

Можливими є три схеми включення біполярного транзистора з використанням одного з виводів для приєднання до входу і 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. 2.15).

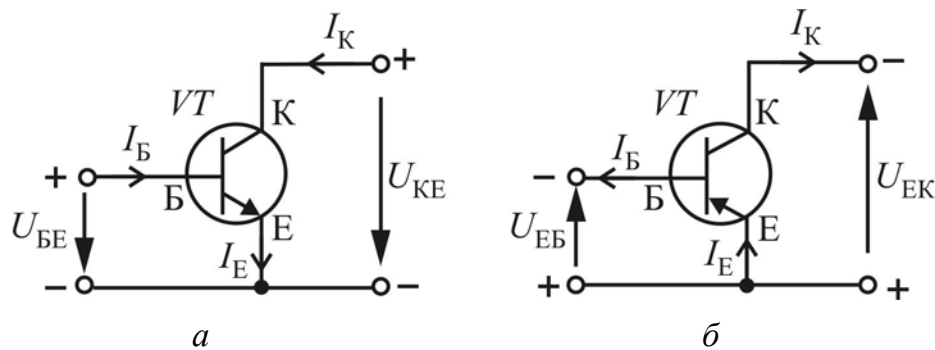


Рисунок 2.15 – Включення за схемою зі спільним емітером біполярних транзисторів типів *n-p-n* (а) і *p-n-p* (б)

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

$$I_B = I_E - I_K = (1 - \alpha)I_E \ll I_E \approx I_K. \quad (2.9)$$

Особливість схеми СЕ полягає в тому, що вхідним струмом в ній є малий струм бази, а вихідним – струм колектора. Відповідно коефіцієнт передачі струму для схеми СЕ визначається як

$$\beta = \frac{I_K}{I_B}. \quad (2.10)$$

Невелике значення струму у вхідному контурі й зумовило широке застосу-

вання схеми зі спільним емітером.

Відрізняють вхідну (базову) і вихідну (колекторну) вольт-амперні характеристики біполярного транзистора. Перша показує залежність базового струму від напруги між базою та емітером $I_B(U_{BE})$ і може вважатися незмінною при різних значеннях напруг U_{KE} . Друга – залежність колекторного струму від напруги між колектором і емітером при фіксованому значенні базового струму $I_K(U_{KE})_{I_B=\text{const}}$. Зазвичай надається набір вихідних характеристик при різних значеннях базового струму (рис. 2.16).

Для розрахунків та аналізу роботи електронних пристроїв з біполярними транзисторами використовують схему заміщення біполярного транзистора, яка побудована 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 ΔI_B , ΔU_{BE} , ΔI_K , ΔU_{KE} (рис. 2.17). Дві з цих величин можна вважати незалежними, а дві інші – їх функціями: $U_{BE} = F_1(I_B, U_{KE})$ та $I_K = F_2(I_B, U_{KE})$.

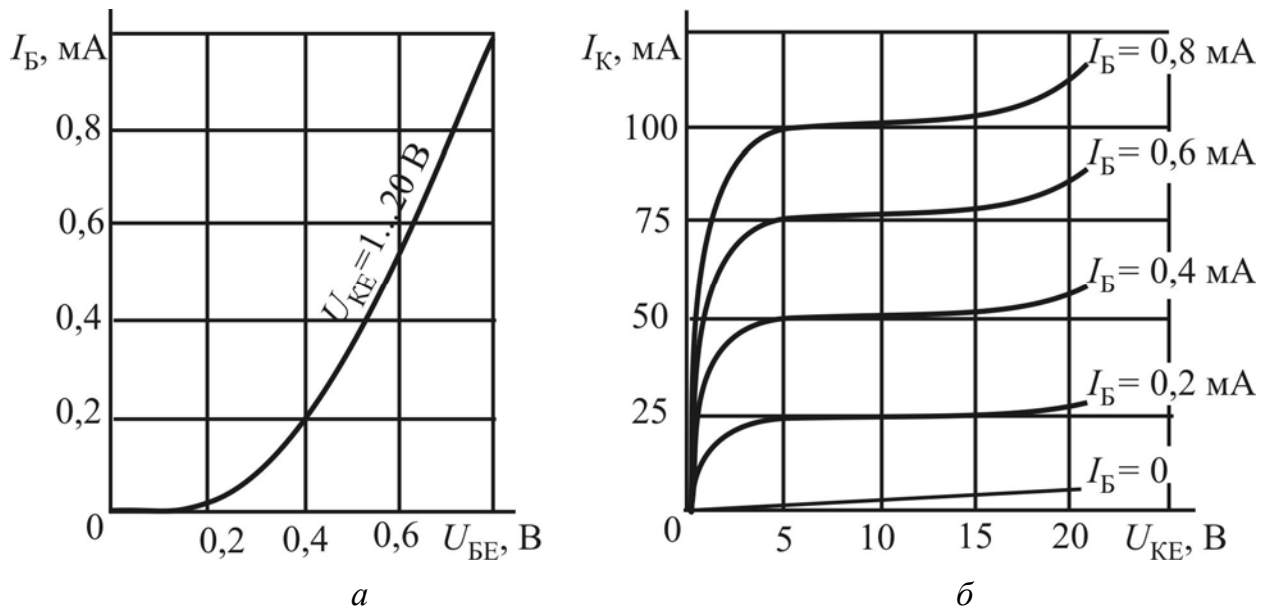


Рисунок 2.16 – Вольт-амперні характеристики біполярного транзистора:
(а) – вхідна; (б) – вихідні

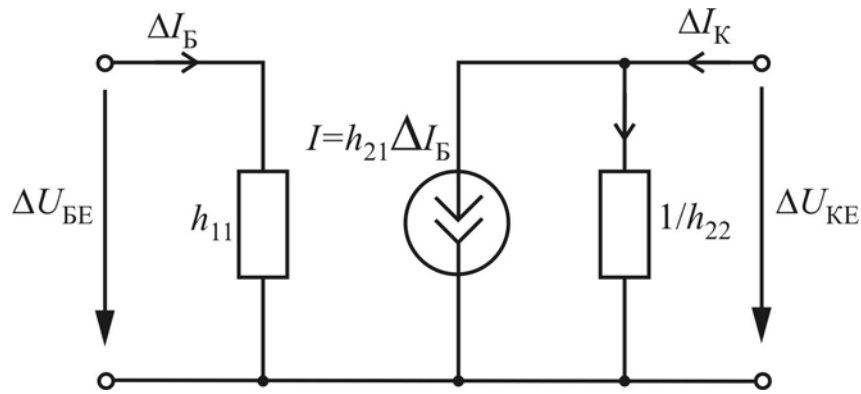


Рисунок 2.17 – Схема заміщення біполярного транзистора *p-n*-типу, включеного за схемою зі спільним емітером

В межах лінійних ділянок вольт-амперних характеристик для приростів ΔU_{BE} і ΔI_K справедливими є рівняння:

$$\Delta U_{BE} = \frac{\partial F_1}{\partial I_B} \Delta I_B + \frac{\partial F_1}{\partial U_{KE}} \Delta U_{KE}; \quad (2.11)$$

$$\Delta I_K = \frac{\partial F_2}{\partial I_B} \Delta I_B + \frac{\partial F_2}{\partial U_{KE}} \Delta U_{KE} \quad (2.12)$$

або

$$\Delta U_{BE} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{KE}; \quad (2.13)$$

$$\Delta I_K = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{KE}, \quad (2.14)$$

де коефіцієнти h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} визначаються за вхідною і вихідними вольт-амперними характеристиками:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \text{ при } U_{KE} = \text{const} \quad (\Delta U_{KE} = 0); \quad (2.15)$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{KE}} \text{ при } I_B = \text{const} \quad (\Delta I_B = 0); \quad (2.16)$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \text{ при } U_{KE} = \text{const} \quad (\Delta U_{KE} = 0); \quad (2.17)$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \text{ при } I_B = \text{const} \quad (\Delta I_B = 0). \quad (2.18)$$

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} – *коефіці-*

ент передачі за струмом, що визначає підсилювальні (щодо струму) можливості транзистора. Параметр h_{22} дорівнює вихідній провідності транзистора з незмінним струмом бази.

Визначені h - параметри покладено в основу схеми заміщення біполярного транзистора, яка містить тільки резистори і кероване джерело струму (рис. 2.17).

Діапазон робочих температур біполярних транзисторів, який визначається властивостями p - n -переходів, є таким самим, як і у напівпровідникових діодів. Особливо сильно на роботу транзисторів впливає нагрів і менш суттєво – охолодження (до -60 °C). Крім зміни значення основних параметрів транзистора, нагрів спричиняє зміщення вихідних характеристик і зміну їх нахилу, що також заважає нормальній роботі приладу.

Особливо суттєвого впливу на роботу транзистора при нагріві завдає струм $I_{КБО}$. Приблизне значення струму при нагріві можна визначити з рівняння

$$I_{КБОг} \approx I_{КБОн} e^{0,07\Delta t}, \quad (2.19)$$

де $I_{КБОг}$ – величина $I_{КБО}$ при підвищеній температурі; $I_{КБОн}$ – величина $I_{КБО}$ при нормальній температурі (20 °C); Δt – різниця температур при нагріві транзистора.

Нестабільність режиму транзистора, яка обумовлена струмом $I_{КБО}$, є дуже суттєвою, оскільки зворотний струм колектора у значній мірі впливає на струми емітера і 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 °C. З цією ж метою використовують и ряд нових напівпровідникових матеріалів, з яких значний інтерес викликає карбід кремнію. Прилади, що виготовлені на карбіді кремнію, зможуть нормально працювати до температур 500...600 °C.

На частотні властивості транзисторів великий вплив мають 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 емітер-

ний і колекторний переходи. Особливо шкідливого впливу на роботу транзистора завдає ємність C_K , оскільки на високих частотах ємнісний опір $\frac{1}{\omega_B C_K}$ виявляється значно меншим, ніж активний опір R_K , і колекторний перехід втрачає свої основні властивості.

Другою причиною погіршення роботи транзистора на високих частотах є відставання по фазі змінного струму колектора від змінного струму емітера. Це обумовлено інерційністю процесу проходження носіїв заряду через базу від емітерного переходу до колекторного, а також інерційністю процесів накопичення та розсіювання зарядів у базі.

Час прольоту носіїв через базу $\tau_{пр}$ у звичайних транзисторів становить приблизно 0,1 нс. Звичайно, цей час дуже малий, але на частотах порядку одиниць – десятків мегагерц 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 враховувати 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 у різний час. Таким чином, закон змінення струму колектора може не відповідати закону змінення струму емітера, що призводить до викривлення підсилюваного сигналу.

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

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\alpha}\right)^2}}, \quad \beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}, \quad (2.20)$$

де α_0 і β_0 – коефіцієнти підсилення за струмом при частоті $f = 0$; f_α і f_β – граничні частоти транзистора в схемах зі спільною базою і спільним емітером відповідно.

Таким чином, з підвищенням частоти струму транзистора зменшується коефіцієнт передачі за струмом h_{21} . На практиці *граничною частотою* $f_{гр}$ вважається така, при якій h_{21} зменшується у $\sqrt{2}$ рази.

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

В табл. 2.2 наведено класифікацію та параметри біполярних транзисторів.

Таблиця 2.2 – Параметри біполярних транзисторів

Тип транзистора	Параметри			
	$U_{KE \max}$, В	$I_{K \max}$, А	h_{21}	$f_{гр}$, МГц
Малопотужні	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

2.3.2. Польові транзистори

Польовий транзистор побудований 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 і кількість електричних зарядів можуть змінюватись, завдяки чому здійснюється керування струмом між електродами.

Конструктивно польові транзистори поділяються на дві групи:

- польові транзистори з керованими *p-n*-переходами (канальні або уніполярні транзистори);
- польові транзистори з ізольованим затвором (МДН- або МОН-транзистори), які, в свою чергу, поділяються на польові транзистори з вбудованим каналом та індукованим каналом (назви транзисторів розшифровуються таким чином: МДН – метал-діелектрик-напівпровідник, МОН – метал-оксид-напівпровідник).

Принципову конструктивна схема, умовне позначення і порядок включення польового транзистора з керованими *p-n*-переходами зображено на рис. 2.18. Тонкий шар напівпровідника *n*- або *p*-типу, обмежений з обох сторін напівпровідником протилежного типу, і є так званим *каналом*.

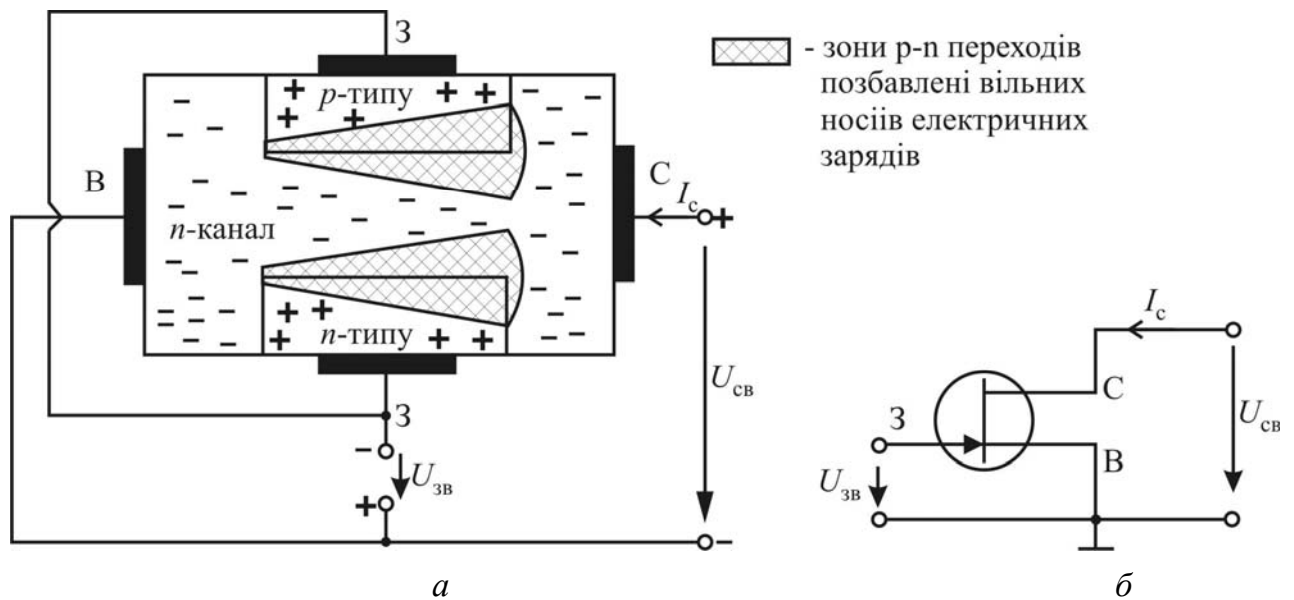


Рисунок 2.18 – Структура (а), умовне позначення і схема включення (б) польового транзистора з керованими *p-n*-переходами і *n*-каналом

Він підключається до електричного кола за допомогою двох електродів: *стік* (C) і *витік* (B). До напівпровідників протилежного типу, завдяки яким канал проходить між двома *p-n*-переходами, приєднуються керуючі електроди – *затвори* (3). Значення струму в каналі залежить від напруги між стоком і витком U_{CB} 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, затискується канал. Зростає його опір, зменшується стоковий струм I_C (рис. 2.19). Внаслідок того, що за нормальної схеми 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 дуже малий (табл. 2.3). Керування транзистором здійснюється не струмом, а напругою, що зводить енерге-

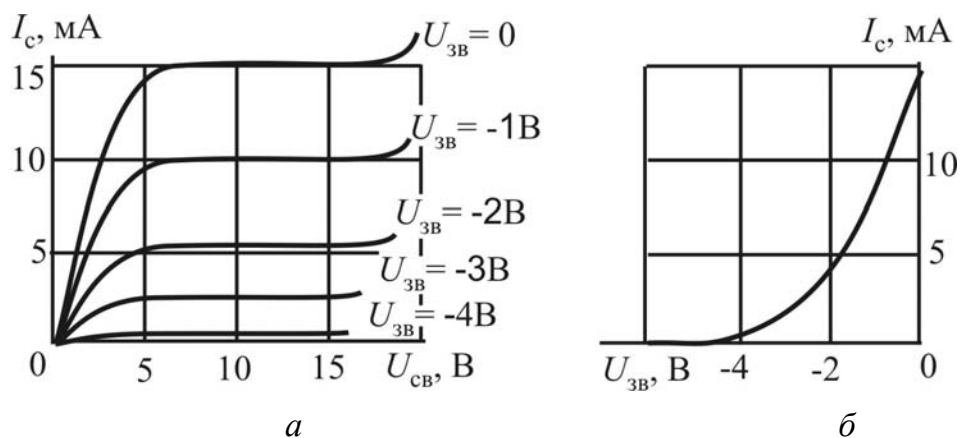


Рисунок 2.19 – Вольт-амперні характеристики польового транзистора з *n*-каналом: (а) вихідні; (б) передаточні

вання транзистором здійснюється не струмом, а напругою, що зводить енерге-

тичні витрати на керування майже до нуля.

Таблиця 2.3 – Параметри польових транзисторів

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 ізолюваним затвором	10...1000	10^{-4} ...5,0	10^{-9} ... 10^{-4}
Транзисторні збірки (типу $IGBT$)	1000...6000	100...3000	10^{-4} ... 10^{-1}

Ще менший струм тече через затвор у польовому транзисторі з ізолюваним затвором, вхідний опір якого досягає 10^{12} ... 10^{14} Ом. За конструктивну основу такого транзистора править пластинка (підкладка) монокристалічного кремнію p -типу, якщо канал є n -типу (рис. 2.20), або навпаки. Области стоку С і витоку В сильно, а канал – слабо легуються домішками протилежного типу до монокристалічного кремнію. Відстань між витоком і стоком становить приблизно 1 мкм, а глибина каналу є ще меншою. Затвором З служить металева пластинка, ізолювана від каналу діелектриком (транзистор типу МДН) або оксидною плівкою (транзистор типу МОН) товщиною до 0,1 мкм.

В основі роботи транзистора подібної конструкції лежить ефект впливу

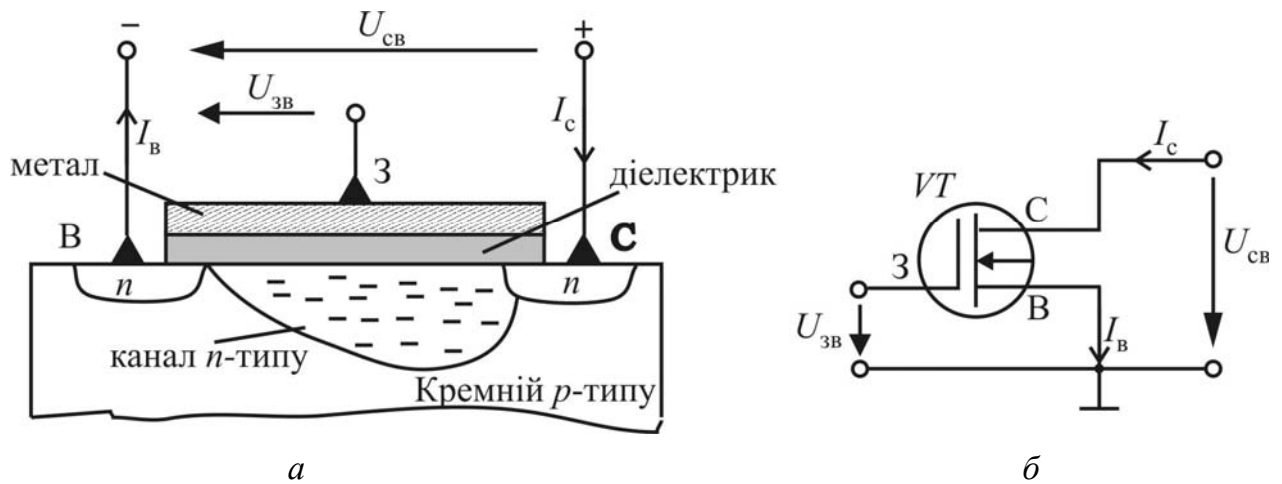


Рисунок 2.20 – Структура (а), умовне позначення і схема включення (б) польового транзистора з n -каналом та ізолюваним затвором

електричного поля на електричні заряди. Залежно від полярності прикладеної до затвора напруги канал може збіднюватися (заряди витискуються з каналу в підкладку) або збагачуватися (заряди втягуються в канал з підкладки) на вільні носії електричних зарядів.

В режимі збіднення струм в каналі зменшується, в 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 позитивною напругою на затворі (рис. 2.21, *a*).

Більш того, якщо зовсім не легувати канал, а індукувати його, втягуючи, наприклад, електричним полем від позитивного потенціалу на затворі електрони з кремнієвої підкладки p -типу, то транзистор пропускатиме струм тільки в режимі збагачення. Це дуже зручно, тому що за відсутності напруги на затворі транзистор буде гарантовано закритий. Він відкриється тільки після подолання деякого порогового значення напруги (рис. 2.21, *б*).

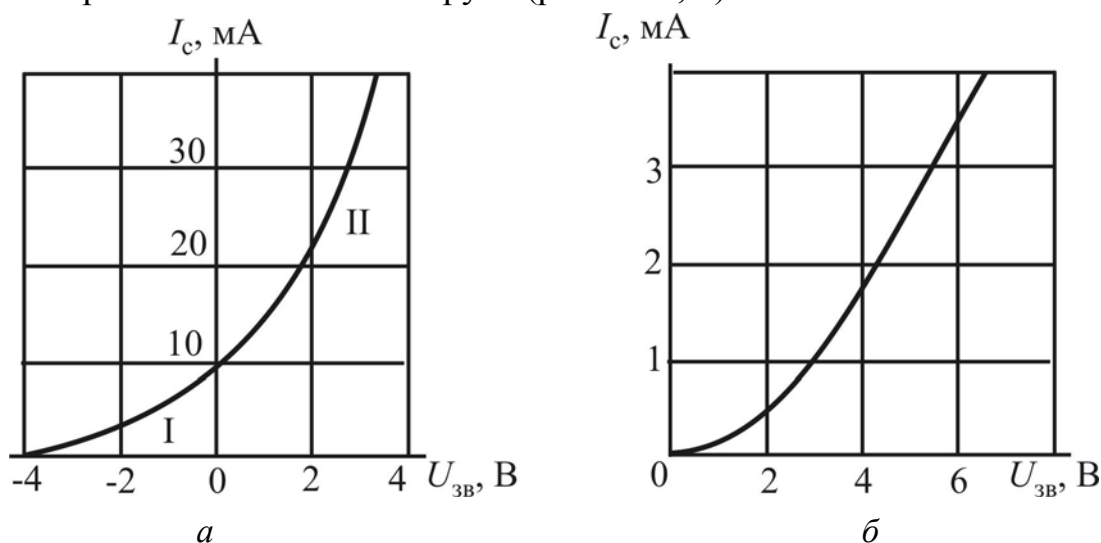


Рисунок 2.21 – Вольт-амперні характеристики польових транзисторів з ізольованим затвором: (*a*) – із початковим каналом n -типу (I – режим збіднення; II – режим збагачення); (*б*) – з індукованим каналом n -типу

2.3.3. IGBT-транзистори

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

На рис. 2.22 показано базову комірку *IGBT* транзистора та її дещо спрощену структурну схему. Принцип дії зображеного електронного ключа полягає в тому, що поки на затвор Z не подана позитивна напруга, канал МДН-

транзистора є перекритим і на базу біполярного транзистора $p-n-p$ не подається струм. Відповідно, він залишається теж закритим і не пропускає струм від колектора K до емітера E , між якими утримується велика напруга ($IGBT$ закритий).

При подачі на затвор позитивної напруги (кілька вольт) з шару p в канали МДН-транзисторів втягуються електрони і утворюється шлях для проходження струму на базу біполярного транзистора, який відкривається і починає пропускати основний струм. Напруга між колектором та емітером падає до $1...2$ В ($IGBT$ відкритий).

Внаслідок того що підвищення температури $IGBT$ по-різному впливає на опори біполярного транзистора і МДН-транзисторів, загальний температурний коефіцієнт в зоні робочих струмів є позитивний, що дозволяє зберігати переваги польового транзистора (збільшення температури не призводить до збільшення струму). При великій кількості паралельно з'єднаних комірок вкрай важливо, щоб зростання температури не призводило до зменшення їх опору, в протилежному разі одна з комірок почне пропускати все більший струм, проб'ється і закоротить всю збірку.

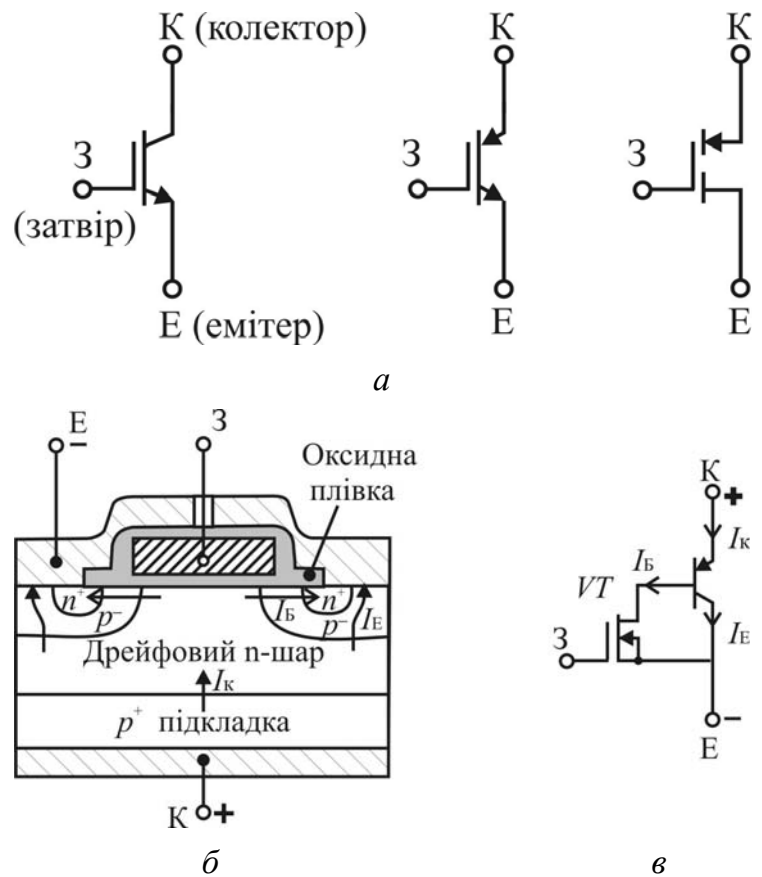


Рисунок 2.22 – Транзистор $IGBT$: умовні позначення (а); структура базової комірки (б); спрощена схема (в)

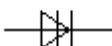
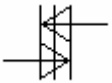
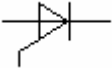
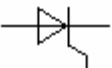
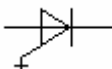
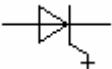
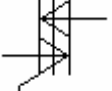
2.4. Тиристори

Тиристором називається напівпровідниковий прилад вентиляного типу, який відкривається для пропускання електричного струму при досягненні поро-

гового значення напруги між анодом і катодом або за умови подачі невеликої напруги на керуючий електрод.

Для виготовлення тиристорів використовують кремній, в якому створюються прошарки, що чергуються, напівпровідників p - і n -типів. Зазвичай таких прошарків чотири з трьома p - n -переходами. Умовні позначення основних типів тиристорів наведено в табл. 2.4. Структуру й умовні позначення двох видів тиристорів – діодного з двома виводами (*диністора*) і тріодного з іще одним, керуючим, електродом (*триністора*) – показано на рис. 2.23.

Таблиця 2.4 – Умовні позначення тиристорів

Позначення	Назва
	– диністор
	– симетричний диністор (діак)
	– тиристор з керуванням за анодом
	– тиристор з керуванням за катодом
	– замикаючий анодний триністор
	– замикаючий катодний триністор
	– симетричний триністор (симістор)

При включенні 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 в переході і зменшують тим самим його ширину.

При досягненні певного рівня прямої напруги $U_{\text{вкл}}$ на тиристорі ширина

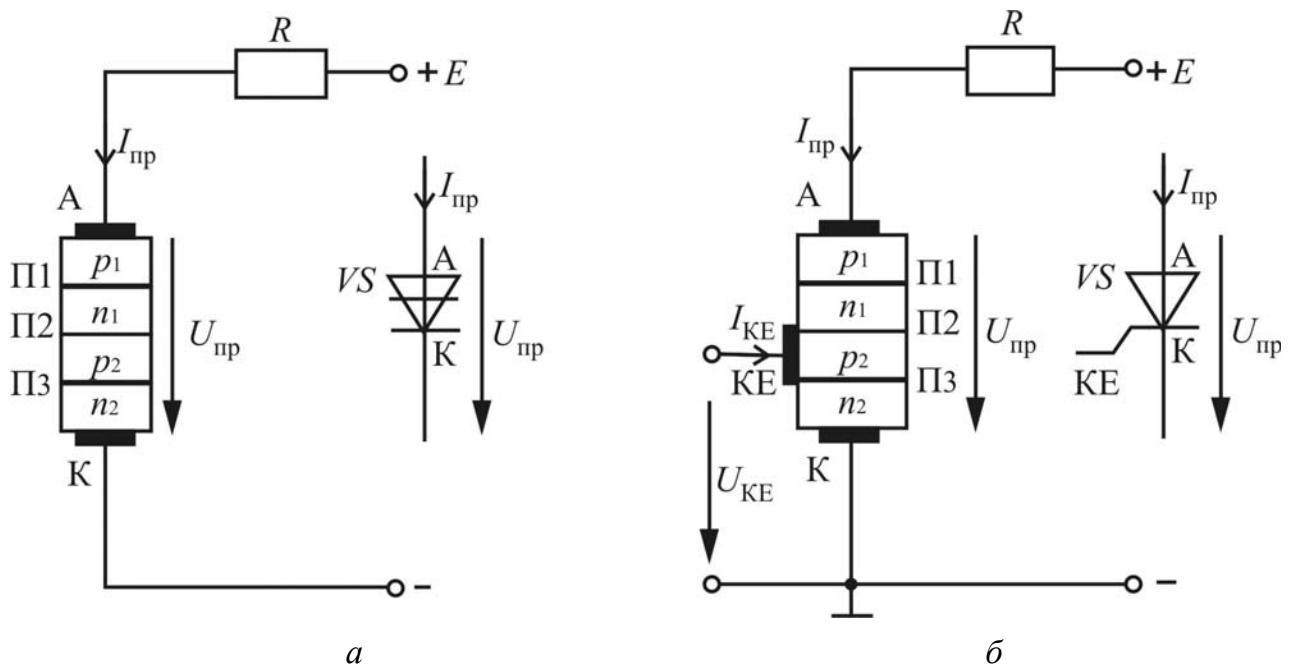


Рисунок 2.23 – Структура і умовні позначення диністора (а) і триністора (б):
 А – анод; К – катод; КЕ – керуючий електрод

переходу П2 стає близькою до нуля, і він відкривається для основних носіїв електричних зарядів, концентрація яких зростала з підвищенням напруги. Починається їх лавиноподібний рух, внаслідок 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 «включення» тиристора (рис. 2.24).

Напруга $U_{\text{вкл}}$, при якій відпирається тиристор, може бути зменшена шляхом введення додаткових неосновних носіїв електричних зарядів у будь-який з прошарків побіч 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 використовують керуючий електрод (див. рис. 2.23, б), який живиться від незалежного джерела напруги.

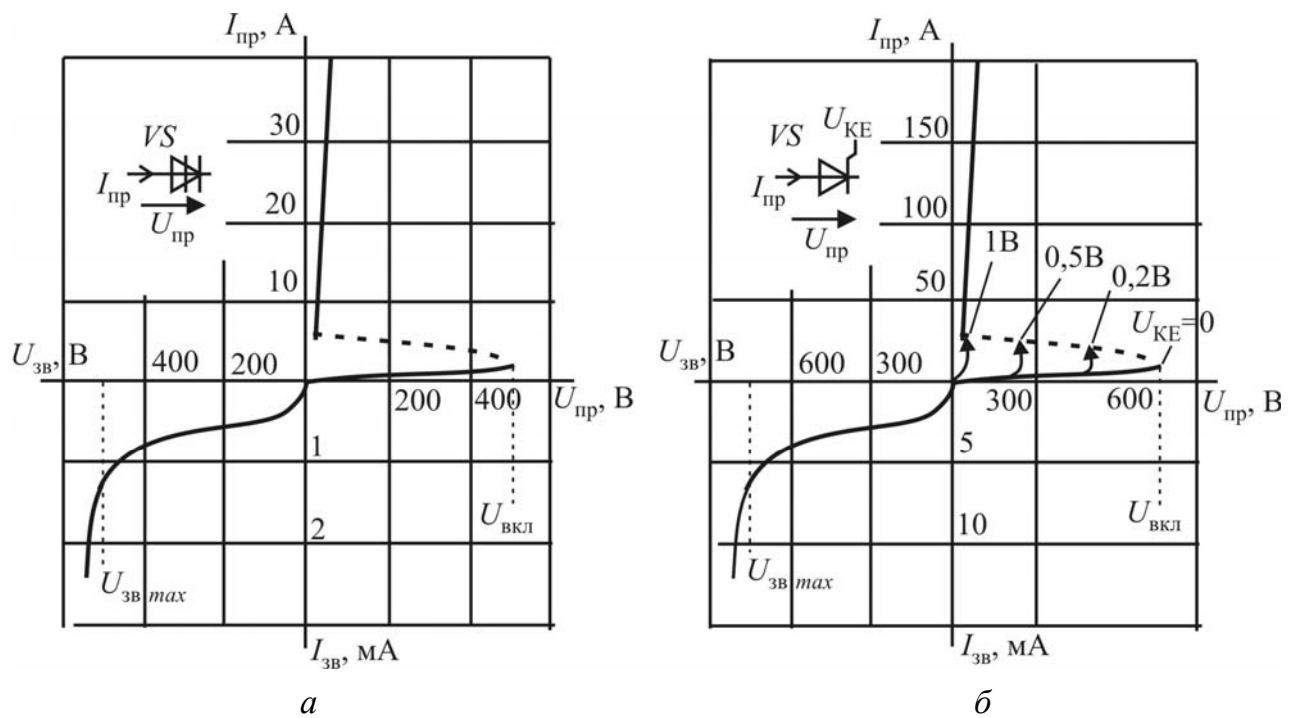


Рисунок 2.24 – Вольт-амперні характеристики диністора (а) і триністора (б)

Якою мірою знижується пробивна напруга залежно від напруги U_{KE} на керуючому електроді, ілюструє сімейство кривих на рис. 2.24, б. Якщо буде зменшений до нуля прямий струм і прикладена зворотна напруга, 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 $U_{зв\ max}$ (рис. 2.24).

Тиристри, що запираються, закриваються коротким імпульсом зворотної напруги, яка подається на керуючий електрод.

Структури некерованих симетричних тиристорів показано на рис. 2.24.

В п'ятишаровій конструкції тиристора (рис. 2.25, а) при полярності прикладеної напруги (без дужок) працює ліва половина приладу (напрямок руху електронів показано стрілкою зверху вниз). При зворотній полярності напруги (показано у дужках) струм

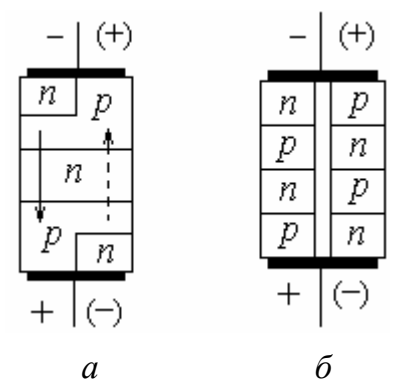


Рисунок 2.25 – Структури симетричних тиристорів

іде в зворотному напрямку через праву половину приладу (напрямок руху електронів показано стрілкою знизу вгору).

Роль симетричного тиристора можуть виконувати два діодних тиристори, які включено зустрічно-паралельно (рис. 2.25, б). Керовані симетричні тиристори мають виводи від відповідних базових областей.

Тиристори використовують в керованих випрямлячах та інверторах як малої, так і великої потужності, в комутаційній апаратурі різного роду. Виготовляють тиристори на струми до 2000 А і напруги включення до 4000 В, тобто вони конкурентоспроможні 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

1. Назвіть основні типи напівпровідникових приладів та укажіть кількість *p-n*-переходів у них.
2. Наведіть класифікацію та умовні позначення напівпровідникових резисторів
3. Який параметр найбільш істотно впливає на опір і вольт-амперні характеристики варисторів, терморезисторів, тензорезисторів і фоторезисторів?
4. Що таке варистор? Накресліть його вольт-амперну характеристику. Що таке коефіцієнт нелінійності варистора? Де використовують варистор?
5. Що таке терморезистор? Накресліть температурні характеристики термістора і позистора. Що таке температурний коефіцієнт опору? Де використовують терморезистори?
6. Що таке тензорезистор? Накресліть деформаційні характеристики тензорезисторів *n*- і *p*-типу. Що таке коефіцієнт тензочутливості? Де використовують тензорезистори?
7. Що таке фоторезистор? Накресліть світлову і вольт-амперну характеристики фоторезисторів. Що таке загальна чутливість фоторезистора? Де застосовуються фоторезистори?
8. Що таке напівпровідниковий діод? Наведіть класифікацію та умовні позначення напівпровідникових діодів.
9. Що таке випрямний діод? Накресліть його умовне позначення і вольт-

амперну характеристику. Де застосовуються випрямні діоди?

10. Що таке напівпровідниковий стабілітрон? Накресліть його умовне позначення і вольт-амперну характеристику. Де застосовуються напівпровідникові стабілітрони?

11. Що таке напівпровідниковий варикап? Накресліть його умовне позначення і характеристику залежності ємності варикапа від зворотної напруги. Де використовують варикапи?

12. Що таке фото- і світлодіоди? Накресліть їх умовні позначення. Де використовують фото- і світлодіоди?

13. Що таке транзистор? Наведіть класифікацію та умовні позначення транзисторів.

14. Накресліть структуру та умовне позначення біполярних транзисторів $p-n-p$ і $n-p-n$ -типів. Позначте основні елементи.

15. Назвіть і наведіть схеми включення біполярного транзистора.

16. Зобразіть вхідну і вихідну вольт-амперні характеристики біполярного транзистора, включеного за схемою зі спільним емітером.

17. Що являють собою h -параметри біполярного транзистора?

18. Накресліть структуру, умовне позначення і схему включення польового транзистора з керованими $p-n$ -переходами.

19. Наведіть структуру, умовне позначення і схему включення польового транзистора з n -каналом і ізольованим затвором.

20. Що таке $IGBT$ транзистор? Наведіть умовне позначення, структуру базової комірки і спрощену схему транзистора $IGBT$.

21. Що таке тиристор? Наведіть структуру та умовні позначення диністора і триністора. Де використовують тиристори?

22. Поясніть принцип дії диністора і триністора. Накресліть їх вольт-амперні характеристики.

РОЗДІЛ 3

ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЖИВЛЕННЯ

Параметри струму головного джерела електричної енергії (наприклад, електромережі) не завжди збігаються з тими, що потрібні для живлення як окремих електротехнічних і електронних приладів та пристроїв, так і тих, що входять до складу систем та комплексів. Тому для отримання струму потрібного виду і з потрібними параметрами застосовують перетворювачі електричної енергії, які по відношенню до основного джерела живлення називаються *джерелами вторинного живлення* (ДВЖ). Крім широко відомих трансформаторів, до них відносяться *випрямлячі*, що перетворюють змінний струм на постійний, *інвертори*, що перетворюють постійний струм на змінний, *помножувачі напруги*, що здатні у скільки завгодно разів підвищувати вхідну напругу, перетворюючи її зі змінної на постійну.

Джерела вторинного живлення поділяються в залежності від напруги на виході на ДВЖ низької (до 100 В), середньої (100...1000 В) і високої (більше 1000 В) напруги, а за потужністю навантаження – на ДВЖ невеликої (до 100 Вт), середньої (100...1000 Вт) і великої (більше 1000 Вт) потужності.

3.1. Випрямлячі

3.1.1. Загальні поняття і відомості про випрямлячі

Найбільш поширеним джерелом вторинного живлення можна вважати випрямляч, повну структурну схему якого зображено на рис. 3.1. На вхід випрямляча подається однофазний або багатофазний (найчастіше трифазний) змінний

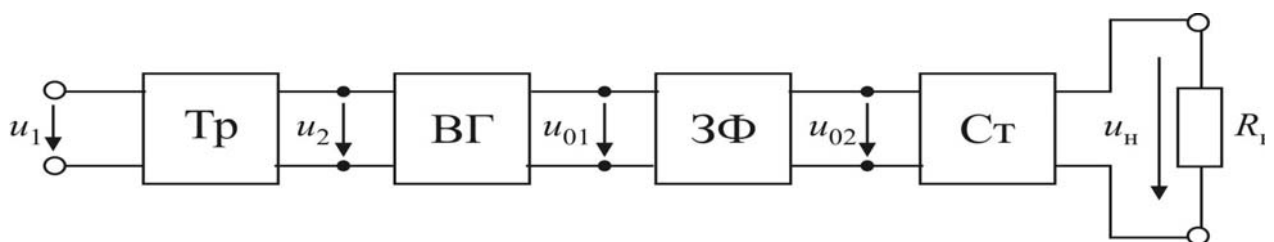


Рисунок 3.1 – Структурна схема випрямляча: Тр – трансформатор; ВГ – вентильна група; ЗФ – згладжувальний фільтр; Ст – стабілізатор постійної напруги

струм з напругою u_1 . За допомогою трансформатора Тр напруга змінюється до потрібної u_2 , а далі вентиляною групою (ВГ) (або одним вентиляем) перетворюється на випрямлену пульсуючу напругу u_{01} .

Напруга u_{01} , крім сталої складової, містить в собі ще цілий ряд гармонік змінного струму, які за допомогою згладжувального фільтра ЗФ можна зменшувати до потрібного рівня. Тому напруга u_{02} на виході фільтра майже не має пульсацій. І нарешті, щоб підтримувати незмінною напругу u_n на навантаженні R_n , ставиться блок стабілізації Ст.

Залежно від умов роботи випрямного пристрою і вимог до нього можуть бути відсутні його окремі блоки, наприклад, трансформатор (якщо напруга електричної мережі відповідає потрібному значенню випрямленої напруги), або згладжувальний фільтр чи блок стабілізації (якщо немає обмежень величини пульсацій). Обов'язковим блоком завжди є вентиляна група.

Випрямлячі бувають *некеровані* і *керовані*. У перших вентиляна група складається з діодів, а випрямлена напруга має якесь одне значення і не змінюється. У керованих випрямлячів вентиляна група має в своїй основі тиристори або транзистори, це дозволяє за необхідності змінювати значення випрямленої напруги.

Робота випрямляча істотно залежить від характеру навантаження. Випрямлячі невеликої потужності найчастіше працюють на активне та активно-ємнісне навантаження, випрямлячі середньої і великої потужності – на активно-індуктивне навантаження. Робота з проти-ЕРС має місце тоді, коли випрямляч живить двигун постійного струму або заряджає акумулятор.

Основні електричні параметри випрямляча:

- середні значення випрямлених струму і напруги $I_{н\text{ ср}}, U_{н\text{ ср}}$;
- максимальне значення зворотної напруги діода $U_{зв\text{ max}}$;
- потужність навантаження $P_{н\text{ ср}} = U_{н\text{ ср}} I_{н\text{ ср}}$;
- амплітуда основної гармоніки випрямленої напруги $U_{осн\text{ m}}$;
- коефіцієнт пульсації випрямленої напруги $p = U_{осн\text{ m}} / U_{н\text{ ср}}$;
- діючі значення струмів і напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора I_1, U_1, I_2, U_2 ;
- типова потужність трансформатора $S_{\text{тр}} = 0,5(S_1 + S_2)$, де $S_1 = U_1 I_1$, а

$$S_2 = U_2 I_2;$$

- коефіцієнт корисної дії (ККД) $\eta = P_{\text{н.ср}} / (P_{\text{н.ср}} + P_{\text{тр}} + P_{\text{в}})$, де $P_{\text{тр}}$ – втрати у трансформаторі; $P_{\text{в}}$ – втрати у вентилях.

3.1.2. Однофазні некеровані випрямлячі

Розглянемо роботу некерованих випрямлячів на активне навантаження, зосередившись на перетворенні струму у вентиляльній групі.

Будемо вважати, що робота трансформатора і діодів близька до ідеальної, тобто якщо трансформатор увімкнений на синусоїдальну напругу, то ЕРС вторинної обмотки теж синусоїдальна, прямий опір відкритого діода дорівнює нулю, закритий діод розриває електричне коло. Спрацьовує діод миттєво. Згладжування пульсацій і стабілізацію напруги та струму розглянемо окремо.

Розрізняють три типи випрямлячів однофазного змінного струму: *однопівперіодний, двопівперіодний з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора, двопівперіодний мостовий.*

Схему однопівперіодного випрямляча наведено на рис. 3.2, а.

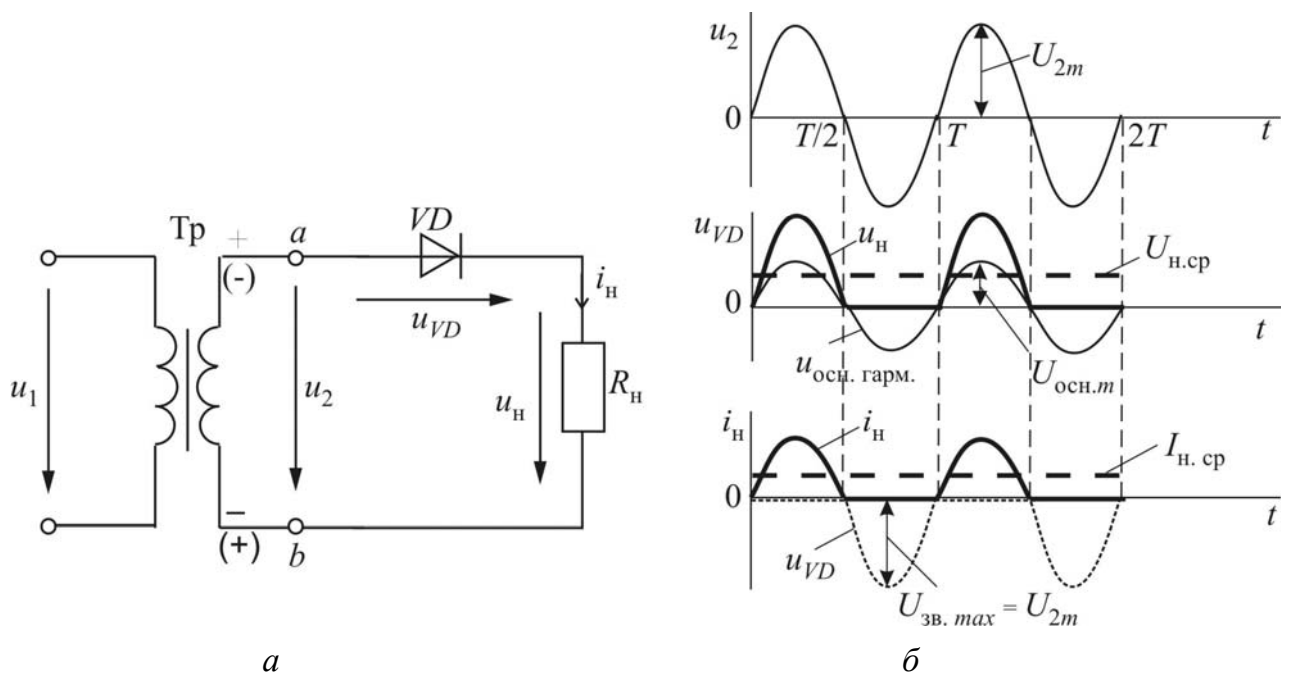


Рисунок 3.2 – Схема (а), часові діаграми напруг і струмів (б) однопівперіодного однофазного випрямляча

Однопівперіодний випрямляч складається з трансформатора Тр , до вторинної обмотки якого послідовно приєднано діод VD і навантаження $R_{\text{н}}$. Якщо в першому півперіоді потенціал точки a вище потенціалу точки b , то діод знахо-

диться під прямою напругою і через R_H проходить струм $i_H = \frac{u_2}{R_H}$, а $u_H = R_H \cdot i_H = u_2$. У наступному півперіоді потенціали точок a і b змінюються на зворотні, діод підпадає під зворотну напругу і розриває електричне коло. Струм i_H стає нульовим, відповідно $u_H = R_H \cdot i_H = 0$, вся напруга u_2 прикладається до діода, а її максимальне значення дорівнює амплітудному значенню U_{2m} .

Щоб не сталося пробою діода, його треба обирати на максимально допустиму напругу $U_{\text{мах доп}}$ з приблизно 30 % запасом: $U_{\text{мах доп}} \geq 1,3U_{2m}$. Середнє значення випрямленого струму має бути не більше допустимого середнього значення прямого струму: $I_{\text{пр ср}} > I_{H \text{ ср}}$. Необхідно також дотримуватись максимально допустимої частоти, за якої діод ще зберігає свої вентиляльні властивості.

Основна перевага однопівперіодного випрямляча полягає в його простоті. Недоліками його є великий коефіцієнт пульсації p (див. табл. 3.1), низьке значення випрямлених струмів і напруг (див. табл. 3.1), підмагнічування трансформатора.

Таблиця 3.1 – Параметри некерованих випрямлячів при роботі на активне навантаження

Схема випрямляча	$U_{H \text{ ср}}$	p	$I_{H \text{ ср}}$	$U_{зв \text{ мах}}$
<u>Однофазна:</u>				
однопівперіодна	$0,45U_2$	1,57	$0,63 I_2$	U_{2m}
трансформаторна схема	$0,45U_2$	0,67	$1,27 I_2$	U_{2m}
мостова	$0,9U_2$	0,67	$0,9 I_2$	U_{2m}
<u>Трифазна:</u>				
з нейтральним виводом	$1,17U_2$	0,25	$1,72 I_2$	$\sqrt{3} U_{2m}$
мостова	$2,34U_2$	0,057	$1,22 I_2$	$\sqrt{3} U_{2m}$

Двопівперіодний випрямляч з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора (трансформаторна схема) можна розглядати як два з'єднаних в одне ціле і працюючих на спільне навантаження R_H однопівперіодних випрямляча (рис. 3.3, а).

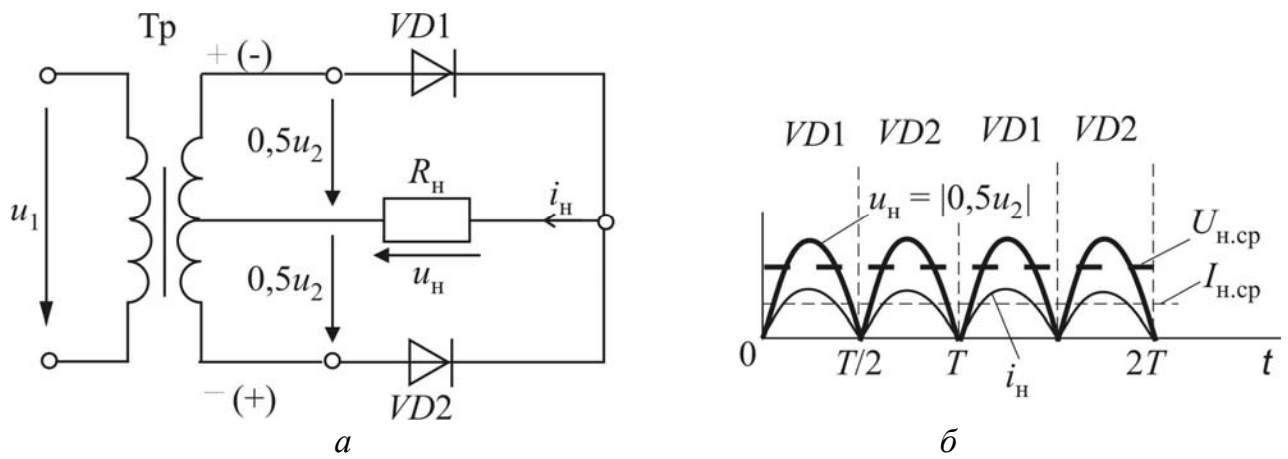


Рисунок 3.3 – Схема (а) та часові діаграми випрямлених струму і напруги (б) однофазного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора

Кожні півперіоду під пряму напругу підпадає діод $VD1$ (діод $VD2$ – під зворотну) або діод $VD2$ (діод $VD1$ – під зворотну). Таким чином, навантаження R_n весь час перебуває під напругою, спрямованою до середньої точки трансформатора. Ця напруга змінюється кожного півперіоду за законом $0,5 u_2$ для першого півперіоду. Крізь R_n проходить струм $i = \frac{u_2}{2R_n}$, і , відповідно,

$u_H = R_n i_H = \frac{u_2}{2}$ (рис. 3.3, б). Зворотна напруга на закритому діоді дорівнює повній напрузі u_2 . Максимальна зворотна напруга досягає значення U_{2m} . Розглянута схема дає можливість зменшити коефіцієнт пульсації порівняно з однопівперіодним випрямлячем (табл. 3.1).

Найбільш поширеним є *двопівперіодний мостовий випрямляч* (рис. 3.4, а). Його вентильна група складається з чотирьох діодів, з'єднаних за мостовою схемою, одна діагональ якої приєднується до вторинної обмотки трансформатора, а друга – до навантаження R_n . Кожна пара діодів ($VD1, VD3$ і $VD2, VD4$) працює по черзі.

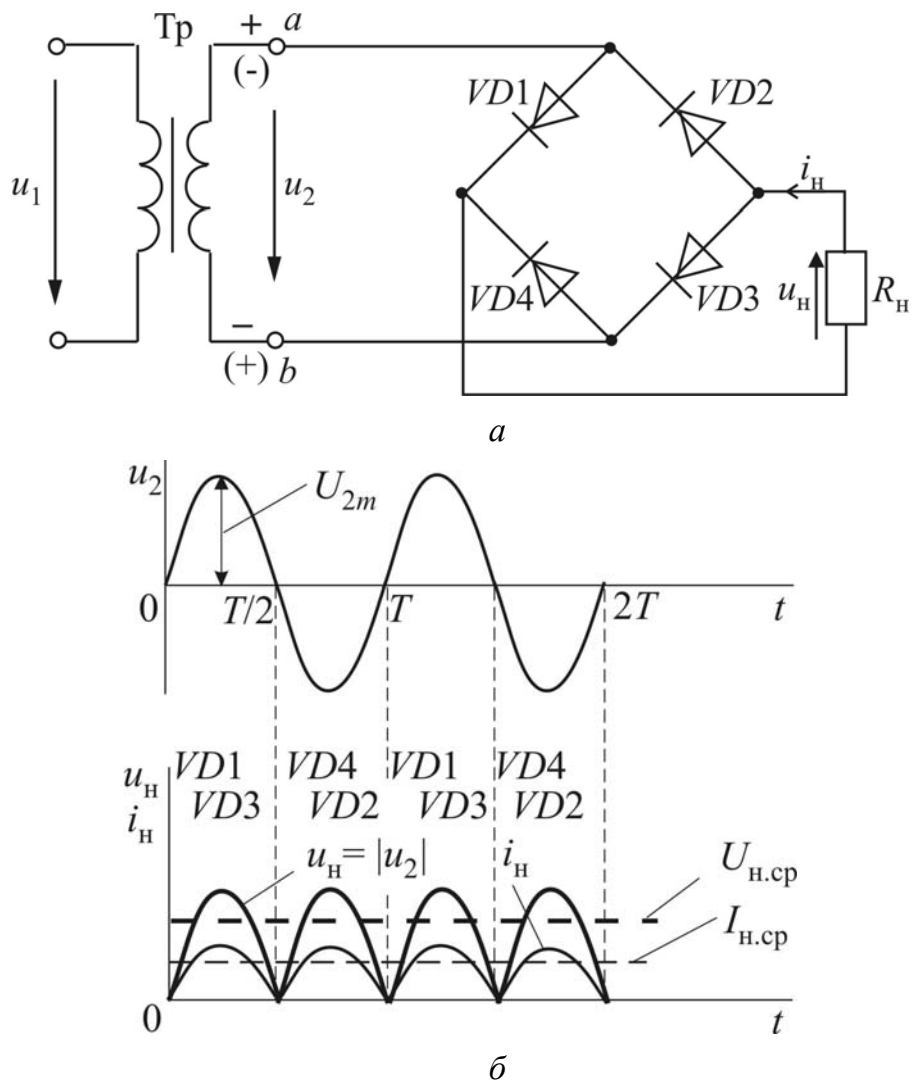


Рисунок 3.4 – Схема (а) та часові діаграми випрямлених струму і напруги (б) однофазного мостового випрямляча

Якщо у першому півперіоді потенціал точки a вище потенціалу точки b , то під прямою напругою перебувають діоди $VD1$, $VD3$ і крізь них та навантаження R_H проходить струм $i_H = u_2 / R_H$ та виникає напруга $u_H = R_H \cdot i_H = u_2$.

Що стосується діодів $VD2$ і $VD4$, напруга u_2 є зворотною, і в місцях їх розташування електричне коло можна вважати розірваним. Максимальне значення вторинної напруги досягає U_{2m} . В наступному півперіоді потенціал точки b вище потенціалу точки a , і картина змінюється на протилежну: струм i_H проходить через діоди $VD4$, $VD2$, а діоди $VD1$, $VD3$ перебувають під зворотною напругою. Відбулося нібито перемикання контактів трансформатора a і b щодо R_H , і напрямок струму крізь навантаження R_H зберігся (рис. 3.4, б).

У порівнянні з розглянутими однопівперіодним випрямлячем і двопівпері-

одним випрямлячем з виведенням середньої точки вторинної обмотки трансформатора мостова схема дає можливість удвічі підвищити випрямлені струм і напругу (табл. 3.1), однак ККД випрямляча трохи падає внаслідок послідовного з'єднання діодів.

3.1.3. Трифазні некеровані випрямлячі

Трифазні випрямлячі найчастіше працюють на середню і велику потужність. Розрізняють два основні типи випрямлячів: з нейтральним виводом і мостовий.

На рис. 3.5, а зображено схему трифазного випрямляча з нейтральним виводом.

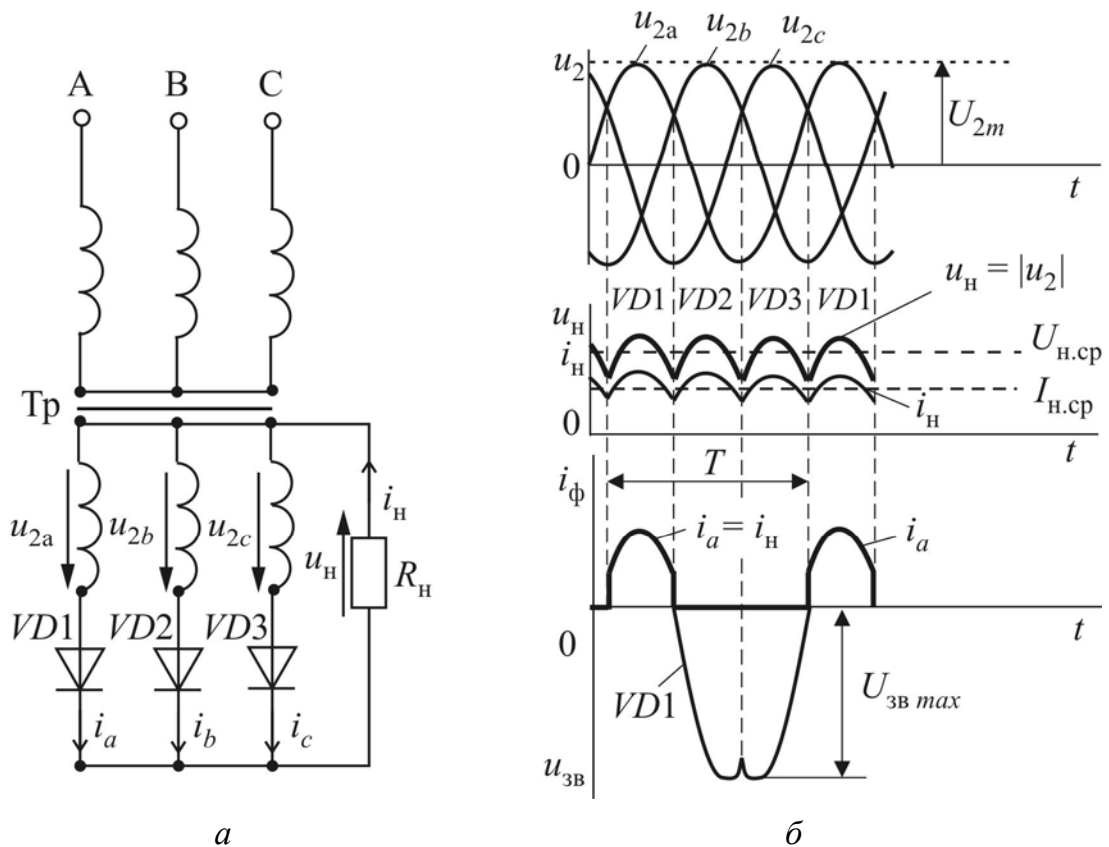


Рисунок 3.5 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) трифазного випрямляча з нейтральним виводом

Він складається з трифазного трансформатора Tr , обмотки якого з'єднані зіркою, трьох діодів $VD1$, $VD2$ і $VD3$ (по одному в кожній фазі вторинної обмотки трансформатора) і навантаження R_H . Кожну третину періоду один з діодів знаходиться під більшою (порівняно з двома іншими) фазною напругою. Він

відкривається, і через нього проходить струм i_n на навантаження R_n . До двох інших діодів прикладено зворотну напругу, тому вони закриті і не пропускають струм.

Таким чином, струм по черзі проходить крізь діоди $VD1 (i_a)$, $VD2 (i_b)$, $VD3 (i_c)$. На рис. 3.5, б зображено часові діаграми напруг і випрямленого струму, а також струм $i_a = i_n$ крізь діод $VD1$ (фаза a), коли він знаходиться під прямою напругою, та зворотна напруга на ньому, коли він закритий і не пропускає струм.

Коефіцієнт пульсації p в такому випрямлячі значно менший у порівнянні з однофазними випрямлячами, а його надійність, завдяки мінімальній кількості діодів, досить висока, але велике підмагнічування трансформатора робить її мало привабливою.

Трифазний мостовий випрямляч, незважаючи на подвійну кількість діодів, за багатьма показниками краще розглянутого випрямляча з нейтральним виводом. Схему цього випрямляча зображено на рис. 3.6, а.

Діоди $VD1$, $VD3$, $VD5$ складають групу, загальний вузол якої дає плюс на навантаження R_n , а загальний вузол групи діодів $VD2$, $VD4$, $VD6$ – мінус. Струм на навантаженні i_n проходить крізь ті діоди, які у дану мить перебувають під найбільшими позитивною і негативною напругами (рис. 3.6, б), тобто підпадають під найбільший лінійний струм.

Пульсації випрямленої напруги є набагато меншими, а сама напруга є удвічі більшою у порівнянні з трифазним випрямлячем з нейтральним виводом (див. табл. 3.1).

3.1.4. Керовані випрямлячі

Часто виникає потреба не тільки перетворювати змінний струм у постійний, а й плавно змінювати значення випрямленої напруги. Найбільш зручно і економічно вигідно робити це у колі випрямленого струму в процесі самого випрямлення.

Випрямлячі, які об'єднують випрямлення змінного струму з керуванням випрямленою напругою, називають керованими випрямлячами.

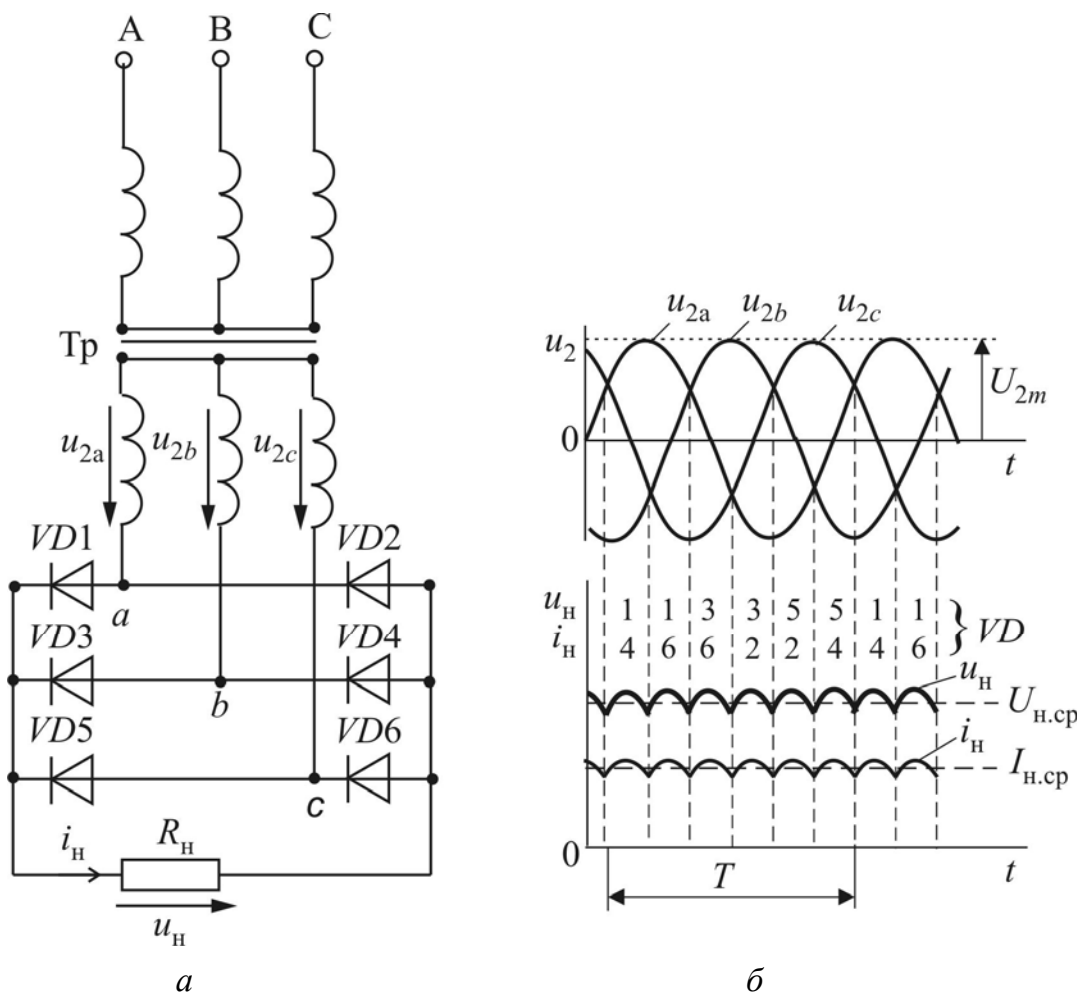


Рисунок 3.6 – Схема (а) і часові діаграми напруг і випрямленого струму (б) трифазного мостового випрямляча

Головним елементом сучасних керованих випрямлячів є тиристор або транзистор типу *IGBT*. В основі керування лежить фазний зсув між анодною напругою на тиристорі і напругою, яка подається на керуючий електрод. Такий зсув фаз називається *кутом керування* і позначається α .

Одна зі схем, що забезпечує зміну кута α , зображена на рис. 3.7, а. Відповідно до функціонального призначення вона називається *фазообертач*, принцип дії якого пояснює векторна діаграма, наведена на рис. 3.7, б. Як відомо, кут між векторами напруг на послідовно з'єднаних активному опорі \underline{U}_R і ємності \underline{U}_C завжди дорівнює 90° . Таким чином, утворюється прямокутний трикутник *adb*, вершина якого *d* незалежно від значень U_R і U_C знаходиться на півколі, яке опирається на вектор базової напруги U_{ab} . Відповідно кут α між напругою U_{cd} , спрямованою на вузол з'єднання активного опору R і ємності C , і базовою напругою U_{ab} може змінюватися від $\alpha = 0^\circ$ ($R = 0$) до $\alpha = 180^\circ$ ($R \rightarrow \infty$). При

цьому розташування вузла *c* принципового значення не має.

На рис. 3.8, *a* зображено схему однофазного однопівперіодного керованого випрямляча.

До його складу входить фазообертач,

який утворюють резистор *R2* і конденсатор *C*. Від фазообертача за допомогою діода *VD* забезпечується подача позитивних однополярних імпульсів на керуючий електрод тиристора *VS*. Значення напруги цих імпульсів u_k можна змінювати за допомогою резистора *R1*.

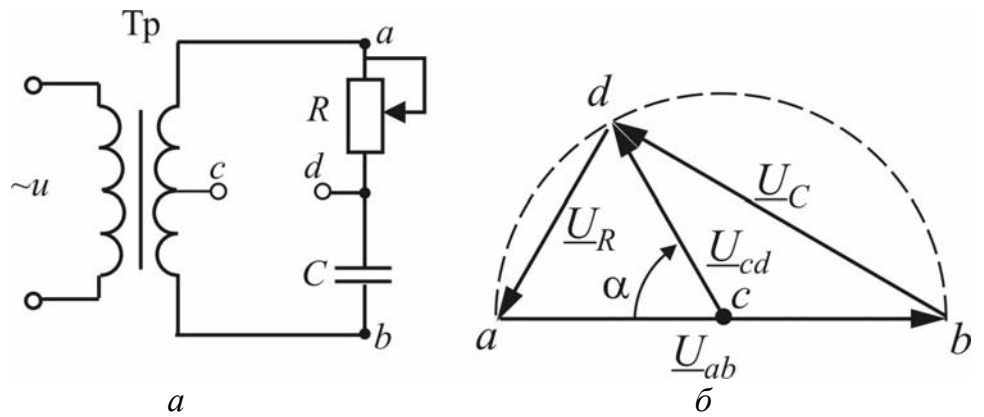


Рисунок 3.7 – Схема (*a*) і векторна діаграма (*б*) фазообертача

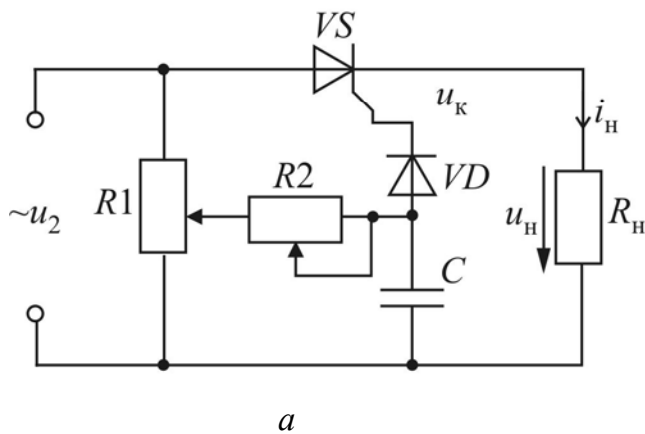


Рисунок 3.8 – Схема (*a*) і часові діаграми напруги і струму (*б*) однофазного однопівперіодного керованого випрямляча

Щойно позитивний імпульс потрапляє на керуючий електрод, тиристор відкривається і починає пропускати струм i_H . На навантаженні R_H виникає напруга $u_H = R_H \cdot i_H$ (рис. 3.8, *б*), середнє значення якої визначає кут α :

$$U_{H\alpha} = U_{H\text{ср}} \frac{1 + \cos\alpha}{2}, \quad (3.1)$$

де $U_{н\text{ ср}}$ – середня напруга некерованого однофазного однопівперіодного випрямляча.

Аналогічно працюють більш складні керовані випрямлячі: однофазні дво-півперіодні, трифазні. Керуючі імпульси в них утворюються більш оптимальної форми, у вигляді короткого імпульсу з крутим фронтом. Це дозволяє зменшити нагрівання керуючого електрода тиристора, а також забезпечити більш чітко його відкриття. Для формування подібних імпульсів та їх зсуву в часі використовують спеціальні імпульсно-фазові системи керування, в основі яких може бути як фазообертач, так і генератор лінійних імпульсів напруги.

3.2. Згладжувальні фільтри

Використання випрямлячів з рівнем пульсацій, які мають місце на виході з вентиляльної групи, досить часто є неможливим, особливо для живлення електронних та мікропроцесорних приладів та пристроїв, де діапазон допустимих коефіцієнтів пульсацій p знаходиться, в основному, в межах $10^{-7} \dots 10^{-3}$. Тому на виході з вентиляльної групи, як правило, ставиться згладжувальний фільтр, яким можуть бути конденсатор, індуктивні котушки, транзистори, а також різного виду їх з'єднання, у тому числі з резисторами.

Основним параметром, який характеризує ефективність згладжувального фільтра, є *коефіцієнт згладжування*

$$q = p_{\text{вх}} / p_{\text{вих}}, \quad (3.2)$$

де $p_{\text{вх}}$ і $p_{\text{вих}}$ – коефіцієнти пульсацій на вході і виході фільтра.

Найбільш поширені прості ємнісний та індуктивний згладжувальні фільтри. Їх робота визначається тим, що зміна напруги на конденсаторі і струму в індуктивній котушці не може відбуватися миттєво (стрибком).

2.1. Ємнісний фільтр

Ємнісний фільтр включається паралельно навантаженню R_n . Його роботу пояснюють часові діаграми (рис. 3.9).

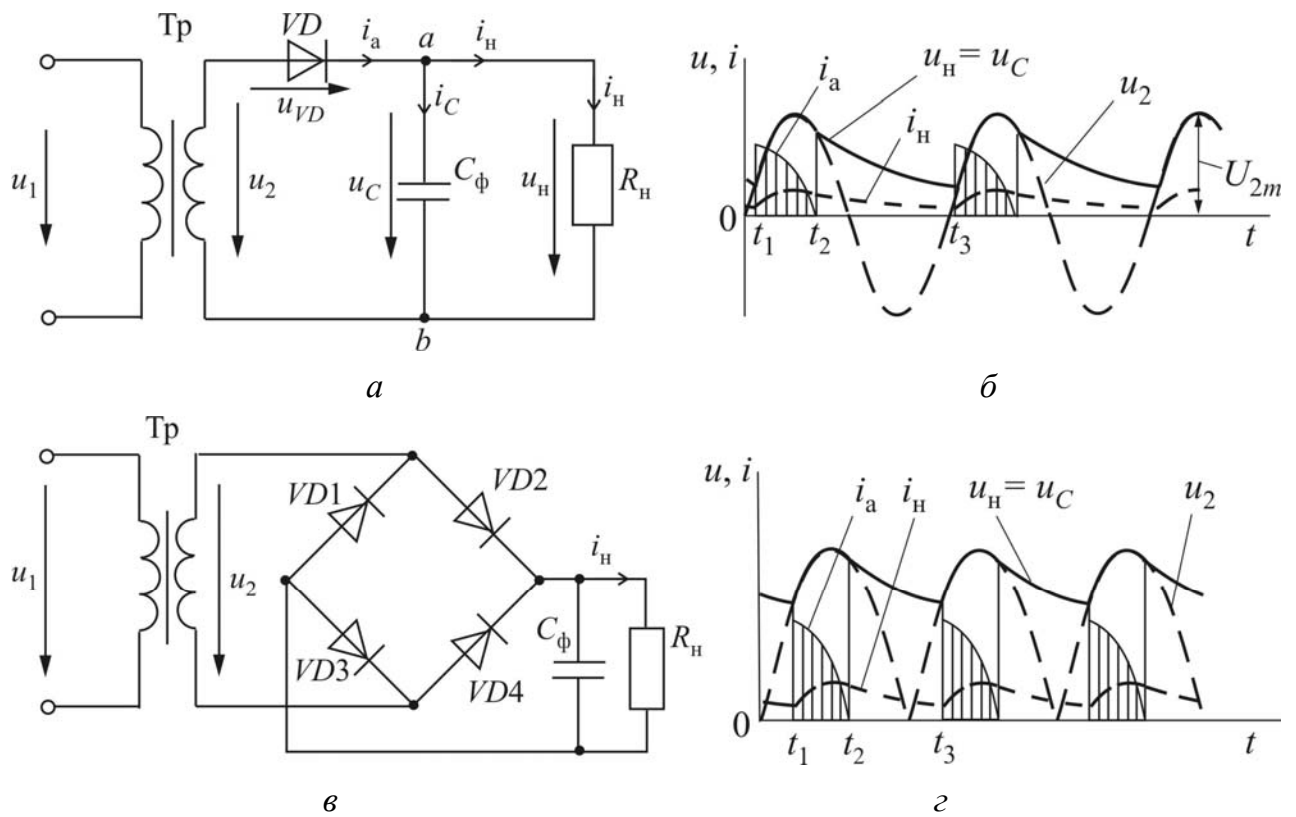


Рисунок 3.9 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) однопівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром та схема (в) і часові діаграми напруг і струмів (г) мостового випрямляча з ємнісним фільтром

У момент часу t_1 , коли напруга трансформатора u_2 починає перевищувати напругу конденсатора u_c , діод VD (або відповідна група діодів у мості) відкривається і пропускає струм i_a , більша частина якого іде на зарядку конденсатора. Максимальна напруга, до якої може бути заряджений конденсатор C_ϕ , дорівнює амплітудному значенню напруги трансформатора U_{2m} . Потім, коли починається зменшення напруги u_2 і змінюється її полярність, зменшення напруги конденсатора u_c може бути повільнішим, і з моменту часу t_2 вона почне перевищувати напругу трансформатора. Діод VD (або відповідна група діодів у мості) підпадає під зворотну напругу і не пропускає прямий струм i_a , але струм i_H крізь навантаження R_H продовжує проходити завдяки розряду конденсатора C_ϕ .

Час розрядки конденсатора визначає стала часу $\tau_{\text{розр}} = C_\phi R_H$. Тому чим більше C_ϕ і R_H , тим повільніше буде спадати напруга u_c на конденсаторі під час зменшення напруги на виході з трансформатора і зміни її полярності. Тим самим буде утримуватися напруга $u_H = R_H \cdot i_H = u_c$ на навантаженні до моменту часу t_3 , коли знову відбудеться пряме включення діода і почнеться підзарядка

конденсатора.

Враховуючи зазначене, можна зробити висновок, що використовувати ємнісні фільтри доречно тільки при великих R_H . Коефіцієнт пульсацій на виході з фільтра буде при цьому таким:

$$p_{\text{вих}} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн}} \cdot C_{\phi} \cdot R_H}, \quad (3.3)$$

де $f_{\text{осн}}$ – частота основної гармоніки.

Відповідно до останньої формули, якщо стала часу $\tau_{\text{розр}} \geq 10T_{\text{осн}}$, то коефіцієнт пульсацій $p_{\text{вих}}$ не буде перевищувати 10^{-2} .

Особливість роботи випрямляча з ємнісним фільтром полягає в тому, що коли починається підзарядка конденсатора, крізь діод проходить великий струм, який може вивести його з ладу. Тому створюється Г-подібний фільтр, в якому до конденсатора C_{ϕ} додається опір R_{ϕ} , послідовно з'єднаний з діодом (рис. 3.11, а). Крім цього, слід мати на увазі, що максимальна зворотна напруга на закритому діоді може вдвічі перевищувати U_{2m} , оскільки в цей час напруги конденсатора і трансформатора додаються.

3.2.2. Індуктивний фільтр

Індуктивний фільтр – це дросель L_{ϕ} , послідовно з'єднаний з навантаженням R_H . Його роботу пояснюють часові діаграми напруг і струмів на рис. 3.10. Внаслідок того що при зміні струму в дроселі виникає ЕРС самоіндукції

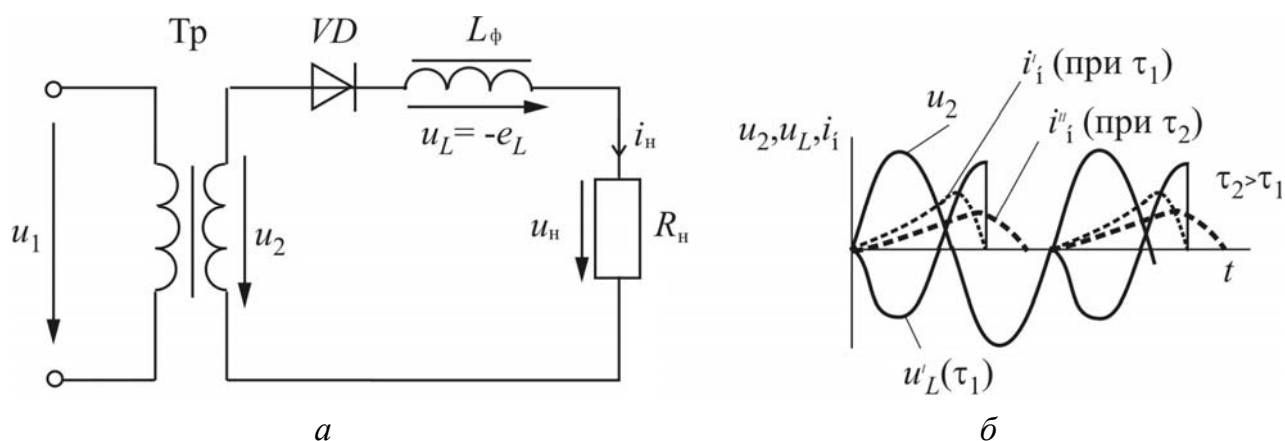


Рисунок 3.10 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) однопівперіодного випрямляча з індуктивним фільтром

$e_L = -u_L = -L_\Phi \frac{di}{dt}$, яка буде підтримувати струм при його зменшенні, процес проходження струму i_n крізь діод VD та опір R_n не припиняється відразу після зміни полярності напруги на виході трансформатора u_2 .

Уповільнення процесу залежить від сталої часу $\tau = L_\Phi / R_n$. Чим більше τ , тим довше проходить імпульс струму і тим менше на нього впливає зміна полярності напруги u_2 . Коефіцієнт пульсацій на виході з індуктивного фільтра

$$P_{\text{вих}} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн}} \cdot L_\Phi / R_n} \quad (3.4.)$$

Чим менше R_n і, відповідно, більше струм i_n , тим менше пульсації. Тому індуктивний фільтр, на відміну від ємнісного, що використовується у випрямлячах малої потужності, ставлять у випрямлячах середньої і великої потужності.

Г-подібні фільтри (рис. 3.11) використовуються тоді, коли прості фільтри не забезпечують задовільних коефіцієнтів згладжування або погіршують роботу випрямляча за іншими параметрами.

Як вже відзначалось, у малопотужних випрямлячах RC -фільтр дає можливість полегшити роботу конденсатора C_Φ . За умови $X_{C_\Phi} \ll R_\Phi$ резистор R_Φ бере на себе основну складову напруги від пульсацій, зменшуючи їх тим самим на навантаженні R_n . Якщо взяти значення R_Φ зі співвідношення $R_n / (R_n + R_\Phi) = 0,5 \dots 0,9$, то падіння сталої складової напруги на резисторі R_n буде мінімальним.

Коефіцієнт згладжування

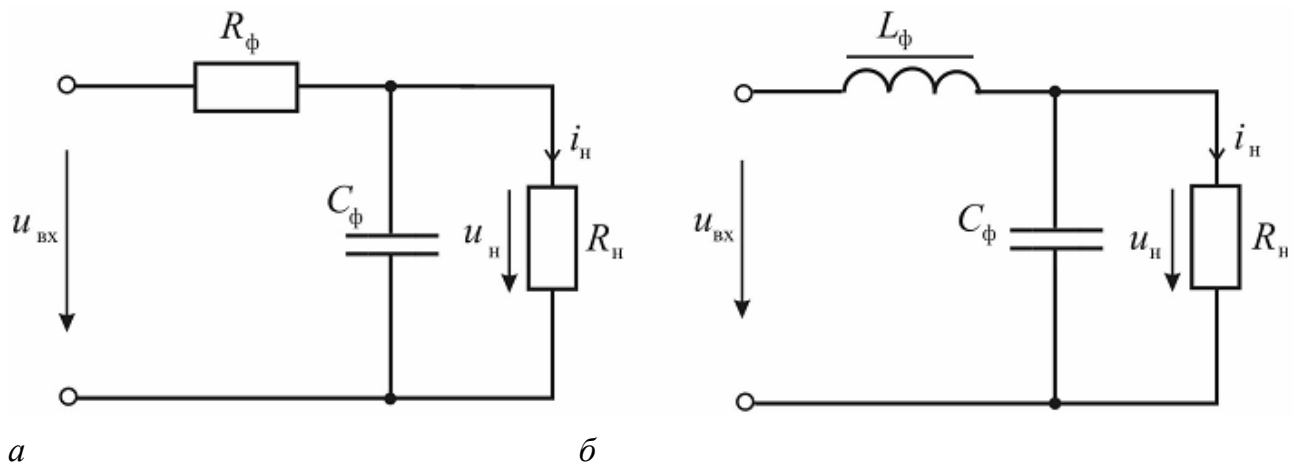


Рис. 3.11 – Схеми Г-подібних RC -фільтра (а) і LC -фільтра (б)

$$q = (0,5 \dots 0,9) 2\pi f_{осн} R_{тм} C_{тм} . \quad (3.5)$$

Зниження пульсацій LC -фільтром пояснюється спільною дією індуктивної котушки L_{ϕ} і конденсатора C_{ϕ} . На дроселі відбувається значне падіння змінних складових напруги, і рівень пульсацій для згладжування конденсатором стає меншим. В той же час стала складова напруги на навантаженні R_H не зменшується, тому що відсутнє її помітне падіння на дуже малому активному опорі дроселя.

Коефіцієнт згладжування LC -фільтра:

$$q = (2\pi f_{осн})^2 L_{\phi} C_{\phi} - 1. \quad (3.6)$$

3.3. Стабілізатори

3.3.1. Загальні відомості про стабілізатори

Стабілізатором напруги (струму) називають пристрій, який автоматично забезпечує підтримання напруги (струму) на навантаженні з потрібним значенням точності. Якщо не використовувати блок стабілізації, то при вмиканні випрямляча на навантаження і проходженні крізь нього струму I_H напруга на на-

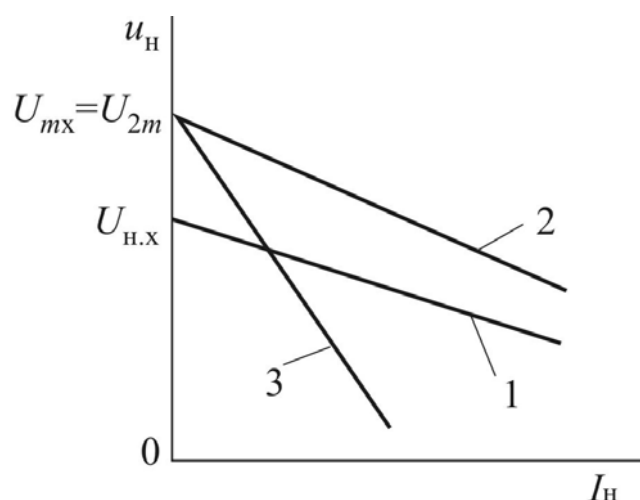


Рисунок 3.12 – Зовнішні характеристики однофазного випрямляча: 1 – без фільтра; 2 – з ємнісним фільтром; 3 – з RC -фільтром

вантаженні внаслідок збільшення падіння напруги всередині випрямляча (на трансформаторі, вентилях, фільтрі) буде зменшуватись (рис. 3.12). Впливають на зміну напруги також дестабілізуючі фактори, наприклад, зміна напруги в живильній електромережі змінного струму. Тому для підтримання напруги на постійному рівні (або з малими від нього відхиленнями) й потрібні стабілізатори.

Основним параметром, який характеризує якість роботи стабілізатора

напруги, є коефіцієнт стабілізації за напругою:

$$K_{\text{ст}U} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{н}} / U_{\text{н}}}, \quad (3.7)$$

де $U_{\text{вх}}$ – напруга на вході стабілізатора;

$U_{\text{н}}$ – напруга на навантаженні (на виході стабілізатора).

Чим більше значення коефіцієнта, тим вище рівень стабілізації.

3.3.2. Параметричний стабілізатор напруги

Схема найпростішого параметричного стабілізатора напруги зображена на рис. 3.13, а. За допомогою стабілізатора на основі напівпровідникового стабілітрона VD можна отримувати стабільну напругу від кількох одиниць до сотень вольт при струмах навантаження від одиниць міліампер до одиниць ампер.

Відповідно до наведеної схеми, вхідна напруга $U_{\text{вх}}$, що стабілізується, складається з напруги на баластному резисторі $R_{\text{б}}$ і напруги стабілітрона $U_{\text{ст}}$, яка дорівнює вихідній напрузі $U_{\text{н}}$, прикладеній до навантаження $R_{\text{н}}$, тобто

$U_{\text{вх}} = R_{\text{б}}I_0 + U_{\text{ст}}$. Враховуючи, що струм $I_0 = I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}$, де $I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{ст}}}{R_{\text{н}}}$, вхідну

напругу $U_{\text{вх}}$ можна зв'язати зі струмом стабілітрона $I_{\text{ст}}$:

$$U_{\text{вх}} = R_{\text{б}}I_{\text{ст}} + \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{н}}}U_{\text{ст}} + U_{\text{ст}}.$$

Внаслідок зміни вхідної напруги змінюється струм стабілітрона:

$$I_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{вх}} - \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{н}}}U_{\text{ст}} - U_{\text{ст}}}{R_{\text{б}}}, \quad (3.8)$$

але це мало впливає на вихідну напругу $U_{\text{н}} = U_{\text{ст}}$, якщо струм залишається в допустимих межах (від $I_{\text{ст} \text{ min}}$ до $I_{\text{ст} \text{ max}}$). Це наочно видно на вольт-амперній характеристиці стабілітрона VD при розгляді двох можливих режимів роботи стабілізатора (рис. 3.13, б).

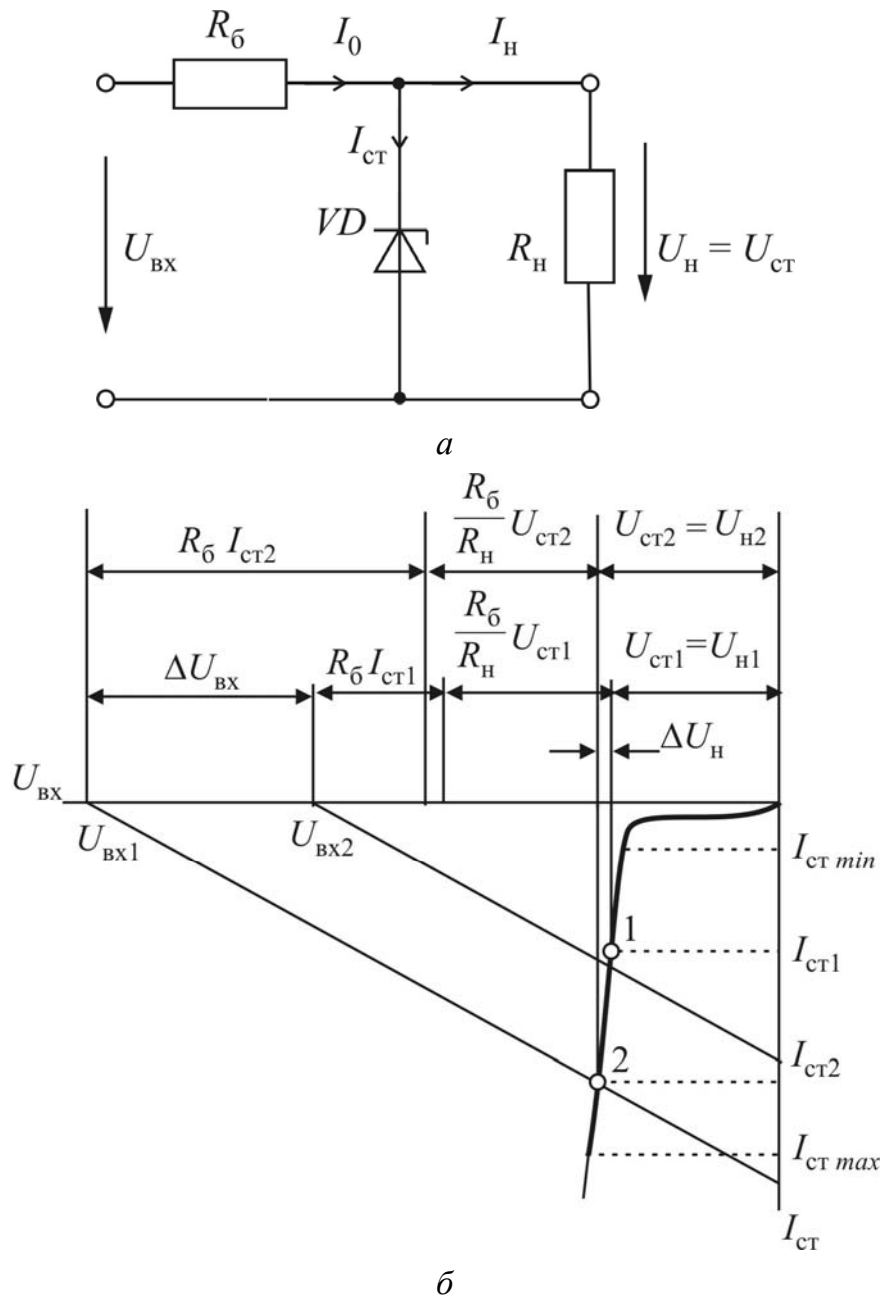


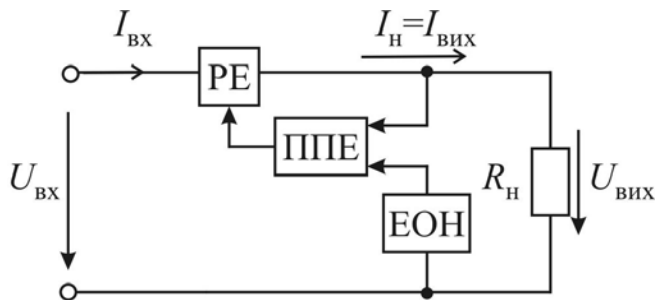
Рисунок 3.13 – Схема (а) і пояснення принципу дії (б) параметричного стабілізатора напруги на напівпровідниковому стабілітроні

Коефіцієнт стабілізації розглянутого параметричного стабілізатора напруги може досягати 30...50.

3.3.3. Компенсаційний стабілізатор напруги

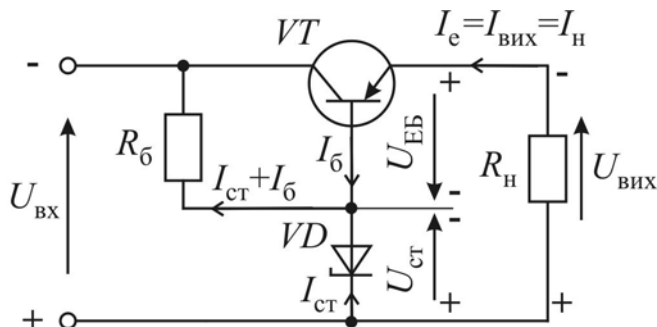
У компенсаційних стабілізаторах здійснюється порівняння фактичного та заданого значень вихідного сигналу, і залежно від значення та знаку неузгодження між ними в стабілізаторі автоматично виникає корегувальна дія, спрямована на зменшення цього неузгодження.

На рис. 3.14 наведено структурну і електричну схеми однокаскадного компенсаційного стабілізатора напруги. Основними функціональними елементами стабілізатора є: елемент опорної напруги ЕОН, порівняльний і підсилювальний елемент ППЕ та регулюючий елемент РЕ (рис. 3.14, а).



а

Якщо з якихось причин напруга на виході $U_{\text{вих}}$ відхилилась від свого номінального значення, то різниця між еталонною і вихідною напругами змінюється, посилюється і діє на регулюючий елемент РЕ. При цьому опір регулюючого елемента РЕ автоматично змінюється, і вхідна напруга $U_{\text{вх}}$ розподіляється між елементом РЕ та навантаженням $R_{\text{н}}$ таким чином, щоб компенсувати зміну напруги та стабілізувати її на навантаженні близькою до номінальної.



б

Рисунок 3.14 – Структурна (а) і електрична (б) схеми однокаскадного компенсаційного стабілізатора напруги

В електричній схемі (рис. 3.14, б) елементом опорної напруги ЕОН, на якому утримується незмінна напруга $U_{\text{ст}}$, є стабілітрон VD , а роль порівняльного, підсилювального ППЕ і регулюючого РЕ елементів виконує транзистор VT .

Порівняльна напруга $U_{\text{ЕБ}}$ (за другим законом Кірхгофа) є різниця між незмінною напругою $U_{\text{ст}}$ і напругою на навантаженні $U_{\text{н}} = U_{\text{вих}}$:

$$U_{\text{ЕБ}} = U_{\text{ст}} - U_{\text{вих}} . \quad (3.9)$$

У нормальному режимі, коли дестабілізація відсутня, режим роботи транзистора VT обирається таким, щоб він був неповністю відкритим ($U_{\text{ЕБ}} \approx 0,1 \dots 0,3$ В). Вихідна напруга при цьому, як видно з рівняння (3.9), практично дорівнює опорній: $U_{\text{вих}} \approx U_{\text{ст}}$.

Якщо внаслідок зміни напруги на вході $U_{\text{вх}}$ почне змінюватися струм $I_{\text{вих}} = I_{\text{н}}$ і, відповідно, напруга на виході $U_{\text{вих}} = U_{\text{н}} = R_{\text{н}} I_{\text{н}}$, то це обов'язково призведе до зміни порівняльної напруги $U_{\text{ЕБ}}$, тому що напруга на стабілітроні

$U_{ст}$ залишиться постійною.

Зміна напруги $U_{ЕБ}$ завжди сприятиме тому, щоб повернути струм на виході, який проходить крізь транзистор, до свого попереднього значення. Отже, напруга на виході $U_{вих} = R_{н} I_{н} = U_{н}$ збережеться незмінною.

Компенсацію ж напруги між $U_{вх}$ і $U_{ст}$ візьме на себе баластний опір $R_{б}$. Але, на відміну від параметричного стабілізатора, крізь нього буде проходити тільки струм стабілітрона, що істотно зменшує втрати, підвищує ККД стабілізатора і коефіцієнт стабілізації, який може досягати 1000 і вище.

3.3.4. Стабілізатор струму

У найпростішому транзисторному стабілізаторі струму задача полягає в стабілізації струму колектора $I_{К} = I_0$ (рис. 3.15).

Цей струм пов'язаний зі струмом емітера $I_{Е}$ та струмом бази $I_{Б}$ залежністю

$$I_{К} = I_0 = I_{Е} - I_{Б}. \quad (3.10)$$

Внаслідок того що $I_{Б} \ll I_{Е}$, тобто $I_0 \cong I_{Е}$, а напругу на стабілітроні $U_{ст}$ можна вважати незмінною, то підвищення або зниження струму I_0 буде зменшувати або збільшувати напругу $U_{БЕ}$ між базою та емітером транзистора VT :

$$U_{БЕ} = U_{ст} - R_{Е} I_{Е} \cong U_{ст} - R_{Е} I_0. \quad (3.11)$$

Це, в свою чергу, вплине на опір транзистора, збільшуючи або зменшуючи його, що сприятиме поверненню струму I_0 .

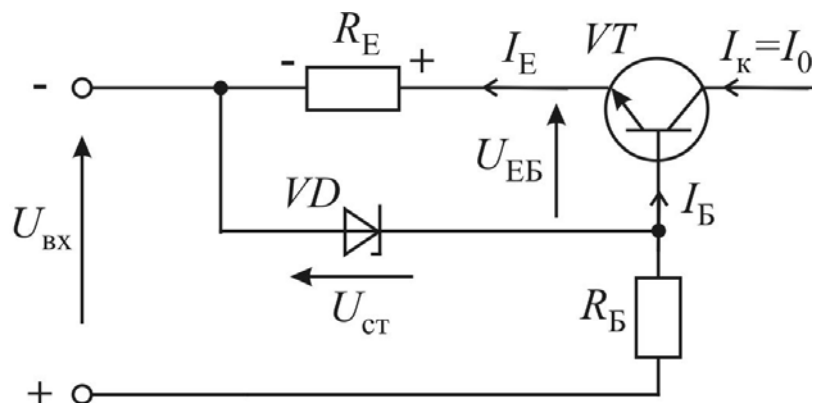


Рисунок 3.15 – Транзисторний стабілізатор струму

3.4. Інвертори

3.4.1. Загальні відомості про інвертори

Інверторами називаються перетворювачі постійної напруги на змінну.

За видом задіяних у них комутаційних приладів розрізняють тиристорні й транзисторні інвертори.

За принципом комутації – інвертори, ведені мережею й автономні.

А залежно від того, який вихідний параметр є основним, перетворювачі поділяються на інвертори струму та інвертори напруги.

Тиристорний інвертор використовується, як правило, для перетворення великих потужностей. *Транзисторний інвертор* – це перетворювач переважно середньої і малої потужності. Проте прогрес у створенні сильнострумових транзисторів типу *IGBT* дає можливість застосовувати транзисторні інвертори і на велику потужність. Але досягнути такого високого ККД інвертора, як на тиристорах (до 99 %), поки що не вдається, і це стримує розвиток потужних транзисторних інверторів.

Інвертори, ведені електричною мережею, найчастіше використовуються на електричному транспорті. Залежно від напрямку потоку енергії вони працюють як джерело постійного струму для тягових електродвигунів у режимі активного руху або як генератор, що віддає електричну енергію в мережу змінного струму під час гальмування. Такий процес називається *рекуперацією*.

3.4.2. Інвертори, ведені мережею

На рис. 3.16 зображено схему інвертора, веденого мережею, який залежно від кута регулювання α може працювати в режимі випрямляча ($\alpha < 90^\circ$) та в режимі інвертора ($\alpha > 90^\circ$). Напрямок потоку електричної енергії визначається співвідношенням напрямків напруги і струму в первинній обмотці трансформатора Tr .

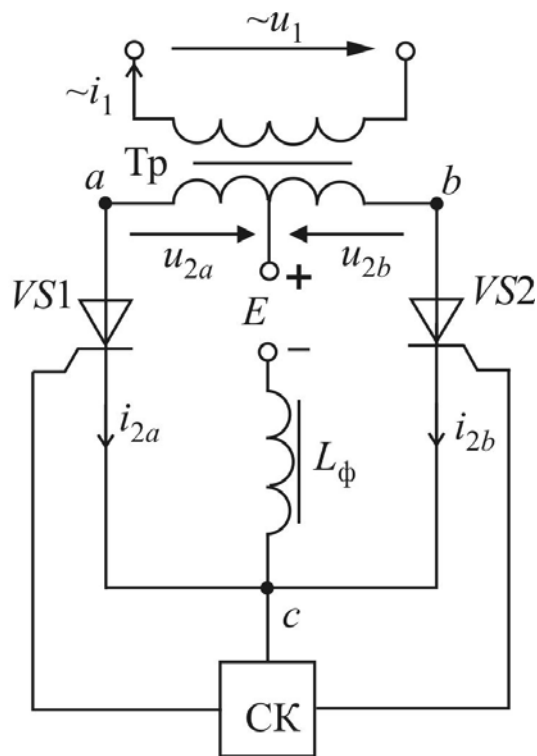


Рисунок 3.16 – Схема однофазного двопівперіодного інвертора, введеного мережею

ніж наполовину є зустрічними, то це означає, що ця обмотка не споживає, а навпаки, віддає електричну енергію в електричну мережу змінного струму, а інвертор працює в режимі перетворювача постійного струму в змінний (рис. 3.17, б).

Зрозуміло, що найбільший ефект перетворення постійного струму в змінний буде тоді, коли кут $\alpha = 180^\circ$. Але при цьому не залишається часу на відімкнення другого тиристора, виникає коротке замикання і процес інвертування зірветься. Тому кут регулювання α береться меншим 180° на кут β , який називається *кутом випередження відпирання* (рис. 3.17, б). Запирання і відпирання тиристорів $VS1$ і $VS2$ відбувається за допомогою вторинної напруги, яка створюється електричною мережею змінного струму. Тому такий *інвертор* називається *веденим мережею*. За своїм схемним рішенням це обернений керований випрямляч з відповідною фазністю та періодичністю.

Напрямок струму в первинній обмотці відповідає напрямку струму у вторинній обмотці, що визначається кутом регулювання α . Напрямок напруг в первинній та вторинній обмотках трансформатора задається електричною мережею і від кута α не залежить.

Таким чином, якщо напрямки напруги і струму в первинній обмотці трансформатора повністю або більш ніж наполовину збігаються, то електрична мережа виступає як джерело електричної енергії змінного струму, а інвертор працює в режимі керованого випрямляча, що перетворює цю енергію на енергію постійного струму (рис. 3.17, а).

Але якщо напруга і струм у первинній обмотці трансформатора повністю або більш

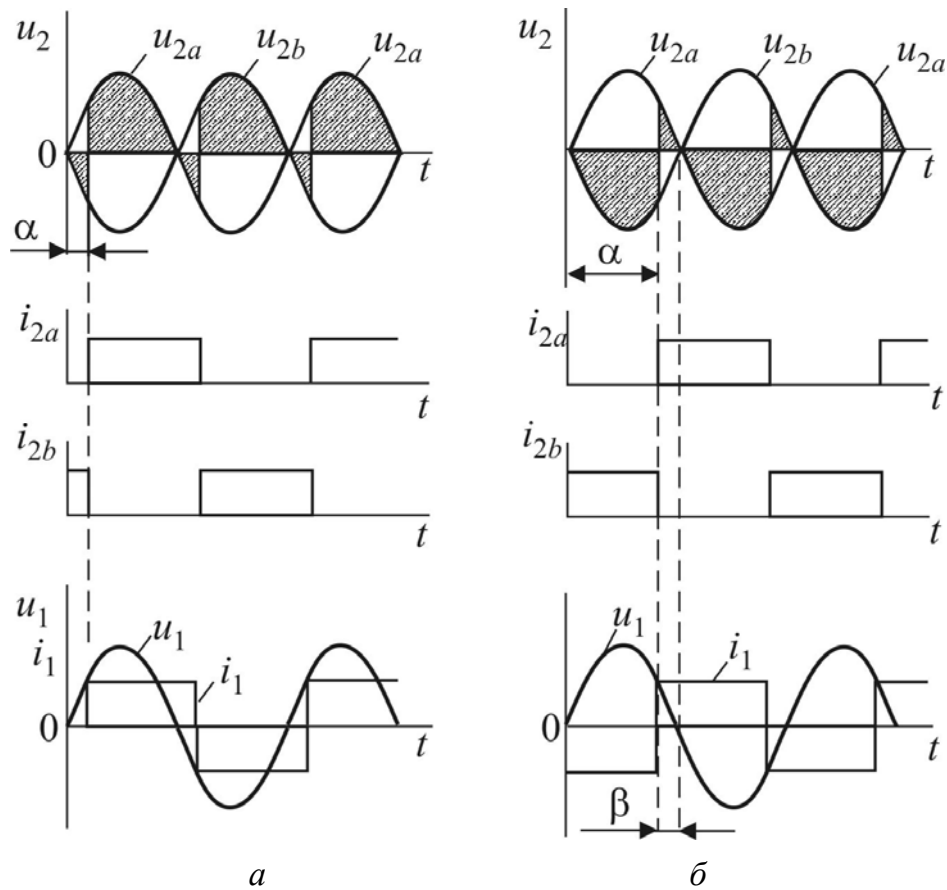


Рисунок 3.17 – Часові характеристики однофазного двопівперіодного інвертора, введеного мережею, при роботі в режимі випрямляча (а) і в режимі інвертора (б)

3.4.3. Автономні інвертори

Автономні інвертори працюють на автономне навантаження і не пов'язані з загальною мережею змінного струму. Тому вони можуть перетворювати постійний струм на змінний будь-якої частоти. Разом з керованими вентилями обов'язковим елементом автономного інвертора є конденсатор, якщо в якості вентилів застосовано тиристри. Конденсатор потрібен для запирання тиристорів і формування вихідної напруги. Але якщо в якості вентилів використано транзистори, то наявність конденсатора необов'язкова, а схема такого інвертора відповідає схемі керованого випрямляча, який працює в зворотному режимі.

Схема найпростішого автономного інвертора зображена на рис. 3.18. Там же наведено часові діаграми струмів і напруг, які пояснюють його роботу.

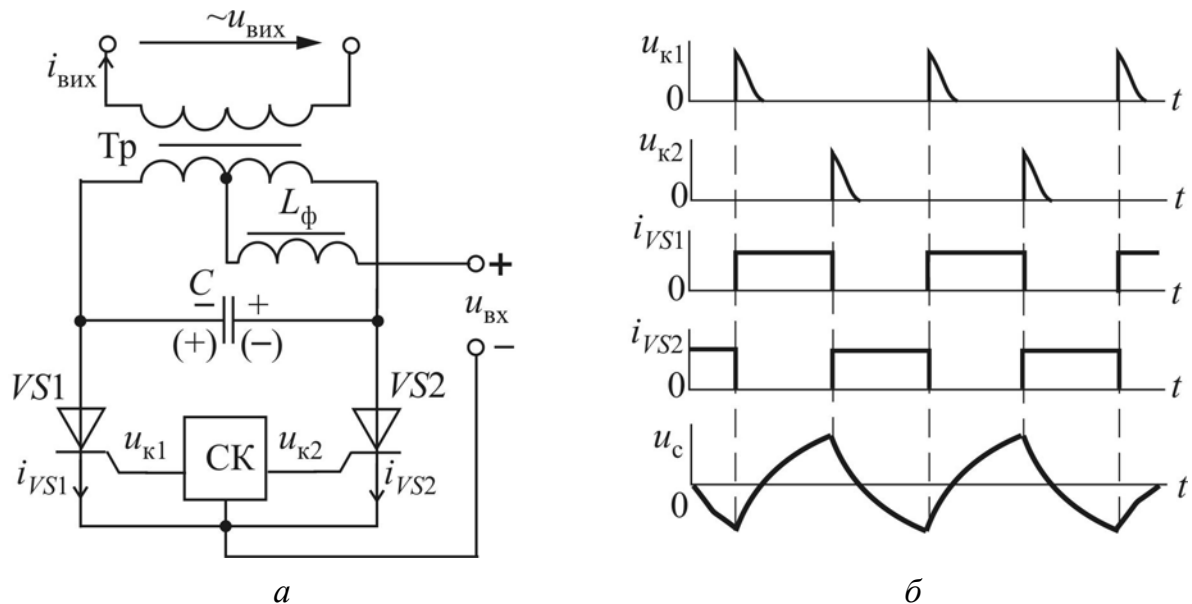


Рисунок 3.18 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) автономного інвертора

Як видно зі схеми рис. 3.18, а, аноди обох тиристорів $VS1$ і $VS2$ через обмотку трансформатора Tr увімкнуті на «плюс» джерела постійного струму. Катоди, відповідно, – на «мінус». При подачі керуючого сигналу u_{k1} на тиристор $VS1$ він відкривається, замикає конденсатор на «мінус», що призводить до його зарядки від джерела постійного струму. Якщо після цього подати керуючий сигнал u_{k2} на тиристор $VS2$, то внаслідок його відпирання швидко запирається тиристор $VS1$ напругою, що утворилася на конденсаторі C , а сам конденсатор починає перезаряджатися, тому що полярність його вмикання до джерела постійного струму змінилася на протилежну.

Таким чином, послідовно відкриваючи тиристори $VS1$ і $VS2$, можна утворювати змінну напругу на конденсаторі C , яка через трансформатор Tr передається на вихід.

3.5. Помножувачі напруги

При роботі на високоомне малопотужне навантаження дуже часто застосовують помножувачі напруги, які дозволяють у скільки завгодно разів збільшувати вихідну напругу щодо вхідної, одночасно перетворюючи її зі змінної на постійну.

Досягається це завдяки використанню конденсаторів $C1$ і $C2$, які можуть

утримувати напругу практично незмінною, якщо стала часу їх розрядки $\tau_{\text{розр}} = CR_{\text{н}}$ (C – ємність конденсатора; $R_{\text{н}}$ – опір навантаження) набагато більше періоду T змінного струму на вході.

На рис. 3.19 зображено схему *паралельного подвоювача напруги*. У перший півперіод (на a – плюс, на b – мінус) відкривається діод $VD1$, і конденсатор $C1$ заряджається до максимального значення змінної напруги U_{2m} . За другий півперіод крізь відкритий діод $VD2$ відбувається заряд конденсатора $C2$, а конденсатор $C1$ зберігає напругу U_{2m} , якщо $\tau_{\text{розр}} \gg T/2$.

Таким чином, на навантаженні утворюється напруга $U_{\text{н}} = 2U_{2m}$.

Схема *послідовного подвоювача напруги* зображена на рис. 3.20. Зарядка конденсатора $C1$ до напруги U_{2m} відбувається при відкритому діоді $VD1$ (на a – мінус, на b – плюс). У наступному півперіоді полярність змінюється (на a – плюс, на b – мінус), і діод $VD1$ закривається, а діод $VD2$ відкривається. До конденсатора $C2$ прикладається напруга u_2 і напруга U_{2m} від конденсатора $C1$. По мірі зростання напруги u_2 відбувається заряд конденсатора $C2$ до залишкової напруги $2U_{2m}$, яка й утримується на навантаженні ($U_{\text{н}} = 2U_{2m}$), якщо $\tau_{\text{розр}}$ є достатньо великим.

Схема *послідовного подвоювача напруги* зображена на рис. 3.20. Зарядка конденсатора $C1$ до напруги U_{2m} відбувається при відкритому діоді $VD1$ (на a – мінус, на b – плюс). У наступному півперіоді полярність змінюється (на a – плюс, на b – мінус), і діод $VD1$ закривається, а діод $VD2$ відкривається. До конденсатора $C2$ прикладається напруга u_2 і напруга U_{2m} від конденсатора $C1$. По мірі зростання напруги u_2 відбувається заряд конденсатора $C2$ до залишкової напруги $2U_{2m}$, яка й утримується на навантаженні ($U_{\text{н}} = 2U_{2m}$), якщо $\tau_{\text{розр}}$ є достатньо великим.

У наступному півперіоді полярність змінюється (на a – плюс, на b – мінус), і діод $VD1$ закривається, а діод $VD2$ відкривається. До конденсатора $C2$ прикладається напруга u_2 і напруга U_{2m} від конденсатора $C1$. По мірі зростання напруги u_2 відбувається заряд конденсатора $C2$ до залишкової напруги $2U_{2m}$, яка й утримується на навантаженні ($U_{\text{н}} = 2U_{2m}$), якщо $\tau_{\text{розр}}$ є достатньо великим.

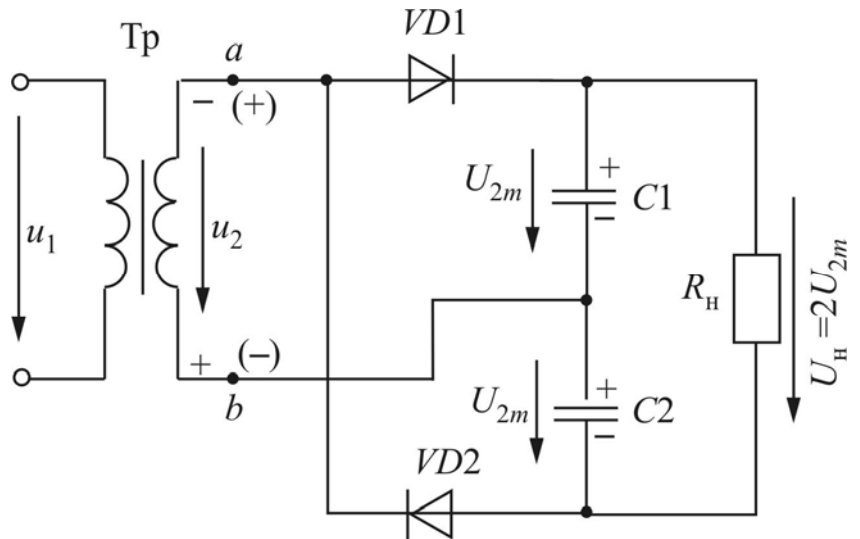


Рисунок 3.19 – Схема паралельного подвоювача напруги

У наступному півперіоді полярність змінюється (на a – плюс, на b – мінус), і діод $VD1$ закривається, а діод $VD2$ відкривається. До конденсатора $C2$ прикладається напруга u_2 і напруга U_{2m} від конденсатора $C1$. По мірі зростання напруги u_2 відбувається заряд конденсатора $C2$ до залишкової напруги $2U_{2m}$, яка й утримується на навантаженні ($U_{\text{н}} = 2U_{2m}$), якщо $\tau_{\text{розр}}$ є достатньо великим.

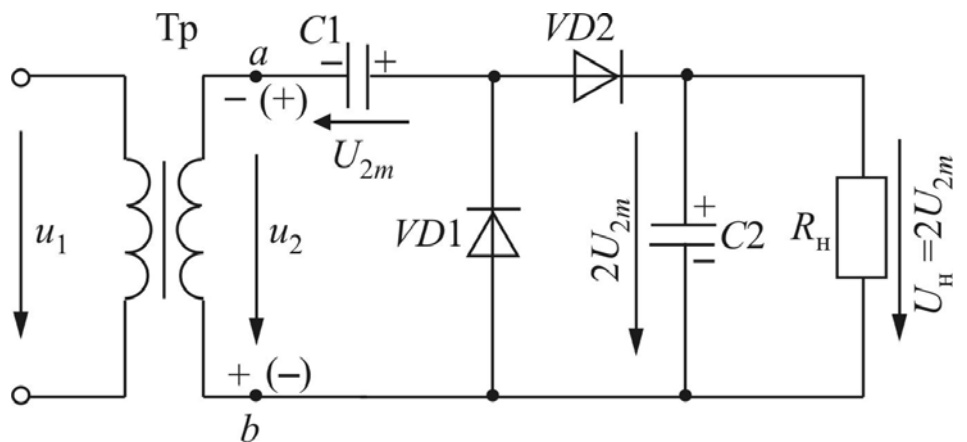


Рисунок 3.20 – Схема послідовного подвоювача напруги

Послідовний перехід напруги з одного, вже зарядженого конденсатора, на наступний дає можливість використовувати схему послідовного помножувача напруги не лише для подвоювання, а і для багаторазового її підвищення.

На рис. 3.21 зображено схему чотириразового помножувача напруги.

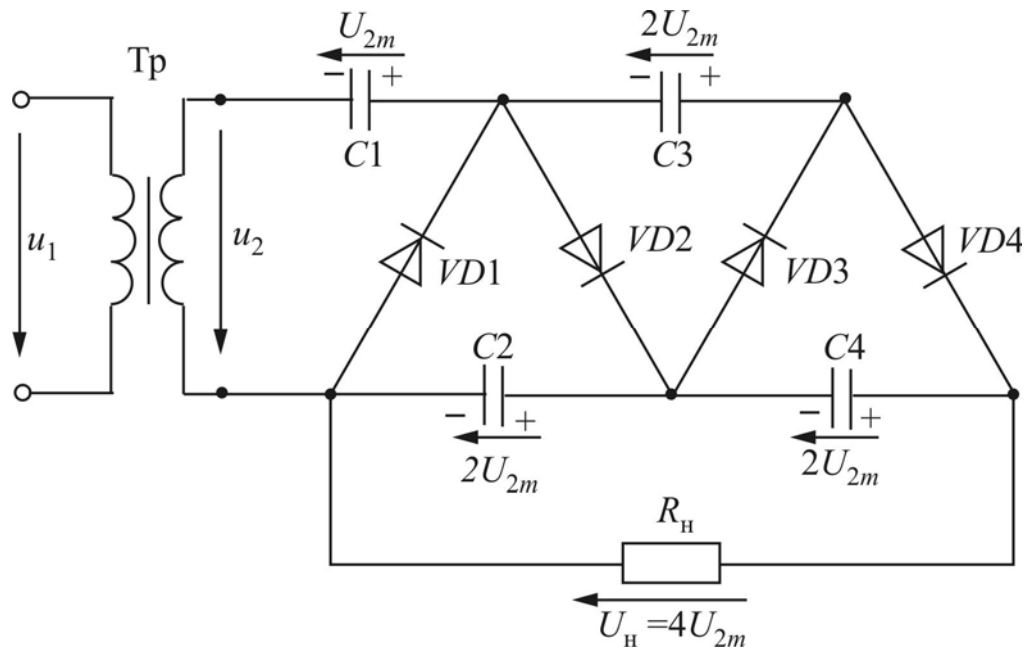


Рисунок 3.21 – Схема чотириразового помножувача напруги

Його робота базується на почерговому відкриванні діодів напругою відповідної полярності. Спочатку відкривається діод $VD1$ і конденсатор $C1$ заряджається до напруги $U_{C1} = U_{2m}$. При великому $\tau_{розр}$ ця напруга практично зберігається надалі. Коли діод $VD1$ закривається, то відкривається діод $VD2$, що дає можливість зарядити конденсатор $C2$ до напруги $U_{C2} = U_{C1} + u_2 \rightarrow U_{2m} + U_{2m} = 2U_{2m}$. Далі відкривається діод $VD3$ і закривається діод $VD2$, а конденсатор $C3$ заряджається до напруги $U_{C3} = U_{C2} + u_2 - U_{C1} \rightarrow 2U_{2m} + U_{2m} - U_{2m} = 2U_{2m}$. І нарешті, відкривається діод $VD4$ і закривається діод $VD3$. Конденсатор $C4$ заряджається до напруги $U_{C4} = U_{C3} + U_{C1} + u_2 - U_{C2} \rightarrow 2U_{2m} + U_{2m} + U_{2m} - 2U_{2m} = 2U_{2m}$, а напруга на навантаженні досягає значення $U_{н} = U_{C2} + U_{C4} = 2U_{2m} + 2U_{2m} = 4U_{2m}$.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке джерела вторинного живлення? Які пристрої відносять до цих джерел? Як класифікуються джерела вторинного живлення?
2. Що таке випрямляч? Наведіть повну структурну схему випрямляча. Зазначте основні електричні параметри випрямляча.
3. Охарактеризуйте основні типи некерованих випрямлячів однофазного змінного струму. Накресліть їх схеми.
4. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії однопівперіодного однофазного випрямляча.
5. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії однофазного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора.
6. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії однофазного мостового випрямляча.
7. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії трифазного випрямляча з нейтральним виводом.
8. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії трифазного мостового випрямляча.
9. Що таке керовані випрямлячі? Наведіть схему і часові діаграми напруг і струму однофазного однопівперіодного керованого випрямляча. Поясніть принцип його дії.
10. Наведіть схему і векторну діаграму фазообертача. Поясніть принцип його дії.
11. Що таке згладжувальний фільтр і для чого він потрібен? Які елементи використовуються для згладжувального фільтра і як вони вмикаються в схемі?
12. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струмів однопівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром. Поясніть принцип дії фільтра.
13. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струмів однопівперіодного випрямляча з індуктивним фільтром. Поясніть принцип дії фільтра.
14. Наведіть схеми Г-подібних RC -фільтра і LC -фільтра. Поясніть принцип їх дії. Чому дорівнює коефіцієнт згладжування RC -фільтра і LC -фільтра?
15. Що таке стабілізатор напруги (струму)? Чому дорівнює коефіцієнт стабілі-

зації за напругою?

16. Наведіть схему і поясніть принцип дії параметричного стабілізатора напруги на напівпровідниковому стабілітроні.
17. Наведіть структурну та електричну схеми однокаскадного компенсаційного стабілізатора напруги. Поясніть принцип його дії.
18. Наведіть схему і поясніть принцип дії транзисторного стабілізатора струму.
19. Що таке інвертор? Назвіть різновиди інверторів за принципом комутації. Що таке інвертор струму та інвертор напруги?
20. Наведіть схему однофазного двопівперіодного інвертора, веденого мережею, і його часові характеристики при роботі в режимі інвертора. Поясніть принцип його дії.
21. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струмів автономного інвертора. Поясніть принцип його дії.
22. Наведіть схему і поясніть принцип дії паралельного подвоювача напруги.
23. Наведіть схему і поясніть принцип дії послідовного подвоювача напруги.

РОЗДІЛ 4

ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ

4.1. Загальні відомості і параметри підсилювачів

Часто виникає потреба переводити слабкий вхідний електричний сигнал (від електромагнітного поля, різного роду датчиків) на вищий енергетичний рівень, де його зможуть сприйняти різного виду виконавчі пристрої або органи чуття живих організмів.

Найбільш поширений спосіб такого підсилення ґрунтується на тому, що вхідний електричний сигнал $u_{\text{вх}}$ за допомогою керуючого елемента КЕ впливає на роботу джерела електричної енергії (джерело живлення $E_{\text{ж}}$), відтворюючись завдяки цьому на вищому енергетичному рівні (рис. 4.1). Якщо керуючий елемент КЕ побудовано на базі електронного приладу, то таке підсилення називають *електронним*.

Принцип електронного підсилення полягає у перетворенні енергії джерела постійної напруги $E_{\text{ж}}$ в енергію змінного вихідного сигналу $u_{\text{вих}}$ шляхом зміни провідності КЕ за законом, зумовленим формою вхідного сигналу $u_{\text{вх}}$.

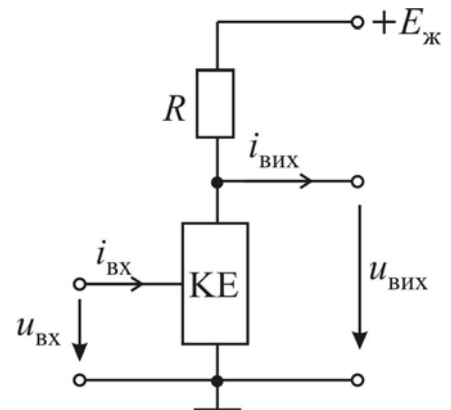


Рисунок 4.1 – Структурна схема підсилювального каскаду

Основою електронного підсилювача є підсилювальний каскад, який в якості керуючого елемента має біполярний або польовий транзистор. Він характеризується коефіцієнтами підсилення, що визначаються відношеннями вихідних параметрів до вхідних:

- коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}$;
- коефіцієнт підсилення за струмом $K_I = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}}$.

Залежно від того, який параметр домінує, розрізняють підсилювальні каскади за напругою, струмом і потужністю.

Якщо забезпечити потрібне підсилення одним каскадом неможливо, то його вихідний сигнал можна подати як вхідний на наступний каскад, і так далі,

доки не буде досягнуто необхідного коефіцієнта підсилення. У такий спосіб створюють багатокаскадний підсилювач (рис. 4.2).

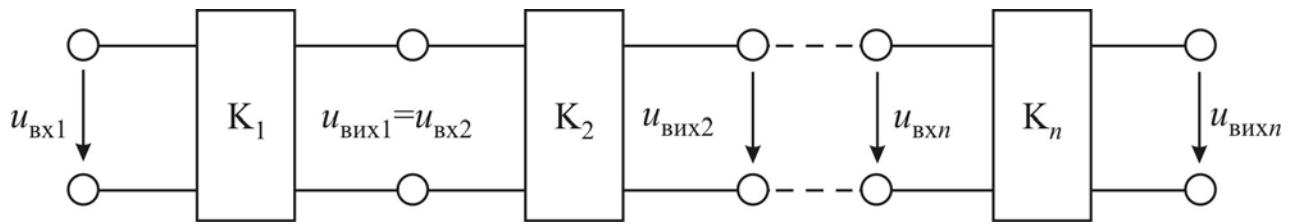


Рисунок 4.2 – Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача, наприклад, за напругою

$$K_U = U_{\text{вих}n} / U_{\text{вх}1} \quad (4.1)$$

Відповідно до того, що $U_{\text{вих}1} = U_{\text{вх}2}$, $U_{\text{вих}2} = U_{\text{вх}3}, \dots, U_{\text{вих}n-1} = U_{\text{вх}n}$, коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення всіх каскадів

$$K_U = U_{\text{вих}n} / U_{\text{вх}1} = K_1 K_2 \dots K_n \quad (4.2)$$

Залежно від діапазону частот вхідних сигналів розрізняють:

- *підсилювачі постійного струму* (ППС) для підсилення сигналів, які змінюються повільно (від 0 Гц і вище);
- *підсилювачі низької частоти* (ПНЧ) для підсилення в діапазоні від звукових частот і вище (від десятків герц до 10...15 МГц);
- *підсилювачі високої частоти* (ПВЧ) для підсилення в діапазоні частот від десятків кілогерц до сотень мегагерц;
- *широкопasmові підсилювачі* (ШСП) для підсилення імпульсних сигналів, що мають спектр частот від десятків герц до сотень мегагерц;
- *вузькосмугові (вибірні) підсилювачі* (ВСП) для підсилення сигналів у вузькому діапазоні частот.

За видом зв'язку між джерелом сигналу, каскадами та навантаженням підсилювачі поділяються на підсилювачі з безпосереднім, резистивним, оптичним, резистивно-ємнісним, трансформаторним або резонансно-трансформаторним зв'язком.

Перші три види зв'язку можуть використовуватися у підсилювачах як постійного, так і змінного струму, решта – тільки у підсилювачах змінного стру-

му.

Надалі ми будемо розглядати лінійні підсилювачі, у яких пропорційним змінам вхідного сигналу відповідають пропорційні зміни вихідного.

Зв'язок із навантаженням (часто це наступний каскад підсилення) може бути трансформаторним – як відімкнене навантаження R'_n – або резистивно-ємнісним – як відімкнене навантаження R_n

На низьких частотах (тисячі і десятки тисяч герц) застосування LC -контурів недоцільне через низьку добротність, великі габарити і масу. У такому разі застосовують підсилювачі з частотно-залежними зворотними зв'язками, зазвичай резистивно-ємнісними.

4.2. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі зі спільним емітером

4.2.1. Будова і принцип дії підсилювального каскаду

Найбільш поширеним підсилювальним каскадом на біполярному транзисторі є каскад зі спільним емітером (рис. 4.3). Він підключається до джерела живлення $E_{\text{ж}}$ таким чином, що колектор перебуває під зворотною напругою. Якщо використовується транзистор типу $n-p-n$, то полярність живлення така, як на рис. 4.3. Для підсилювального каскаду з транзистором $p-n-p$ -типу полярність протилежна. Напруга живлення підсилювального каскаду на біполярному транзисторі дорівнює, як правило, 10...30 В.

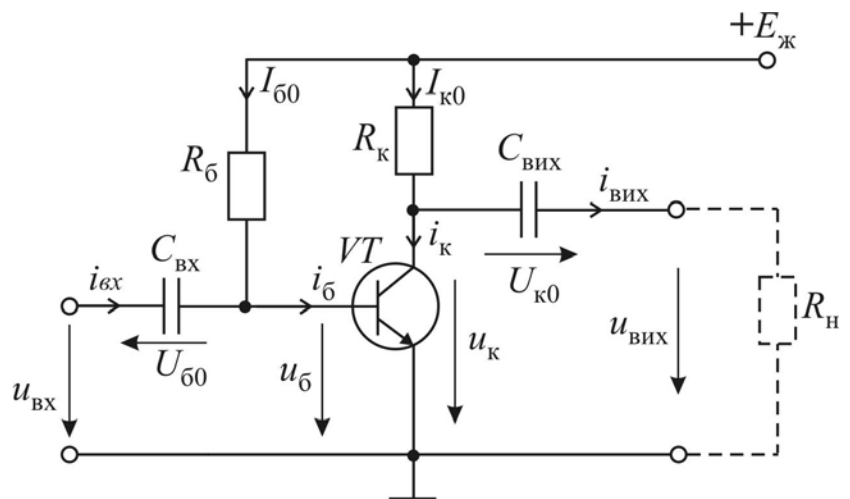


Рисунок 4.3 – Схема підсилювального каскаду зі спільним емітером

Транзистор VT

з'єднується зі входом і виходом підсилювального каскаду конденсаторами $C_{\text{вх}}$

та $C_{\text{вих}}$, ємність яких обирається такою, щоб у діапазоні робочих частот змінний струм проходив крізь них без помітного падіння напруги.

Значення опору R_K обирається таким, щоб при короткому замиканні транзистора ($U_K = 0$) його колекторний струм I_{K3} не перевищував допустимого значення (рис. 4.4):

$$R_K = E_{\text{ж}} / I_{K3}. \quad (4.3)$$

Вольт-амперна характеристика цього опору, якщо скористатися другим законом Кірхгофа для колекторного контуру, матиме вигляд

$$U_K = E_{\text{ж}} - R_K i_K, \quad (4.4)$$

що відповідає прямій, проведеній між точками ($u_K = 0, i_K = I_{K3}$) і ($u_K = E_{\text{ж}}, i_K = 0$).

Визначальним для роботи підсилювального каскаду є режим спокою, який відповідає розподілу напруг і струмів за відсутності вхідного сигналу. Щоб забезпечити обраний режим, який відповідає точці спокою $c'(U_{K0}, I_{K0})$ на вольт-амперній характеристиці R_K , треба знайти відповідне значення опору $R_{\text{б}}$ (рис. 4.3). Цьому сприяє перехідна характеристика $i_K(i_{\text{б}})$, яка зв'яже вихідну характеристику транзистора з вхідною (рис. 4.4).

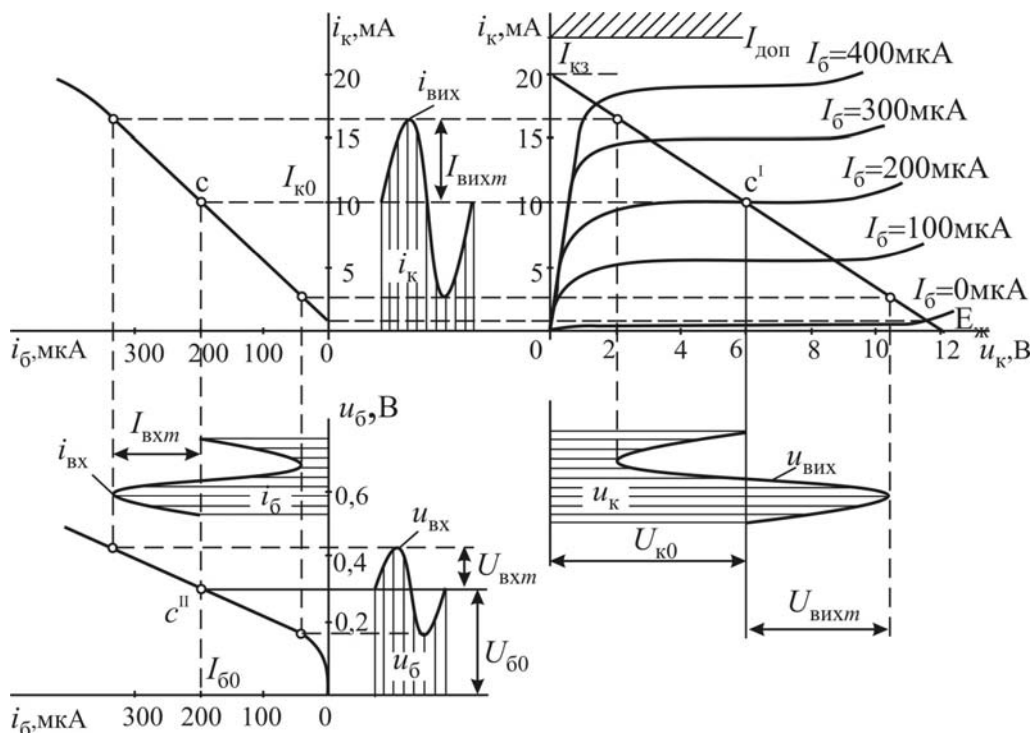


Рисунок 4.4 – Робота підсилювального каскаду на біполярному транзисторі при $E_{\text{ж}} = 12 \text{ В}$ і $R_K = 600 \text{ Ом}$

За допомогою цієї характеристики знаходять точку c'' вхідної характе-

тики і в ній визначають базову напругу U_{60} та базовий струм I_{60} , а далі з рівняння, записаного за другим законом Кірхгофа для базового контуру, опір

$$R_6 = \frac{E_{ж} - U_{60}}{I_{60}} \cong \frac{E_{ж}}{I_{60}}, \quad (4.5)$$

тому що $E_{ж} \gg U_{60}$.

Процес підсилення вхідного сигналу відбувається наступним чином (рис. 4.4). Змінна напруга $u_{вх}$, що потрапляє на вхід, додається до напруги U_{60} на конденсаторі $C_{вх}$ і утворює змінну напругу на базі $u_6 = U_{60} + u_{вх}$. Змінюючись у межах, визначених зміною напруги на вході, базова напруга змінює в тих же межах базовий струм, який буде тепер складатися зі струму спокою і змінного вхідного струму: $i_6 = I_{60} + i_{вх}$. Внаслідок зміни базового струму змінюється колекторний струм, а це, в свою чергу, призводить до зміни напруги на колекторі. Виникають змінні струм і напруга на виході: $i_{вих} = I_{к0} - i_{к}$; $u_{вих} = u_{к} - U_{к0}$.

Важливо також відзначити, що, крім підсилення, на виході з підсилювального каскаду виникає фазовий зсув напруги і струму на 180° відносно входу, тобто збільшення вхідного сигналу призводить до зменшення напруги на виході і навпаки (рис. 4.4).

Якщо зміна вхідної напруги, струмів бази і колектора лежить у межах лінійних частин вхідної і перехідної характеристик, то форма вихідної напруги буде відповідати формі вхідної. Наприклад, за наявності синусоїдальної напруги на вході, напруга на виході також буде синусоїдальною. Але занадто велика вхідна напруга буде виводити змінні складові струмів за межі лінійних ділянок вхідної і перехідної характеристик, внаслідок цього форма вихідної напруги значно спотворюється, а коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = U_{вихт} / U_{вхт}$ зменшується. Це добре видно на амплітудній характеристиці підсилювального каскаду (рис. 4.5), лінійна частина якої відповідає діапазону вхідних напруг, які не спотворюють вихідну напругу.

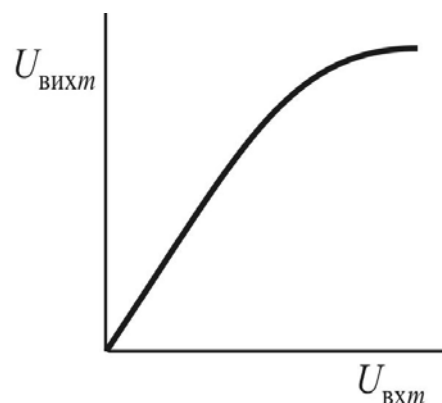


Рисунок 4.5 – Амплітудна характеристика підсилювального каскаду

4.2.2. Схема заміщення підсилювального каскаду

При роботі підсилювального каскаду в режимі, який відповідає лінійним ділянкам характеристик, коефіцієнт підсилення можна визначити аналітично, за допомогою h -параметрів транзистора. Враховуючи те, що для змінних складових струмів падіння напруги на конденсаторах і в джерелі живлення можна прийняти рівним нулю, схему заміщення підсилювального каскаду можна подати, як зображено на рис. 4.6, де пунктиром окреслено схему заміщення біполярного транзистора.

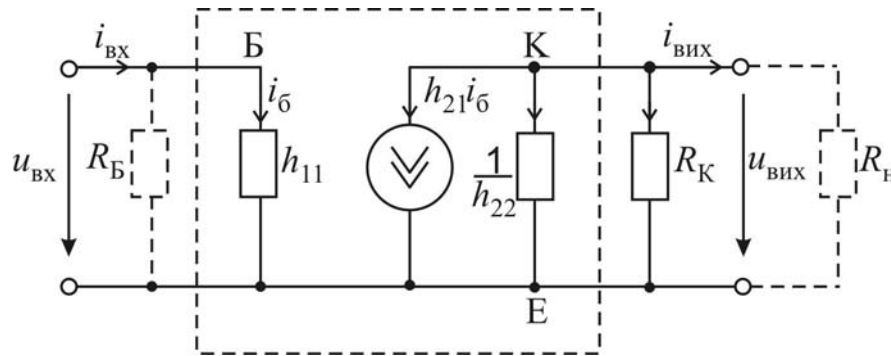


Рисунок 4.6 – Схема заміщення підсилювального каскаду зі спільним емітером

Як правило, $R_Б \gg h_{11}$, тому

$$u_{вх} = \frac{h_{11}R_Б}{h_{11} + R_Б} \cdot i_{вх} \cong h_{11}i_{вх}. \quad (4.6)$$

За першим законом Кірхгофа для колекторного вузла

$$h_{21}i_Б + h_{22}u_{вх} + u_{вх}/R_К + u_{вх}/R_Н = 0. \quad (4.7)$$

Використовуючи те, що $R_Н \gg R_К$, а $i_Б \cong i_{вх}$, це рівняння приведемо до такого вигляду:

$$h_{21}i_{вх} + h_{22}u_{вх} + u_{вх}/R_К = 0. \quad (4.8)$$

Підставляючи в нього із (4.6) $i_{вх} = u_{вх}/h_{11}$, остаточно отримаємо

$$u_{вх} = -\frac{u_{вх}}{h_{11}} \cdot \frac{h_{21}}{h_{22} + 1/R_К}. \quad (4.9)$$

Знак “мінус” ще раз підтверджує, що вихідна напруга знаходиться у протифазі з вхідною.

Таким чином, коефіцієнт підсилення за напругою не перевантаженого підсилювального каскаду зі спільним емітером

$$K_U = \frac{U_{\text{вихм}}}{U_{\text{вхм}}} = \frac{h_{21}R_K}{h_{11}(1 + h_{22}R_K)} \cong h_{21} \frac{R_K}{h_{11}}, \quad (4.10)$$

тому що $h_{22}R_K \ll 1$ (зазвичай $h_{22} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ см; $R_K = 10^3 \dots 10^4$ Ом).

Отже, коефіцієнт підсилення за напругою є пропорційним коефіцієнту підсилення за струмом $K_I = I_{\text{вихм}}/I_{\text{вхм}} = h_{21}$ і співвідношенню опорів колекторного резистора R_K та входу у транзистор h_{11} .

4.2.3. Температурна стабілізація підсилювального каскаду

На роботу біполярного транзистора істотно впливає температура. При її підвищенні колекторні характеристики змінюються і колекторний струм зростає (рис. 4.7). Це призводить до погіршення роботи підсилювального каскаду, оскільки лінійний діапазон підсилення звужується.

Для того щоб запобігти цьому, в емітерне коло підсилювального каскаду зі спільним емітером додається резистор R_E і паралельно ньому конденсатор C_E , ємнісний опір якого в діапазоні робочих частот вхідного сигналу близький до нуля

(рис. 4.8). У коло бази вводиться розподільвач напруг $R'_B R''_B$ для створення початкової напруги зсуву між базою та емітером:

$$U_{6E} = \frac{E_{ж} R'_6}{R'_6 + R''_6} - R_E I_E. \quad (4.11)$$

При збільшенні емітерного струму $I_E \cong I_K$ внаслідок підвищення температури зменшується U_{6E} і, відповідно, базовий струм. Зменшення базового струму сприяє поверненню назад точки спокою на колекторній характеристиці (рис. 4.7).

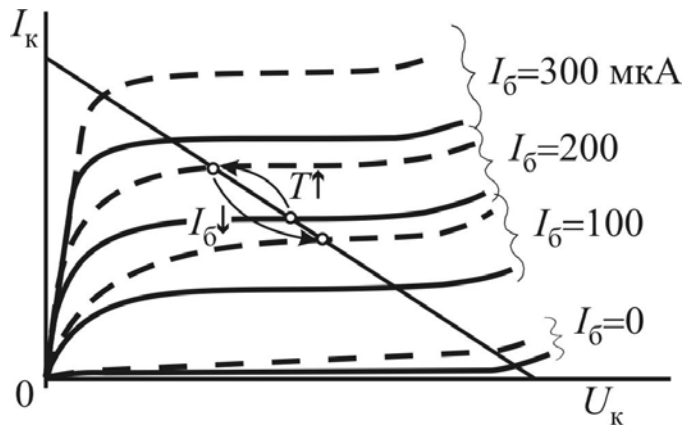


Рисунок 4.7 – Механізм стабілізації роботи підсилювального каскаду при підвищенні температури

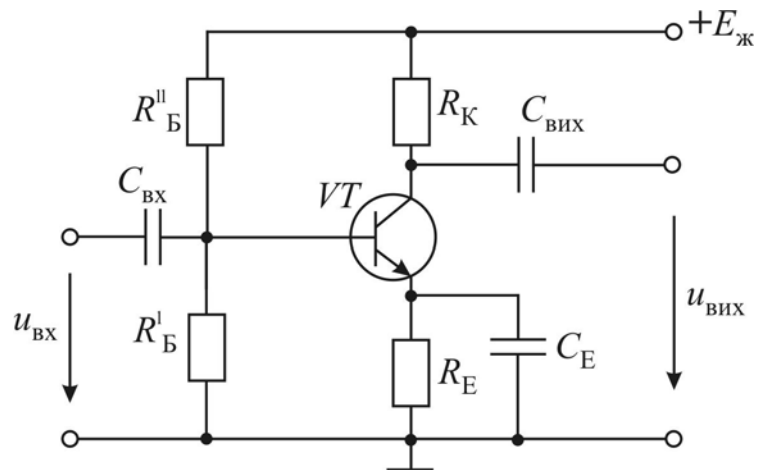


Рисунок 4.8 – Підсилювальний каскад з емітерною температурною стабілізацією

Одночасно конденсатор C_E , що шунтує резистор R_E , дозволяє уникнути зменшення змінної напруги вхідного сигналу при передачі її на базу – емітер:

$$u_{BE} = u_{BX} - \frac{R_E x_{CE}}{R_E + x_{CE}} \cdot i_E \cong u_{BX}, \quad (4.12)$$

тому що $x_{CE} \rightarrow 0$.

4.3. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі

Порівняно з біполярним транзистором польовий транзистор має набагато більший вхідний опір і, відповідно, споживає набагато менше електричної енергії. Це сприяє широкому застосуванню підсилювальних каскадів на польових транзисторах в інформаційній електроніці, мікропроцесорній техніці, різного роду системах кодування.

Найчастіше використовують підсилювальний каскад зі спільним витоком, схема якого наведена на рис. 4.9. Як і в підсилювальному каскаді на біполярному транзисторі, у каскаді на польовому транзисторі розрізняють режими спокою і підсилення; останній супроводжується проходженням через

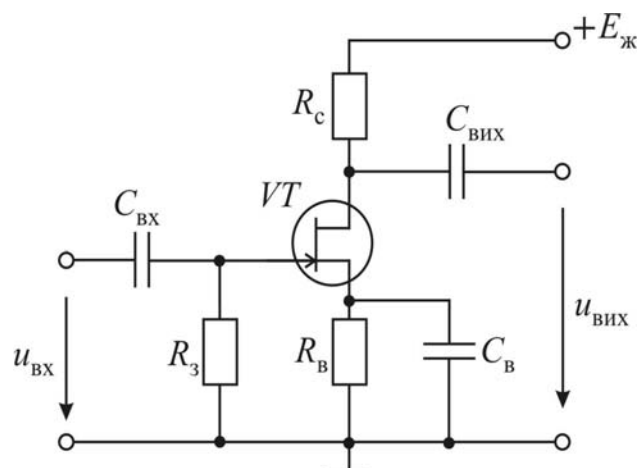


Рисунок 4.9 – Схема підсилювального каскаду зі спільним витоком

каскад змінної складової струму i_c (рис. 4.10).

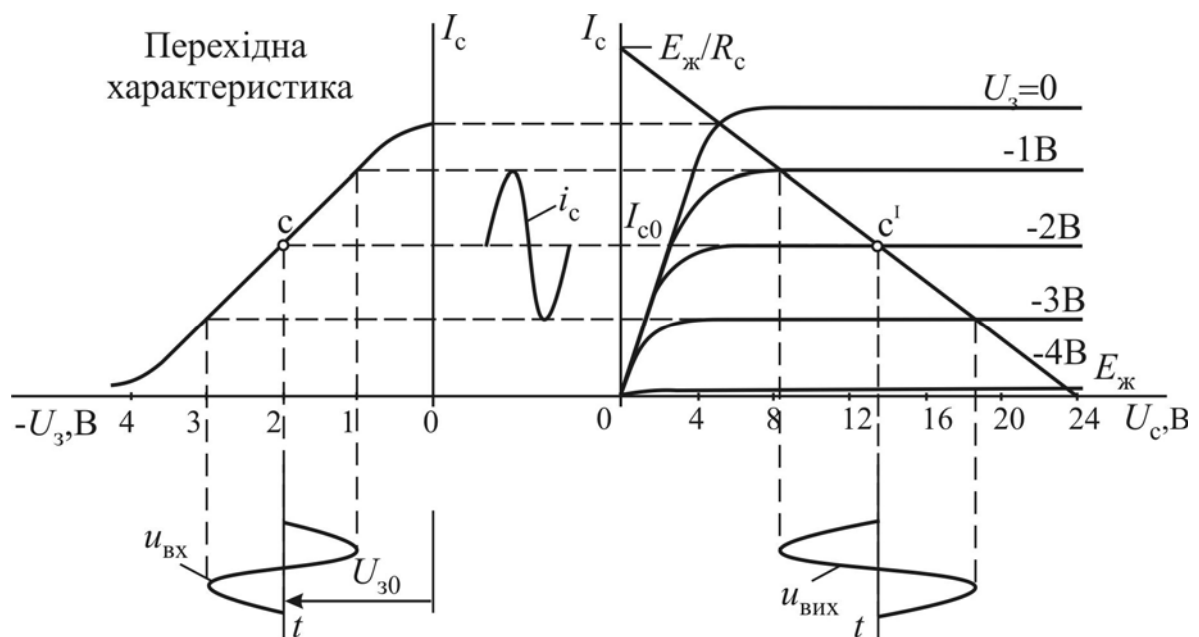


Рисунок 4.10 – Робота підсилювального каскаду зі спільним витоком

Електричні параметри для постійного і змінного струму визначаються конденсаторами $C_{вх}$, $C_{в}$, $C_{вих}$, ємність яких така, що в діапазоні робочих частот змінного струму падіння напруги на них практично відсутнє, а при постійному струмі відбувається розрив кола.

За допомогою резистора R_c здійснюється підсилення вхідного сигналу. Внаслідок того, що для змінної складової струму внутрішній опір джерела живлення близький до нуля, то $u_{вих} = -R_c i_c$; тобто, як і у каскаді на біполярному транзисторі, у підсилювальному каскаді на польовому транзисторі вихідна напруга протифазна до вхідної. До того ж вона значно більша за вхідну, оскільки напруга в колі стоку значно більша порівняно з напругою в колі затвору.

Резистор R_c визначає також характеристику навантаження. Його значення обирають таким, щоб стоковий струм короткого замикання не перевищував допустимий струм для даного транзистора: $R_c = E_{ж} / I_{кc}$.

Резистори R_3 і R_b потрібні для визначення точки спокою c (рис. 4.10). Резистор у колі затвору R_3 забезпечує в режимі спокою рівність потенціалів затвору і спільної точки підсилювального каскаду. В той же час на витоку виникає напруга від постійної складової струму стоку. Значення потенціалу на затворі відносно цієї напруги стає від'ємним, на ньому створюється напруга зсуву U_{30} , яка

і визначає точку спокою. Відповідно, $R_B = |U_{30}|/I_{C0}$.

Зазвичай точку спокою розташовують посередині лінійної частини динамічної перехідної характеристики, а процес підсилення відбувається аналогічно підсиленню в каскаді з біполярним транзистором.

4.4. Режими роботи підсилювального каскаду

В залежності від розташування точки спокою на характеристиках транзисторів розрізняють три основні режими роботи підсилювальних каскадів: А, В, С. Відрізняються ці режими за ступенем спотворення вхідного сигналу при підсиленні і значенням ККД.

Режим А. Робоча точка c обирається на лінійних ділянках вхідної і перехідної характеристик (як правило, посередині). На рис. 4.11 показано, що при знаходженні вхідного сигналу в межах лінійної частини перехідної характеристики, його підсилення відбувається практично без спотворень. Тому режим А широко застосовують в підсилювачах напруги. Однак він має такий істотний недолік, як низький ККД.

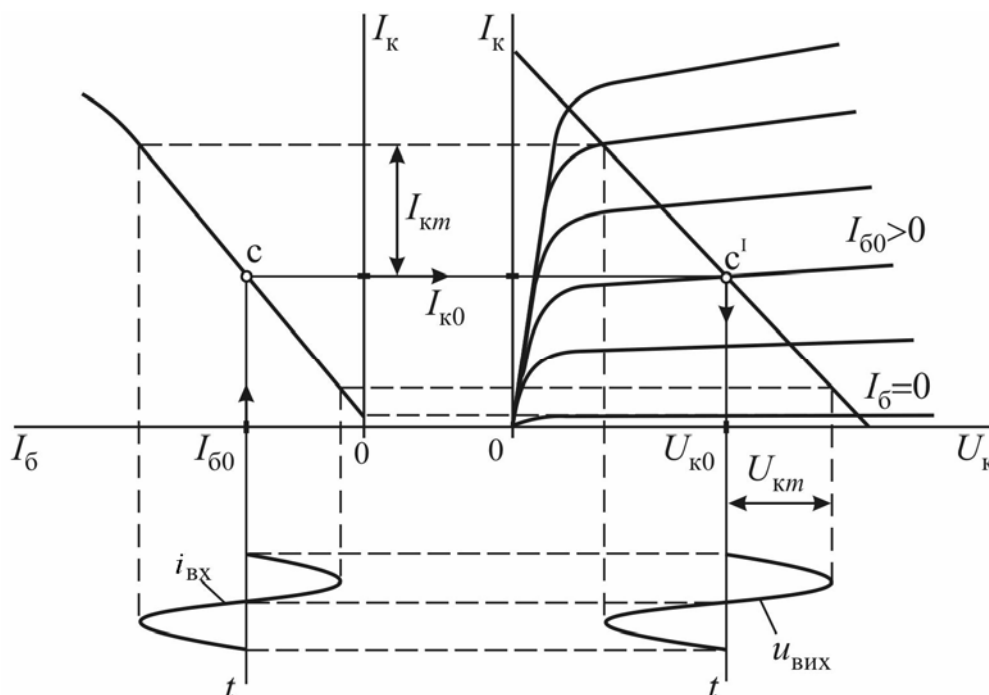


Рисунок 4.11 – Робота підсилювального каскаду в режимі А

ККД підсилювального каскаду (як і підсилювача в цілому) визначається відношенням вихідної потужності $P_{ВИХ}$ до потужності, що споживається від

джерела живлення

$$P_0 = E_{ж} I_{K0} . \quad (4.13)$$

У режимі А

$$P_{вих} = U_{вих} I_{вих} = \frac{U_{км}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{км}}{\sqrt{2}} = 0,5 \cdot U_{км} I_{км} , \quad (4.14)$$

де $U_{км}$ і $I_{км}$ – амплітудні значення змінних складових колекторних напруг і струму.

Таким чином,

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_0} = 0,5 \frac{U_{км} I_{км}}{E_{ж} I_{K0}} , \quad (4.15)$$

і враховуючи те, що завжди $U_{км} < 0,5E_{ж}$ і $I_{км} < I_{K0}$ (це добре видно з рис. 4.11), ККД завжди буде менше 0,25. На практиці ККД рідко перевищує 0,15.

Режим В. Робоча точка c обирається на початку перехідної характеристики транзистора (точка відсічки). Внаслідок цього змінні складові струму і напруги транзистора виникають тільки в позитивні півперіоди вхідного сигналу (рис. 4.12).

При синусоїдальній вхідній напрузі вихідна напруга підсилювального каскаду має форму півсинусоїди. Для того щоб на виході була синусоїда, підсилювальний каскад має бути двотактним.

Режим В використовують, як правило, в підсилювачах потужності, де велике значення має ККД, який у цьому режимі вищий у порівнянні з режимом А і може досягати 60 %. Цьому сприяє те, що струм спокою практично дорівнює нулю, а постійна складова струму за наявності вхідної напруги є порівняно невеликою.

Режим С. Робоча точка c обирається за точкою відсічки. Тому струм в транзисторі проходить протягом частини позитивного півперіоду вхідного сигналу (рис. 4.13). Це призводить до значних спотворень напруги, що підсилюється, але ККД може бути значним і наближатися до 80 %. Режим С застосовують у вибіркових (селективних) підсилювачах та в автогенераторах.

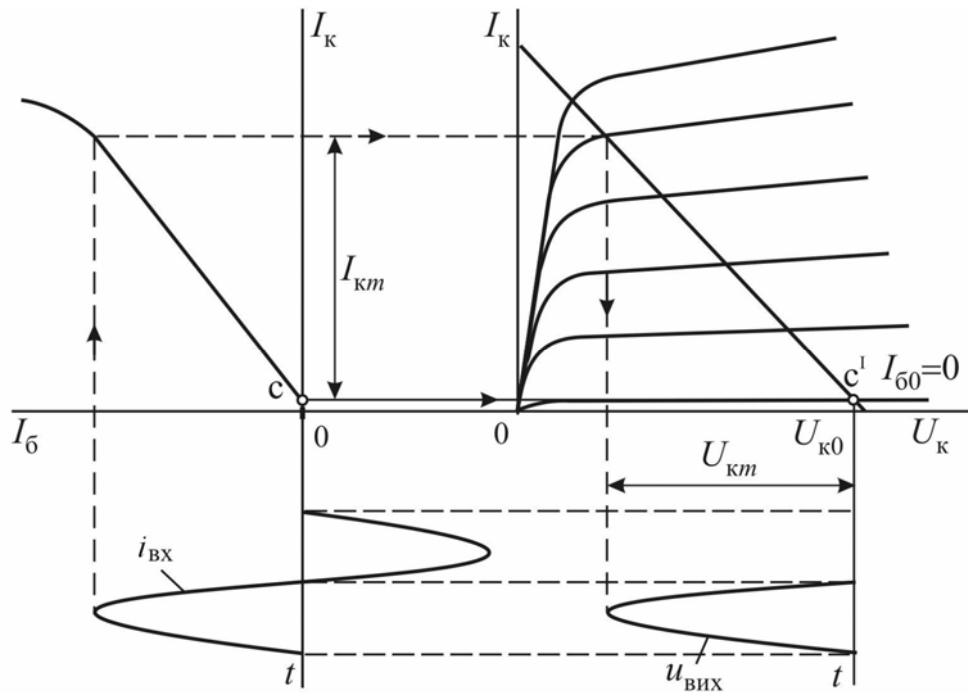


Рисунок 4.12 – Робота підсилювального каскаду в режимі В

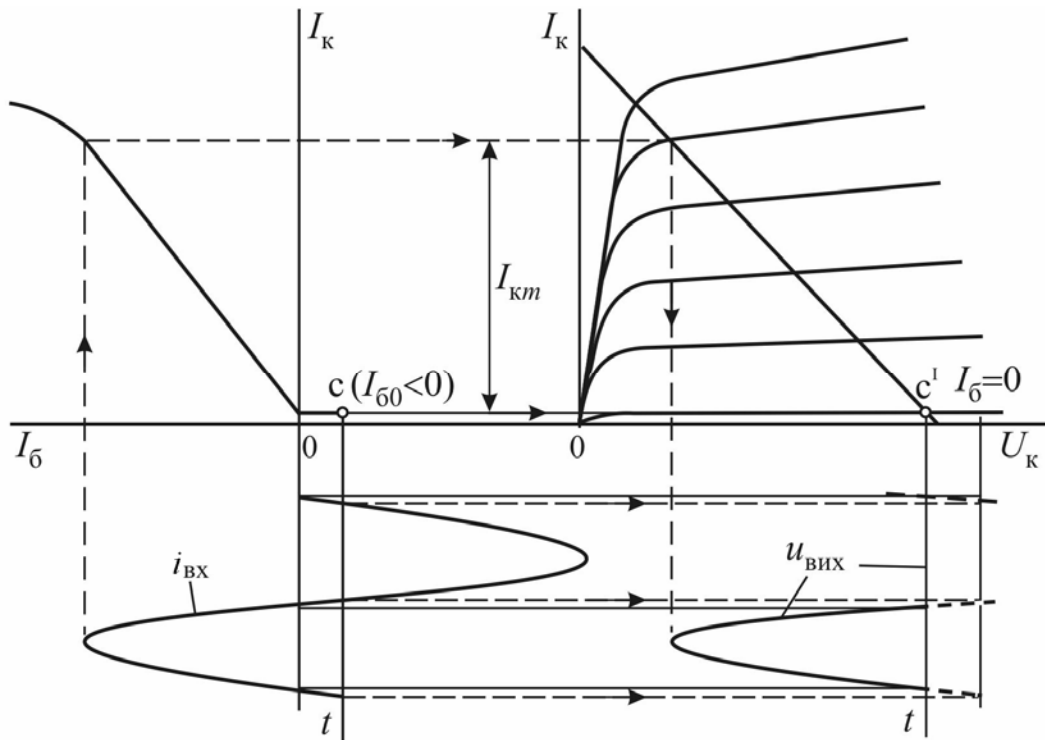


Рисунок 4.13 – Робота підсилювального каскаду в режимі С

4.5. Каскадні підсилювачі напруги з резистивно-ємнісним зв'язком

В багатьох випадках потрібно, щоб значення коефіцієнта підсилення за напругою було набагато більше того, що може дати один підсилювальний каскад. Для забезпечення цього використовують багатокаскадні підсилювачі, в тому числі з резистивно-ємнісним зв'язком. На рис. 4.14 наведено схему двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах.

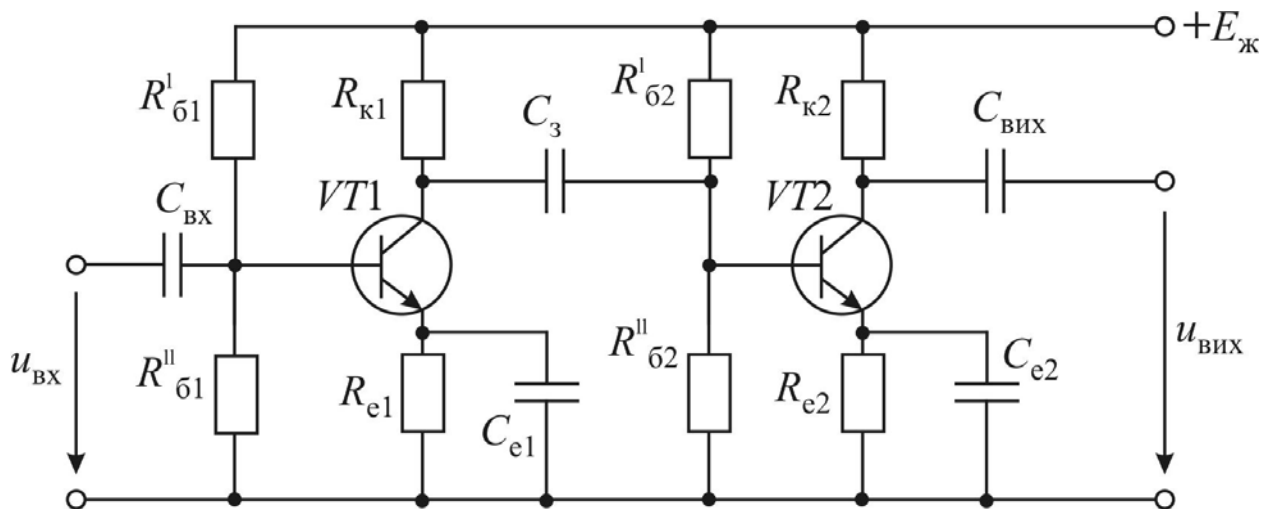


Рисунок 4.14 – Схема двокаскадного підсилювача напруги на біполярних транзисторах з резистивно-ємнісним зв'язком

Він працює наступним чином. Вхідний сигнал через конденсатор $C_{\text{вх}}$ надходить на базу першого транзистора $VT1$, колектор якого з'єднаний конденсатором зв'язку C_3 зі входом до другого підсилювального каскаду (база транзистора $VT2$). Каскади побудовані подібно, і в кожному з них відбувається підсилення вхідної напруги. Якщо двох каскадів замало для отримання потрібного коефіцієнта підсилення, можна збільшити їх кількість до 4–5, аналогічно з'єднуючи їх за допомогою конденсаторів зв'язку.

Зрозуміло, що при зниженні частоти змінної напруги вхідного сигналу на конденсаторах зв'язку (до яких, безперечно, належать і $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вих}}$) буде все більше падати напруга, що призведе до зменшення коефіцієнта підсилення. При нульовій частоті проходження змінного струму взагалі перекриється, і коефіцієнт підсилення стане нульовим. Відповідно, на амплітудно-частотній характеристиці підсилювача напруги встановлюють нижню допустиму межу його роботи

по частоті f_H і коефіцієнту підсилення K_H , значення останнього не може бути менше $0,7K_{U_{НОМ}}$ (рис. 4.15).

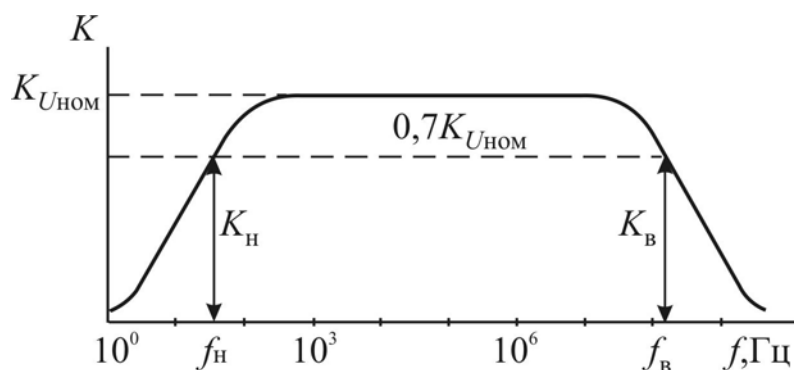


Рисунок 4.15 – Приклад амплітудно-частотної характеристики підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком

Причиною зниження коефіцієнта підсилення на низьких частотах є наявність роздільних конденсаторів $C_{ВХ}$, C_3 , $C_{ВИХ}$, а також C_{e1} , C_{e2} оскільки опір конденсатора

$$X_C|_{\omega \rightarrow 0} = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \infty.$$

У результаті на роздільних конденсаторах падає

частина напруги сигналу, який має передаватися у наступний каскад або навантаження, а з зростанням опору конденсаторів C_{e1} , C_{e2} виникає суттєвий негативний зворотній зв'язок за підсилюваним сигналом змінної напруги.

Причини зниження коефіцієнта підсилення на високих частотах є такі:

- зниження коефіцієнта передачі транзистора за струмом при $f > f_B$;
- наявність у схемі паразитних конденсаторів та індуктивностей, оскільки

$X_C|_{\omega \rightarrow \infty} = \frac{1}{\omega C} = 0$; $X_L|_{\omega \rightarrow \infty} = \omega L \rightarrow \infty$, то зі збільшенням частоти сигналу (або для його вищих складових гармонік) розосереджена ємність ліній зв'язку в межах каскаду шунтує частину енергії підсилюваного сигналу, а індуктивність провідників веде до падіння на них напруги. У результаті коефіцієнт підсилення знижується.

Таким чином визначається верхня допустима межа частоти f_B , якій відповідає $K_B = 0,7K_{U_{НОМ}}$.

Зниження коефіцієнта підсилення в області нижніх і верхніх частот називають *частотним спотворенням*, оскільки при підсиленні несинусоїдальної напруги окремі її складові мають різну частоту і тому підсилюються по-різному, а форма вихідної напруги спотворюється відносно вхідної.

Діапазон частот між верхньою f_B і нижньою f_H допустимими частотами називається *смугою пропускання* підсилювача.

4.6. Підсилювачі потужності

4.6.1. Загальні відомості про підсилювачі потужності

У промисловій електроніці дуже часто виникає потреба отримати велику потужність на виході з підсилювача. Підсилювальні каскади, що забезпечують таку потребу, ставлять на виході з підсилювача, а сам він називається підсилювачем потужності.

Для отримання максимальної потужності на виході останній каскад підсилювача повинен працювати в режимі В або С.

У разі невеликого опору навантажувального пристрою підсилювальний каскад з'єднується з ним за допомогою знижувального трансформатора, первинна обмотка якого знаходиться у колекторному колі. Таким чином можна збільшити до необхідного рівня приведеній до цього кола опір навантаження

$$R'_H = (W_1 / W_2)^2 R_H. \quad (4.16)$$

Якщо значення опору навантажувального пристрою близьке до значення вихідного опору підсилювального каскаду, то необхідності у трансформаторному зв'язку немає, і він може бути резистивно-ємнісним.

Велике практичне значення для підсилювачів потужності має ККД, який істотно залежить від режиму роботи транзистора. Тому найчастіше у підсилювачах потужності використовується режим В, який забезпечує достатньо високий ККД. Але при підсилюванні вхідного сигналу у цьому режимі виникають значні нелінійні спотворення, і, щоб їх зменшити, застосовують двотактні підсилювальні каскади.

4.6.2. Двотактний підсилювач потужності

Двотактний підсилювач потужності (рис. 4.16) складається з двох симетричних частин.

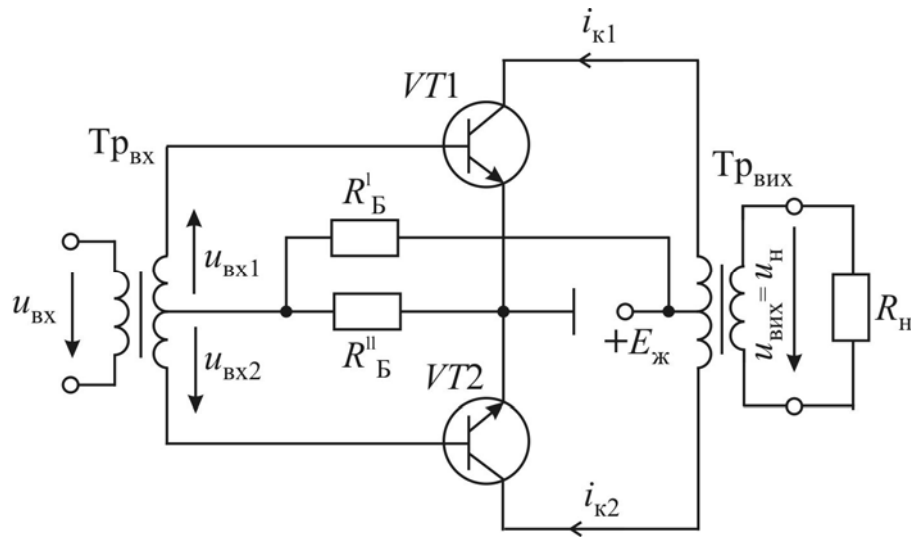


Рисунок 4.16 – Схема двотактного підсилювача потужності

Транзистори $VT1$ і $VT2$, які повинні мати максимально близькі характеристики, працюють в однаковому режимі. Єдина відмінність в роботі цих транзисторів полягає у протифазній подачі напруги на їхні бази з вхідного трансформатора $Tr_{вх}$. Відповідно, зміни напруги в колекторних колах транзисторів $VT1$ і $VT2$ також будуть знаходитись у протифазі. При роботі в режимі В, коли при синусоїдальній напрузі на вході залишається тільки одна напівсинусоїда на виході з транзистора, можна за допомогою вихідного трансформатора $Tr_{вих}$ скласти ці протифазні напівсинусоїди з транзисторів $VT1$ і $VT2$ та отримати синусоїдальну напругу на виході з підсилювача потужності.

4.6.3. Безтрансформаторний підсилювач потужності

Безтрансформаторний двотактний підсилювач потужності (рис. 4.17) утворюється також на двох транзисторах, але різних типів: $VT1$ – типу $n-p-n$; $VT2$ – типу $p-n-p$. Транзистори, як правило, включаються за схемою зі спільним колектором, що дає найменший вихідний опір, а це важливо при роботі на низькоомне навантаження. Незалежно від схеми включення характеристики транзисторів повинні бути максимально близькими.

На бази транзисторів $VT1$ і $VT2$, які при постійному струмі з'єднані послідовно, а при змінній складовій (через конденсатор $C_{вих}$) – паралельно з навантаженням $R_н$, надходить однакова змінна вхідна напруга. Але внаслідок різної структури транзисторів відкриватися вони будуть у протифазі і, відповідно, на спільну точку змінні складові колекторних струмів будуть приходити у проти-

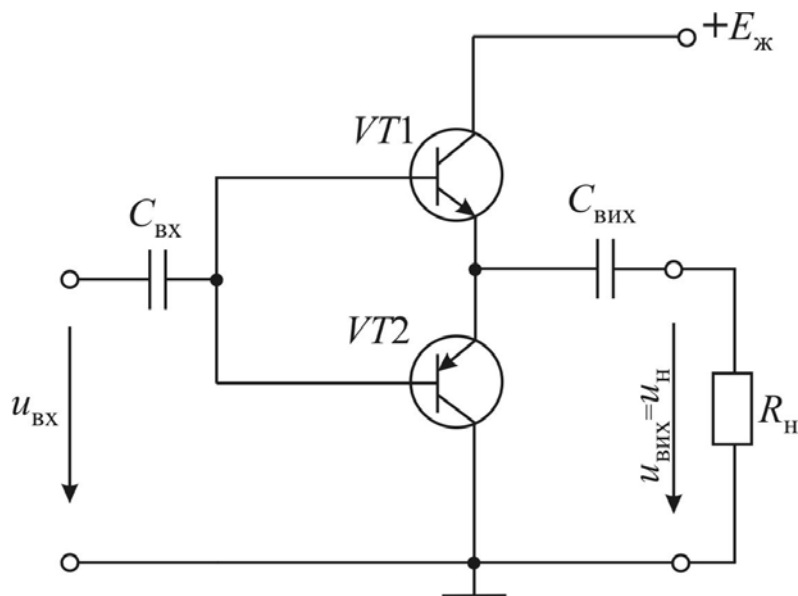


Рисунок 4.17 – Схема двотактного безтрансформаторного підсилювача потужності

показані, але обговорювалися раніше.

фазі, а в навантажувальному пристрої з опором R_n підсумовуватися. Сумарний струм навантаження в режимі А вдвічі перевищуватиме змінну складову струму одного транзистора, а в режимі В складатиметься з двох півхвиль, що будуть по черзі проходити через кожний транзистор. Зрозуміло, що ці режими забезпечуватимуться відповідними опором в базовому колі, які на схемі не

4.7. Підсилювачі постійного струму

Підсилювач, у якого на найнижчих частотах не зменшується коефіцієнт підсилення (рис. 4.18), називається *підсилювачем постійного струму* (ППС). Необхідність забезпечувати підсилення вхідного сигналу постійної напруги створює специфічні труднощі, пов'язані з відокремленням цього сигналу від постійних складових напруг і струмів в режимі спокою. Для цього використовують різноманітні компенсаційні методи, які реалізують в підсилювачах постійного струму з одним або двома джерелами живлення.

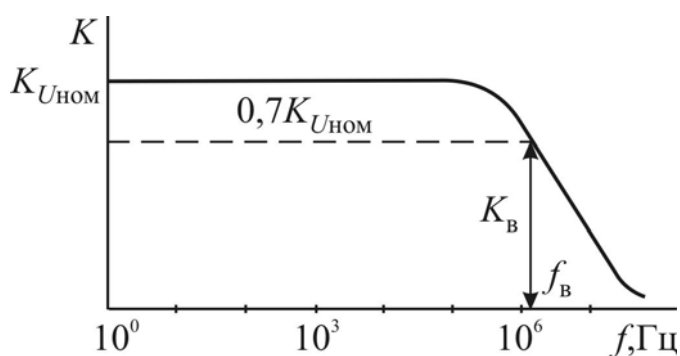


Рисунок 4.18 – Приклад амплітудно-частотної характеристики ППС

4.7.1. Підсилювач постійного струму з одним джерелом

Живлення

Найпростіша схема підсилювача постійного струму з одним джерелом живлення зображена на рис. 4.19, *a*.

В основу його будови покладено вже розглянутий підсилювальний каскад на біполярному транзисторі (окреслений на схемі пунктирною лінією), але без конденсатора в колі емітера, який хоча і зменшує коефіцієнт підсилення, зате збільшує пропускну смугу частот. На відміну від підсилювачів з резистивно-ємнісним зв'язком, в наведеній схемі вихід на навантаження R_H розташований між колектором транзистора з потенціалом φ_K і середньою точкою розподільвача напруги R_3R_4 з потенціалом φ_2 , а вхідна напруга $u_{вх}$ подається між базою транзистора з потенціалом $\varphi_Б$ та середньою точкою розподільвача напруги R_1R_2 з потенціалом φ_1 .

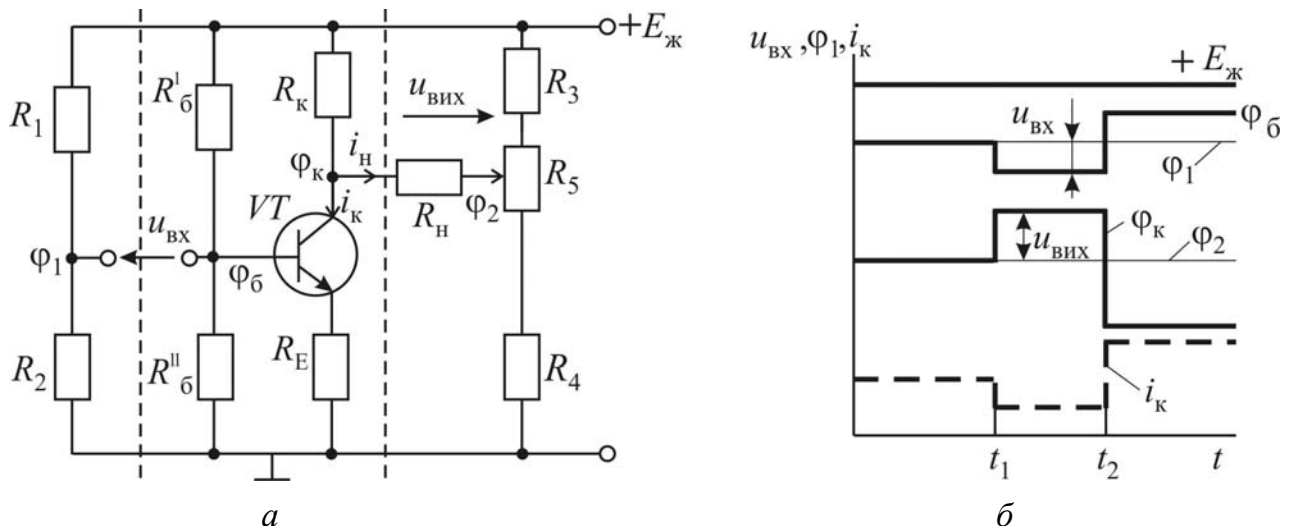


Рисунок 4.19 – Схема (*a*) і потенційні діаграми (*б*) ППС з одним джерелом живлення

За відсутності вхідної напруги ($u_{вх} = 0$) $\varphi_Б = \varphi_1$, $\varphi_K = \varphi_2$, внаслідок цього $i_H = 0$ і $u_{вих} = 0$ (рис. 4.19, *б*). Для точного підстроювання на режим у вихідному колі передбачено змінний резистор R_5 .

При подачі вхідного сигналу $u_{вх}$ змінюються базовий і колекторний струми, що, в свою чергу, змінює потенціал на колекторі транзистора VT :

$$\varphi_K = E_{ж} - R_K i_K.$$

З'являються напруга на виході $u_{вих}$ і струм навантаження i_H . Все це відображають потенціальні діаграми підсилювача, наведені на рис. 4.19, *б*.

Головним недоліком схеми ППС з одним джерелом живлення є те, що вхід і вихід підсилювача не з'єднуються зі спільною точкою нульового потенціалу (корпус), а таке з'єднання зі спільною точкою є необхідним в складних електронних пристроях зі значною кількістю підсилювальних каскадів.

4.7.2. Підсилювач постійного струму з двома джерелами живлення

Згаданого у п. 4.7.1 недоліку ППС з одним джерелом живлення позбавлений підсилювач постійного струму з двома джерелами живлення. Найпростіша схема такого однокаскадного підсилювача зображена на рис. 4.20, а. Два джерела живлення ($+E_1$ і $-E_2$) створюють додатну та від'ємну напруги відносно спільної точки з нульовим потенціалом (\perp).

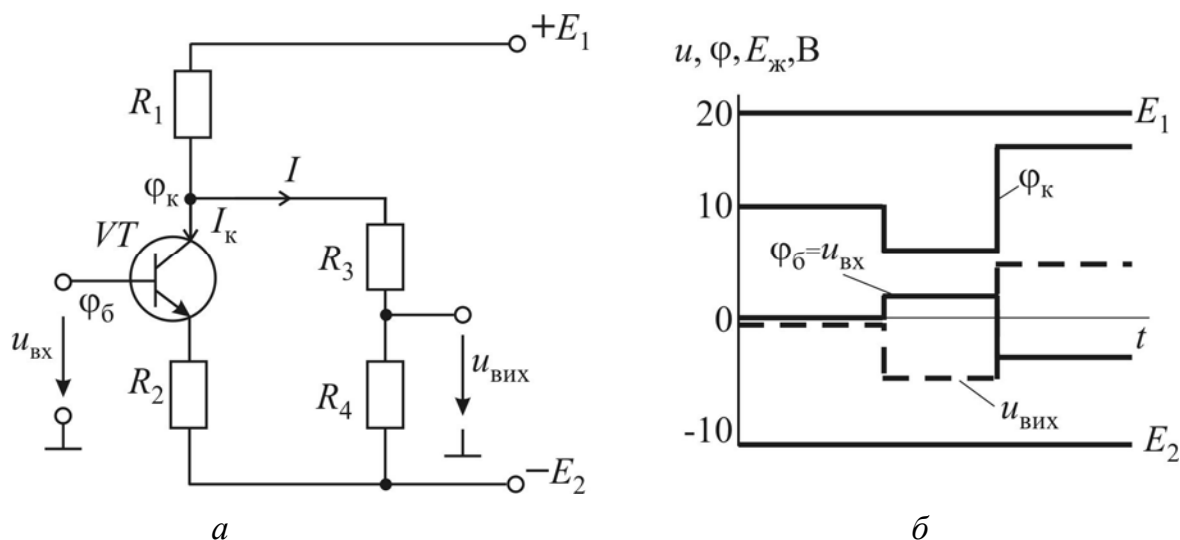


Рисунок. 4.20 – Схема (а) і потенціальні діаграми (б) ППС з двома джерелами живлення

За відсутності вхідного сигналу ($U_{\text{вх}} = 0$) потенціал бази транзистора $\varphi_{\text{б}} = 0$, а потенціал емітера $\varphi_{\text{Е}}$ становить приблизно $-0,5$ В. Потенціал колектора $\varphi_{\text{К}}$ залежить від напруг джерел живлення і показаний на рис. 4.20, б для $E_1 = 20$ В і $E_2 = 10$ В. До розподільника R_3R_4 прикладена напруга

$$U_{R_3} + U_{R_4} = \varphi_{\text{К}} - (-E_2) = \varphi_{\text{К}} + E_2.$$

Щоб напруга на виході $U_{\text{вих}}$ дорівнювала нулю при $U_{\text{вх}} = 0$, потенціал середньої точки розподільника R_3R_4 має бути нульовим, а це можливо тільки за умови $U_{R_3} = \varphi_{\text{К}}, U_{R_4} = E_2$. Це забезпечується опороми $R_3 = U_{R_3} / I = \varphi_{\text{К}} / I$ і

$$R_4 = U_{R4} / I = E_2 / I, \text{ де } I = (0,02 \dots 0,1) I_K.$$

При подачі вхідної напруги $u_{\text{вх}}$ залежно від її полярності збільшується або зменшується базовий струм транзистора і, відповідно, збільшується або зменшується його колекторний струм. Зміна колекторного струму обумовлює зміну падіння напруги на резисторі R_1 , а це відбивається на потенціалі φ_K . Зміна потенціалу φ_K уводить середню точку розподільвача $R_3 R_4$ з нуля, і на виході виникає напруга $U_{\text{вих}}$, полярність якої протилежна до вхідної (рис. 4.20, б).

Коефіцієнт підсилення такого підсилювального каскаду за умови

$$R_3 \gg R_1, R_4 \gg R_1,$$

що дозволяє не враховувати шунтуючу дію розподільвача, буде таким:

$$K = K_0 \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad (4.17)$$

де K_0 – коефіцієнт підсилення на виході з транзистора.

Якщо $R_4 \gg R_3$, то зменшення коефіцієнта підсилення є незначним. Але це потребує великої напруги джерела E_2 , а в більшості випадків $E_2 = (0,5 \dots 1) E_1$. Тому R_3 , як правило, близький за значенням до R_4 , і коефіцієнт підсилення зменшується у 1,5...2 рази.

Розглянуті підсилювачі постійного струму мають специфічний недолік, який ускладнює підсилення слабких постійних напруг і струмів. Це так званий *дрейф нуля* підсилювача постійного струму. Він полягає у тому, що навіть за відсутності вхідного сигналу на виході підсилювача виникає напруга (внаслідок нестабільності джерел живлення, старіння транзистора, зміни зовнішньої температури тощо), яка принципово не відрізняється від корисного сигналу. Цю напругу, поділену на коефіцієнт підсилення, і називають дрейфом нуля, приведеним до входу підсилювача:

$$U_{\text{др}} = U_{\text{вих}} / K \text{ (при } U_{\text{вх}} = 0). \quad (4.18)$$

З достатньою точністю ППС може відтворювати на виході тільки ті сигнали, що значно більші за напругу дрейфу, тобто за умови $U_{\text{вх}} \gg U_{\text{др}}$. Тому для підвищення чутливості ППС (а це особливо важливо для мікросхем) застосовують спеціальні заходи, спрямовані на зниження дрейфу нуля, а саме:

- стабілізацію напруги джерел живлення, температурного режиму;
- використання диференціальних (балансних) схем ППС, в основу будови

- яких покладено принцип дії врівноваженого чотирьохплечового моста;
- проміжне перетворення підсилюваної постійної напруги на змінну.

4.8. Зворотні зв'язки в підсилювачах

Використання вхідної напруги підсилювача (або її частини) для впливу на вхідний сигнал називають *зворотним зв'язком*. Структурна схема підсилювача зі зворотним зв'язком зображена на рис. 4.21. Якщо за наявності зворотного зв'язку до вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ додається напруга зворотного зв'язку $U_{\text{зв}}$ і внаслідок цього на підсилювач подається збільшена напруга U_1 , то такий зворотний зв'язок називають *позитивним*.

Зворотний зв'язок, що зменшує вхідний сигнал і, відповідно, напругу на виході з підсилювача $U_{\text{вих}}$, називається *негативним*.

Усі зворотні зв'язки поділяються на зворотні зв'язки за напругою і за струмом. У зворотному зв'язку за напругою $U_{\text{зв}} = \beta U_{\text{вих}}$, де β – коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку.

В зворотному зв'язку за струмом $U_{\text{зв}} = R_{\text{зв}} i_{\text{вих}}$, де $R_{\text{зв}}$ – взаємний опір вихідного кола і кола зворотного зв'язку.

Зрозуміло, що для підсилювача без зворотного зв'язку $U_{\text{вх}} = U_1$, тому його коефіцієнт підсилення $K = U_{\text{вих}} / U_1$.

Для того щоб визначити залежність коефіцієнта підсилення від коефіцієнта передачі ланки зворотного зв'язку β , запишемо згідно з другим законом Кірхгофа рівняння для напруг на вході до підсилювача зі зворотним зв'язком за напругою:

$$U_{\text{вх}} = U_1 - U_{\text{зв}} = U_1 - \beta U_{\text{вих}}. \quad (4.19)$$

Відповідно, для підсилювача зі зворотним зв'язком коефіцієнт підсилення

$$K_{\text{зв}} = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}} = U_{\text{вих}} / (U_1 - \beta U_{\text{вих}}) = K / (1 - \beta K). \quad (4.20)$$

Ця формула наочно показує, що при $\beta > 0$ (позитивний зворотний зв'язок)

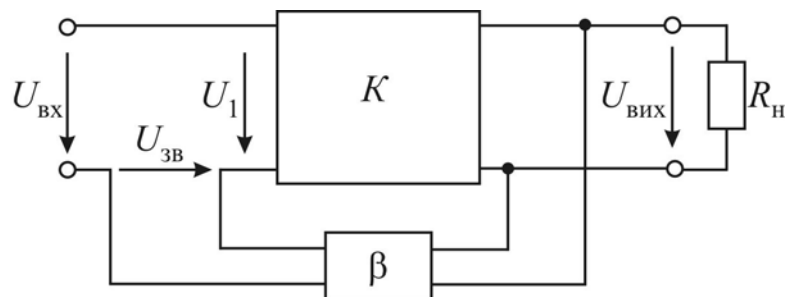


Рисунок 4.21 – Схема підсилювача K з ланкою зворотного зв'язку β

коефіцієнт підсилення $K_{зв}$ збільшується у порівнянні з коефіцієнтом підсилення K без зворотного зв'язку, а при $\beta < 0$ (негативний зворотний зв'язок) – зменшується.

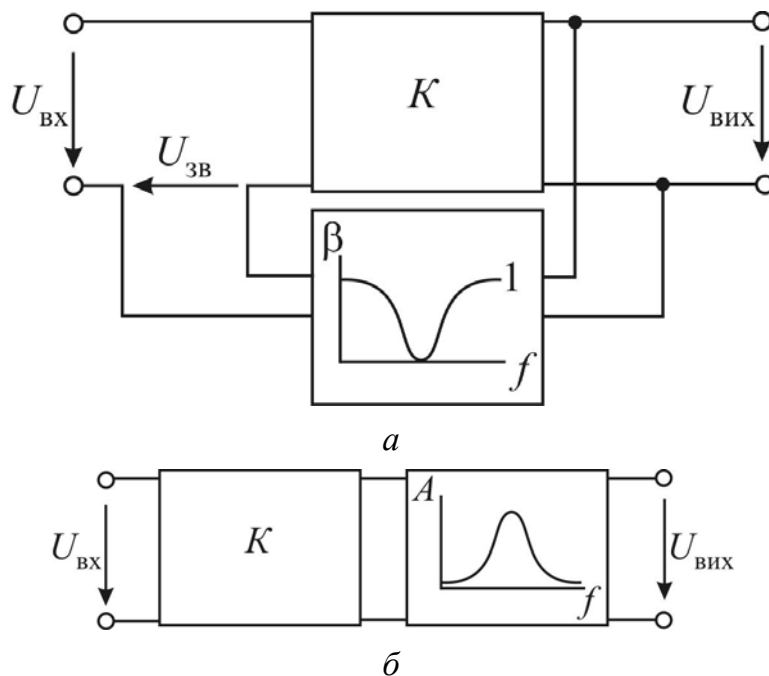
Незважаючи на зменшення коефіцієнта підсилення, негативний зворотний зв'язок використовують дуже часто. Це дозволяє істотно поліпшити роботу підсилювача через те, що:

- зростає стабільність підсилення при зміні параметрів транзисторів;
- знижується рівень різного виду спотворень;
- розширюється пропусканна смуга частот.

4.9. Вибіркові підсилювачі

4.9.1. Загальні відомості про вибіркові підсилювачі

Досить часто виникає потреба виділити і підсилити сигнал тільки одної конкретної частоти. Це відбувається в усіх багатоканальних системах зв'язку, при виборі радіотелевізійних програм, при здійсненні автоматичного контролю і керування тощо. Таке вибіркоче підсилення здійснюється спеціальними вузь-



космуговими підсилювачами, в яких співвідношення верхньої f_v і нижньої f_n граничних частот пропускання близьке до одиниці (1,001...1,1).

В основу будови вибіркових підсилювачів покладено звичайні широкосмугові підсилювальні каскади, до яких додаються спеціальні резонансні фільтри або у колі зворотного зв'язку (рис. 4.22, а), або безпосередньо на виході з підсилювача (рис. 4.22, б).

Рисунок 4.22 – Схеми вибіркових підсилювачів з RC -фільтром у колі зворотного зв'язку (а) і з каскадним LC - фільтром (б)

В лінії зворотного зв'язку найчастіше використовують частотно-залежний чотириполюсник у вигляді подвійного T -подібного моста (рис. 4.23, а).

За умови квазірезонансної частоти $f_0 = 1/(2\pi RC)$ повні опори обох T -подібних складових цього моста однакові, і через них проходять однакові струми. Але вони знаходяться у протифазі, тому $\beta = 0$ і зворотного зв'язку немає. При частотах нижчих або вищих від резонансної, зворотний зв'язок забезпечується або резисторами, або конденсаторами і може досягати $\beta = 1$ (рис. 4.23, б).

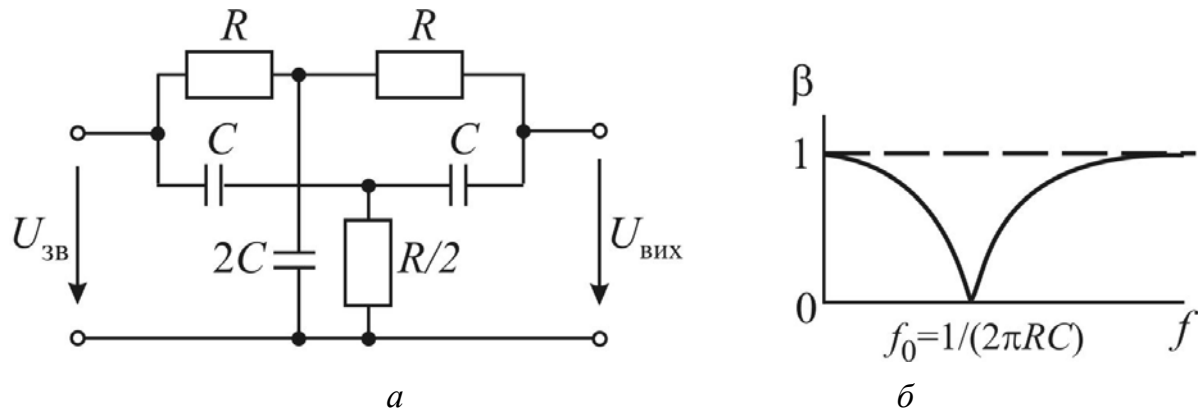


Рис. 4.23 – Схема (а) і частотна характеристика (б) подвійного T -подібного моста

При вмиканні моста на негативний зворотний зв'язок коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача дорівнюватиме

$$K_{зв} = K / (1 + \beta K), \quad (4.21)$$

де K – коефіцієнт підсилення без зворотного зв'язку (рис. 4.24, крива 1).

Відповідно, наведена формула дає: при $\beta = 1$ ($f = 0$ і $f \rightarrow \infty$) $K_{зв} \cong 1$ ($K \gg 1$), при $\beta = 0$ ($f = f_0$) $K_{зв} = K$, що і відображає амплітудно-частотна характеристика 2 на рис. 4.24.

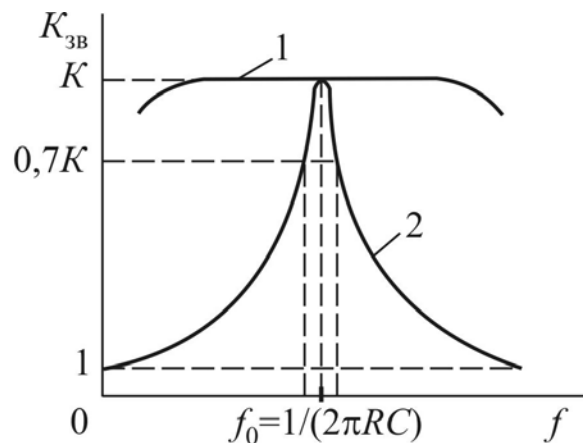


Рисунок 4.24 – Амплітудно-частотна характеристика широкопasmового (1) і вибіркового (2) підсилювача з подвійним T -подібним мостом у колі зворотного зв'язку

4.9.2. Вибірковий підсилювач з резонансним контуром

Для роботи на вищих частотах ($f_0 > 1 \dots 5$ МГц) більш доцільною стає схема вибіркового підсилювача з LC -резонансним контуром (рис. 4.25).

Цей фільтр на резонансній частоті

$$f_p = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (4.22)$$

практично перекриває шлях змінній складовій струму через джерело живлення на корпус і спрямовує її на вихід, підвищуючи тим самим коефіцієнт підсилення.

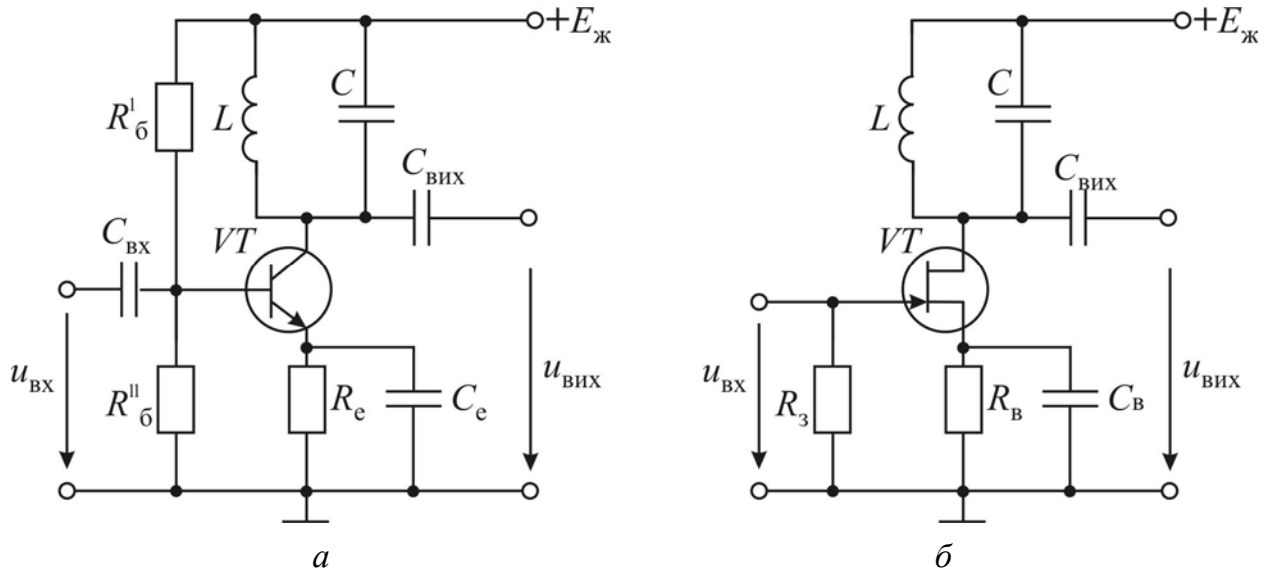


Рисунок 4.25 – Схеми однокаскадних вибірових підсилювачів з послідовним LC-резонансним контуром на біполярному транзисторі (а) і на польовому транзисторі (б)

Причому тим більшою мірою, чим більше добротність резонансного контуру $Q = \sqrt{L/C}/R$, де R – резистивний опір котушки L .

Відхилення частоти від резонансної дає можливість змінній складовій струму уходити через джерело живлення, і, відповідно, коефіцієнт підсилення зменшується (рис. 4.26).

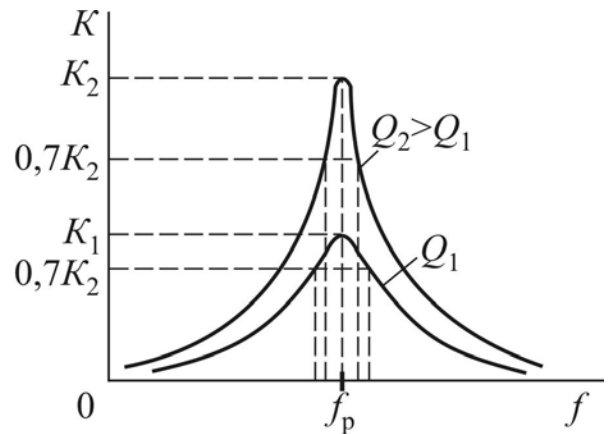


Рисунок 4.26 – Амплітудно-частотні характеристики вибірових підсилювачів при різній добротності LC-резонансних контурів

4.10. Загальні відомості про операційні підсилювачі

Операційний підсилювач (ОП) – це багатокаскадний підсилювач постійного струму, що має високий коефіцієнт підсилення, з двома входами: прямим і інвертувальним (диференційним входом) і одним виходом.

Умовне позначення ОП наведено на рис. 4.27,а (на рис. 4.27, б,в наведено умовні позначення, прийняті у деяких закордонних країнах).

Вхід, на який подано $u_{вх1}$, називається інвертувальним (позначений кружком на рис.4.27,а,б, та “-” на рис.4.27,в), а $u_{вх2}$ – неінвертувальним. Вістря трикутника відповідає вихідному виводу (рис.4.27,б,в).

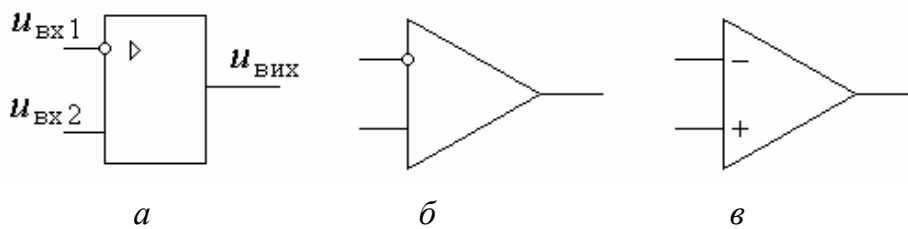


Рисунок 4.27 – Умовні позначення ОП

Якщо сигнал подати на неінвертувальний вхід, то зміни вихідного сигналу збігаються за знаком (фазою) зі змінами

вхідного. Якщо сигнал подати на інвертуючий вхід, то зміни вихідного сигналу матимуть протилежний знак (фазу) щодо змін вхідного. Інвертуючий вхід використовують для охоплення ОП зовнішніми негативними зворотними зв'язками, а неінвертуючими – позитивними зворотними зв'язками.

Фактично ОП являють собою широкий клас підсилювачів з гальванічними зв'язками, які працюють при наявності глибокого зворотного зв'язку. Цей зворотний зв'язок є настільки великим, що параметри і характеристики пристрою на ОП практично повністю визначаються видом і характеристиками елементів, що входять у коло зворотного зв'язку.

Вперше ОП було розроблено близько 70 років тому і призначалися вони для виконання деяких математичних операцій (додавання, віднімання, диференціювання, інтегрування тощо) в аналогових обчислювальних машинах. З розвитком інтегральної техніки області використання ОП значно розширились. Нині вони використовуються в основному як високоякісні підсилювачі напруги при побудові будь-яких електронних пристроїв. А аналогові обчислювальні машини тим часом були витіснені цифровими, математичні операції в яких виконуються логічними (цифровими) інтегральними мікросхемами, а підсилювачі з великим коефіцієнтом підсилення і глибокими зворотними зв'язками з цією

метою не використовуються. Проте термін «операційні підсилювачі» за ними зберігся.

Зазвичай ОП будують як ППС з безпосередніми зв'язками між каскадами, з диференційним входом і біполярним відносно амплітуди підсилюваного сигналу виходом. Це забезпечує нульові потенціали на вході та виході ОП за відсутності вхідного сигналу. Тому такі підсилювачі легко з'єднувати послідовно, а також охоплювати зворотними зв'язками.

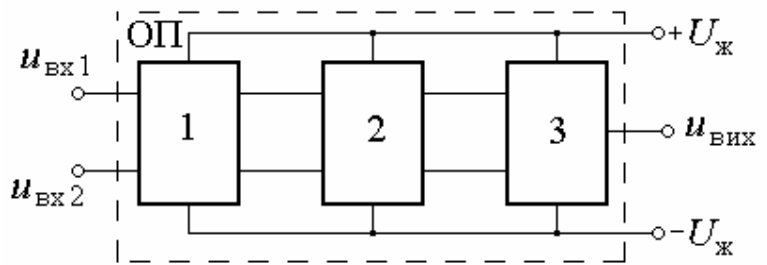


Рисунок 4.28 – Структурна схема ОП:
1 – симетричний диференціальний каскад;
2 – несиметричний диференціальний каскад; 3 – емітерний повторювач

До структури ОП (рис. 4.28) входять вхідний симетричний диференціальний каскад (зменшує дрейф нуля і має два входи: інвертувальний ($u_{вх1}$) і неінвертувальний, або прямий ($u_{вх2}$)), несиметричний диференціальний каскад (здійснює підсилення сигналу) і емітерний повторювач (забезпечує потужність вихідного сигналу).

До основних параметрів ОП відносять наступні:

K_u – коефіцієнт підсилення за напругою;

K_p – коефіцієнт підсилення за потужністю;

$U_{вих.макс}$ – максимальне значення вихідної напруги;

f_n – нижня гранична частота підсилюваного сигналу;

$R_{вх}$ – вхідний опір;

$R_{вих}$ – вихідний опір.

Поширеному застосуванню ОП сприяють їхні високі параметри. Це великий коефіцієнт підсилення за напругою, що становить $K_u = (10^4-10^6)$; високий вхідний опір по кожному з входів $R_{вх} > 400$ кОм; низький вихідний опір $R_{вих} < 100$ Ом; широкий частотний діапазон – від нуля до одиниць мегагерц.

За цими параметрами ОП для багатьох застосувань наближаються до ідеального підсилювача, що має:

- коефіцієнт підсилення за напругою $K_u \rightarrow \infty$;

- два симетричних входи з опором $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$;
- вихідний опір $R_{\text{вих}} \rightarrow 0$;
- безкінечний діапазон частот сигналу, що підсилюється.

При цьому зазначимо, що як лінійні підсилювачі у десятки тисяч разів реальні ОП не застосовують, тому що їхній коефіцієнт підсилення (як і інші параметри) є величиною вкрай нестабільною, наприклад, під дією температури.

Основною характеристикою ОП є великий коефіцієнт підсилення за напругою ($K \cong \infty$). Важливою для ОП є передатна характеристика $u_{\text{вих}} = f(u_{\text{вх}})$, що зображена на рис.4.29. Оскільки підсилювач має два входи (прямий та інвертувальний), то ця характеристика відображає роботу ОП при надходженні сигналу на кожний вхід окремо.

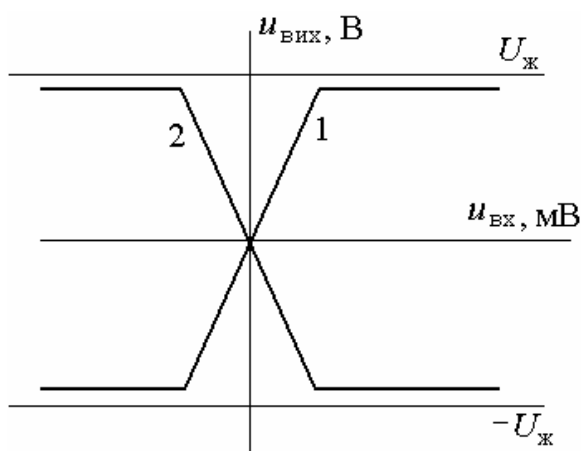


Рисунок 4.29 – Передатні характеристики ОП: 1 – неінвертувальний вхід; 2 – інвертувальний вхід

Горизонтальні ділянки характеристики відповідають режиму відкритого або закритого стану транзистора вихідного каскаду. При цьому величина вихідного сигналу обмежується максимальним значенням напруги на виході ОП додатного ($U_{\text{вих.макс}}^+$) чи від'ємного ($U_{\text{вих.макс}}^-$) значення, яка досягає (0,9 ÷ 0,95) напруги живлення $U_{\text{ж}}$. На цих ділянках зміна вхідного сигналу не буде спричинити зміни вихідного сигналу, тобто напруга на виході буде залишатись сталою.

На похилих ділянках характеристики величина вихідної напруги буде визначатися коефіцієнтом підсилення

$$K_{\text{у.оп}} = \frac{\Delta u_{\text{вих}}}{\Delta u_{\text{вх}}} \quad (4.23)$$

У випадку наявності сигналів на обох входах ОП, його вхідна напруга визначатиметься алгебричною сумою напруг на цих входах

$$\Delta u_{\text{вх}} = \Delta u_{\text{вх2}} - \Delta u_{\text{вх1}} \quad (4.24)$$

В цьому випадку вихідна напруга

$$u_{\text{вих}} = K_{\text{у.оп}} (\Delta u_{\text{вх2}} - \Delta u_{\text{вх1}}) \quad (4.25)$$

Під час розрахунку схем на базі ОП без великої похибки можна прийма-

ти, що $K_{u,оп} = \infty$, де $K_{u,оп}$ – коефіцієнт підсилення за напругою ОП без зворотного зв'язку. При використанні ОП в схемах імпульсної техніки важливим є значення вихідної напруги. Оскільки в імпульсній техніці рівні вхідних сигналів є більші за ті значення, які відповідають лінійній ділянці передатної характеристики, то вихідна напруга ОП визначається додатним $U_{вих.макс}^+$ або від'ємним $U_{вих.макс}^-$ значеннями.

Живлення ОП здійснюється від різнополярних джерел, завдяки чому спрощується завдання компенсації зсуву нуля на виході ОП за відсутністю вхідних сигналів та виключається постійна складова струму і напруги у навантаженні. Для більшості сучасних ОП напругу живлення $U_{ж}$ можна змінювати в широкому діапазоні від ± 3 до ± 15 В (важливо лише, щоб за абсолютним значенням напруги «позитивного» і «негативного» джерел залишались однаковими).

Для забезпечення стійкості в операційних підсилювачах широко використовуються частотно-залежні зворотні зв'язки (кола корекції).

Хороші шумові характеристики ОП забезпечуються спеціальними технологічними операціями при виробництві транзисторів з мінімальною площею контакту *p-n* переходів з поверхнею, зменшенням абсолютних розмірів транзисторів, високоякісною ізоляцією і використанням у вхідних каскадах польових транзисторів.

За своєю схемою ОП бувають три- або двокаскадні. За три каскадною схемою будувалися ОП у інтегральному виконанні першого покоління. Перший диференційний каскад у них працює в режимі мікрострумів, забезпечуючи тим самим високий вхідний опір. Другий диференційний каскад забезпечує підсилення напруги. Третій каскад, вихідний, виконується як двотактний зі спільним колектором і забезпечує підсилення потужності, а також низький вихідний опір.

ОП другого покоління будуються за двокаскадною схемою. Це стало можливим завдяки зростанню рівня інтегральної технологій. При цьому, перший каскад забезпечує і високий вхідний опір, і великий коефіцієнт підсилення за напругою. Другий каскад є підсилювачем потужності.

Реалізувати високоякісний ОП на дискретних елементах – завдання дуже складне, а для серійного виробництва майже не розв'язуване. Тому широкого

розповсюдження набули лише інтегральні ОП, стабільні параметри яких досягнуто завдяки забезпеченню високої симетрії плечей балансних каскадів, що входять до них, і підвищенню складності електричної схеми. Більшість інтегральних ОП виконується за напівпровідниковою технологією (серії К140, К153, К553, К740, К744 та ін.) і лише деякі – за гібридною (серії 284, 287).

4.11. Функціональні схеми на операційних підсилювачах

Враховуючи, що ОП мають малий діапазон лінійного підсилення вхідного сигналу, то на практиці ці підсилювачі використовуються з ланками від'ємного зворотного зв'язку. Це значно розширює діапазон підсилення, а також забезпечує регулювання величини вихідної напруги. Таким чином здійснюється масштабування вхідного сигналу. Методика аналізу наведених нижче схем здійснюється за припущеннями, що коефіцієнт підсилення за напругою $K_u \rightarrow \infty$, опір симетричних входів $R_{вх} \rightarrow \infty$, вихідний опір $R_{вих} \rightarrow 0$.

4.11.1. Масштабний інвертувальний підсилювач

У цьому випадку вхідна напруга подається на інвертувальний вхід ОП (рис. 4.30), а вихідна напруга ОП $u_{вих}$ змінюється у протифазі до вхідної $u_{вх}$ (у випадку синусоїдального сигналу фаза змінюється на 180°). В схемах таких підсилювачів від'ємний зворотний зв'язок (зз) реалізується через елемент R на інвертувальний вхід ОП з метою зменшення коефіцієнта підсилення розімкненого ОП. Наявність такого зв'язку призводить до того, що завжди у стані рівноваги $u_{вх.оп} = 0$. Тоді за другим законом Кірхгофа

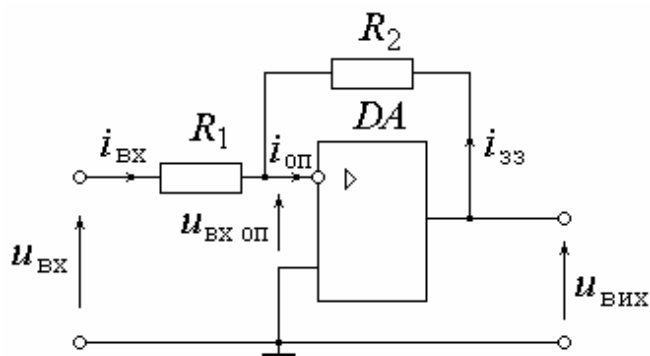


Рисунок 4.30 – Схема масштабного інвертувального підсилювача

$$u_{вх} - u_{вх.оп} = R_1 i_{вх}, \quad u_{вих} - u_{вх.оп} = R_2 i_{зз},$$

$$i_{вх} = \frac{u_{вх}}{R_1}, \quad i_{зз} = \frac{u_{вих}}{R_2}.$$

Враховуючи, що $R_{\text{вх.оп}} = \infty$, то $i_{\text{оп}} = 0$ і відповідно $i_{\text{вх}} = -i_{\text{зз}}$, тобто

$$\frac{u_{\text{вх}}}{R_1} = -\frac{u_{\text{вих}}}{R_2}.$$

Звідси отримаємо, що для такого підсилювача коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{1}{\beta}, \quad (4.26)$$

де $\beta = \frac{R_1}{R_2}$ – передатний коефіцієнт ланки зворотного зв'язку ОП.

Необхідно відзначити, що коефіцієнт підсилення ОП зі зворотним зв'язком не залежить від частоти вхідного сигналу.

4.11.2. Масштабний неінвертувальний підсилювач

У цьому випадку вхідний сигнал подається на неінвертувальний вхід ОП, вихідна напруга $u_{\text{вих}}$ має такий самий знак як і вхідна, а зворотний зв'язок забезпечується через елемент R_2 на інвертувальний вхід ОП (рис. 4.31). Оскільки в цьому випадку $i_{\text{вх}} = i_{\text{оп}} = 0$, то за умови, що $u_{\text{вх.оп}} = 0$, отримаємо

$$u_{\text{вх}} = u_{\text{зз}} = u_{\text{вих}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = u_{\text{вих}} \beta, \quad (4.27)$$

де $\beta = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$.

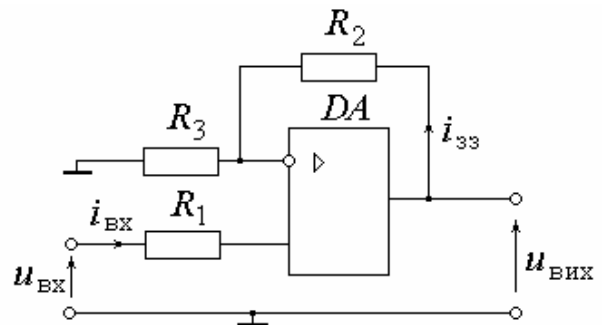


Рисунок 4.31 – Схема масштабного неінвертувального підсилювача

Тоді коефіцієнт підсилення для такого підсилювача буде визначатись

$$K_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{R_2 + R_3}{R_3} = 1 + \frac{R_2}{R_3}. \quad (4.28)$$

4.11.3. Масштабні суматори

На основі ОП широко використовуються схеми інвертувальних та неінвертувальних суматорів. Розглянемо роботу *інвертувального суматора* (рис.4.32).

Враховуючи особливості роботи інвертувального підсилювача, запишемо за першим законом Кірхгофа $i_{вх1} = i_{вх2} + i_{зз} = 0$. Виразивши струми через напруги, отримаємо

$$-\frac{u_{вх}}{R_3} = \frac{u_{вх1}}{R_1} + \frac{u_{вх2}}{R_2}.$$

Звідки

$$u_{вх} = -\left(u_{вх1} \frac{R_3}{R_1} + u_{вх2} \frac{R_3}{R_2}\right). \quad (4.29)$$

Переважно, в схемах суматора опори вхідних резисторів приймають однаковими за величиною ($R_1 = R_2 = R$), тоді вихідна напруга

$$u_{вх} = -\frac{R_3}{R}(u_{вх1} + u_{вх2}). \quad (4.30)$$

Отже, вихідна напруга ОП буде визначатись сумою вхідних напруг з відповідним масштабним множником. Якщо вхідні сигнали подавати на неінвертувальний вхід ОП, то отримаємо *схему неінвертувального суматора*. (рис.4.33).

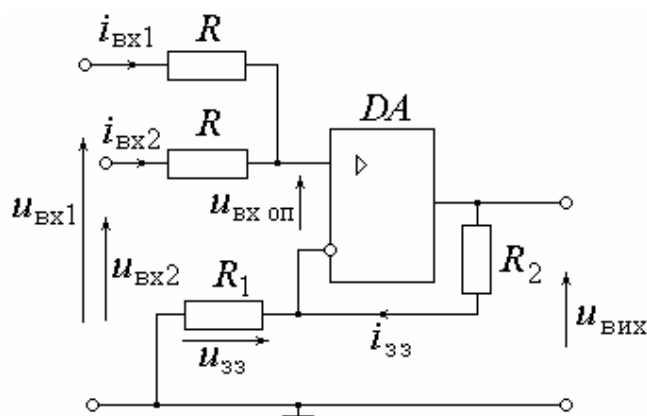


Рисунок 4.33 – Схема неінвертувального суматора

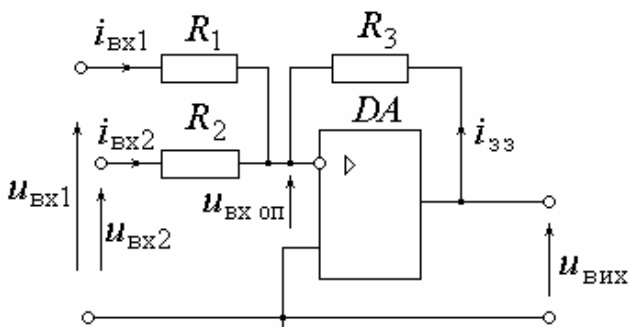


Рисунок 4.32 – Схема інвертувального суматора

Враховуючи, що $R_{вх.оп} = \infty$, отримаємо за першим законом Кірхгофа

$$i_{вх1} + i_{вх2} = 0,$$

бо визначивши струми через вхідні напруги за другим законом Кірхгофа,

$$\frac{u_{вх1} - u_{зз}}{R} + \frac{u_{вх2} - u_{зз}}{R} = 0.$$

Звідки $u_{вх1} + u_{вх2} = 2u_{зз}$. З урахуванням того, що $u_{зз} = \beta u_{вх}$, де

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \text{ отримуємо}$$

$$u_{вх} = \frac{R_1 + R_2}{2R_1}(u_{вх1} + u_{вх2}). \quad (4.31)$$

Якщо неінвертувальний суматор має n входів, то вихідна напруга такого суматора буде визначатись

$$u_{\text{вих}} = \frac{R_1 + R_2}{nR_1} (u_{\text{вх1}} + u_{\text{вх2}} + \dots + u_{\text{вхn}}) . \quad (4.32)$$

4.11.4. Масштабний віднімальний підсилювач

Щоб одержати на виході напругу $u_{\text{вих}}$, яка дорівнювала б різниці двох напруг, треба ці дві напруги $u_{\text{вх1}}$ та $u_{\text{вх2}}$ прикласти до обох входів підсилювача (рис. 4.34).

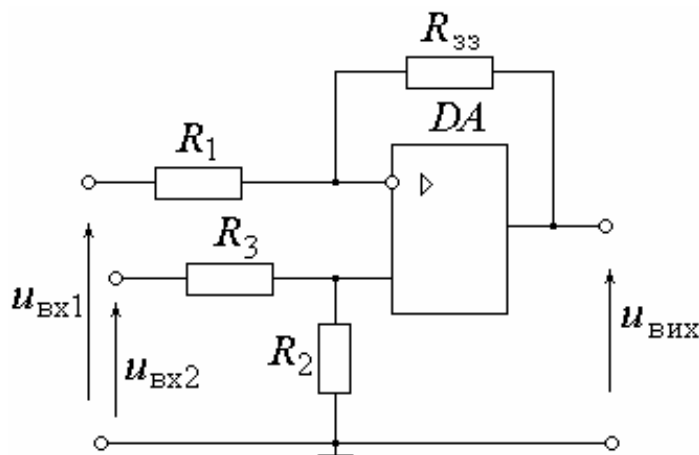


Рисунок 4.34 – Схема віднімального ОП

Вважаючи підсилювач лінійною схемою для малих сигналів, застосуємо для неї принцип суперпозиції, розглядаючи дію вхідних сигналів по черзі, закорочуючи решту з них і підсумовуючи результати. Так, перемикаючи $u_{\text{вх2}}$, матимемо

$$u_{\text{вих1}} = u_{\text{вх1}} \left(-\frac{R_{33}}{R_1} \right) . \quad (4.33)$$

Перемикаючи $u_{\text{вх1}}$, маємо

$$u_{\text{вих2}} = \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1} \right) u_{\text{вх2}} \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1} \right) \frac{R_2}{R_3} \cdot \frac{u_{\text{вх2}}}{1 + R_2/R_3} . \quad (4.34)$$

Якщо покласти $R_2/R_3 = R_{33}/R_1$, то одержимо $u_{\text{вих2}} = u_{\text{вх2}} \cdot R_{33}/R_1$. Додаючи результати, матимемо

$$u_{\text{вих}} = u_{\text{вих1}} + u_{\text{вих2}} = u_{\text{вх1}} \left(-\frac{R_{33}}{R_1} \right) + u_{\text{вх2}} \frac{R_{33}}{R_1} = \left(-\frac{R_{33}}{R_1} \right) (u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}) = K_{\beta}^{\ominus} (u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}) . \quad (4.35)$$

Якщо $K_{\beta}^{\ominus} = 1$, то

$$u_{\text{вих}} = u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}} . \quad (4.36)$$

4.11.5. Інтегратор

Інтегратор – пристрій електроніки, що реалізує функцію інтегрування й виконуються на базі інвертувального операційного підсилювача шляхом введення в ланку від'ємного зворотного конденсатора C (рис. 4.35).

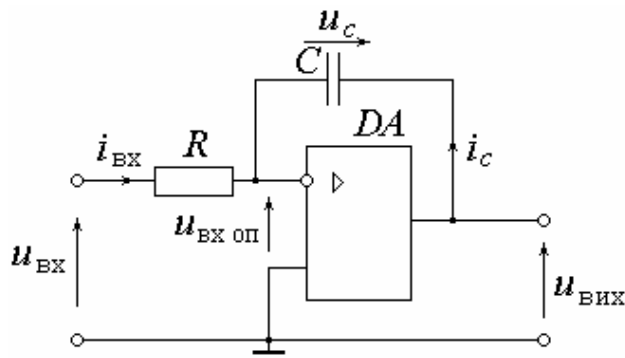


Рисунок 4.35 – Схема інтегратора

Враховуючи, що $R_{\text{вх.оп}} = \infty$, то $i_{\text{вх}} = -i_c$. Записавши рівняння за другим законом Кірхгофа для вхідного та вихідного контурів

$$u_{\text{вх}} - u_{\text{вх.оп}} = i_{\text{вх}} R,$$

$$u_{\text{вх.оп}} + u_c - u_{\text{вих}} = 0$$

враховуючи, що для ОП $u_{\text{вх.оп}} = 0$, отримаємо

$$i_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{вх}}}{R}, \quad u_{\text{вих}} = u_c = \frac{1}{C} \int i dt.$$

Отже, з урахуванням рівняння для ємності отримаємо, що вихідна напруга такої схеми є пропорційною до інтеграла від вхідної напруги

$$u_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} \int u_{\text{вх}} dt. \quad (4.37)$$

Якщо вхідна напруга – незмінна за величиною $u_{\text{вх}} = U$, то вихідна напруга буде пропорційна до тривалості часу інтегрування t

$$u_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} Ut. \quad (4.38)$$

Тривалість інтегрування визначається часом перехідного процесу, що виникає в ланці RC при подачі $u_{\text{вх}}$, а швидкість інтегрування (нахил прямої) визначається сталою часу $\tau = RC$.

Якщо $u_{\text{вх}}$ є знакозмінною то напруга на виході інтегратора буде трикутно-подібною, що використовується в генератора лінійно-змінної напруги.

4.11.6. Компаратор

Компаратор – це елемент порівняння, який широко використовуються в системах контролю та автоматичного керування і відносяться до елементів імпульсної техніки.

Компаратор, виконаний на базі ОП (рис.4.36,а), порівнює вимірювану напругу $u_{\text{ВХ}}$, яка подається на один із входів (переважно на інвертувальний), з опорною напругою (наперед заданою) $U_{\text{оп}}$, яка подана на інший вхід. Опорна

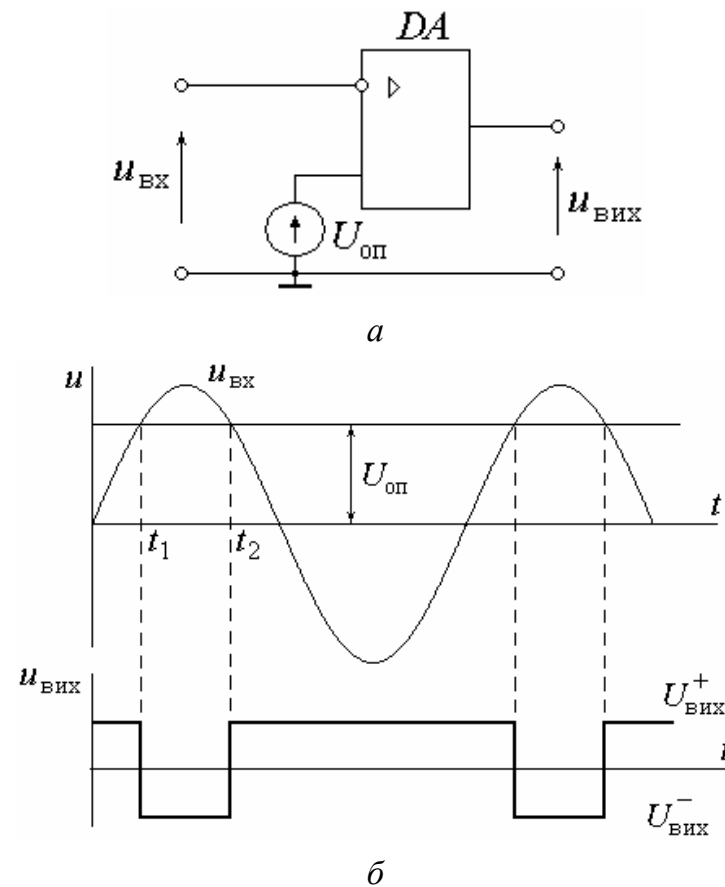


Рисунок 4.36 – Схема (а) та часові діаграми (б) компаратора

напруга є незмінною в часі, додатної чи від’ємної полярності, а вхідна напруга – змінюється. Коли $u_{\text{ВХ}} = U_{\text{оп}}$ вихідна напруга ОП змінює свій знак на протилежний (з $U_{\text{вих.макс}}^+$ на $U_{\text{вих.макс}}^-$ чи навпаки). Тому компаратор ще має назву «нуль-орган», оскільки зміна полярності вихідної напруги (перемикання) відбувається за умови, що $u_{\text{ВХ}} - U_{\text{оп}} = 0$, де $U_{\text{оп}}$ – задана напруга.

Якщо на інвертувальний вхід подається інвертувальний сигнал ($u_{\text{ВХ}}$), а на неінвертувальний – постійна напруга ($U_{\text{оп}}$) додатної полярності (рис.4.36,б), то вхідна напруга ОП $u_{\text{ВХ.оп}} = u_{\text{ВХ}} - U_{\text{оп}}$. До

моменту часу від 0 до t_1 напруга $u_{\text{ВХ.оп}} < 0$, тому $u_{\text{ВИХ}} = U_{\text{вих.макс}}^+$. В проміжку часу від t_1 до t_2 напруга $u_{\text{ВХ.оп}} > 0$, тому $u_{\text{ВИХ}} = U_{\text{вих.макс}}^-$.

До моменту часу від 0 до t_1 напруга $u_{\text{ВХ.оп}} < 0$, тому $u_{\text{ВИХ}} = U_{\text{вих.макс}}^+$. В проміжку часу від t_1 до t_2 напруга $u_{\text{ВХ.оп}} > 0$, тому $u_{\text{ВИХ}} = U_{\text{вих.макс}}^-$.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії підсилювального каскаду. Якими коефіцієнтами підсилення він характеризується?
2. Наведіть структурну схему багатокаскадного підсилювача. Чому дорівнює його коефіцієнт підсилення?
3. Яким чином залежно від діапазону частот вхідних сигналів розрізняють підсилювачі?

4. Наведіть схему і поясніть принцип дії підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером.
5. Наведіть схему і поясніть призначення елементів підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером.
6. Поясніть процес підсилення вхідного сигналу підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером за допомогою вхідної, перехідної та вихідної характеристик.
7. Наведіть і поясніть амплітудну та амплітудно-частотну характеристики сигналу підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером.
8. Наведіть і поясніть схему заміщення підсилювального каскаду зі спільним емітером.
9. Наведіть схему підсилювального каскаду з емітерною температурною стабілізацією. Поясніть механізм стабілізації роботи підсилювального каскаду при підвищенні температури.
10. Наведіть схему і поясніть принцип роботи підсилювального каскаду на польовому транзисторі зі спільним витоком.
11. Від чого залежать і чим відрізняються режими роботи підсилювального каскаду?
12. Поясніть роботу підсилювального каскаду в режимі А за допомогою вхідної і перехідної характеристик. Де використовують цей режим?
13. Поясніть роботу підсилювального каскаду в режимі В за допомогою вхідної і перехідної характеристик. Де використовують цей режим?
14. Поясніть роботу підсилювального каскаду в режимі С за допомогою вхідної і перехідної характеристик. Де використовують цей режим?
15. Наведіть схему і поясніть роботу двокаскадного підсилювача напруги на біполярних транзисторах з резистивно-ємнісним зв'язком.
16. Наведіть схему і поясніть роботу двотактного підсилювача потужності.
17. Наведіть схему і поясніть роботу двотактного безтрансформаторного підсилювача потужності.
18. Наведіть схеми і поясніть роботу підсилювачів постійного струму з одним та двома джерелами живлення.
19. Що таке зворотні зв'язки в підсилювачах? Наведіть структурну схему і по-

яснить роботу підсилювача зі зворотним зв'язком. Який параметр характеризує зворотні зв'язки?

20. Назвіть та охарактеризуйте види зворотних зв'язків. Яким чином зворотний зв'язок впливає на параметри підсилювача?

21. Що таке вибірковий підсилювач? За яким принципом він побудований? Наведіть структурні схеми вибіркового підсилювачів.

22. Наведіть схему і поясніть роботу однокаскадного вибіркового підсилювача з послідовним LC -резонансним контуром на біполярному транзисторі.

23. Що таке добротність резонансного контуру? Наведіть амплітудно-частотні характеристики вибіркового підсилювачів при різній добротності LC -резонансних контурів.

24. Що таке операційний підсилювач?

25. Поясніть назву операційних підсилювачів та їх призначення і застосування.

26. Зазначте основні властивості операційних підсилювачів.

27. Зобразіть умовні позначення операційних підсилювачів з зазначенням їх елементів.

28. Зобразіть структурну схему операційного підсилювача та поясніть її.

29. Назвіть основні параметри операційних підсилювачів та зазначте їх основні величини.

30. Зобразіть і поясніть передатні характеристики операційного підсилювача.

31. Зобразіть схему і поясніть роботу масштабного інвертувального підсилювача.

32. Зобразіть схему і поясніть роботу масштабного неінвертувального підсилювача.

33. Зобразіть схему та поясніть роботу масштабного інвертувального суматора.

34. Зобразіть схему і поясніть роботу масштабного неінвертувального суматора.

35. Зобразіть схему і поясніть роботу масштабного віднімального підсилювача.

36. Зобразіть схему і поясніть роботу інтегратора.

37. Зобразіть схему і поясніть роботу компаратора.

РОЗДІЛ 5

ГЕНЕРАТОРИ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

5.1. Умови самозбудження автогенераторів

За допомогою підсилювальних каскадів можна перетворювати електричну енергію джерела постійного струму в енергію електромагнітних коливань синусоїдальної форми потрібної частоти і потужності. Електронні генератори гармонічних коливань можуть бути як з незалежним збудженням, так і з самозбудженням. Останні називаються *автогенераторами гармонічних коливань*. Генератори з незалежним збудженням – це, по суті, звичайні підсилювачі потужності, на вхід яких подають синусоїдальні сигнали збудження від автогенераторів.

На рис. 5.1 зображено структурну схему автогенератора, який складається з підсилювача з коефіцієнтом підсилювання \underline{K} і ланки зворотного зв'язку $\underline{\beta}$. В якості підсилювачів можна використовувати підсилювальні каскади на транзисторах, інтегральних мікросхемах тощо. Ланка зворотного зв'язку – це, як правило, частотнозалежні кола: LC -резонансні контури і RC -чотириполюсники.

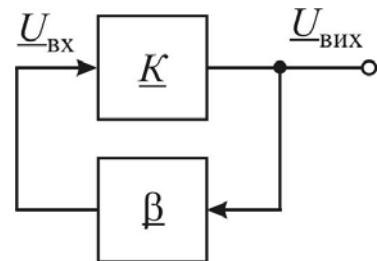


Рисунок 5.1 – Структурна схема автогенератора

Враховуючи синусоїдальну форму коливань, що утворюються, співвідношення напруг в автогенераторі можна розглядати у вигляді векторів або комплексних чисел. Відповідно до наведеної схеми в сталому режимі $\underline{U}_{\text{ВХ}} = \underline{\beta} \underline{U}_{\text{ВИХ}}$, $\underline{U}_{\text{ВИХ}} = \underline{K} \underline{U}_{\text{ВХ}}$, що визначає умову самозбудження

$$\underline{K} \underline{\beta} = 1. \tag{5.1}$$

Подаючи \underline{K} і $\underline{\beta}$ комплексними числами, отримаємо рівність

$$K e^{j\varphi} \beta e^{j\psi} = 1, \tag{5.2}$$

яка виконується за умови

$$K\beta = 1, \tag{5.3}$$

$$\varphi + \psi = 2\pi n \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (5.4)$$

Перша умова – баланс амплітуд (5.3), друга – баланс фаз (5.4). Остання обумовлює вимогу зміни фази напруги при проходженні через ланку зворотного зв'язку ψ на $\pm 180^\circ$, тому що фазний зсув в підсилювальному каскаді $\varphi = 180^\circ$. Здійснити зворотний зв'язок з потрібною зміною фази можна за допомогою трансформаторної ланки або RC -ланцюжка.

Таким чином, робота автогенератора ґрунтується на тому, що виникаючі на вході підсилювального каскаду флуктуації напруги (наприклад, при його підключенні до джерела живлення) не зникають, а навпаки, завдяки позитивному зворотному зв'язку і достатньому коефіцієнту підсилення збільшуються, починають повторюватися з частотою, яка визначається або коливальним контуром в самому підсилювальному каскаді, або частотнозалежним (резонансним) зворотним зв'язком. Перехідний процес закінчується при досягненні $K\beta = 1$, і на виході автогенератора встановлюються незгасаючі синусоїдальні коливання відповідної частоти (рис. 5.2).

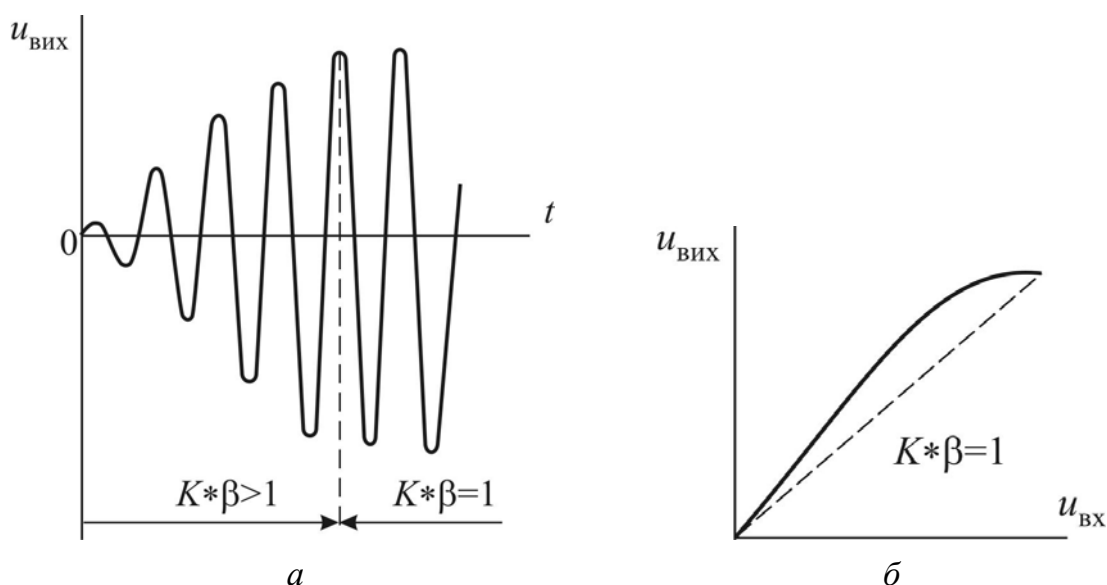


Рисунок 5.2 – Виникнення коливань в автогенераторі (а) і амплітудна характеристика підсилювача при цьому (б)

5.2. LC -автогенератори

Найпростіші варіанти автономних генераторів на польових транзисторах із застосуванням LC -резонансних контурів показано на рис. 5.3. Використання цих контурів в автогенераторах можливо тільки при їх високій добротності.

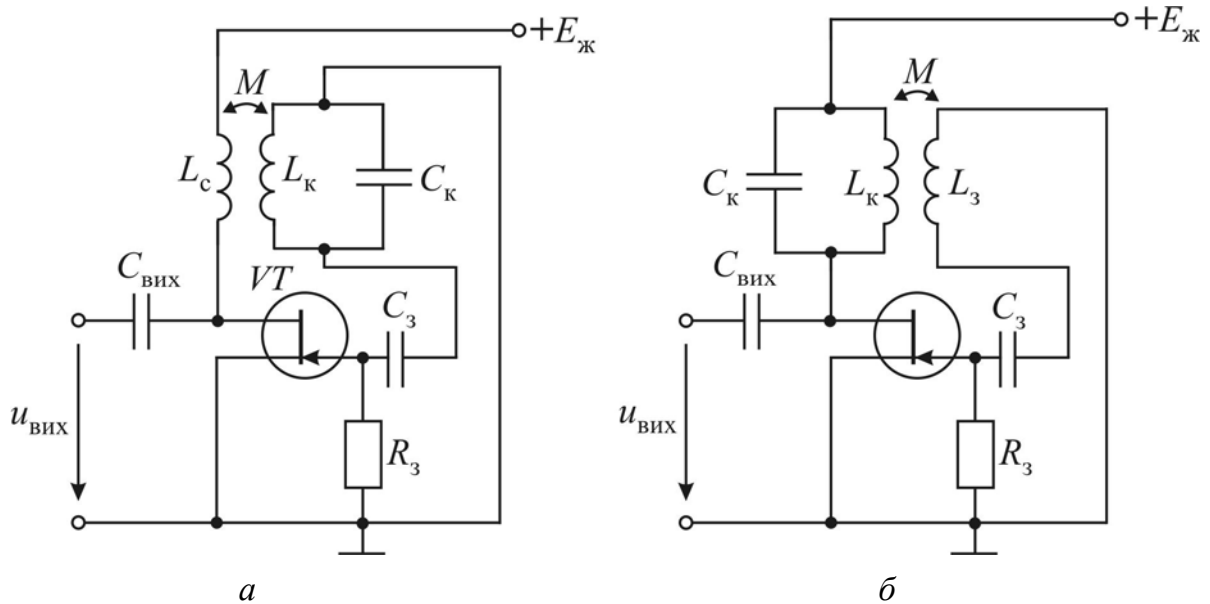


Рис. 5.3 – LC -автогенератор на польових транзисторах з LC -коливальними контурами: (а) – у колі затвора; (б) – у колі стоку

Незалежно від місця розташування контуру, який складається з котушки індуктивності L_k і конденсатора ємністю C_k , його еквівалентний активний опір повинен бути меншим за $\sqrt{L_k/C_k}$. Тоді при підключенні автогенератора до джерела живлення в контурі виникають періодичні коливання з частотою, близькою до $\omega_0 = 1/\sqrt{L_k C_k}$. Ці коливання через взаємодуктивність M (трансформаторний зворотний зв'язок) передаватимуться з кола затвору у стокове коло (рис. 5.3, а), або навпаки (рис. 5.3, б).

Щоб коливання не згасали, потрібен достатньо високий коефіцієнт підсилення K і позитивний зворотний зв'язок β . Поки $K\beta > 1$ буде відбуватися “розгойдування” автогенератора до встановлення стійких гармонічних коливань і досягнення $K\beta = 1$. При цьому активні втрати потужності в контурі компенсуються надходженням енергії з джерела живлення $E_{ж}$.

5.3. RC -автогенератори

Гармонічні коливання в автогенераторі зі зворотним зв'язком у вигляді частотно залежних RC -ланцюжків, два можливих варіанти яких показано на рис. 5.4, утворюються завдяки тому, що напруга на конденсаторах не може змінюватися миттєво.

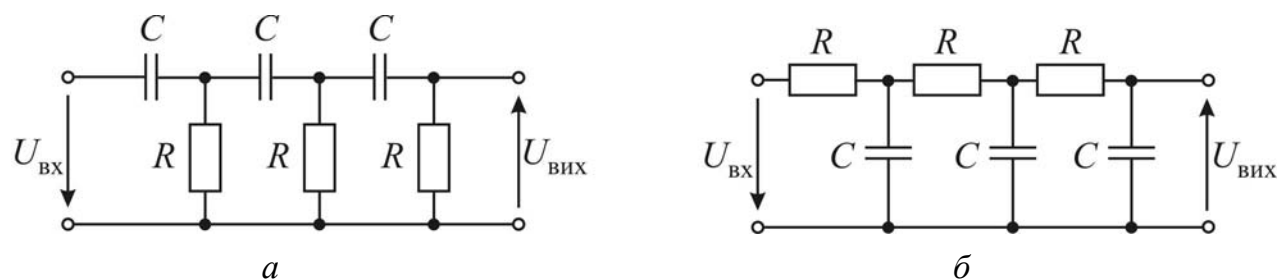


Рисунок 5.4 – Частотозалежні Г-подібні RC -ланцюжки

Флуктуації напруги в автогенераторі (наприклад, при його підключенні до джерела живлення) не зникають відразу. Більш того, при балансі фаз підсилювального каскаду і ланки позитивного зворотного зв'язку процес зміни напруг і струмів продовжується.

Зростання напруг на конденсаторах і, відповідно, на виході підсилювального каскаду передається через ланку зворотного зв'язку на його вхід (база біполярного транзистора, затвор польового транзистора). Транзистор VT відкривається ще більше, і це обумовлює припинення зарядки і початок розрядки конденсаторів, що супроводжується падінням напруги на виході підсилювального каскаду. Падіння напруги на виході передається на вхід, і транзистор починає закриватися. Це, в свою чергу, призводить до припинення розрядки конденсаторів, і напруга на виході знову починає збільшуватися. Утворюється змінна складова напруги з частотою, яка відповідає параметрам RC -ланцюжка.

На рис. 5.5 і 5.6 зображено схеми одно- і двокаскадного автогенераторів з Г-подібним RC -ланцюжком у колі зворотного зв'язку, наведеним на рис. 5.4, *a*. Баланс фаз у цих автотрансформаторах відповідає частоті $f = 1/(2\pi\sqrt{6}RC)$, а баланс амплітуд досягається при значенні того ж коефіцієнта підсилення $K \geq 29$.

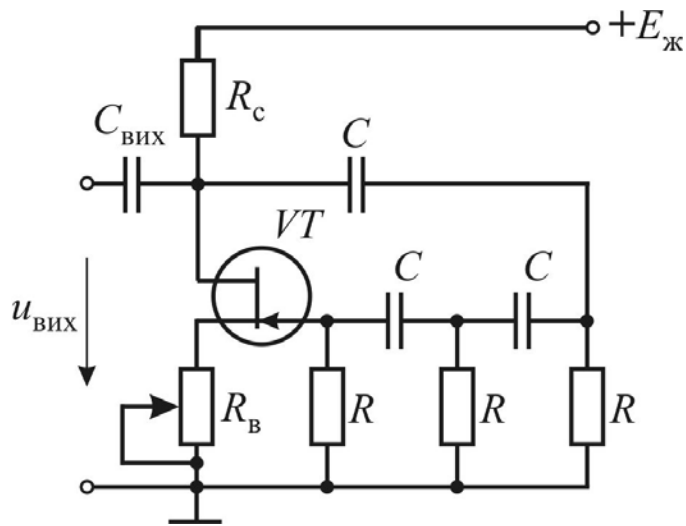


Рисунок 5.5 – Схема однокаскадного RC -автогенератора з фазозсувними Γ -подібними зворотними RC -ланцюжками

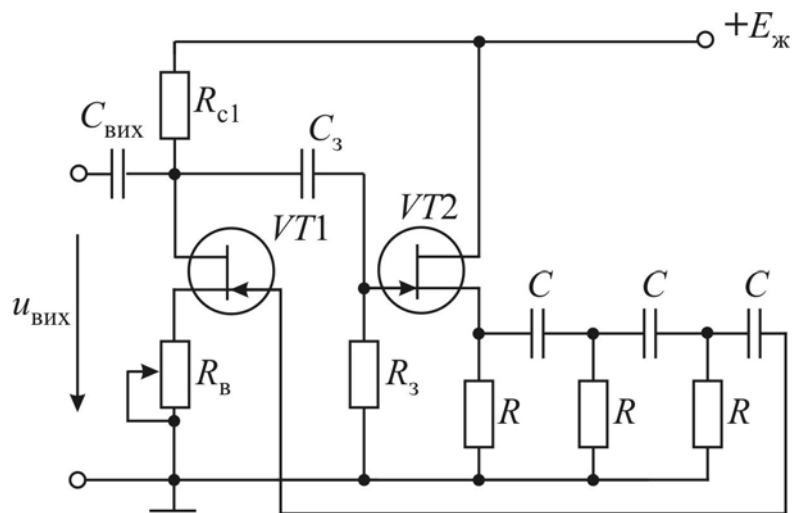


Рисунок 5.6 – Схема двокаскадного RC -автогенератора з фазозсувними Γ -подібними зворотними RC -ланцюжками

Якщо у розглянутих автогенераторах замінити RC -ланцюжок на той, що зображено на рис. 5.4, б, то частота гармонічних коливань зросте до значення $f = \sqrt{6}/(2\pi RC)$, а баланс амплітуд буде досягатися при тому ж значенні коефіцієнта підсилення $K \geq 29$.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке автогенератор? Наведіть його структурну схему із зазначенням ос-

новних елементів і параметрів.

2. Назвіть і поясніть умови самозбудження автогенераторів.
3. Поясніть і наведіть, як виникають коливання в автогенераторі. Якою буде амплітудна характеристика підсилювача при цьому?
4. Наведіть схему і поясніть роботу LC -автогенератора на польових транзисторах з LC -коливальним контуром у колі затвора.
5. Наведіть схему і поясніть роботу LC -автогенератора на польових транзисторах з LC -коливальним контуром у колі стоку.
6. Наведіть схеми і поясніть роботу частотнозалежних Γ -подібних RC -ланцюжків у автогенераторах.
7. Наведіть схему і поясніть роботу однокаскадного RC -автогенератора з фазозсувними Γ -подібними зворотними RC -ланцюжками.
8. Наведіть схему і поясніть роботу двокаскадного RC -автогенератора з фазозсувними Γ -подібними зворотними RC -ланцюжками.

РОЗДІЛ 6

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

Стрімкий розвиток інформаційно-обчислювальної техніки, систем зв'язку і систем керування обумовлених, в першу чергу, досягненнями *мікроелектроніки* – нового напрямку електроніки, спрямованого на зменшення маси, габаритів та енергоспоживання як окремих елементів, так і електронних виробів у цілому з одночасним підвищенням надійності їх роботи. Досягається це якоюсь мірою шляхом мініатюризації дискретних елементів (резисторів, конденсаторів, дроселів, діодів, транзисторів тощо), а головним чином – завдяки створенню якісно нової елементної бази, що є вирішальним.

Нова елементна база складається з інтегральних мікросхем і функціональних пристроїв, пов'язаних, у першу чергу, з оптоелектронікою, кріоелектронікою, біоелектронікою тощо.

6.1. Загальні поняття про інтегральні мікросхеми

Відповідно до прийнятої термінології інтегральна мікросхема (ІМС) – це мікроелектронний виріб, що в об'ємі 1 см^3 вміщає не менше 5 елементних приладів і являє собою схемну і конструктивну цілісність.

ІМС характеризується *щільністю пакування та ступенем інтеграції*. Щільності пакування відповідає кількість елементів, яка припадає на одиницю об'єму ІМС. Ступінь інтеграції визначається загальною кількістю елементів, що входять до складу ІМС: перший ступінь інтеграції – до 10 елементів, другий – від 10 до 100 елементів, третій – від 100 до 1000 елементів і т.д.

За технологією виготовлення розрізняють *гібридні та напівпровідникові* ІМС. Залежно від функціонального призначення всі ІМС діляться на *лінійно-імпульсні та логічні*.

До лінійно-імпульсних мікросхем відносять ті ІМС, що забезпечують приблизно пропорційну залежність між вхідними і вихідними сигналами. Як правило, це напруги. Найпростішим прикладом лінійно-імпульсної мікросхеми є

широкосмуговий підсилювач. Його коефіцієнт підсилювання $K \geq 50000$, верхня межа частоти пропускання досягає 20 МГц.

Логічні ІМС, у більшості своїй, налічують декілька входів і виходів. При цьому вихідна напруга залежить від наявності або відсутності напруг на різних входах мікросхеми. Один з головних параметрів логічної ІМС – її швидкодія.

Загально-технічні параметри ІМС – механічна міцність, діапазон робочих температур, стійкість до зниження і підвищення тиску, вологостійкість – зазвичай є не гіршими, ніж у діодів і транзисторів.

Важливою відмінністю ІМС є їх висока надійність внаслідок того, що вони являють собою єдине ціле, а не механічне з'єднання дискретних елементів, кожного зі своїм коефіцієнтом надійності. Другою, не менш важливою особливістю ІМС, є їх невеликі масогабаритні параметри. Маса великої ІМС, що налічує сотні тисяч елементів, становить усього кілька грамів, і це при тому, що основна частина маси припадає на корпус, виводи і підкладку, а не на активні напівпровідникові елементи. Щільність пакування великої ІМС досягає 10^5 ел/см³, що на два-три порядки вище у порівнянні з мікромодульними схемами, побудованими на дискретних елементах.

Внаслідок дуже малих розмірів ІМС істотно зменшується вплив таких паразитних параметрів, як міжелектродні ємності та індуктивності з'єднувальних дротів. Це дозволяє створювати високочастотні підсилювачі на частоти до 3 ГГц та швидкодіючі логічні схеми із затримкою не більше 0,1 нс. Позитивним є також висока економічність ІМС. Рівень енергоспоживання великих ІМС не перевищує 100...200 мВт, а для невеликих може дорівнювати 10...100 мкВт.

6.2. Гібридні інтегральні мікросхеми

Гібридна ІМС являє собою з'єднання, відповідно до електричної схеми, на єдиній діелектричній підкладці (скло, кераміка, ситал або сапфір) безкорпусних активних і пасивних елементів, утворених шляхом нанесення різного виду плівок на цю підкладку.

Невелика товщина плівок (на рівні 1 мкм) дозволяє створювати резистори різного опору. При цьому використовується незначна частина поверхні підкла-

дки, особливо якщо резистивна плівка розташовується у вигляді меандру (рис. 6.1, *a*). Опір таких резисторів може досягати сотень кОм.

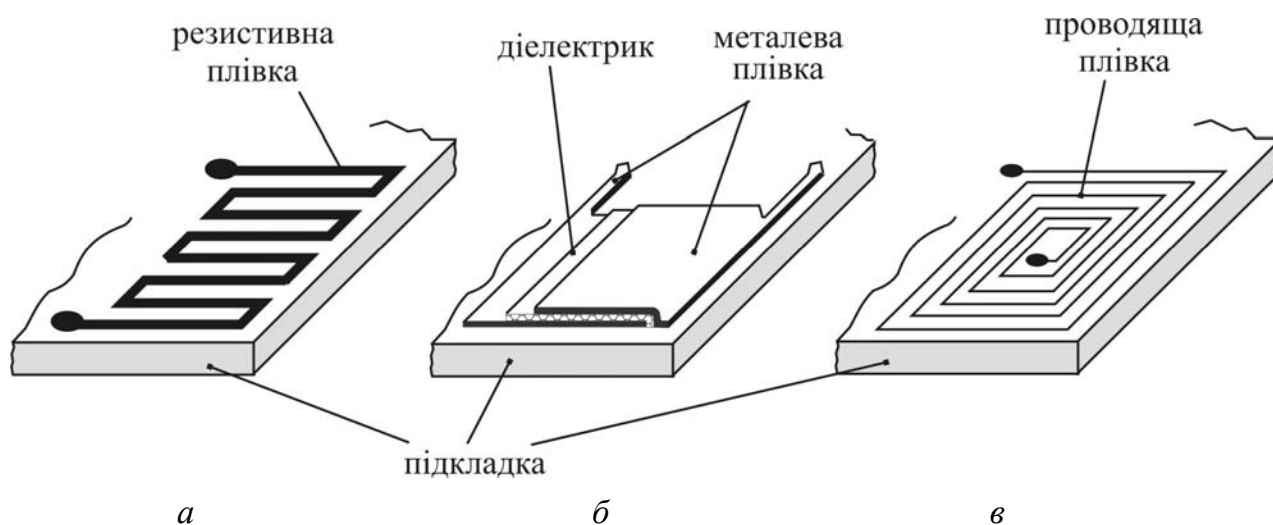


Рисунок 6.1 – Компоненти гібридних ІМС на плівковій основі: (*a*) – резистор; (*б*) – конденсатор; (*в*) – індуктивність

Плівкові конденсатори також розміщуються на поверхні підкладки (рис. 6.1, *б*). Вони мають три плівкові шари: метал – діелектрик – метал. Завдяки малій товщині діелектрика ємність таких конденсаторів може бути досить високою – до 0,1 мкФ.

Використання провідної плівки дозволяє створювати індуктивні дроселі у вигляді спіралі на поверхні підкладки (рис. 6.1, *в*). Індуктивність таких дроселів досить невелика (до 10 мкГн). Якщо потрібні індуктивності великих номіналів, то використовують навісні елементи.

Безкорпусні напівпровідникові прилади і навісні елементи приклеєні у визначених місцях до підкладки, з'єднані з елементами плівкової схеми, і всі разом розміщені в герметичному корпусі з належною кількістю виводів (рис. 6.2). Щільність пакування гібридних ІМС невелика, до 150 ел/см³.

Ступінь інтеграції – перший, другий. Але кожний з елементів електричної схеми чітко визначений, і тому можна за-

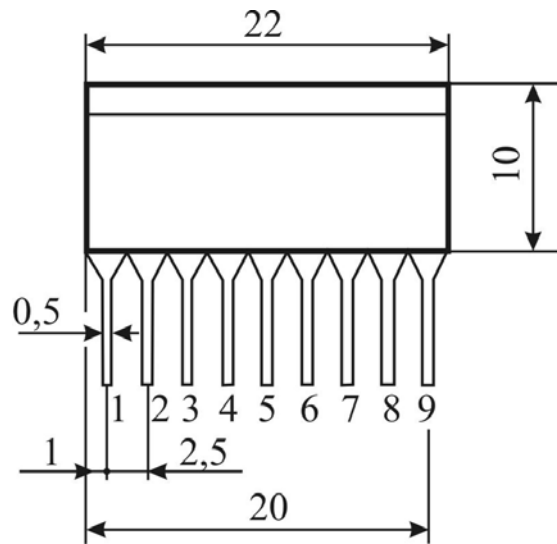


Рисунок 6.2 – Гібридна мікросхема у корпусі з позначенням геометричних параметрів у мм

безпечити близьке значення його параметрів до потрібних. До того ж дискретне розташування цих елементів та їх надійне з'єднання забезпечує високу точність параметрів гібридної ІМС у цілому. Це робить гібридні ІМС найбільш прийнятними для електронних пристроїв з відносно невеликою кількістю елементів.

6.3. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми

На відміну від гібридних ІМС, які утворюються з плівкових і навісних елементів, напівпровідникова ІМС являє собою єдиний кристал напівпровідника, окремі (локальні) ділянки якого виконують функції активних і пасивних елементів, з'єднаних між собою відповідно до загальної електричної схеми.

Найчастіше напівпровідникові ІМС виготовляють з кремнію. Це пояснюється тим, що у порівнянні з германієм він має більшу заборонену зону, менші зворотні струми і вищу робочу температуру (до 150 °С). Крім цього, кремній досить легко окислюється, що дозволяє утворювати на його поверхні оксидну плівку SiO_2 , яка має високі ізоляційні та механічні властивості.

Транзистори в напівпровідникових ІМС можуть бути як польові, так і біполярні, зазвичай *p-n-p*-типу. *Діоди* утворюються або як звичайні двошарові структури з одним *p-n*-переходом, або шляхом діодного вмикання транзисторів (рис. 6.3).

Роль *конденсаторів* у напівпровідникових ІМС виконують *p-n*-переходи, заперті зворотною постійною напругою. Максимальна ємність, яка може бути досягнута, – 100...200 пФ. Відхилення ємності таких конденсаторів від номінальної становить $\pm 20\%$.

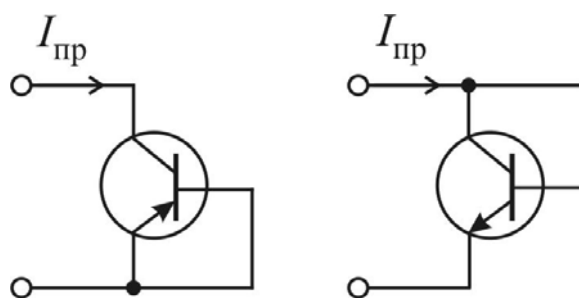


Рисунок 6.3 – Діодне вмикання транзисторів

Резистори напівпровідникових ІМС утворюються шляхом відокремлення ділянки легованого напівпровідника і приєднанням до неї двох виводів. Опір такого резистора залежить від питомого опору напівпровідника і геометричних розмірів ділянки. Як правило, він не перевищує кількох кОм. Відхилення опору від номінального значення може бути

більшим $\pm 20\%$.

У напівпровідникових ІМС складно утворювати *дроселі*, тому до складу більшості напівпровідникових мікросхем індуктивні елементи не входять.

Усі перелічені елементи мікросхеми створюються в кристалі під час єдиного технологічного циклу. Ізоляція окремих елементів здійснюється або закритими *p-n*-переходами, або за допомогою ізоляційної плівки з двоокису кремнію SiO_2 . Останній спосіб є більш доцільним, тому що дозволяє до мінімуму звести відстань між сусідніми елементами схеми, в той час як використання закритих

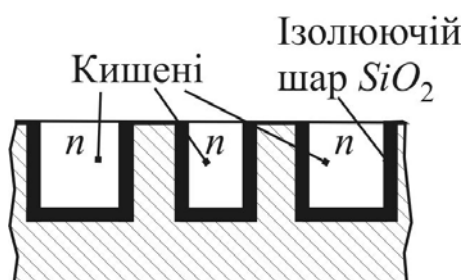
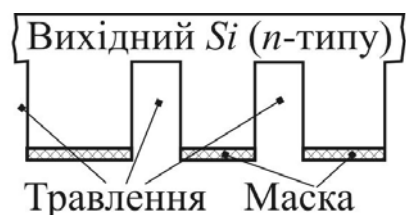


Рисунок 6.4 – Напівпровідникова ІМС: послідовність утворення ізольованих ділянок (“кишень”) у пластині кремнію

p-n-переходів потребує проміжку не менше 20...30 мкм, що не дозволяє створювати напівпровідникові ІМС високого ступеня інтеграції.

На рис. 6.4 показано послідовність створення ізольованих ділянок *n*-кремнію. Спочатку на пластину легованого кремнію методом фотолітографії наносять захисну маску і проводять вибіркоче витравлювання кристала. Потім маску змивають, пластину кремнію окислюється при температурі 800...1200 °С у середовищі кисню або насиченої водяної пари. На поверхні кремнію утворюється плівка окису SiO_2 товщиною від 0,1 до 2 мкм, на яку напильють або нарощують шар полікристалічного кремнію. Після повторного витравлення первинного кристала залишаються ізольовані області кремнію *n*-типу, так звані “кишені”.

Шляхом послідовного накладення відповідних масок і дифузії при температурі 800...1250 °С акцепторних і донорських домішок, розчинених у газовому середовищі, в кишнях утворюються потрібні ділянки з електропровідністю *p*- і *n*-типів. Таким чином кожна кишень стає елементом інтегральної мік-

росхеми, які з'єднуються між собою після вакуумного наплення через маску відповідних провідникових плівок (рис. 6.5).

На одній пластині кремнію одночасно створюється досить велика кількість мікросхем, що істотно здешевлює їх виробництво. Після розрізання пластини на окремі мікросхеми, вони розміщуються в металевих або пластикових корпусах. Зовнішні виводи на корпусі з'єднуються з мікросхемою золотими або алюмінієвими дротами завтовшки до 10 мкм.

У процесі розвитку мікроелектроніки з'явилися деякі різновиди біполярних транзисторів, які не мають аналогів у дискретній напівпровідниковій техніці. Це, наприклад, багатоемітерний транзистор, який являє собою сукупність декількох *n-p-n*-транзисторів, що мають окремі емітери E1, E2 і E3, спільний колектор К і спільну базу Б (рис. 6.6).

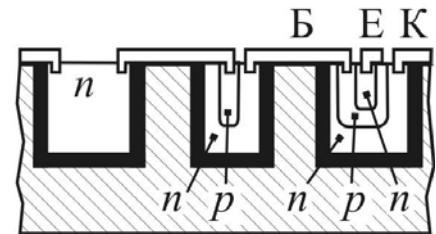
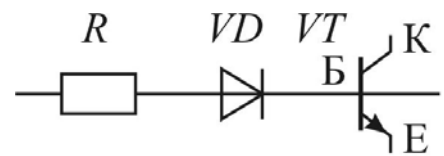


Рисунок 6.5 – Фрагмент напівпровідникової інтегральної мікросхеми

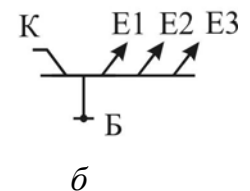
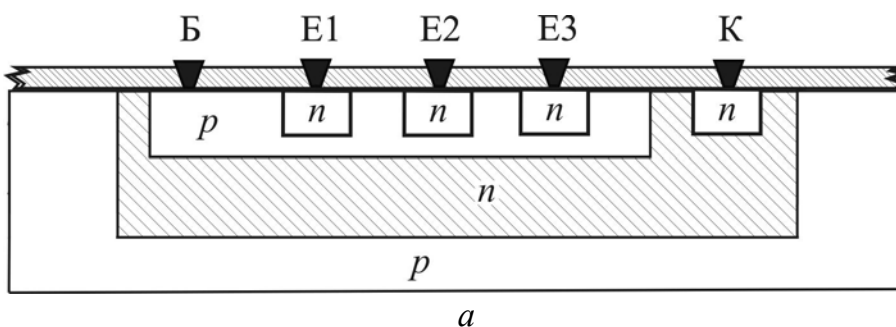


Рисунок 6.6 – Будова (а) та умовне позначення (б) багатоемітерного транзистора

Особливістю цього транзистора у відкритому стані є відсутність прямої взаємодії емітерів між собою, тому що їх розділяють ділянки бази. Можна вважати, що багатоемітерний транзистор у ввімкнутому стані являє собою декілька транзисторів, що мають спільний колектор.

Напівпровідникові ІМС характеризуються найвищою щільністю пакування (до 10^5 ел/см³) і високим ступенем інтеграції (до 7-го). Але внаслідок того, що розміри елементів схеми і відстань між ними можуть мати значні технологічні відхилення, абсолютна ідентичність параметрів неможлива. Значення робочих

струмів, напруг, фазних зсувів можуть істотно відхилитися від потрібних, виникають паразитні мікроструми між елементами, а все це разом відбивається на вихідних параметрах, точність яких, як правило, є значно нижчою у порівнянні з гібридними ІМС.

6.4. Оптоелектроніка

6.4.1. Загальні відомості про оптоелектроніку

Цей напрям функціональної мікроелектроніки пов'язаний як з оптичними і фотоелектричними явищами у напівпровідниках, так і з лазерною технікою, волоконною оптикою, голографією тощо.

Оптоелектроніка базується на електронно-оптичному принципі отримання, передачі, обробки і зберіганні інформації, носієм якої є електрично нейтральний фотон. Суміщення в оптоелектронних функціональних пристроях двох способів обробки і передачі інформації – оптичного та електричного – дозволяє отримувати надзвичайну швидкодію, високу щільність розміщення інформації, яку потрібно зберігати, створювати високоефективні способи її відображення. Важливою перевагою елементів оптоелектроніки є те, що вони оптично пов'язані між собою, а електрично – ізольовані. Це забезпечує надійне узгодження різних оптоелектронних мереж, сприяє спрямованості передачі інформації, її завадостійкості. Технологія виготовлення основних напівпровідникових елементів оптоелектроніки – оптронів – збігається з технологією виготовлення ІМС.

6.4.2. Оптрони

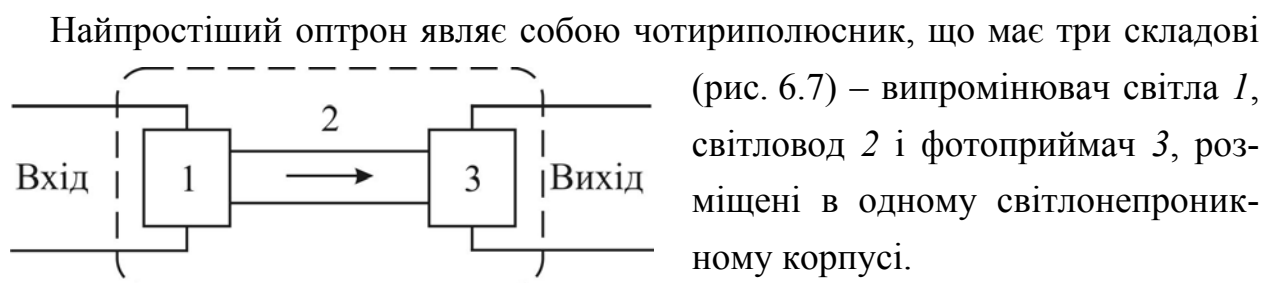


Рисунок 6.7 – Структурна схема оптрона

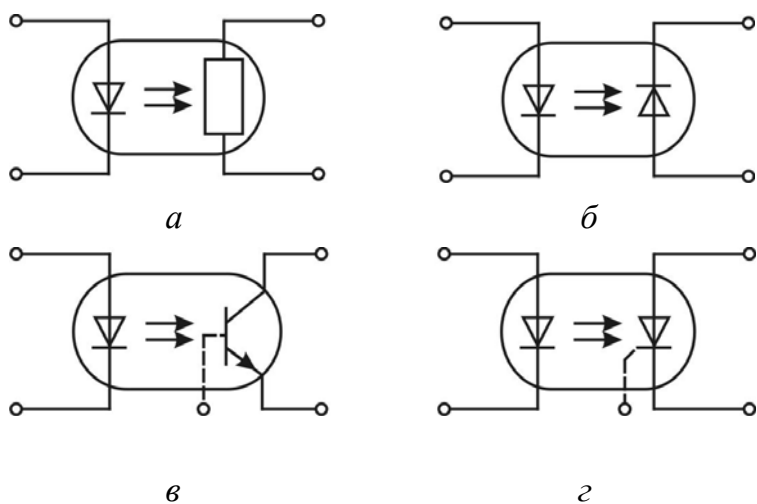


Рисунок 6.8 – Види оптронів (схемні позначення): (а) – резисторний; (б) – діодний; (в) – транзисторний; (г) – тиристорний

Найчастіше випромінювачами світла є світлодіоди зі швидкодією до 0,5 мкс, а фотоприймачами, які визначають схематичні можливості оптрона і дають назву оптронної пари, є різного виду напівпровідникові прилади (рис. 6.8).

Залежно від сукупності характеристик оптронної пари оптрон може виконувати різні функції в електронному колі: перемикання, підсилення, узгодження, перетворення, індексацію тощо Найпростіші схеми можливого використання оптронів показано на рис. 6.9.

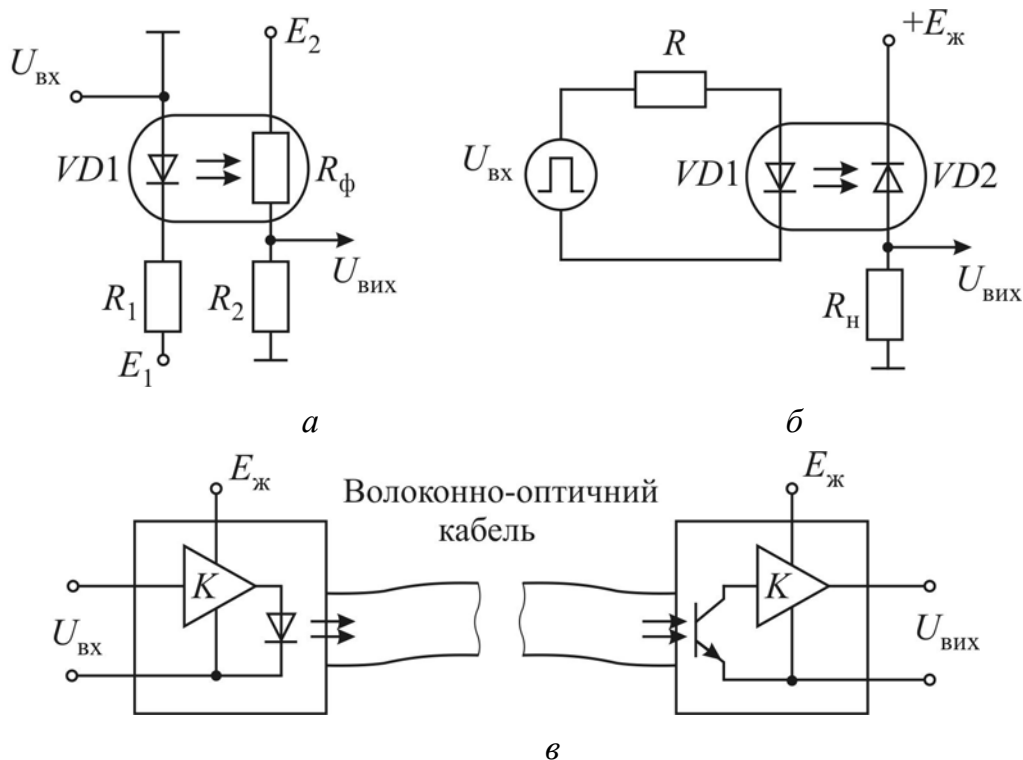


Рисунок 6.9 – Застосування оптронів: (а), (б) – в керованих розподільниках напруги; (в) – в системі оптичного зв'язку

Поряд з ключовими функціями (рис. 6.9, а, б), за допомогою оптронів може здійснюватися оптичний зв'язок (рис. 6.9, в). У передавальному пристрої та-

кої лінії вхідний сигнал проходить через підсилювач K і вмикає випромінювач світла (світлодіод $VD1$, лазер), яке у приймальному пристрої потрапляє на фотоприймач (фотодіод $VD2$, фототранзистор) електронного підсилювача K .

6.4.3. Волоконно-оптичні кабелі

Зв'язок між передавачем і приймачем здійснюється за допомогою волоконно-оптичного кабелю, що забезпечує завадостійкість і високу надійність передачі. Широкосмуговість такої оптичної передачі є надзвичайною (по одній лінії зв'язку може одночасно передаватися до 10^{10} телефонних розмов або 10^6 телевізійних програм). В обчислювальній техніці подібні лінії дають можливість оперувати великими масивами інформації, яка обробляється в різних блоках ЕОМ.

Передача світла по двошаровому оптичному волокну базується на ефекті повного внутрішнього відбиття. Як відомо, кути проходження світлового променя θ_1 і θ_2 крізь поверхню поділу двох середовищ з коефіцієнтами заломлення n_1 і n_2 (рис. 6.10, а) пов'язані рівнянням

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (6.1)$$

Якщо $n_1 > n_2$, при $\theta_1 \geq \theta_{1M} = \arcsin(n_2/n_1)$, що відповідає $\theta_2 = 90^\circ$ ($\sin \theta_2 = 1$), світловий промінь не може подолати поверхню поділу і відбивається в більш оптично щільне середовище під кутом $\beta = \alpha = \theta_1$ (рис. 6.10). Таким середовищем є серцевина двошарового оптичного волокна. При невеликих кутах падіння світлових променів на граничну оболонку оптичного волокна $(90^\circ - \theta_1) < (90^\circ - \theta_{1M})$ вся енергія світлової хвилі відбивається всередину внутрішньої жили і передається вздовж неї, не виходячи крізь оболонку (рис. 6.10, б).

Найчастіше внутрішня жила виготовляється з чистого кварцу, а світловідбивальна оболонка, що має менший коефіцієнт заломлення, з кварцу, легованого бором. Діаметр внутрішньої жили D_1 не перевищує кількох десятків мікрон, діаметр оболонки $D_2 - 100$ мкм. Волоконно-оптичні кабелі можуть об'єднувати до кількох сотень таких двошарових світловодів.

6.5. Кріоелектроніка

6.5.1. Загальні відомості про кріоелектроніку

Здатність деяких матеріалів втрачати опір при низькій температурі, тобто переходити у стан надпровідності, дає можливість створювати електронні прилади вентильного типу, у яких це явище використовується. Звідси назва – кріоелектроніка (кріо – холод).

До надпровідникових матеріалів відносяться ряд металів (наприклад, тантал, ніобій, цирконій, свинець) та їх сполуки, а також керамічні утворення типу $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_3$ та подібні. Перші переходять у надпровідний стан при температурах до 20 К (на рівні температури рідкого гелію). Другі, так звані “високотемпературні надпровідники”, – при температурах рідкого азоту (78 К) і вищих.

Наявність надпровідності обмежена критичними параметрами – граничними значеннями температури, напруженості магнітного поля, густини струму, при досягненні яких вона зникає. Змінюючи будь-який з цих параметрів з переходом через критичне значення, можна переводити надпровідникові матеріали з надпровідного стану в нормальний і навпаки.

6.5.2. Кріотрони силові

Найбільш відпрацьованим кріогенним електронним приладом ключового типу є кріотрон, який стрибком змінює свій опір внаслідок втрати або відновлення надпровідності. Він може застосовуватися як в потужних електронних

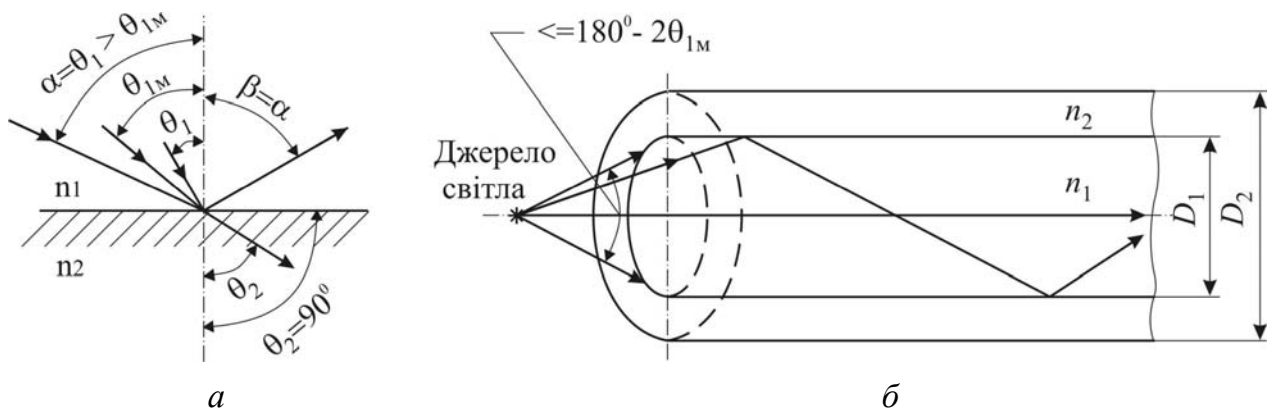


Рисунок 6.10 – Принцип дії світловода: (а) – відбиття променя світла при $n_1 > n_2$; (б) – проходження світла у двошаровому світловоді при повному внутрішньому відбитті

пристроях, так і в мікроелектроніці. Найпростіша схема силового кріотрона наведена на рис. 6.11. Він складається зі струмонесучого надпровідника, на який намотано інший надпровідник, що має вищі критичні параметри, (наприклад, ніобій) і може без втрати надпровідності створювати магнітне поле, критичне для струмонесучого надпровідника (наприклад, танталу).

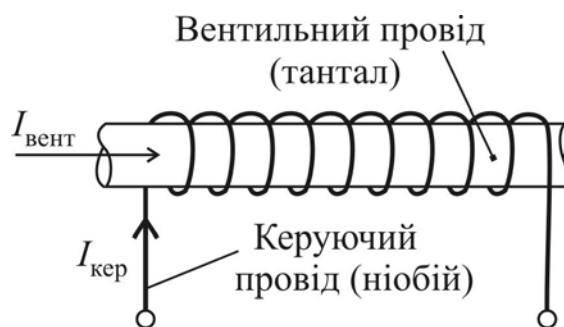


Рисунок 6.11 – Конструктивна схема силового кріотрона

Провідник, що переводиться з надпровідного стану у нормальний (і навпаки), називається *вентильним*, провідник соленоїду – *керуючим*. Відповідно струми, що проходять по цих провідниках, називаються *вентильним* $I_{\text{вент}}$ і *керуючим* $I_{\text{кер}}$. Магнітне поле, прикладене до вентильного провідника, змінюється за допомогою струму $I_{\text{кер}}$. Залежно від сили цього струму, що створює критичне магнітне поле для вентильного провідника, струм в останньому стрибком змінюється від значення $I_{\text{вент max}}$ у надпровідному стані до значення $I_{\text{вент min}}$ після втрати надпровідності.

Відношення зміни струмів, що відповідає цьому переходу, називається коефіцієнтом підсилення за струмом:

$$K_i = \frac{\Delta I_{\text{вент}}}{\Delta I_{\text{кер}}} \quad (6.2)$$

Такий перехід силового кріотрона з одного стану в інший відбувається за час, набагато менший мікросекунди, тобто кріотрони мають високу швидкодія, що робить їх привабливими для використання в логічних колах ЕОМ. Хоча для такої мети краще підходять кріотрони, дія яких базується на ефекті Джозефсона.

6.5.3. Кріотрони на ефекті Джозефсона

Ефект Джозефсона полягає в протіканні надпровідного струму через тонкий ($\sim 1\text{нм}=10^{-9}\text{ м}$) шар ізоляції, що розділяє два надпровідника (так званий *контакт Джозефсона*). Якщо сила струму I через контакт не перевищує критичного значення I_k , то падіння напруги на контакті відсутнє. При $I > I_k$ на контакті

виникає падіння напруги і спостерігається електромагнітне випромінювання з частотою

$$v = \frac{2eU}{h}, \quad (6.3)$$

де e – елементарний електричний заряд ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл); h – стала Планка ($h = 6,626 \cdot 10^{-31}$ Дж·с); U – напруга на контакті.

На рис. 6.12 схематично показано структуру кріотрона, який працює на ефекті Джозефсона. Завдяки тонкоплівковій технології у мікросхемах може бути вміщено велику кількість таких кріотронів, які характеризуються дуже низьким енергоспоживанням (до 100 нВт) і надвисокою швидкістю (20...30 пс = $20 \dots 30 \cdot 10^{-12}$ с). Але необхідність низькотемпературного охолодження і пов'язані з цим технологічні складнощі поки що обмежують широке застосування кріоелектроніки.

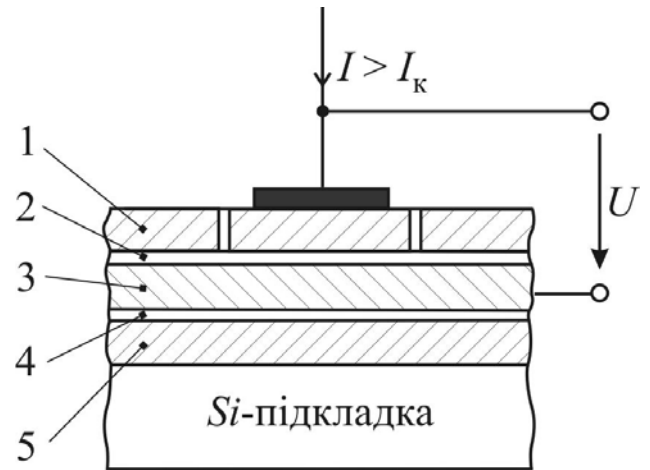


Рисунок 6.12 – Кріотрон на основі ефекту Джозефсона: 1 – надпровідник Pb-Si; 2, 4 – ізоляційні проміжки (~5 нм); 3 – надпровідник Pb-In-Au; 5 – надпровідний екран (Nb)

6.6. Біоелектроніка

6.6.1. Загальні відомості про біоелектроніку

На відміну від медичної електроніки, яка займається розробкою і дослідженням діагностичної та лікувальної апаратури, біоелектроніка використовує унікальні можливості нейрона – своєрідної логічної ІМС на біологічній основі.

В останній час поширюється моделювання нервової системи живих організмів (нейронів та нейронних мереж) для подальшого удосконалення електронних приладів та пристроїв. Спостерігається бажання включити ці біологічні об'єкти безпосередньо в обчислювальні і мікропроцесорні пристрої з метою ще збільшити їх мініатюризацію і швидкість. Базовим стає поняття *біочіп*. На відміну від твердотільних чіпів, біочіпи значною мірою позбавлені таких вад, як тепловиділення, обмеження літографії, спотворення міжз'єднань, наявність

протирич “частота – потужність”, “швидкодія – пам’ять”.

6.6.2. Нейрони як біочіпи

Улаштування і функціонування окремого нейрона пояснює рис. 6.13. Будучи живою нервовою клітиною, нейрон складається з тіла з ядром (*сома*) розміром у декілька десятків мікрон і відростків, що відходять від нього. За винятком одного відростка (*аксон*), який передає імпульси назовні, всі інші (їх може бути один і більше) призначені для сприйняття вхідних сигналів і називаються *дендритами*. Місце контакту аксона одного нейрона з дендритом іншого називається *синапсом*.

Тіло клітини – це місце збору інформації нейроном крізь велику кількість синаптичних з’єднань. Відбувається просторове і часове надходження сигналів від рецепторів або інших нейронів, і коли сумарний сигнал сягає деякого порогового значення, в сомі створюється імпульс, що надходить в аксон, проходить по ньому у численні синапси і потрапляє або до інших нейронів, або до робочих клітин живого організму.

Таким чином у живому організмі нейрони створюють систему, здатну сприймати як зовнішні, так і внутрішні сигнали, накопичувати й обробляти отриману інформацію, передавати потрібні імпульси на виконавчі органи. Отже, завдяки нейронам забезпечується керування всіма життєвими функціями організму.

Надзвичайні можливості такої системи (велика ємність на одиницю об’єму, низькі енергетичні витрати, проходження логічних та інтуїтивних операцій і багато чого іншого) спонукають як до моделювання нейронів і нейронних мереж різного рівня складності (на транзисторах, тунельних діодах, інтегральних мікросхемах тощо), так і до використання живих нейронних клітин в електронних обчислювальних комплексах. І перше, і друге відкриває великі перспективи й

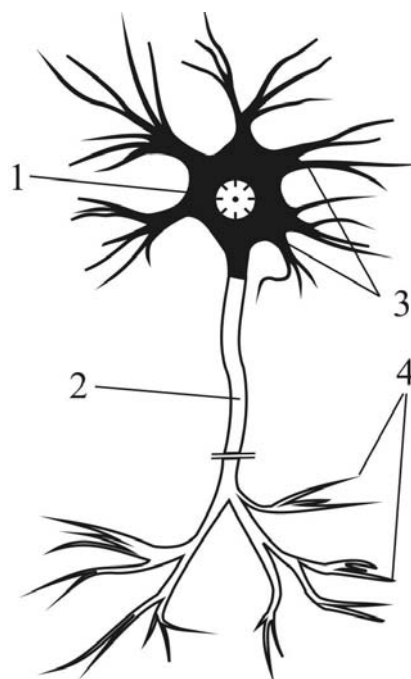


Рисунок 6.13 – Схематичне зображення нейрона:

1 – сома; 2 – аксон;
3 – дендрити; 4 – синапси

одночасно викликає значне занепокоєння, бо можуть мати місце непередбачувані наслідки, пов'язані з втратою контролю людини над такими системами.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке мікроелектроніка? Назвіть нові напрямки її розвитку, пов'язані з функціональними пристроями.
2. Що таке інтегральна мікросхема? Назвіть основні їх види залежно від ступеня інтеграції, технології виготовлення та від функціонального призначення.
3. Охарактеризуйте основні параметри інтегральних мікросхем. Назвіть позитивні фактори інтегральних мікросхем.
4. Що таке гібридна інтегральна мікросхема? З яких елементів вона утворюється?
5. Поясніть, як утворюються резистор, конденсатор та індуктивність на плівковій основі в гібридній інтегральній мікросхемі.
6. Що таке напівпровідникова інтегральна мікросхема? Як утворюються транзистори, діоди, конденсатори, резистори в цій мікросхемі?
7. Поясніть послідовність утворення ізольованих ділянок (“кишень”) у кремнієвій пластині при розробці напівпровідникової інтегральної мікросхеми.
8. Наведіть електричну схему і фрагмент напівпровідникової інтегральної мікросхеми, у якій виконані транзистор, діод та резистор.
9. Що таке оптоелектроніка? Назвіть її переваги і галузі застосування.
10. Що таке оптрон? Наведіть його структурну схему і поясніть призначення основних елементів.
11. Наведіть схеми резисторного, діодного, транзисторного і тиристорного оптронів. Які функції може виконувати оптрон в електричному колі? Поясніть, як може здійснюватися оптичний зв'язок за допомогою оптронів.
12. Поясніть будову, принцип дії, призначення та галузі застосування волоконно-оптичного кабелю.
13. Поясніть будову світловода. Яким чином енергія світлової хвилі передається вздовж внутрішньої жили і не виходить крізь оболонку?
14. Що таке кріоелектроніка? Які матеріали і за яких умов у ній використовуються? Що таке критичні параметри надпровідника?

15. Що таке кріотрон? Накресліть конструктивну схему і поясніть принцип дії силового кріотрона.
16. Наведіть будову і поясніть роботу кріотрону на основі ефекту Джозефсона. В чому полягає ефект Джозефсона?
17. Що таке біоелектроніка? В чому полягає її відмінність від медичної електроніки?
18. Що таке нейрон? Схематично наведіть будову нейрона.

РОЗДІЛ 7

ЕЛЕМЕНТИ ІМПУЛЬСНОЇ ТЕХНІКИ

7.1. Параметри імпульсних сигналів

Робота багатьох електронних пристроїв пов'язана з короткочасною зміною струмів і напруг. *Електричним імпульсом* називають короткочасну зміну сигналу, а режим роботи електронного пристрою, при якому короткочасний вплив сигналу чергується з паузою, називається *імпульсним режимом*.

Короткочасна зміна сигналу може відбуватися за різними законами, що і визначає форму імпульсів: прямокутну, трапецієподібну, «дзвіночок», трикутну, пилкоподібну, експоненціальну (рис. 7.1).

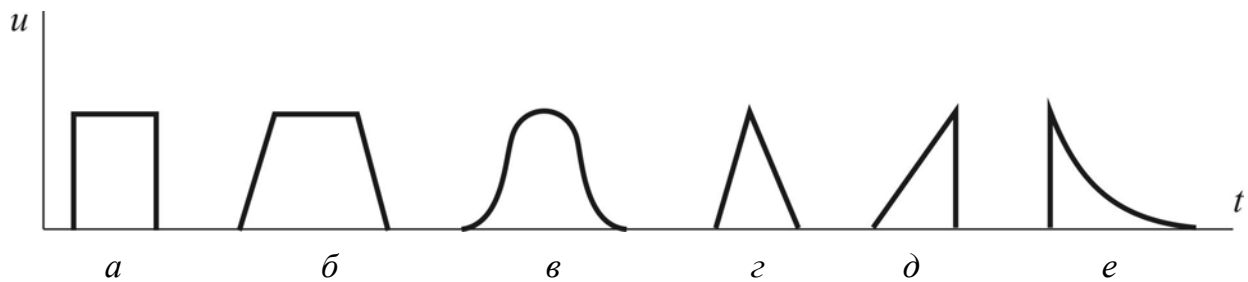


Рисунок 7.1 – Форма відеоімпульсів: *a* – прямокутна; *б* – трапецієподібна; *в* – «дзвіночок»; *г* – трикутна; *д* – пилкоподібна; *е* – експоненціальна

Такі імпульси називають *відеоімпульсами*. Відеоімпульси можуть бути позитивної або негативної полярності. Крім відеоімпульсів, існують *радіоімпульси*, що являють собою пакети високочастотних коливань, обвідна яких змінюється за законами відеоімпульсів (рис. 7.2).

Розрізняють одиночні, неперіодичні та періодичні імпульси.

Одиночними є імпульси, які з'являються настільки рідко, що до моменту надходження на пристрій чергового імпульсу він стає

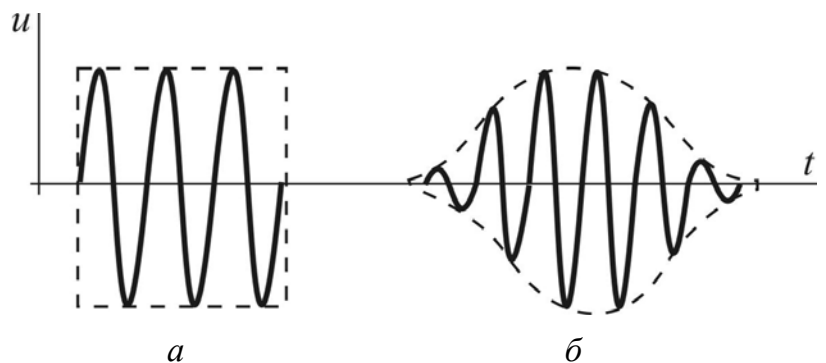


Рисунок 7.2 – Форма радіоімпульсів: *a* – прямокутна; *б* – «кльош»

повністю звільненим від впливу попереднього імпульсу.

У періодичних імпульсів інтервал часу між початком двох сусідніх імпульсів, так званий період повторення T , є величиною сталою (рис. 7.3). Йому відповідає частота повторення імпульсів $f = 1/T$. Тривалість імпульсу t_i – це інтервал часу від моменту появи імпульсу до моменту зникнення, а інтервал часу між сусідніми імпульсами – його пауза $t_{п}$.

Таким чином:

$$T = t_i + t_{п}$$

Відношення періоду T до тривалості t_i імпульсів називається *шпаруватістю імпульсів*

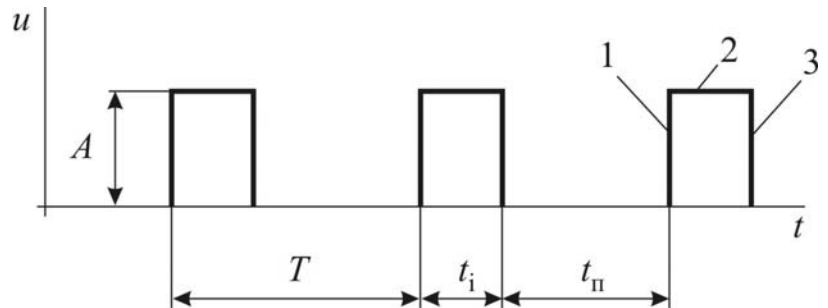


Рисунок 7.3 – Періодичні відеоімпульси:

A – амплітуда імпульсу; T – період повторення;
 t_i – тривалість імпульсу; $t_{п}$ – тривалість паузи;
 1 – фронт імпульсу; 2 – вершина імпульсу;
 3 – зріз імпульсу

$$q = T / t_i. \quad (7.1)$$

Шпаруватість імпульсів зазвичай знаходиться у межах 2...10 (автоматика, обчислювальна техніка), але може досягати і 10000 (радіолокація, телебачення).

Насправді реальні імпульси є спотвореними, що виявляється в уповільненні наростання і спаду імпульсу, а також у зрізі плоскої вершини імпульсу. Характеризуються реальні імпульси такими параметрами (рис. 7.4):

- амплітудою імпульсу A ;
- тривалістю імпульсу t_i , що визначається на рівні $0,1 A$;
- тривалістю фронту імпульсу t_{ϕ} – часом наростання імпульсу від $0,1 A$ до $0,9 A$;
- тривалістю спаду імпульсу t_3 – часом спаду імпульсу від $0,9 A$ до $0,1 A$;
- нерівномірністю зрізом вершини імпульсу ΔA .

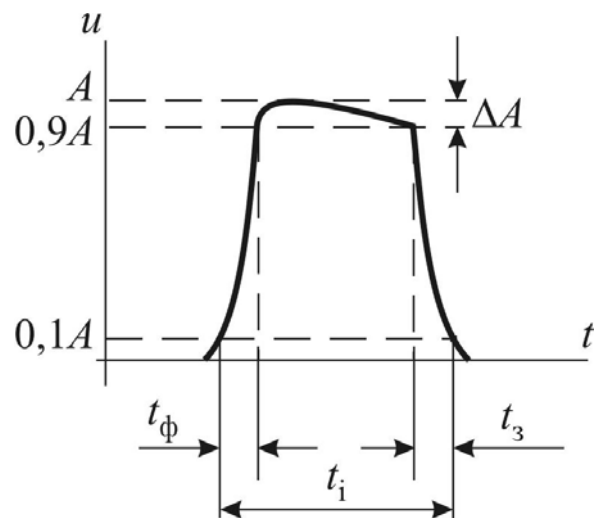


Рисунок 7.4 – Параметри реального відеоімпульсу

7.2. Електронні ключі

Оснoву електронного ключа становить активний елемент (напівпровідниковий діод, транзистор, тиристор), який працює у ключовому режимі. *Ключовий режим* характеризується двома станами ключа: “Розімкнено” – “Замкнено”. На рис. 7.5 зображено схему і часові діаграми ідеального ключа. При розімкненому ключі $0 \leq t \leq t_1$ $i = 0$, а $u_{\text{вих}} = E$, а при замкненому ключі $t_1 \leq t \leq \infty$ $i = E/R$, $u_{\text{вих}} = 0$. Отже, припускається, що опір розімкненого ключа нескінченно великий, а опір замкненого ключа дорівнює нулю.

7.2.1. Діодні ключі

Найпростіший тип електронних ключів – діодні. На рис. 7.6 показано схему послідовного діодного ключа і його передавальну характеристику $u_{\text{вих}}(u_{\text{вх}})$. За відсутності в схемі джерела енергії електричного струму (E_0) і додатної вхідної напруги $u_{\text{вх}}$ діод VD відкритий, а струм через нього

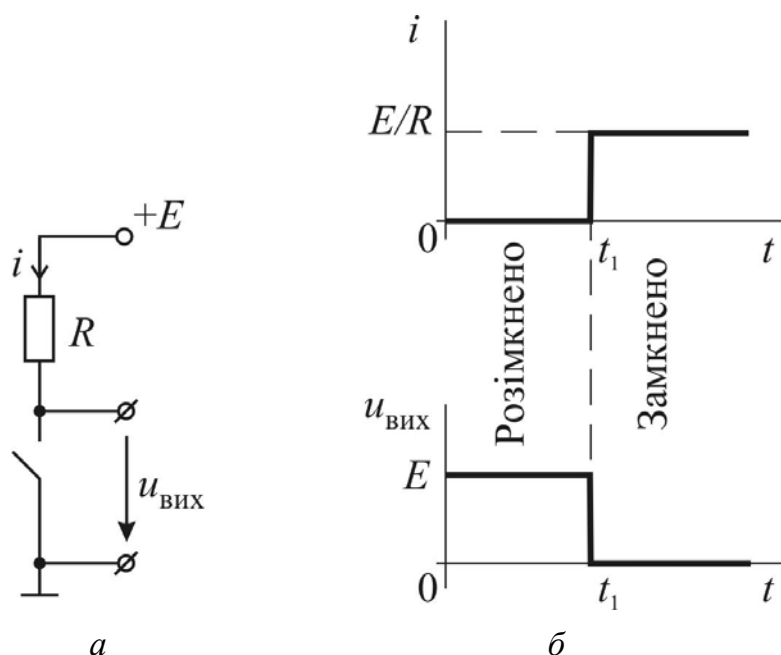


Рисунок 7.5 – Схема (а), часові діаграми струму і вихідної напруги (б) ідеального ключа

$$i = \frac{u_{\text{вх}}}{R_{\text{пр}} + R}, \quad (7.2)$$

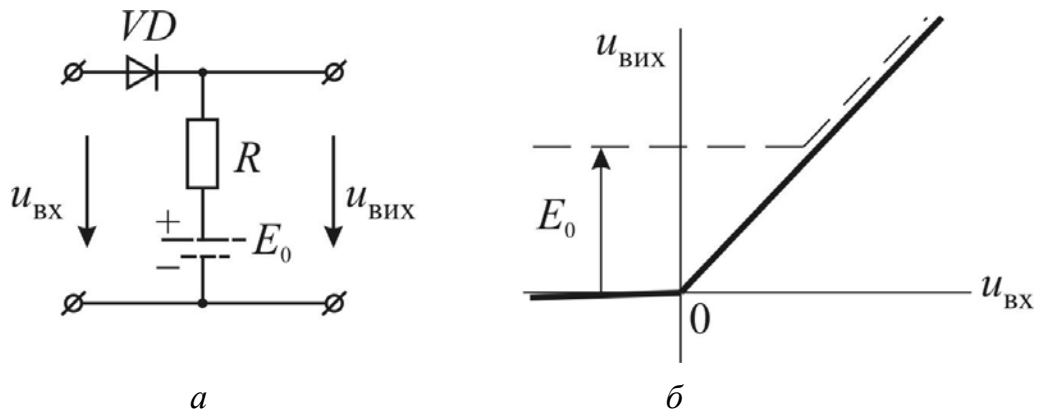


Рисунок 7.6 – Схема (а) і передавальна характеристика (б) послідовного діодного ключа з нульовим (суцільні лінії) та ненульовим (штрихові лінії) рівнем вмикання

де $R_{пр}$ – прямиий опір діода.

Вихідна напруга

$$u_{\text{вих}} = R \cdot i = R \frac{u_{\text{вх}}}{R_{\text{пр}} + R}. \quad (7.3)$$

Оскільки $R_{пр} \ll R$, то $u_{\text{вих}} \approx u_{\text{вх}}$.

При від'ємній вхідній напрузі зворотний струм через діод

$$i = \frac{u_{\text{вх}}}{R_{зв} + R}, \quad (7.4)$$

де $R_{зв}$ – зворотний опір діода.

При цьому вихідна напруга

$$u_{\text{вих}} = R \cdot i = R \frac{u_{\text{вх}}}{R_{зв} + R}. \quad (7.5)$$

Оскільки $R_{зв} \gg R$, то

$$u_{\text{вих}} \approx \frac{R}{R_{зв}} u_{\text{вх}} \ll u_{\text{вх}}. \quad (7.6)$$

Для зміни рівня вмикання в коло послідовного діодного ключа вводять джерело напруги зміщення E_0 (рис. 7.6). У цьому випадку при $u_{\text{вх}} > E_0$ діод VD відкритий і $u_{\text{вих}} \approx u_{\text{вх}}$, а при $u_{\text{вх}} < E_0$ – закритий і $u_{\text{вих}} = E_0$.

На рис. 7.7 зображено схему *паралельного діодного ключа* і його передавальну характеристику. За відсутності в схемі джерела E_0 і додатної вхідної напруги діод VD відкритий (ключ замкнений) і $u_{\text{вих}} \approx 0$, а за від'ємної – закритий

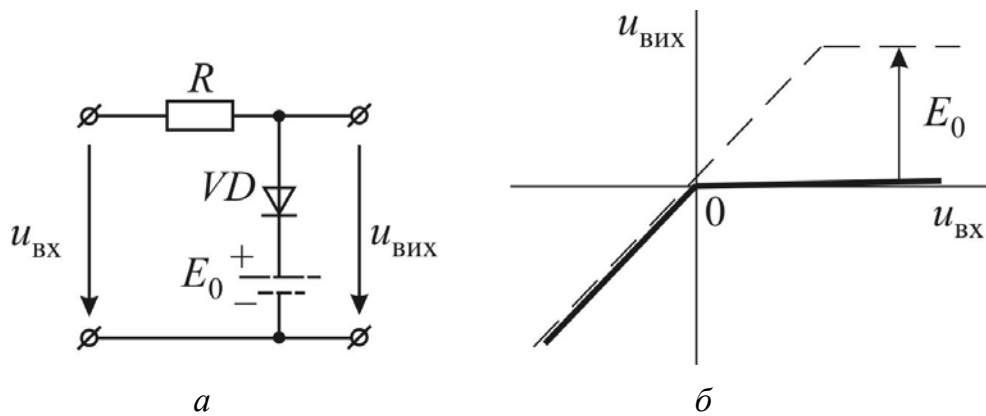


Рисунок 7.7 – Схема (а) і передавальна характеристика (б) паралельного діодного ключа з нульовим (суцільні лінії) та ненульовим (штрихові лінії) рівнем вмикання

(ключ розімкнений) і $u_{\text{ВИХ}} \approx u_{\text{ВХ}}$. Для зміни рівня вмикання ключа вводять джерело напруги зміщення E_0 , підключене послідовно з діодом, та отримують передавальну характеристику, яка показана на рис. 7.7 штриховою лінією.

Через комбінацію двох діодних ключів можна отримати *подвійний діодний ключ* (рис. 7.8), який передає вхідну напругу на вихід ключа, якщо її значення знаходиться в межах, що визначаються рівнями вмикання першого $U_{\text{ВХ1}}$ і другого $U_{\text{ВХ2}}$ ключів.

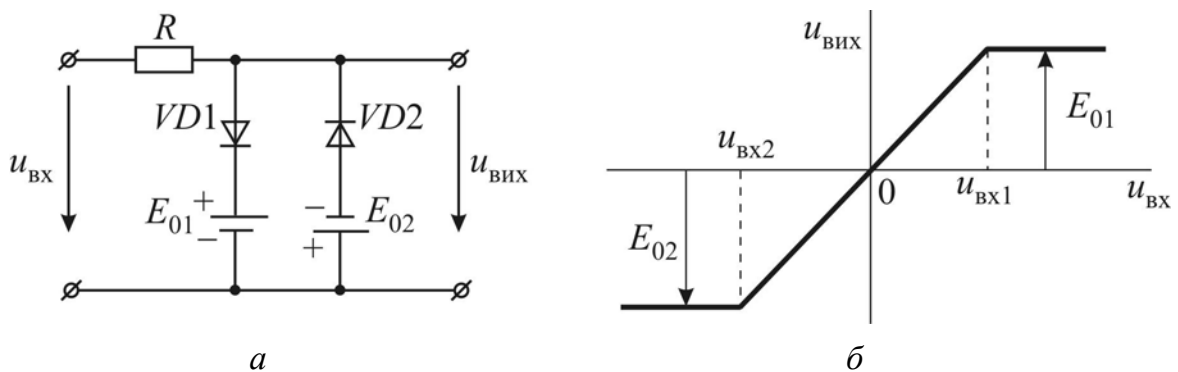


Рисунок 7.8 – Схема (а) і передавальна характеристика (б) подвійного діодного ключа

Діодні ключі не дозволяють розділити керуюче і кероване коло, а цього часто потребує практика. У таких випадках використовують транзисторний ключ.

7.2.2. Транзисторний ключ

У транзисторного ключа вхідне (керуюче) коло відділене від вихідного (керованого) кола (рис. 7.9).

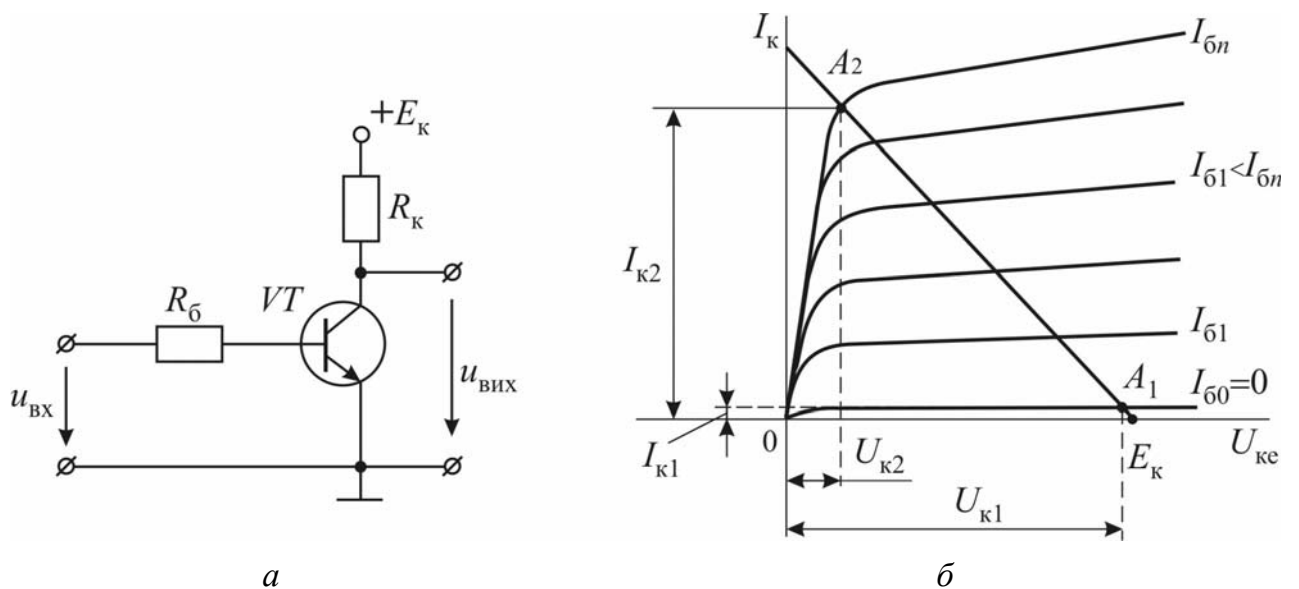


Рисунок 7.9 – Схема (а) і характеристики режиму роботи (б) електронного ключа на біполярному транзисторі

Ключ на біполярному транзисторі мало відрізняється від підсилювача, виконаного за схемою зі спільним емітером. Якщо транзистор працює в режимі ключа, то він характеризується двома станами. Перший стан, що відповідає розімкненому ключу, визначається точкою A_1 на вихідних характеристиках транзистора і його називають *режимом відсічки*. У режимі відсічки струм бази транзистора VT $I_B = 0$, колекторний струм I_{K1} малий і дорівнює початковому колекторному струму, а колекторна напруга $U_K = U_{K1} \approx E_K$ (рис. 7.9, б). Режим відсічки реалізується при зворотному потенціалі бази транзистора.

Другий стан, що відповідає замкненому ключу, визначається точкою A_2 і називається *режимом насичення*, що реалізується при прямому потенціалі бази. При цьому колекторний струм максимальний, транзистор повністю відкритий і падіння напруги на ньому практично відсутнє ($U_{K2} \approx 0$).

З режиму відсічки в режим насичення транзистор VT переводиться із застосуванням прямої вхідної напруги. При цьому підвищенню вхідної напруги (потенціалу бази) відповідає зниження вихідної напруги (потенціалу колектора), і навпаки. Такий ключ називають *інвертуючим* (інвертором). У даному транзисторному ключі рівні вихідної напруги, які відповідають режимам відсічки і насичення, стабільні і майже не залежать від температури.

7.3. Амплітудні обмежувачі і селектори імпульсів

Амплітудним обмежувачем називають чотириполусник, вихідна напруга якого повторює форму вхідної напруги, якщо остання не виходить за рівень обмеження, або залишається на ньому, якщо вхідна напруга перевищує цей рівень. В якості амплітудних обмежувачів використовують електронні ключі. На рис. 7.10 показано обмеження синусоїдальної напруги зверху за допомогою схеми паралельного діодного ключа з ненульовим рівнем вмикання (див. рис. 7.7). Рівень обмеження дорівнює рівню вмикання ключа і в даній схемі визначається величиною джерела напруги зміщення E_0 .

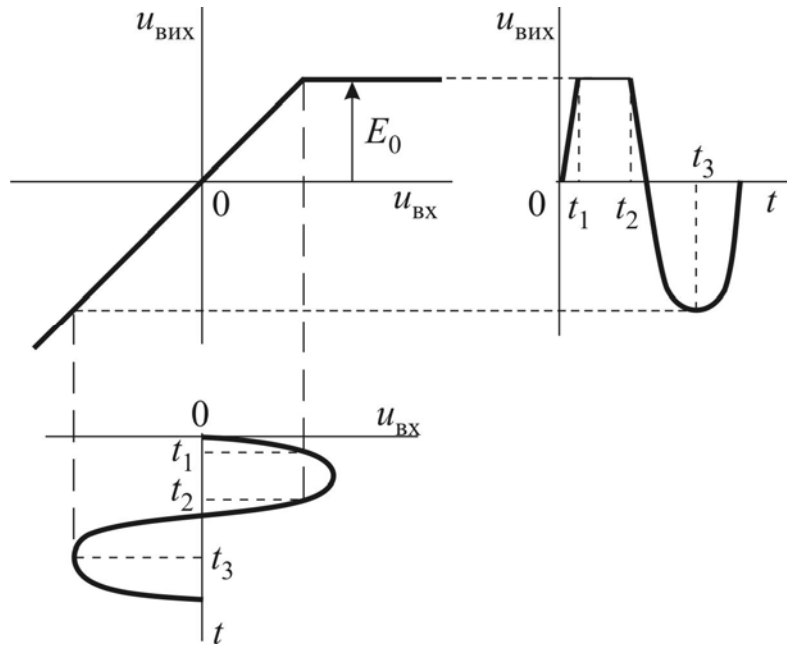


Рисунок 7.10 – Діаграми, що пояснюють роботу амплітудного обмежувача зверху

Аналогічно отримують обмеження знизу.

Для двобічного обмеження використовують подвійні ключі. На рис. 7.11 показано двобічне обмеження синусоїдальної напруги за допомогою подвійного діодного ключа (див. рис. 7.8). При цьому за допомогою амплітудного обмежувача фо-

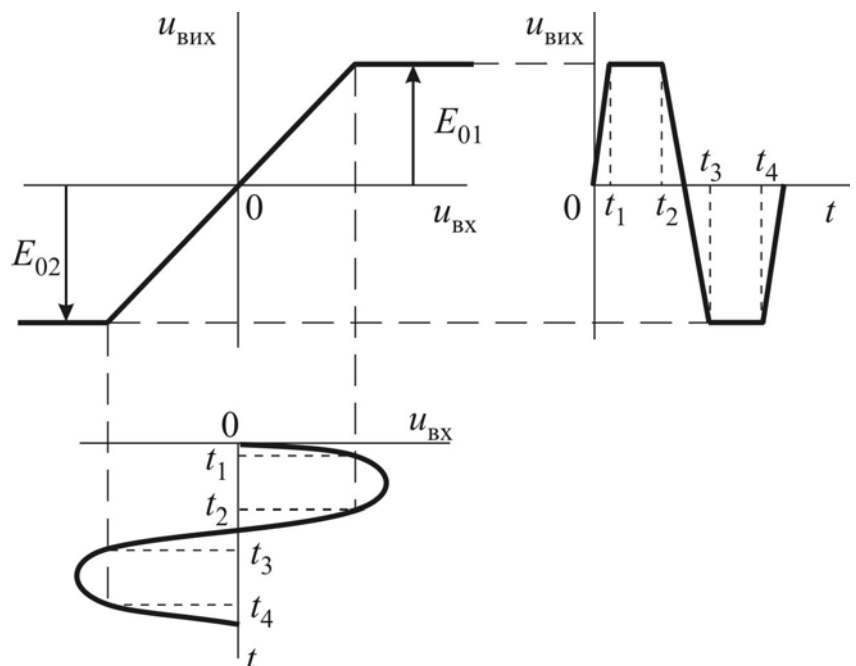


Рисунок 7.11 – Діаграми, що пояснюють роботу двобічного амплітудного обмежувача

рмується трапецеїдальна напруга з синусоїдальної.

Амплітудний обмежувач на стабілітроні дає можливість отримувати трапецеїдні імпульси, відсікаючи синусоїдальну півхвилю знизу (рис. 7.12). У стабілітроні VD при прямому вмиканні можна вважати опір $R_{пр} = 0$, тому на ділянці від t_3 до t_4 вихідна напруга

$$u_{\text{вих}} = R_{\text{пр}} \cdot i = 0. \quad (7.7)$$

Якщо амплітуда вхідної напруги значно більша рівня обмеження, який задається стабілітроном ($U_{\text{вх м}} \gg U_{\text{ст}}$), то можна отримати вихідну напругу, близьку за формою до прямокутних імпульсів.

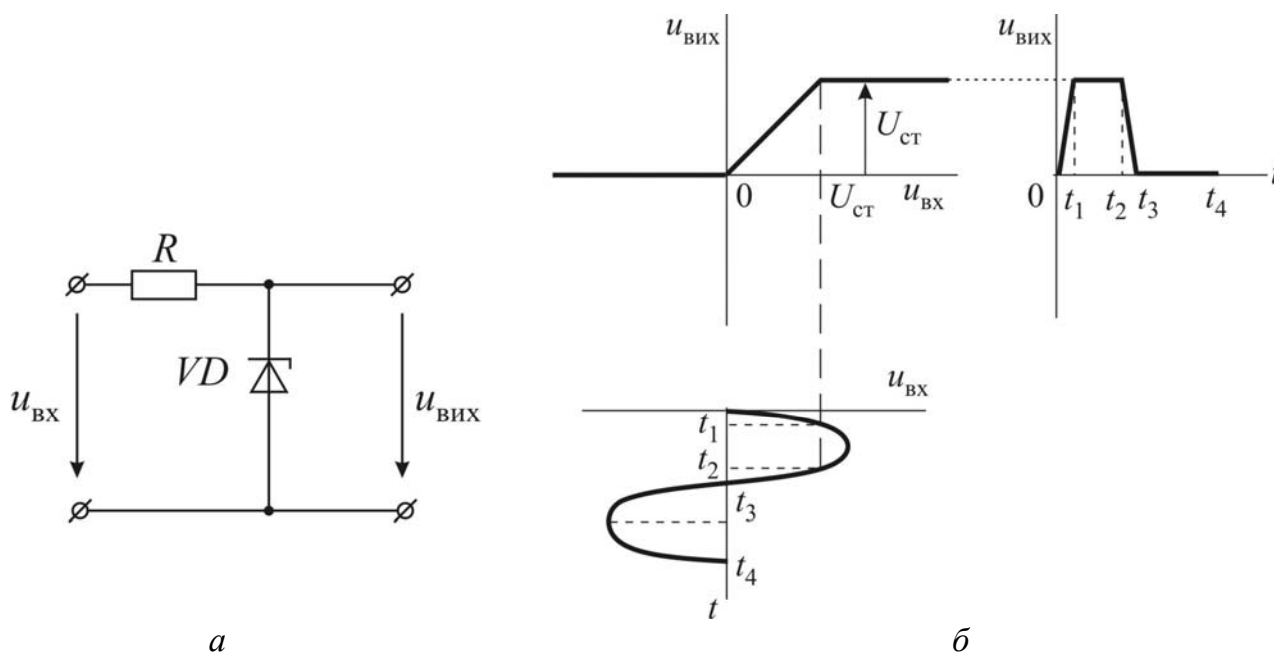


Рисунок 7.12 – Схема (а) і характеристики роботи (б) амплітудного обмежувача на стабілітроні

Амплітудним селектором імпульсів називають пристрій, призначений для виділення імпульсів, амплітуда яких є більшою або меншою певного рівня (рівня селекції), або імпульсів, амплітуда яких знаходиться в заданих межах. На рис. 7.13, а показано застосування послідовного діодного обмежувача з ненульовим рівнем вмикання (див. рис. 7.6) для селекції імпульсів, амплітуда яких перевищує значення напруги зміщення E_0 .

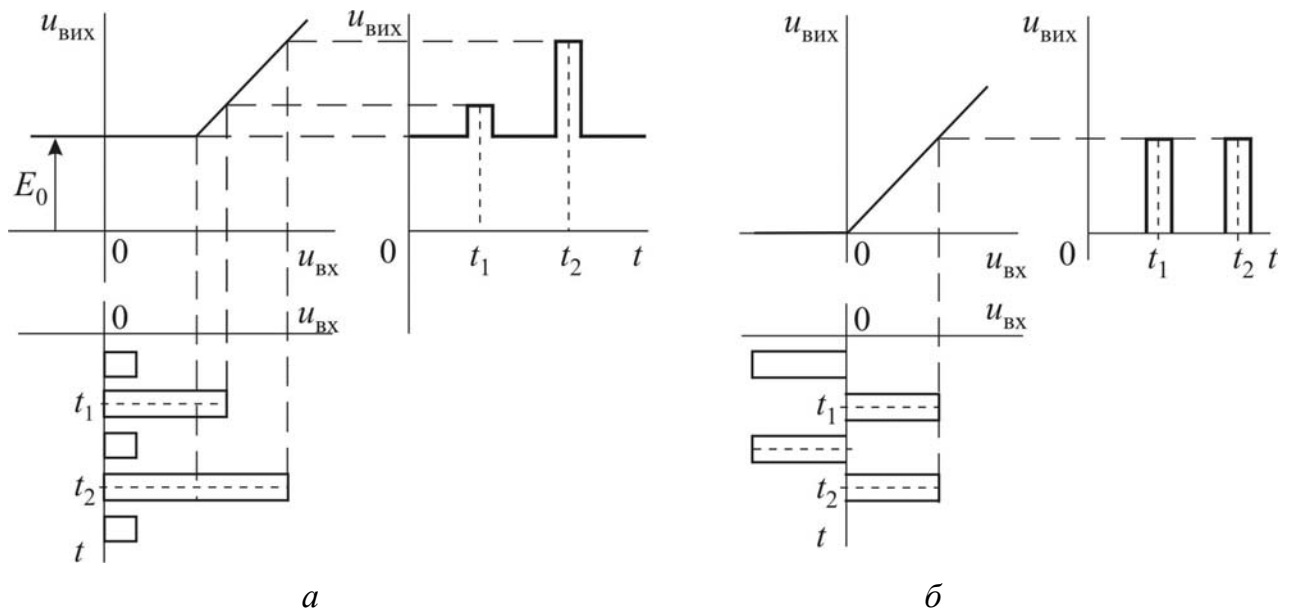


Рисунок 7.13 – Діаграми, що пояснюють роботу селектора імпульсів:
(а) – за амплітудою; (б) – за полярністю

При нульовому рівні обмежувача ($E_0 = 0$) за допомогою послідовного діючого ключа забезпечується селекція імпульсів за полярністю (рис. 7.13, б).

7.4. Генератори пилкоподібних імпульсів

Генератори пилкоподібних імпульсів (ГПІ) створюють напругу, яка періодично лінійно збільшується певний час, після чого стрімко повертається у початковий стан. Така напруга використовується для утворення часового розгортання електронного променя на екрані електронно-променевої трубки, у вимірювальних приладах, ЕОМ безперервної дії тощо.

Зазвичай лінійну зміну напруги отримують на початку зарядки конденсатора. Інакше кажучи, для отримання періодичної послідовності пилкоподібних імпульсів необхідно періодично заряджати і розряджати конденсатор (рис. 7.14, а). При розімкненому ключі К конденсатор C заряджається від джерела живлення $E_{ж}$ струмом i_c , і напруга u_c на ньому зростає за експонентою зі сталою часу $\tau_{зар} = RC$. Якщо через період часу $t_3 \leq \tau_{зар}$ ключ К замкнути, то відбудеться майже миттєве розрядження конденсатора, тому що опір транзистора буде дуже малий (рис. 7.14, б).

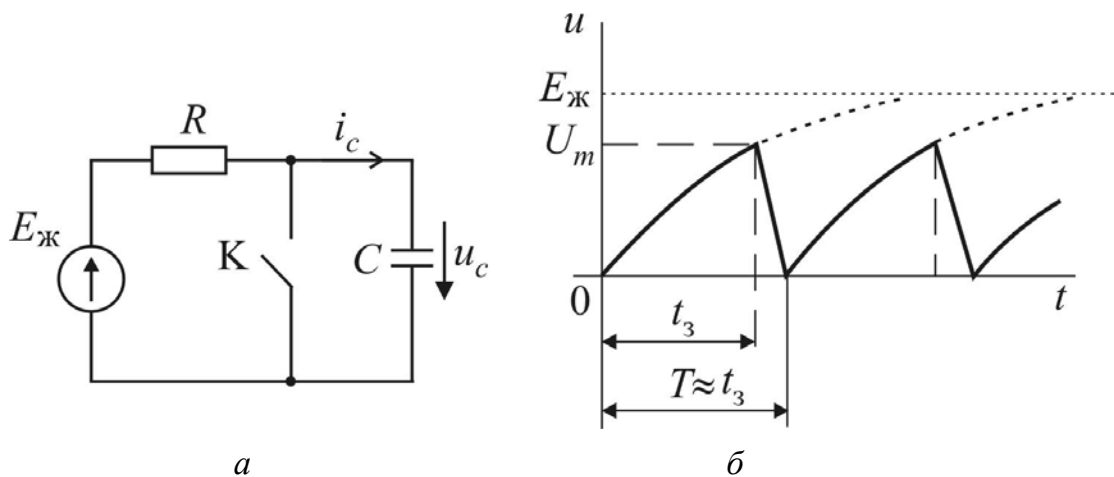


Рисунок 7.14 – Функціональна схема ГПІ (а) та його вихідні імпульси (б)

На рис. 7.15, а зображено електричну схему найпростішого ГПІ. Транзисторний ключ керується прямокутними імпульсами $u_{\text{вх}}$ негативної полярності (рис. 7.15, б). Перебіг процесу відповідає розглянутому для загальної функціональної схеми.

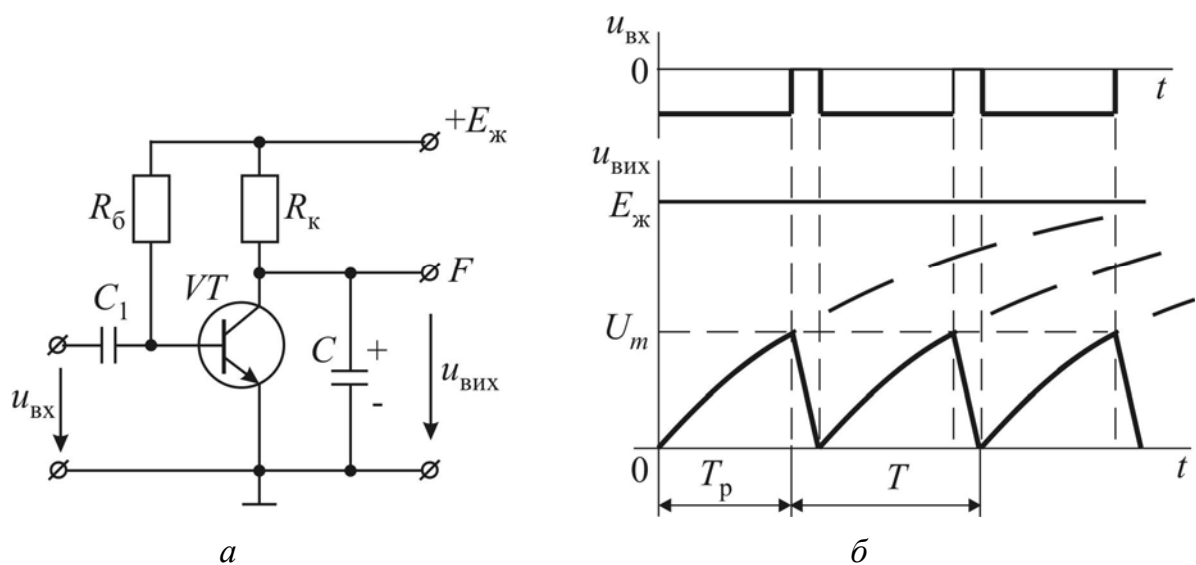


Рисунок 7.15 – Принципова схема (а) та часові діаграми (б) ГПІ

Оскільки при заряді конденсатора напруга на ньому збільшується не за лінійним, а за експоненціальним законом, то для отримання пилкоподібної напруги з задовільною лінійністю доводиться використовувати лише початкову ділянку експоненти при $U_m \ll E_{\text{ж}}$. Отже, розглянута схема ГПІ не дозволяє отримати великі амплітуду і коефіцієнт використання напруги джерела живлення при малій нелінійності.

Нелінійність зростання напруги на конденсаторі при його заряді спричинена зменшенням струму заряду. Якщо струм заряду зробити стабільним, то напруга на конденсаторі буде змінюватися за лінійним законом. Це дозволить при малому коефіцієнті нелінійності збільшити амплітуду пилкоподібної напруги і коефіцієнт використання джерела живлення. Такі ГПШ створюються на базі операційних підсилювачів.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке електричний імпульс? Намалуйте відео- і радіоімпульси різних форм.
2. Назвіть і поясніть основні параметри періодичних відеоімпульсів.
3. Назвіть і поясніть основні параметри реального відеоімпульсу.
4. Що таке електронний ключ? Наведіть і поясніть схему і часові діаграми струму та вихідної напруги ідеального ключа.
5. Наведіть схему і передавальну характеристику послідовного діодного ключа з нульовим та ненульовим рівнем вмикання. Поясніть цю характеристику.
6. Наведіть схему і передавальну характеристику паралельного діодного ключа з нульовим та ненульовим рівнем вмикання. Поясніть цю характеристику.
7. Наведіть схему і передавальну характеристику подвійного діодного ключа. Поясніть цю характеристику.
8. Наведіть схему і характеристики режиму роботи електронного ключа на біполярному транзисторі. Чому такий ключ називають інвертуючим?
9. Що таке амплітудний обмежувач? Накресліть діаграми, що пояснюють роботу амплітудного обмежувача зверху.
10. Накресліть діаграми, що пояснюють роботу двобічного амплітудного обмежувача. За допомогою якого електронного пристрою забезпечується робота цього обмежувача?
11. Що таке амплітудний селектор імпульсів? Наведіть діаграми, що пояснюють роботу селектора імпульсів за амплітудою. За допомогою якого електронного пристрою забезпечується робота цього селектора?
12. Наведіть діаграми, що пояснюють роботу селектора імпульсів за полярністю. За допомогою якого електронного пристрою забезпечується робота цього селектора?
13. Наведіть схему і поясніть роботу амплітудного обмежувача на стабілітроні,

що дає можливість отримувати трапецієподібні імпульси.

14.Що таке генератор пилкоподібних імпульсів і де він використовується? Наведіть функціональну схему та вихідні імпульси цього генератора.

15.Наведіть схему найпростішого генератора пилкоподібних імпульсів та часові діаграми. Поясніть роботу цього генератора.

РОЗДІЛ 8

ЕЛЕМЕНТИ ЦИФРОВОЇ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

8.1. Системи числення

Системою числення називають сукупність символів (цифр) і способів запису чисел. Залежно від способу запису чисел системи числення розділяються на *непозиційні* (наприклад, римська система числення) і *позиційні*. У позиційній системі числення значення цифри в числі визначається її позицією – розрядом числа. Найменування позиційних систем числення збігається з кількістю цифр, що використовуються в них. У повсякденному житті ми користуємося *десятьковою системою числення*, в якій використовують десять цифр від 0 до 9. Будь-яке додатне число A в десятковій системі можна записати у вигляді ряду

$$A = a_n \cdot 10^n + a_{n-1} \cdot 10^{n-1} + \dots + a_1 \cdot 10^1 + a_0 \cdot 10^0 + a_{-1} \cdot 10^{-1} + \dots + a_{-m} \cdot 10^{-m}, \quad (8.1)$$

де 10 – основа системи; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_{-m}$ – коефіцієнти, що мають одне зі значень від 0 до 9; n і m – будь-які цілі числа.

Наприклад, число 5108,3 може бути подане у вигляді

$$5108,3 = 5 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 8 \cdot 10^0 + 3 \cdot 10^{-1}.$$

При цифровій обробці інформації широко використовується *двійкова система числення*, в якій для запису чисел використовують тільки дві цифри: 0 і 1. Будь-яке додатне число B у двійковій системі записується у вигляді ряду

$$B = b_n \cdot 2^n + b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0 + b_{-1} \cdot 2^{-1} + \dots + b_{-m} \cdot 2^{-m}, \quad (8.2)$$

де 2 – основа системи; $b_n, b_{n-1}, \dots, b_{-m}$ – коефіцієнти, що прибирають значення 0 або 1; n і m – будь-які цілі числа.

Ціла частина відокремлюється від дрібної частини точкою. Наприклад, число 3,5 у двійковій системі записується у вигляді

$$3,5_{10} = 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} = 11,1_2.$$

Шістнадцяткова система числення застосовується у спеціалізованих

ЕОМ. В цій системі за основу взято число 16, тому в ній використовується 10 цифр і 6 букв: 0, 1, 2, ..., 8, 9, A, B, C, D, E, F.

Для перетворення числа з двійкової в шістнадцяткову систему числення необхідно двійкове число розділити на групи по чотири розряди (тетради) вліво та вправо від точки. Крайні неповні тетради доповнюються нулями, після чого кожен тетраду замінюють відповідно до табл. 8.1 числом шістнадцяткової системи. Наприклад,

$$11110010_2 = 1111 \ 0010 = F2_{16}, \text{ оскільки}$$

$$1111_2 = F_{16}, \text{ а } 0010_2 = 2_{16}.$$

Таблиця 8.1 – Десяткове, двійкове і шістнадцяткове подання чисел

Десяткова система	Двійкова система	Шістнадцяткова система	Десяткова система	Двійкова система	Шістнадцяткова система
1	1	1	17	10001	11
2	10	2	18	10010	12
3	11	3	19	10011	13
4	100	4	20	10100	14
5	101	5	21	10101	15
6	110	6	22	10110	16
7	111	7	23	10111	17
8	1000	8	24	11000	18
9	1001	9	25	11001	19
10	1010	A	26	11010	1A
11	1011	B	27	11011	1B
12	1100	C	28	11100	1C
13	1101	D	29	11101	1D
14	1110	E	30	11110	1E
15	1111	F	31	11111	1F
16	10000	10	32	100000	20

Щоб виконати зворотнє перетворення, необхідно кожний символ числа з шістнадцяткової системи замінити чотирма числами двійкової системи відповідно до табл. 8.1.

Наприклад, число $C2_{16}$ з урахуванням того, що $C_{16} = 1100_2$, а $2_{16} = 0010_2$ набуває вигляду:

$$C2_{16} = 1100\ 0010 = 11000010_2.$$

Двійкову систему широко застосовують в цифровій техніці завдяки тому, що для подання одного розряду числа потрібен елемент з двома стійкими станами – 0 і 1, наприклад, електронний ключ.

Арифметичні дії з двома числами виконуються відповідно до правил, наведених у табл. 8.2.

Таблиця 8.2 – Правила виконання арифметичних операцій з двійковими числами

Двійкове додавання	Двійкове віднімання	Двійкове множення
$0 + 0 = 0$	$0 - 0 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$
$0 + 1 = 1$	$1 - 0 = 1$	$0 \cdot 1 = 0$
$1 + 0 = 1$	$1 - 1 = 0$	$1 \cdot 0 = 0$
$1 + 1 = 10$	$10 - 1 = 1$	$1 \cdot 1 = 1$

8.2. Логічні елементи

8.2.1. Основні логічні операції

В електронній автоматичі та обчислювальній техніці широкого застосування набули різні логічні схеми, що виконують відповідні логічні операції. *Логічна операція* перетворює за певними правилами вхідну інформацію у вихідну.

Логічні елементи, як правило, будуються на базі електронних пристроїв, що працюють у ключовому режимі. Тому цифрову інформацію звичайно подають у двійковій формі, в якій сигнали мають тільки два значення: “0” (*логічний нуль*) та “1” (*логічна одиниця*), що відповідають двом станам ключа. Логічні перетворення двійкових сигналів містять три елементарні операції: АБО, І, НІ.

Логічна функція АБО – *логічне додавання* (диз’юнкція), яка позначається знаками “V” або “+”:

$$F = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \dots \vee x_n. \quad (8.3)$$

Вихідний сигнал F елемента АБО дорівнює одиниці, якщо хоча б на один з n входів x_n подано сигнал “1”.

Логічна функція І – *логічне множення* (кон’юнкція), яка позначається зна-

ками “ \wedge ”, “ \cdot ” або написанням змінних величин поряд без знаків розділення:

$$F = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \dots \wedge x_n. \quad (8.4)$$

Вихідний сигнал F елемента І дорівнює одиниці, якщо одночасно на всі n входів x_n подано сигнал “1”.

Логічна функція НІ – *логічне заперечення* (інверсія), що позначається рисою над змінною величиною:

$$F = \bar{x}. \quad (8.5)$$

Операція логічного заперечення НІ відмінняє вхідний сигнал, перетворюючи його на протилежний на виході. Істинне висловлювання перетворюється в хибне або навпаки, наприклад, 1 – в 0 або 0 – в 1.

Крім найпростіших логічних операцій, можуть бути використані і більш складні. Найважливішими з них є:

Логічна функція АБО-НІ – заперечення диз’юнкції (операція Пірса), яка позначається таким чином:

$$F = \overline{x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \dots \vee x_n}. \quad (8.6)$$

Функція АБО-НІ створює складне висловлювання з простих відповідно до правила: складне висловлювання є істинним лише в тому випадку, коли є хибними всі прості висловлювання, які утворюють його, і хибним, якщо є істинним хоча б одне з простих висловлювань.

Логічна функція І-НІ – заперечення кон’юнкції (операція Шифера), що позначається таким чином:

$$F = \overline{x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \dots \wedge x_n}. \quad (8.7)$$

Функція І-НІ створює складне висловлювання з простих згідно з правилом: складне висловлювання є істинним, якщо є хибним хоча б одне з простих висловлювань, і хибним, якщо всі прості висловлювання є істинними.

Логічна функція ЗАБОРОНА, яка символічно записується так:

$$F = x_1 \wedge x_2. \quad (8.8)$$

Функція ЗАБОРОНА являє собою складне висловлювання, яке є істинним тільки тоді, коли перше з двох висловлювань є істинним, а друге – хибним.

Правила виконання логічних операцій над двійковими змінними величинами для випадку двох величин наведені в табл. 8.3.

Таблиця 8.3 – Результати логічних операцій

x_1	x_2	F					
		АБО	I	НІ (від x_1)	АБО-НІ	I-НІ	ЗАБОРОНА
0	0	0	0	1	1	1	0
0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	1	1
1	1	1	1	0	0	0	0

Реалізація розглянутих логічних операцій виконується за допомогою логічних елементів, умовне позначення яких наведено на рис. 8.1.

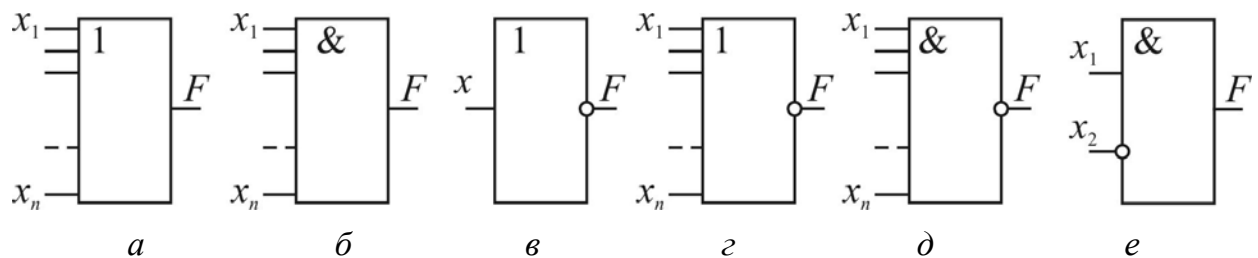


Рисунок 8.1 – Умовні позначення основних логічних елементів, що реалізують логічні функції: *a* – АБО; *б* – I; *в* – НІ; *г* – АБО-НІ; *д* – I-НІ; *е* – ЗАБОРОНА

Залежно від виду сигналів, що використовуються, логічні елементи діляться на *потенційні* та *імпульсні*. В потенційних елементах логічні “0” і “1” подаються двома різними рівнями електричного сигналу, а в імпульсних – наявністю або відсутністю імпульсів. Найбільше поширення отримали потенційні логічні елементи.

8.2.2. Найпростіші схеми логічних елементів

Логічні елементи I та АБО можуть бути побудовані на основі діодних ключів. Схема, наведена на рис. 8.2, *a*, реалізує логічну функцію АБО, а кодування її сигналів показано на рис. 8.2, *б*. При надходженні сигналу “1” ($u_{\text{вх}} = +E$) хоча б на один вхід, наприклад $x_1 = 1$, відкривається відповідний діод *VD1* і вихід з’єднується зі входом, тобто $F = 1$.

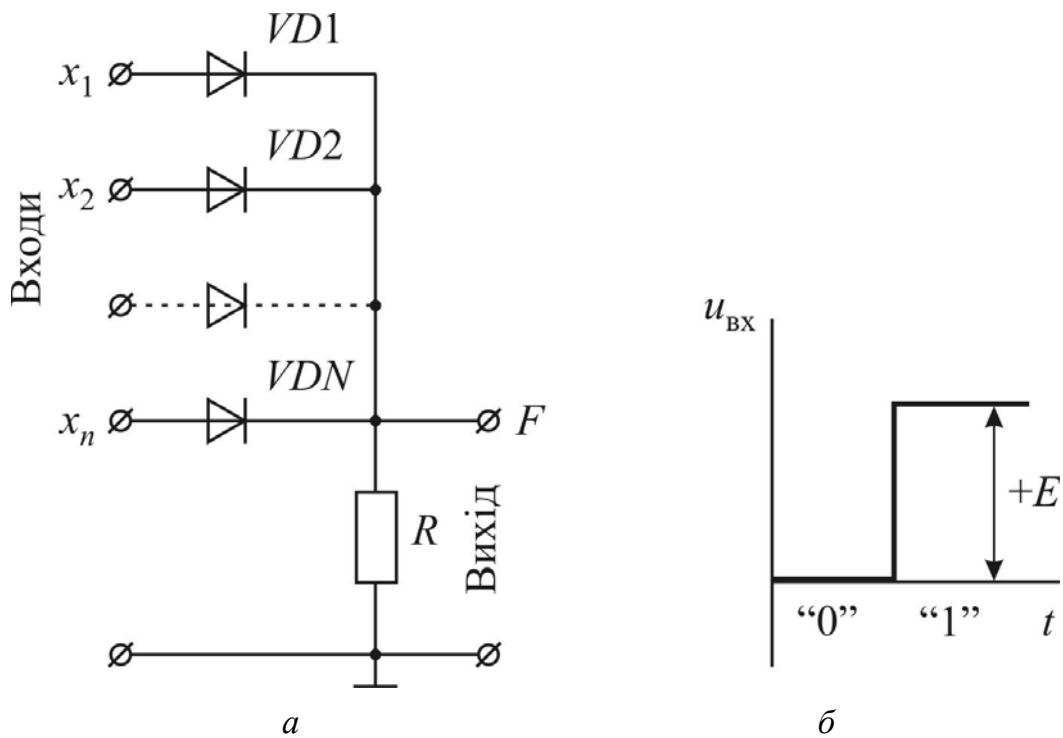


Рисунок 8.2 – Схема (а) і кодування сигналу (б) логічного елемента АБО

Схема, зображена на рис. 8,3, а, реалізує логічну функцію І, а кодування її сигналу показано на рис. 8,3, б. При сигналі “0” хоча б на одному вході діоди є відкритими, крізь них і резистор R протікають струми, створені джерелом E_1 . Оскільки прямий опір діодів значно менший за опір резистора R , то напруга на виході виявляється близькою до нуля.

Якщо напруга $u_{\text{вх}} = E$ на одному з входів $x_1 \dots x_n$ відповідає логічній “1” ($E > E_1$), то відповідний діод закривається, проте інші діоди є відкритими і на виході, як і раніше, логічний “0”. Сигнал “1” з’явиться на виході тільки тоді, коли на всі входи буде подано сигнал “1”. Тоді всі діоди стають закритими, струм крізь резистор буде нульовим і $u_{\text{вих}} = E_1$ ($F = 1$).

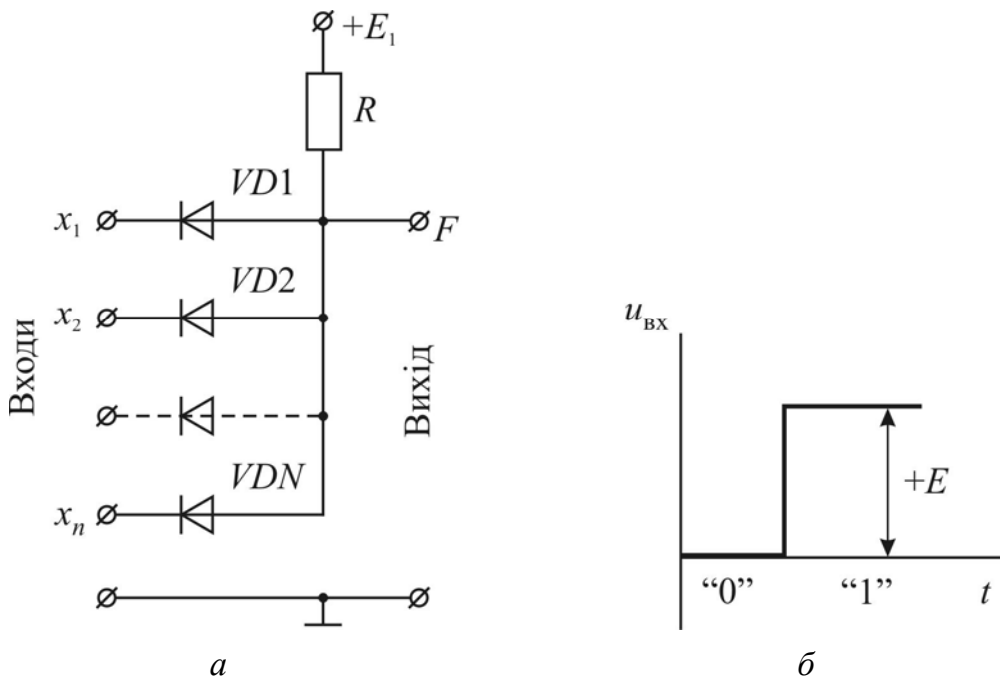


Рисунок 8.3 – Схема (а) і кодування сигналу (б) логічного елемента І

Логічна функція НІ реалізується за допомогою схеми інвертора, коли транзистор VT працює в ключовому режимі (рис. 8.4). За відсутності сигналу на вході ($x = 0$) транзистор запертий і знаходиться в режимі відсічки. Напряга на виході при цьому відповідає логічній “1” ($u_{\text{вих}} \approx E$). При подачі на базу транзистора позитивного сигналу він відпирається, і на виході логічного елемента встановлюється низька напряга, яка відповідає логічному “0”. Транзистор при цьому знаходиться в режимі насичення.

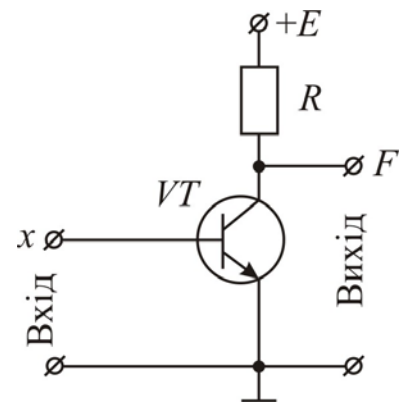


Рисунок 8.4 – Схема логічного елемента НІ

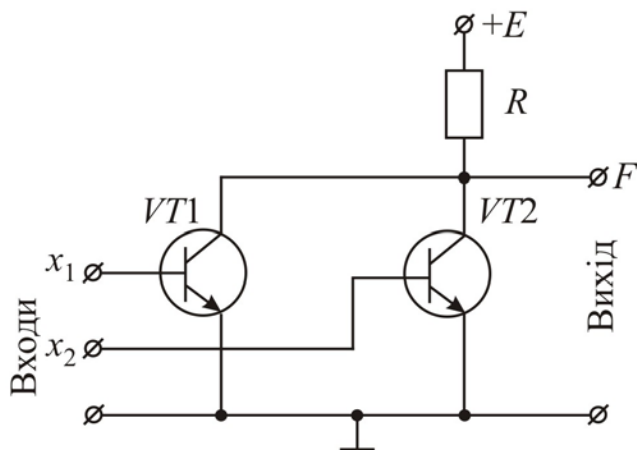


Рисунок 8.5 – Схема логічного елемента АБО-НІ

Логічний елемент АБО-НІ реалізується при паралельному з’єднанні транзисторів згідно з кількістю входів. На рис. 8.5 зображено схему логічного елемента АБО-НІ з двома входами. За відсутності сигналів на входах схеми (логічний “0”) транзистори заперті, і на виході напряга $u_{\text{вих}} = E$ (логічна “1”). Якщо хоча б на один вхід подати

позитивний сигнал (логічна “1”), то відповідний транзистор відпирається, і на виході схеми потенціал знижується практично до нуля (логічний “0”).

Схема, зображена на рис. 8.6, реалізує логічну функцію І-НІ. Тільки при одночасній подачі на бази послідовно з’єднаних транзисторів (у даному випадку їх два: $VT1$ і $VT2$) позитивних вхідних сигналів (логічна “1”) всі транзистори відпираються і замикають вихід F на нуль. За відсутності сигналу хоча б на одному вході (логічний “0”) відповідний транзистор запертий, струм через резистор R не проходить і на виході схеми напруга знижується до логічного “0”.

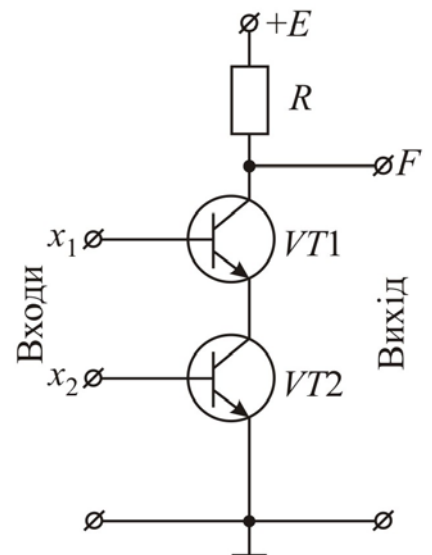


Рисунок 8.6 – Схема логічного елемента І-НІ

Логічний елемент ЗАБОРОНА можна реалізувати за допомогою діодного VD і транзисторних VT ключів (рис. 8.7). Поки не подано сигнал на базу транзистора VT , резистор R не шунтований, і через діод VD передача сигналу відбувається з входу x_1 на вихід F . Подача сигналу на вхід x_2 обнуляє будь-який сигнал з входу x_1 .

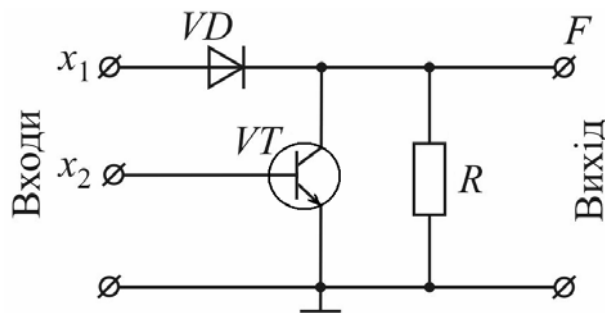


Рисунок 8.7 – Схема логічного елемента ЗАБОРОНА

8.3. Тригери

8.3.1. Загальні відомості про тригери

Тригером називають пристрій, який має два стани стійкої рівноваги і властивість стрибком переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу. *Trigger* (англ.) – спусковий крючок. Кожний з цих станів

може зберігатися будь-який тривалий час.

Перепади вихідної напруги або стійкі стани тригера можна взяти за логічні “0” і “1”. В такому випадку тригер можна використовувати як запам’ятовувальний пристрій, який зберігає один розряд числа, поданого в двійковому коді.

Тригери поділяються на *статичні* і *динамічні*. Статичними називають тригери, у яких кожний стан характеризується незмінним рівнем (потенціалом) вихідної напруги. Статичні тригери називають також потенціальними. В динамічних тригерах один зі станів (звичайно, одиничний) характеризується наявністю на виході безперервної послідовності імпульсів визначеної частоти, а інший (нульовий) – відсутністю імпульсів.

Найбільшого поширення набули статичні тригери, що реалізуються на двокаскадному підсилювачі з позитивним зворотним зв’язком гальванічного типу. Кожен підсилювач створює одне плече тригера. Якщо обидва плеча мають симетрію за схемотехнікою і за параметрами елементів, що входять до них, то такий тригер називають *симетричним*. Якщо симетрія відсутня, то тригер називають *несиметричним*.

8.3.2. Структура і класифікація тригерів

Для перетворення вхідної інформації в комбінацію керуючих символів у тригері є пристрій керування, який дозволяє значно розширити його функціональні можливості.

Структурна схема тригера з пристроєм керування подана на рис. 8.8.

Вхідні сигнали A , B , V , C , S , R залежно від ролі, яку виконують, поділяються на інформаційні (логічні), підготовчі (що дозволяють) і виконуючі

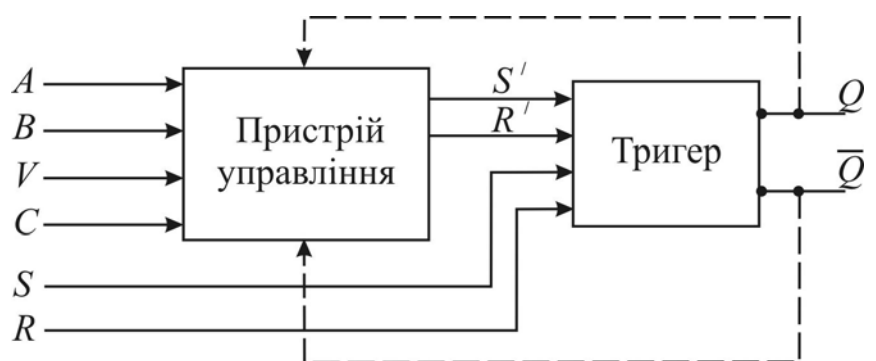


Рисунок 8.8 – Структурна схема тригерної системи: A , B – інформаційні (логічні) входи; V – підготовчий вхід; C – тактовий (синхронізуючий) вхід; S' і R' – внутрішні входи; S і R – зовнішні входи; Q і \bar{Q} – зовнішні виходи

(командні). Входи тригера, на які подаються ці сигнали, відповідно мають назви: *інформаційні* (логічні), *переднастановні* (підготовчі) і *тактові* (синхронізуючі). Переднастановні й тактові входи можуть бути відсутні, а інформаційні входи є у кожного тригера.

На схемах входи тригера позначають згідно з табл. 8.4.

Таблиця 8.4. – Функціональне призначення входів тригера

Умовне позначення	Призначення
	<u>Інформаційні входи</u>
<i>S</i>	Вхід для роздільної установки тригера в стан “1”
<i>R</i>	Вхід для роздільної установки тригера в стан “0”
<i>J</i>	Вхід для установки в стан “1” <i>JK</i> -тригера
<i>K</i>	Вхід для установки в стан “0” <i>JK</i> -тригера
<i>T</i>	Лічильний вхід тригера
<i>D</i>	Вхід для установки тригера в стан “0” або “1”
	<u>Керуючі входи</u>
<i>V</i>	Підготовчий вхід для дозволу прийому інформації
	Підготовчий вхід для здійснення прийому інформації
<i>C</i>	Вхід синхронізації

За назвами інформаційних входів відрізняють: *RS*-тригер; *D*-тригер; *JK*-тригер тощо. Залежно від схеми керуючого пристрою тригери діляться на *синхронні* та *асинхронні*.

Асинхронні тригери мають тільки інформаційні (логічні) входи, і в них запис інформації здійснюється в момент її надходження. У синхронних тригерах запис інформації, що надходить на інформаційні входи, здійснюється тільки при надходженні на синхронізуючий (тактовий) вхід додаткового командного імпульсу. Синхронні тригери можуть мати й асинхронні входи, які звичайно служать для установки тригера в належний початковий стан.

На схемах тригер зображують прямокутником, поділенням на дві частини (рис. 8.9). В правій частині – основному полі – розміщується літера *T*, а в лівій частині – додатковому полі – біля кожного входу пишеться літера (мітка), яка позначає його функціональне призначення (табл. 8.4).

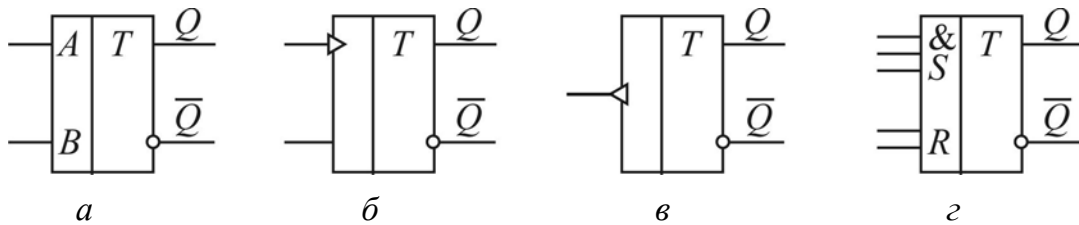


Рисунок 8.9 – Умовні позначення тригерів

Статичні прямі входи і виходи зображують прямими лініями без будь-яких індикаторів, а інверсні входи і виходи мають індикатор у вигляді маленького круга на боці прямокутника (рис. 8.9).

Динамічні входи позначають невеликими трикутниками. У прямих динамічних входів, що викликають “перекидання” тригера при зміні рівня сигналу від “0” до “1”, “шип” трикутника спрямований всередину поля (рис. 8.9, б), а в інверсних, які викликають “перекидання” тригера при зміні рівня сигналу від “1” до “0”, – назовні (рис. 8.9, в).

У тригера може бути декілька інформаційних входів, пов’язаних в групи операціями І або АБО. Група входів, пов’язана операцією І, в додатковому полі позначається символом логічного помноження & (рис. 8.9, з).

8.3.3. RS-тригери на логічних елементах

RS-тригери на логічних елементах не містять навісних деталей і мають кращі параметри порівняно з транзисторними тригерами на дискретних елементах. Вони виконуються на логічних елементах АБО-НІ або І-НІ.

Асинхронний RS-тригер на двох логічних елементах АБО-НІ $E1$ і $E2$ (рис. 8.10) містить два інформаційних входи R і S , на яких можливі чотири комбінації логічних сигналів, що подані в табл. 8.5. В цій таблиці прийнято такі позначення: t^n і t^{n+1} – моменти часу до і після спрацювання тригера; S^n і R^n – сигнали на інформаційних входах в момент t^n , Q^n і

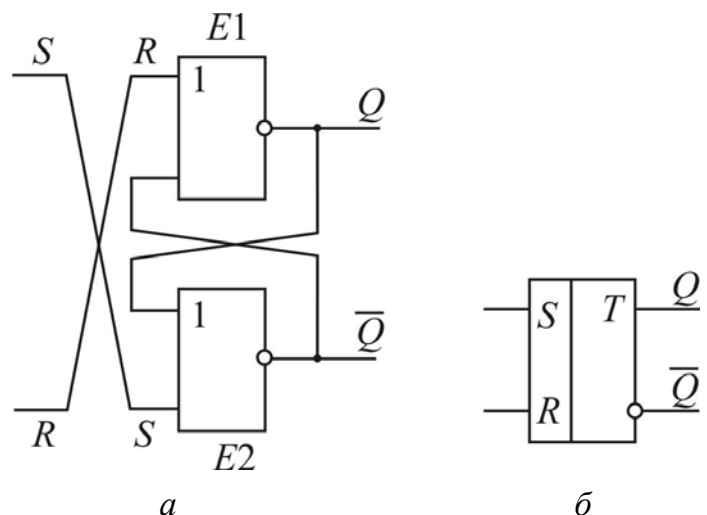


Рисунок 8.10 – Схема (а) і умовне позначення (б) асинхронного RS-тригера на логічних елементах АБО-НІ

Q^{n+1} – сигнали на прямому виході в момент часу t^n і t^{n+1} .

Перша комбінація вхідних сигналів $S^n = R^n = 0$ не призводить до зміни стану тригера. Дійсно, якщо на момент часу t^n стан тригера характеризується сигналами $Q^n = 1, \bar{Q}^n = 0$, то на входах елемента $E1$ діятимуть нульові сигнали, а на його виході Q буде логічна “1” ($Q^{n+1} = 1$). На верхньому вході елемента $E2$ буде логічна

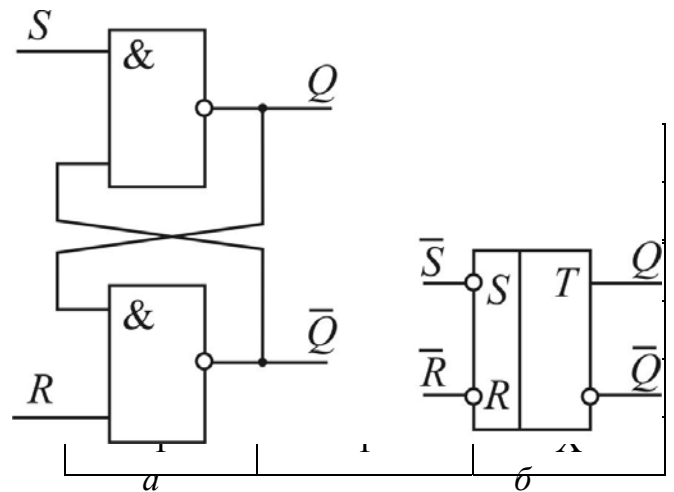


Рисунок 8.11 – Схема (а) і умовне позначення (б) асинхронного RS-тригера на логічних елементах І-НІ

“1”, на нижньому вході S – логічний “0”. В результаті чого на його виході \bar{Q} буде логічний “0” ($\bar{Q}^{n+1} = 0$). При $S^n = R^n = 0$ може зберігатися й інший рівно вірогідний стан тригера ($Q^n = 0, \bar{Q}^n = 1$). Комбінацію вхідних сигналів $S^n = R^n = 0$ називають *нейтральною*, або *режимом пам’яті*.

Комбінація вхідних сигналів $S^n = 1, R^n = 0$ переводить тригер в одиничний стан: $Q^{n+1} = 1, \bar{Q}^{n+1} = 0$, якщо він перед цим знаходився в нульовому стані ($Q^n = 0, \bar{Q}^n = 1$). Якщо ж тригер у момент часу t^n знаходився в одиничному стані ($Q^n = 1, \bar{Q}^n = 0$), то дана комбінація підтверджує цей стан ($Q^{n+1} = 1, \bar{Q}^{n+1} = 0$).

Комбінація вхідних сигналів $S^n = 0, R^n = 1$ забезпечує нульовий стан тригера ($Q^{n+1} = 0, \bar{Q}^{n+1} = 1$) незалежно від того, який він був на виході на момент часу t^n .

При комбінації вхідних сигналів $S^n = R^n = 1$ на обох виходах тригера з’являться логічні “0” ($Q^{n+1} = 0, \bar{Q}^{n+1} = 0$). Якщо вслід за цим встановити нейтральну комбінацію вхідних сигналів ($S^n = R^n = 0$), то тригер з рівною вірогідністю набуває одиничного або нульового стану. Тому комбінацію вхідних сигналів $S^n = R^n = 1$ для даного тригера називають *забороненою* (в табл. 8.5 позначено літерою X).

Асинхронний RS -тригер можна виконувати на двох логічних елементах І-НІ (рис. 8.11).

Перемикання даного тригера здійснюється сигналами логічного “0”. Стани тригера залежно від комбінації вхідних сигналів подано в табл.8.6, звідки видно, що комбінація вхідних сигналів $\bar{S}^n = \bar{R}^n = 1$ є нейтральною, а комбінація $\bar{S}^n = \bar{R}^n = 0$ – забороненою.

Асинхронні RS -тригери використовують як комірки пам’яті в оперативних запам’ятовувальних пристроях (ОЗП) статичного типу.

Асинхронні RS -тригери легко перетворити в синхронні, якщо підключити до їх ввідів пристрій керування на логічних елементах. На рис. 8.12 зображено структурну схему синхронного RS -тригера зі статичним керуванням на логічних елементах І-НІ. Сам тригер виконаний на елементах $DD3$ і $DD4$, а елементи $DD1$ і $DD2$ утворюють пристрій керування. Крім інформаційних входів S та R , пристрій керування має синхронізуючий, або тактовий, вхід C , який зв’язаний з входами S і R операціями І-НІ. Тому інформація з входів S і R передається на сам тригер тільки при $C = 1$.

Таблиця 8.6 – Стани RS -тригера на елементах І-НІ

t^n		t^{n+1}
\bar{S}^n	\bar{R}^n	Q^{n+1}
1	1	Q^n
0	1	1
1	0	0
0	0	X

Сам тригер керується внутрішніми сигналами q_1 та q_2 . Перемикання здійснюється нульовими рівнями цих сигналів таким же чином, як і в тригері, показаному на рис. 8.11.

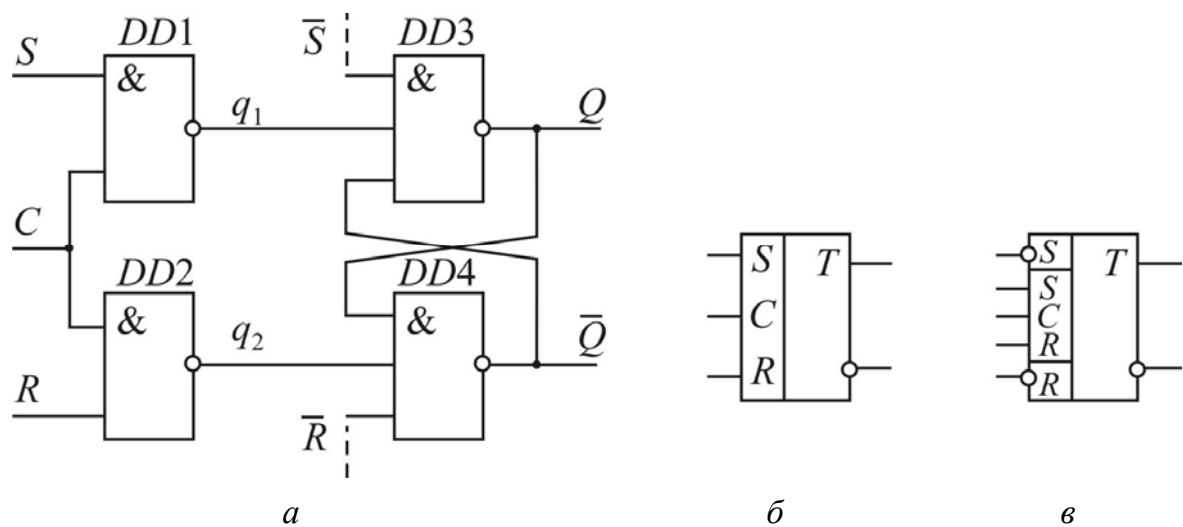


Рисунок 8.12 – Схема (а) і умовне позначення (б, в) синхронного RS -тригера на логічних елементах І-НІ

Оскільки логічні елементи $DD1$ і $DD2$ здійснюють інверсію входних сигналів S і R , то нульовим рівням сигналів q_1 та q_2 повинні відповідати одиничні рівні зовнішніх інформаційних сигналів S і R .

Розглянемо роботу синхронного RS -тригера, прийнявши $Q^n = 0$, $S^n = 1$, $R^n = 0$. Якщо $C = 0$, то логічні елементи $DD1$ і $DD2$ закриті і $q_1 = q_2 = 1$. Така комбінація внутрішніх сигналів q_1 та q_2 є нейтральною для самого тригера, і він зберігає свій стан $Q^n = 0$. З надходженням синхронізуючого імпульсу ($C = 1$) на входах логічного елемента $DD1$ буде діяти логічна “1”, внаслідок чого $q_1 = 0$ та $Q^{n+1} = 1$. Оскільки $q_2 = 1$ (тому що $R^n = 0$ та $C = 1$), то на входи логічного елемента $DD4$ надійдуть сигнали $q_2 = 1$ й $Q^{n+1} = 1$ та утворять на його виході сигнал $Q^{n+1} = 0$. Отже, тригер перейшов в одиничний стан, який зберігатиметься й після призупинення дії синхронізуючого імпульсу ($C = 0$), бо для самого тригера знову виникне нейтральна комбінація $q_1 = q_2 = 1$.

Зворотнє перекидання тригера у стан $Q = 0$ виникне в момент дії наступного синхронізуючого імпульсу за наявності на інформаційних входах сигналів $S^n = 0$ та $R^n = 1$. Комбінація входних сигналів $S^n = R^n = 1$ для розглянутого тригера є недопустимою, оскільки при $C = 1$ виникає недопустима комбінація $q_1 = q_2 = 0$, що створює невизначений стан на виходах тригера

$$i \quad Q^{n+1} = \bar{Q}^{n+1} = 1.$$

Стани розглянутого синхронного *RS*-тригера з двома інформаційними та одним синхронізуючим входами наведено у табл. 8.7.

Якщо на додаткові входи елементів *DD3* і *DD4* (на рис. 8.12 вони показані пунктиром) подавати сигнали \bar{S} і \bar{R} , то можна здійснювати асинхронну установку тригера у стани “0” і “1”, минаючи інформаційні та синхронізуючий входи. При цьому функціонування тригера буде визначатися станами, які відповідають станам тригера з інверсним керуванням.

Умовне позначення синхронного тригера з додатковими входами, що дозволяє здійснювати асинхронне керування його роботою, показано на рис. 8.12, в.

При синхронній роботі тригера на його додаткових входах має підтримуватись нейтральна комбінація $\bar{S} = \bar{R} = 1$.

Синхронний *RS*-тригер можна побудувати і на логічних елементах АБО-НІ (рис. 8.13). Керування роботою такого тригера здійснюється сигналами нульового рівня $S^n = 0$ або $R^n = 0$ при $\bar{C} = 0$ згідно з табл. 8.8.

Забороненою комбінацією входних сигналів є комбінація $S^n = R^n = 0$ при $C^n = 0$. Дійсно, в цьому випадку на обох входах логічних елементів *DD1* і *DD2* діє логічна “1” ($S^n = 1$, $C^n = 1$, $R^n = 1$) та $q_1 = q_2 = 0$. При цьому на обох виходах логічних елементів *DD3* і *DD4* буде логічна “1”.

Таблиця 8.7 – Стани синхронного *RS*-тригера з прямим керуванням

t^n			t^{n+1}
C	S^n	R^n	Q^{n+1}
0	0	0	Q^n
0	0	1	Q^n
0	1	0	Q^n
0	1	1	Q^n
1	0	0	Q^n
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	X

Таблиця 8.8 – Стани $\bar{R}\bar{S}$ -тригера з інверсним керуванням

t^n		t^{n+1}
S^n	R^n	Q^{n+1}
0	0	X
0	1	1
1	0	0
1	1	Q^n

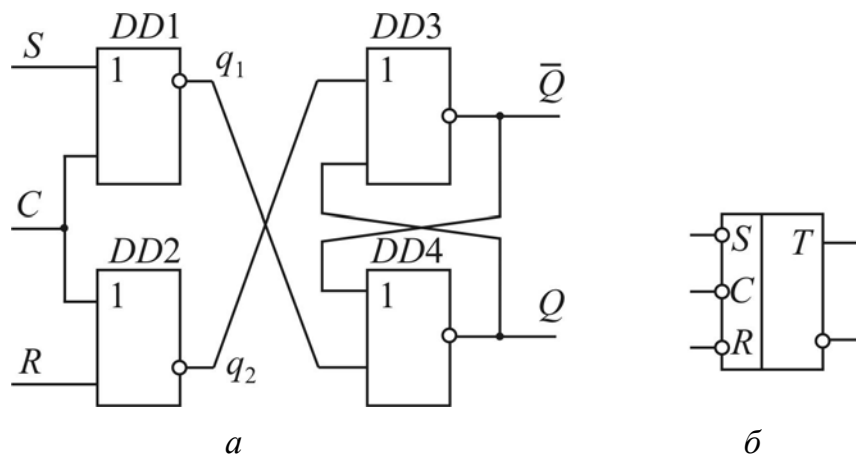


Рисунок 8.13 – Схема (а) і умовне позначення (б) синхронного RS -тригера на логічних елементах АБО-НІ

У синхронних RS -тригерах зміна станів за наявності дозволяючого синхронізуючого імпульсу відбувається таким же чином, як і в асинхронних. Тому зміна сигналів на інформаційних входах повинна відбуватися тільки в паузах між синхронізуючими імпульсами для запобігання порушення його роботи.

Недоліком RS -тригерів є поява невизначених станів при утворенні заборонених комбінацій вхідних сигналів.

8.3.4. D -тригери на логічних елементах

D -тригери (від англ. *delay* – затримка) мають один інформаційний вхід D та можуть бути асинхронними або синхронними. Найширшого застосування набули синхронні D -тригери. Найпростіший синхронний D -тригер виконується на логічних елементах $DD3$ і $DD4$ типу І-НІ за схемою $\bar{R}\bar{S}$ -тригера і є коміркою пам'яті (рис. 8.14).

Логічні елементи $DD1$ і $DD2$ утворюють схему керування. За відсутності синхронізуючого імпульсу ($C=0$) логічні елементи $DD1$ і $DD2$ закриті, $q_1 = q_2 = 1$, а на виході тригера підтримується стійкий стан $Q^n = 1$ або $Q^n = 0$. При цьому інформація на вході D не змінює стан логічних елементів $DD1$ та $DD2$ і тому не впливає на стан комірки пам'яті.

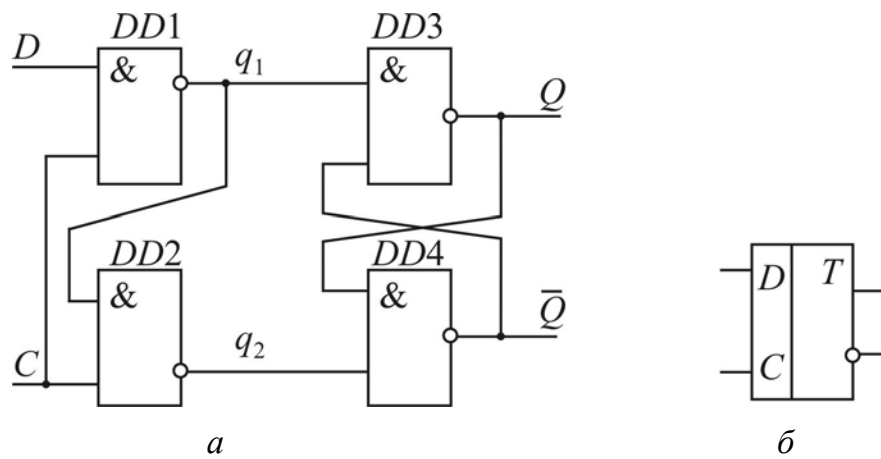


Рисунок 8.14 – Схема (а) і умовне позначення (б) D -тригера на логічних елементах І-НІ

Якщо з приходом синхронізуючого імпульсу $C = 1$ сигнал на інформаційному вході D відсутній, тобто $D^n = 0$, то логічний елемент $DD1$ закритий і $q_1 = 1$. На обох входах елемента $DD2$ буде діяти логічна “1” ($C = 1$, $q_1 = 1$), він відкриється ($q_2 = 0$), що призведе до запирання логічного елемента $DD4$ та відпирання $DD3$. В результаті на виході комірки пам’яті встановиться нульовий стан ($Q^{n+1} = 0$, $\bar{Q}^{n+1} = 1$). Якщо ж внаслідок дії синхронізуючого імпульсу $C = 1$ на вхід D надходить логічна “1” ($D = 1$), то відкривається логічний елемент $DD1$, на його виході утворюється логічний “0” ($q_1 = 0$), а логічний елемент $DD2$ буде закритий і $q_2 = 1$.

Під дією проміжного сигналу $q_1 = 0$ логічний елемент $DD3$ запирається ($Q^{n+1} = 1$), а елемент $DD4$ відпирається, оскільки на входах діють сигнали $q_2 = 1$ та $Q^{n+1} = 1$.

Таким чином, сигнал на виході Q D -тригера має таке ж саме значення, яке є на інформаційному вході D під час дії синхронізуючого імпульсу. Це значення зберігається (запам’ятовується) в тригері до надходження наступного синхронізуючого імпульсу, оскільки в паузах між синхронізуючими імпульсами на входах комірки пам’яті діє нейтральна комбінація сигналів $q_1 = q_2 = 1$. У D -тригері здійснюється затримка на один такт того сигналу, який надходить на інформаційний вхід D . Тому D -тригер називається тригером затримки.

8.3.5. JK-тригери на логічних елементах

JK-тригер функціонує таким же чином, як і RS-тригер, з тією лише різницею, що він не має забороненої комбінації вхідних сигналів. Вхід J виконує роль входу S , а вхід K – роль входу R . При вхідній комбінації $J^n = K^n = 1$, що еквівалентна забороненій комбінації $S^n = R^n = 1$ для RS-тригера, стан JK-тригера змінюється на протилежний.

Структурну схему JK-тригера зображено на рис. 8.15.

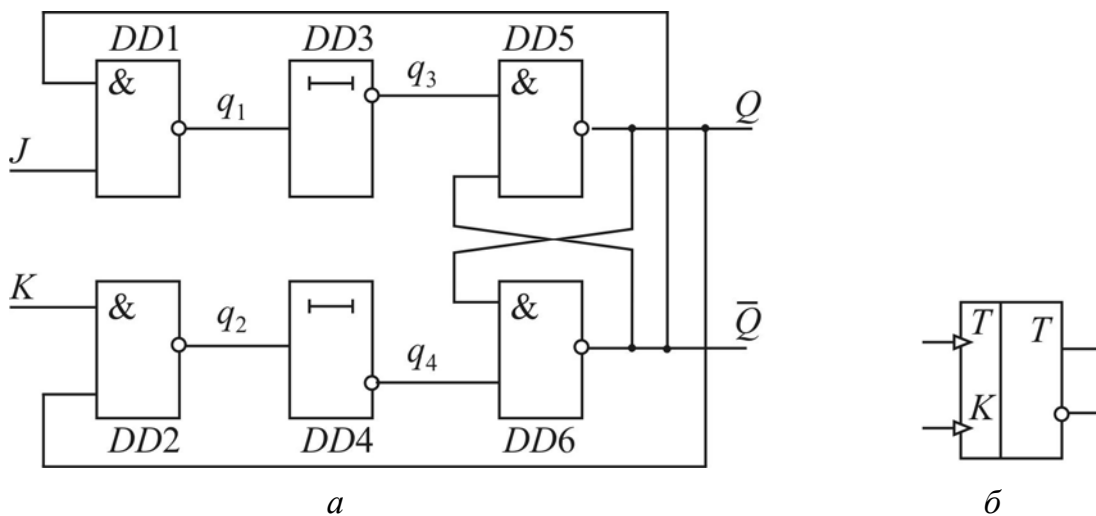


Рисунок 8.15 – Схема (а) і умовне позначення (б) асинхронного JK-тригера

На логічних елементах $DD5$ і $DD6$ виконана комірка пам'яті, що являє собою RS-тригер. Елементи $DD1$ і $DD2$ утворюють схему керування, а елементи $DD3$ і $DD4$ здійснюють затримку тих сигналів, які надходять на входи комірки пам'яті. Особливістю JK-тригера є наявність кіл зворотного зв'язку з виходів на входи, тому його стан залежить не тільки від вхідних сигналів J і K , але і від сигналів на виходах Q і \bar{Q} . Якщо $J^n = K^n = 0$, то незалежно від сигналів Q^n і \bar{Q}^n на виходах логічних елементів $DD1$ і $DD2$ буде нейтральна комбінація $q_1 = q_2 = 1$, яка зберігає інформацію в комірці пам'яті. При $J^n = 1$ і $K^n = 0$ буде залишатися проміжний сигнал $q_2 = 1$, а значення сигналу q_1 залежить від стану комірки пам'яті. Якщо $Q^n = 1$ і $\bar{Q}^n = 0$, то на вході елемента $DD1$ будуть сигнали $J^n = 1$, $\bar{Q}^n = 0$ і $q_1 = q_3 = 1$. Стан комірки пам'яті не зміниться. Якщо ж

$Q^n = 0$, а $\bar{Q}^n = 1$, то $q_1 = q_3 = 0$, на виході елемента $DD5$ утворюється сигнал $Q^{n+1} = 1$, а на виході логічного елемента $DD6$ – сигнал $\bar{Q}^{n+1} = 0$. Аналогічним чином при $K^n = 1$ і $J^n = 0$ в комірку пам'яті записується логічний “0”, якщо вона знаходилась у стані логічної “1”, або підтверджується її нульовий стан.

Розглянемо тепер комбінацію $J^n = K^n = 1$ і $Q^n = 1$, а $\bar{Q}^n = 0$. Це призведе до встановлення $q_2 = q_4 = 0$, в результаті чого стан елемента $DD6$ зміниться на значення $\bar{Q}^{n+1} = 1$, а стан елемента $DD5$ – на значення $Q^{n+1} = 0$. При $J^n = K^n = 1$ і $Q^n = 0$, $\bar{Q}^n = 1$ буде $q_1 = q_3 = 0$, внаслідок чого на виході логічного елемента $DD5$ виникає $Q^{n+1} = 1$, а на виході елемента $DD6$ – сигнал $\bar{Q}^{n+1} = 0$. Таким чином, незалежно від того, в якому стані знаходився JK -тригер, при комбінації вхідних сигналів $J^n = K^n = 1$ здійснюється його перекидання – зміна стану на протилежний.

Елементи затримки $DD3$ і $DD4$ призначені для затримки часу подачі сигналів зворотного зв'язку з виходів тригера на входи логічних елементів $DD1$ і $DD2$. Ці сигнали Q^{n+1} і \bar{Q}^{n+1} надходять на елементи $DD1$ і $DD2$ після закінчення вхідних сигналів J^n і K^n , тобто коли $J^{n+1} = K^{n+1} = 0$. Відсутність елементів затримки могло б спричинити багаторазове спрацювання тригера. Сигнали J і K повинні бути короткочасними, що досягається керуванням роботою логічних елементів $DD1$ і $DD2$ по фронту або зрізу імпульсів. Таким чином, у JK -тригері використовується динамічне керування записом інформації, що підкреслюється в його умовному зображенні (рис. 8.15, б). Стани JK -тригера при різних значеннях вхідних сигналів наведено в табл. 8.9.

Таблиця 8.9 – Стани JK -тригера

t^n		t^{n+1}
J^n	K^n	Q^{n+1}
0	0	Q^n
1	0	1
0	1	0
1	1	\bar{Q}^n

8.3.6. T -тригери на логічних елементах

T -тригер (від англ. *toggle* – кувиркатися) являє собою тригер з рахунковим входом (або рахунковим запуском). Він змінює

свій стан на протилежний при подачі на вхід T кожного запускаючого імпульсу.

T -тригери легко отримати з RS -, JK - або D -тригерів. На рис. 8.16, a показано перетворення двоступеневого RS -тригера в T -тригер.

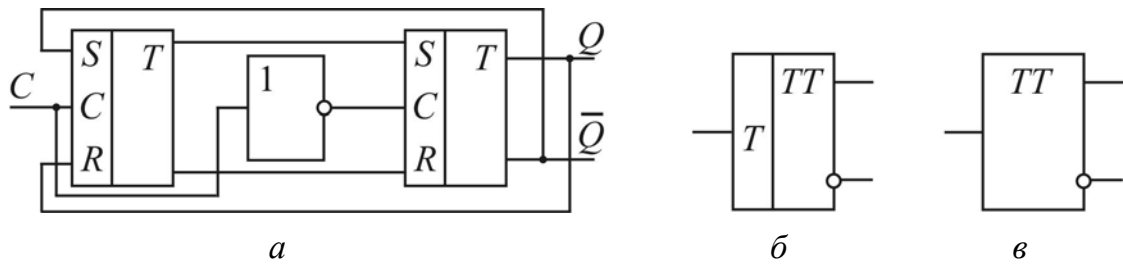


Рисунок 8.16 – Схема (a) і умовне позначення ($b, в$) T -тригера, виконаного на синхронних RS -тригерах

У тих тактах, коли $S^n = \bar{Q}^n = 1$ (при цьому $R^n = Q^n = 0$), синхронізуючий імпульс $C = 1$ встановлює перший тригер в одиничний стан. Цей стан переписується у другий тригер після припинення дії синхронізуючого імпульсу. На вході тригера утворюються сигнали $Q^{n+1} = 1, \bar{Q}^{n+1} = 0$. При подачі наступного синхронізуючого імпульсу перший тригер сигналом $R^{n+1} = Q^{n+1} = 1$ встановлюється у нульовий стан, який записується у другий тригер після закінчення дії синхронізуючого імпульсу: $Q^{n+2} = 0, \bar{Q}^{n+2} = 1$.

На рис. 8.17 показано перетворення JK -тригера в асинхронний (a) і синхронний (b) T -тригери, а також перетворення D -тригера з динамічним або двоступеневим керуванням записом у T -тригер.

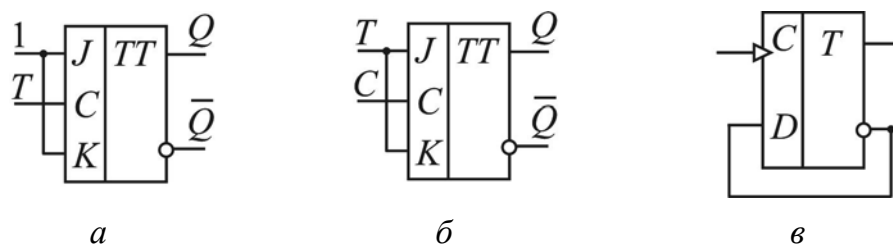


Рисунок 8.17 – Умовні позначення T -тригерів, отриманих з JK -тригерів ($a, б$) і D -тригера з динамічним керуванням

Асинхронні та синхронні T -тригери застосовують у лічильниках і дільниках частоти повторення імпульсів.

8.4. Регістри

8.4.1. Загальні відомості про регістри

Регістри – це пристрої, призначені для прийому, зберігання і передачі інформації, що подана у вигляді двійкового коду (слова). Кожному розряду двійкового коду відповідає певний розряд (комірка пам'яті) регістра. Регістр являє собою сукупність певним чином з'єднаних тригерних комірок з пристроєм керування вхідними і вихідними сигналами. Число тригерів, які використовуються в регістрі, визначає його розрядність.

За способом введення/виведення (прийому/передачі) інформації регістри поділяються на паралельні, послідовні та паралельно-послідовні.

За характером подання інформації, що вводиться і виводиться, регістри поділяють на однофазні і парафазні. В однофазних регістрах інформація вводиться в прямому або зворотному (інверсному) кодах, а в парафазному – одночасно в прямому і зворотному. Виведення інформації з регістрів обох типів може здійснюватись як у прямому, так і у зворотному кодах.

За числом тактів керування при запису регістри бувають однотоктні, двотоктні і багатотоктні. Число тактів визначається типом тригерів, які використовуються в регістрі.

За видом виконуваних операцій над словами розрізняють регістри для прийому, передачі і зміщення інформації.

8.4.2. Паралельні регістри

У *паралельних регістрах* запис інформації (слова) здійснюється одночасно у всі розряди регістра, тобто паралельним кодом. Записана інформація може багаторазово зчитуватися і зберігатися в регістрі будь-який час. Тому такі регістри називають регістрами пам'яті. На рис. 8.18 зображена схема чотирирозрядного паралельного однофазного регістра на *RS*-тригерах.

Керування прийомом (записом) і видачею (зчитуванням) інформації здійснюється відповідно елементами $E1$, $E2$, $E3$. Входи a_1 , a_2 , a_3 та a_4 відповідають розрядам числа (слова), що записується.

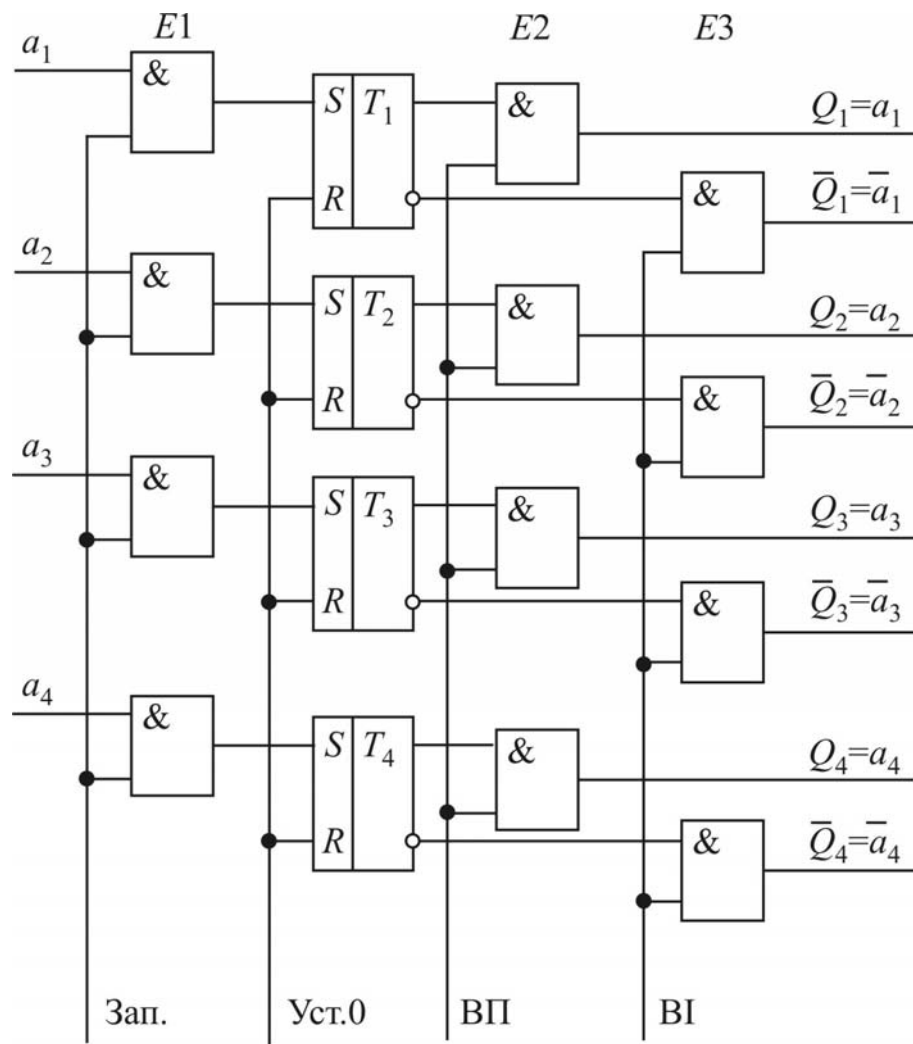


Рисунок 8.18 – Схема однофазного паралельного регістра

Перед записом усі тригери регістра встановлюють у нульовий стан подачею імпульсу “Уст.0” на входи R тригерів. Запис інформації a_1, \dots, a_4 в регістр здійснюється при надходженні імпульсу запису на шину “Зап.” При цьому на виходах логічних елементів $E1$ утворюються сигнали установки тригерів у стан “1” тільки в тих розрядах, у яких $a_i = 1$ ($i = 1, \dots, 4$). Решта тригерів залишаються у нульовому стані. Записаний у регістр код видається в прямому (ВП) (через елементи $E2$) або інверсному (ВІ) (через елементи $E3$) вигляді при надходженні на входи логічних елементів $E2$ або $E3$ відповідно імпульсів “ВП” або “ВІ”. Інформація про записаний код зберігається в регістрі до надходження наступного імпульсу “Уст.0”.

Недоліком паралельного регістра є знижена швидкодія через потребу у часі для обнулення регістра перед записом нової інформації.

Для збільшення швидкодії застосовують парафазний регістр (рис. 8.19).

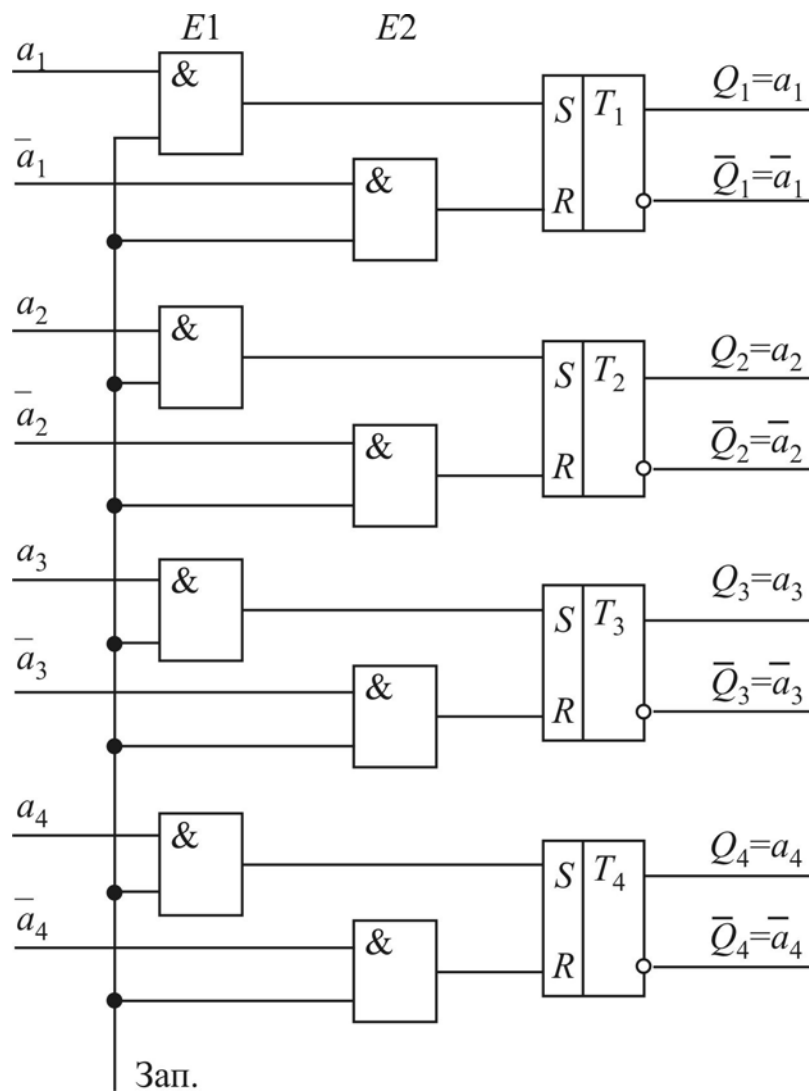


Рисунок 8.19 – Схема парафазного паралельного регістра

Записуване слово подається у прямому ($a_1a_2a_3a_4$) та інверсному ($\bar{a}_1\bar{a}_2\bar{a}_3\bar{a}_4$) кодах на входи логічних елементів $E1$ і $E2$ відповідно. Запис у регістр здійснюється при надходженні сигналів запису на шину “Зап.” При цьому на входи S -тригерів надходять прямі, а на входи R – інверсні значення розрядів записуваного слова, які встановлюють тригери у потрібний стан незалежно від вхідних станів. Видача інформації здійснюється таким же чином, як і в однофазному регістрі.

8.4.3. Послідовні регістри

Послідовні регістри поряд із записом і збереженням дозволяють здійснювати логічну операцію зміщення коду записаного числа на будь-яку кількість розрядів. Тому послідовні регістри називають регістрами зміщення.

Зміщення коду записаного числа в регістрі застосовується при виконанні операцій множення і ділення. Наприклад, зміщення коду 0100 (число 4) на один розряд вліво дає код 1000 (число 8), що відповідає множенню на $2^1 = 2$. Зміщення цього ж коду 0100 на один розряд вправо дає код 0010 (число 2), що рівнозначно діленню на $2^1 = 2$.

Послідовний регістр складається з послідовно з'єднаних тригерів. Під дією тактових імпульсів стан кожного тригера передається наступному, що рівнозначно зміщенню коду. Залежно від числа послідовностей тактових імпульсів, які здійснюють зміщення коду, регістри зміщення бувають однотоктними, двотоктними, тритактними і багатотактними.

При використанні у регістрі зміщення простих *RS*-тригерів кожний розряд, крім основного, містить додатковий тригер, що використовується для проміжного запам'ятовування інформації (рис. 8.20).

Тригери T_1, T_2, \dots, T_n створюють основний регістр, а тригери T'_1, T'_2, \dots, T'_n – додатковий. Синхронізуючі імпульси *C* подаються одночасно на всі розряди основного регістра і через логічний елемент НІ на всі розряди додаткового регістра.

Запис інформації (числа *A*) здійснюється послідовним парафазним кодом, який надходить на вхід першого тригера T_1 основного регістра. До початку запису тригери основного і додаткового регістрів встановлюються в нульовий стан перед подачею на синхронізуючий вхід *n* імпульсів при дії на прямому інформаційному вході нульового сигналу.

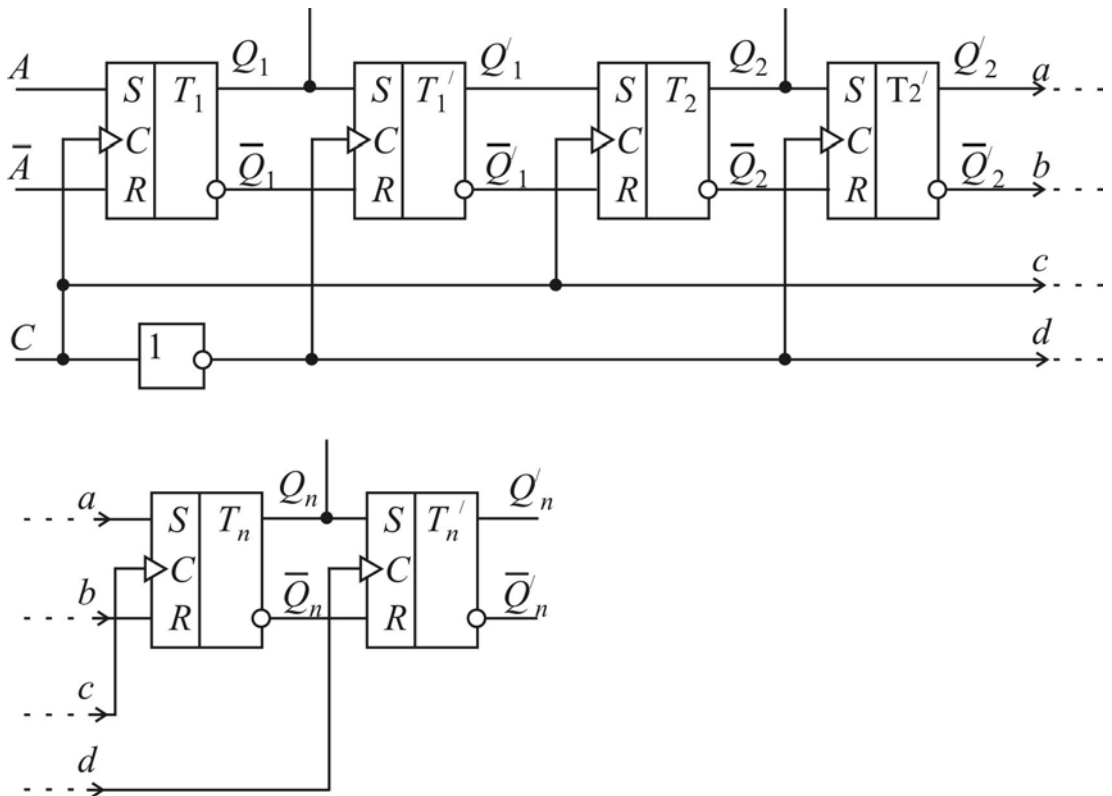


Рисунок 8.20 – Схема послідовного регістра на синхронних RS -тригерах

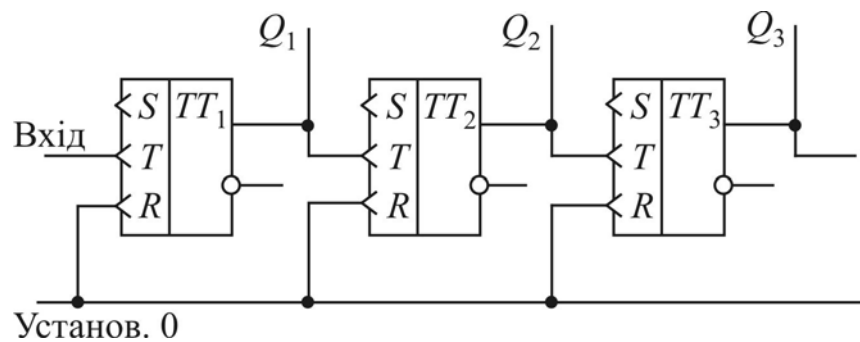
При цьому перший синхронізуючий імпульс C_1 встановлює в нульовий стан тригер T_1 . Оскільки запис інформації на тригери додаткового регістра при цьому заборонено, то не змінюються і стани решти тригерів (крім першого) основного регістра. Після закінчення дії синхронізуючого імпульсу C_1 логічний “0” з виходу тригера T_1 переписується в додатковий тригер T_1' .

Другий синхронізуючий імпульс C_2 підтверджує нульовий стан тригера T_1 і дозволяє запис логічного “0” з додаткового тригера T_1' у тригер другого розряду T_2 . Після закінчення дії імпульсу C_2 логічний “0” з тригера T_2 переписується у тригер T_2' . Третій синхронізуючий імпульс C_3 встановлює тригер T_3 у нульовий стан, який передається тригеру T_3' по закінченню дії синхронізуючого імпульсу C_3 і т.д.

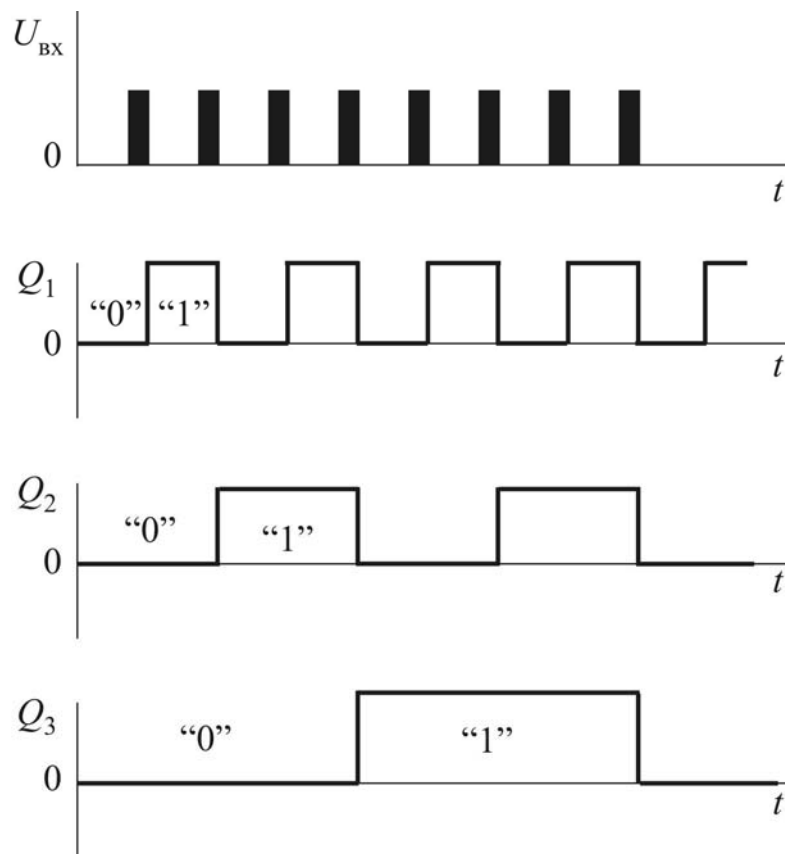
8.5. Цифрові лічильники імпульсів

Цифровим лічильником імпульсів називають пристрій, який здійснює ліччення числа вхідних імпульсів і фіксує це число в будь-якому коді.

Як правило, лічильники будуються на основі тригерів. Функціональна схема найпростішого трирозрядного цифрового лічильника імпульсів зображена на рис. 8.21. Лічильник складається з трьох послідовно з'єднаних лічильних тригерів з комбінованими входами: R , S і T . Лічильні входи T служать для з'єднання тригерів між собою, входи R – для установки всіх тригерів у стан логічного “0” (установка “0”), а входи S не використовуються.



a



б

Рисунок 8.21 – Функціональна схема (*a*) і часові діаграми (*б*) трирозрядного двійкового цифрового лічильника імпульсів

Оскільки сигнали надходять на інверсні входи тригерів, а знімаються з прямих виходів (Q_1 , Q_2 і Q_3), то тригери слід вважати інвертуючими, а виходи (Q_1 , Q_2 і Q_3) – інверсними.

Якщо у початковому стані всі тригери були у стані “0”, то після проходження першого вхідного імпульсу тригер TT_1 переходить на виході у стан “1”. Ця “1” може бути передана далі, на вихід з тригера TT_2 , тільки після скидання її з виходу тригера TT_1 , що і відбувається після закінчення проходження другого вхідного імпульсу. Скинути “1” з виходу тригера TT_2 може тільки проходження другого імпульсу на виході з тригера TT_1 , а для цього потрібні два вхідні імпульси, і т.д. Після восьмого імпульсу всі тригери переходять в стан “0”, і лічення повторюється.

З табл. 8.7 видно, що стан тригерів відображає число імпульсів, які надійшли на вхід лічильника у двійковій системі числення (двійковому коді). Загальне число можливих станів (модуль) N визначається числом тригерів n : $N = 2^n$. У нашому випадку $N = 8$.

Таблиця 8.7 – Таблиця переходів двійкового лічильника імпульсів

Номер вхідного імпульсу	Стан тригерів			Номер вхідного імпульсу	Стан тригерів		
	TT_1	TT_2	TT_3		TT_1	TT_2	TT_3
0	0	0	0	5	1	0	1
1	0	0	1	6	1	1	0
2	0	1	0	7	1	1	1
3	0	1	1	8	0	0	0
4	1	0	0				

Для отримання лічильника, працюючого в іншому коді, наприклад у десятковому, застосовують зворотні зв'язки. На рис. 8.22 подана функціональна схема десяткового (декадного) лічильника імпульсів на чотирьох тригерах.

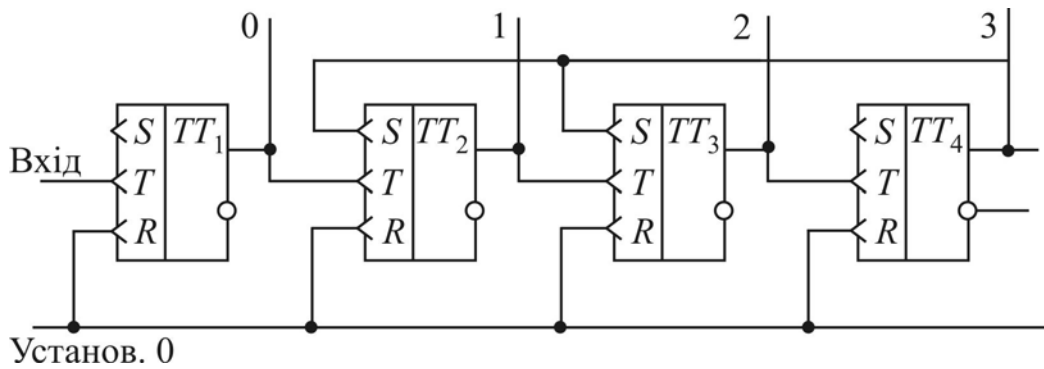


Рисунок 8.22 – Функціональна схема десятичного лічильника імпульсів зі зворотними зв'язками

З виходу тригера TT_4 сигнали зворотного зв'язку надходять на входи тригерів TT_2 і TT_3 . Завдяки цьому після надходження на вхід лічильника восьмого імпульсу на виході тригера TT_4 з'являється сигнал "1", який переводить тригери TT_3 і TT_2 зі стану "0" у стан "1" (табл. 8.8).

Таблиця 8.8 – Таблиця переходів десятичного лічильника

Номер вхідного імпульсу	Стан тригерів				Номер вхідного імпульсу	Стан тригерів			
	TT_4	TT_3	TT_2	TT_1		TT_4	TT_3	TT_2	TT_1
0	0	0	0	0	6	0	1	1	0
1	0	0	0	1	7	0	1	1	1
2	0	0	1	0	8	1	0(1)	0(1)	0
3	0	0	1	1	9	1.....↑.....↑			1
4	0	1	0	0		1	0	0	
5	0	1	0	1	10	0	0	0	0

Дев'ятий імпульс переводить тригер TT_1 у стан "1", і всі тригери опиняються у стані "1". Десятий імпульс переводить усі тригери у стан "0", і лічення починається знову.

Розглянуті лічильники виконують операцію підсумовування, тому їх називають *підсумовуючими*. Для побудови лічильника, що віднімає, можна з'єднати послідовно не прямі (як у схемі на рис. 8.21, а), а інверсні виходи тригерів. Такий лічильник працює наступним чином. Спочатку усі тригери встановлюють у

стан “1” (при трьох тригерах це відповідає двійковому числу 111). Імпульс, що надійшов на вхід лічильника, переводить тригер T_1 у стан “0”, а стан решти тригерів не зміниться. Отже, в лічильнику буде записане двійкове число 110. Наступний вхідний імпульс зменшує число ще на одну одиницю і т.д.

Лічильники, які виконують як операції підсумовування (додавання), так і віднімання, називають *реверсивними*. Звичайно вони мають два входи: додавання і віднімання.

8.6. Шифратори і дешифратори

Процес обробки сигналів за допомогою електронних пристроїв часто починають з кодування цих сигналів. У цифрових пристроях використовуються двійкові і двійково-десяткові коди, в яких сигнали подаються у вигляді логічних “0” і “1”. Двійкову цифру, що приймає значення “0” або “1”, називають *бітом*.

Шифратор (кодер) – це пристрій, здійснюючий кодування сигналів. На рис. 8.23 подана схема матричного шифратора, за допомогою якого можна виконати кодування будь-якої десяткової цифри від 0 до 9 у відповідне їй чотирирозрядне двійкове число.

Кодування здійснюється натисканням кнопок Q , що відповідають десятковим цифрам. Наприклад, при натисканні кнопки 5 до джерела живлення E через два діоди стають підключені дві вертикальні шини 2^2 і 2^0 . На вертикальних шинах 2^3 і 2^1 при цьому напруга дорівнює нулю. В результаті утворюється двійкове число 0101, яке відповідає десятковому числу 5 (див. табл. 8.1). Умовне позначення шифратора показано на рис. 8.24, *а*.

Дешифратором називають пристрій, якій служить для перетворення коду числа на вході (або комбінації вхідних сигналів) у сигнал на визначеному виході. Умовне позначення дешифратора показано на рис. 8.24, *б*.

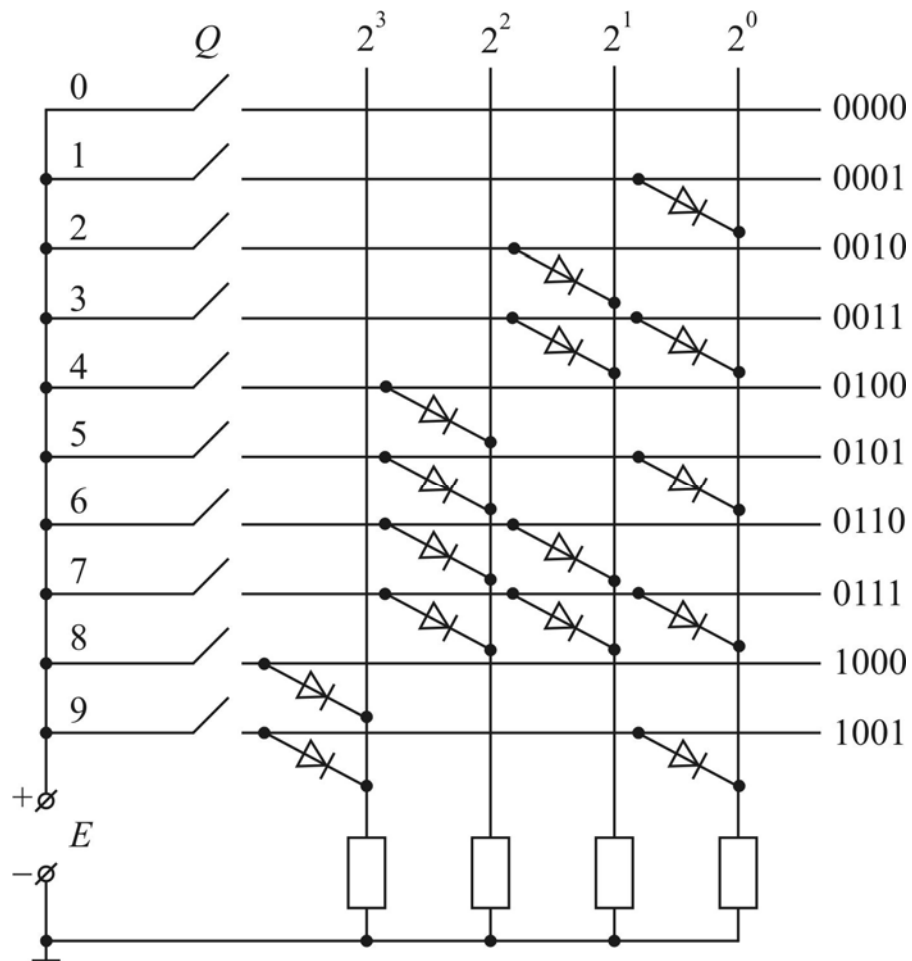


Рисунок 8.23 – Схема матричного шифратора

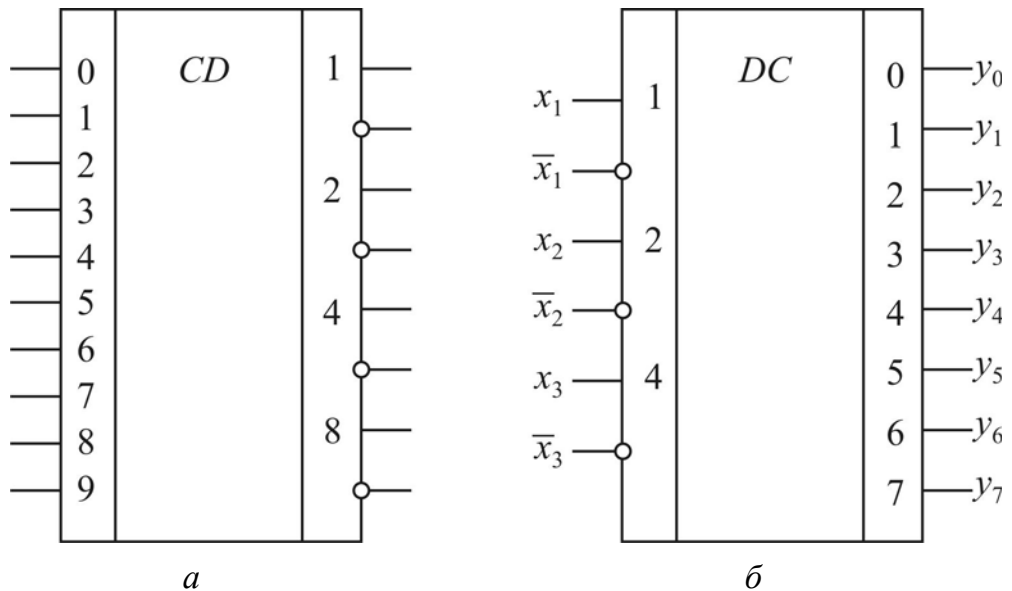


Рисунок 8.24 – Умовне позначення шифратора (а) і дешифратора (б)

Якщо при n входах (де n – число розрядів двійкового числа) дешифратор має $m = 2^n$ виходів, то такий дешифратор називається *повним*. При $2^{n-1} < m < 2^n$ дешифратор називається *неповним* або *частковим*.

Як правило, входи дешифратора підключаються до виходів розрядів регістра або лічильника, на яких формується код числа.

Правила роботи дешифратора на три входи x_1, x_2 і x_3 можна записати за допомогою табл. 8.9. Кількість виходів такого дешифратора $m = 2^3 = 8$ ($y_0, y_1, y_2, \dots, y_7$). Сигнал на тому чи іншому виході дешифратора з'являється тільки при повністю визначеному наборі вхідних сигналів. Стан кожного виходу визначається перемикаючими функціями, які наведені в останньому стовпці табл. 8.9.

Таблиця 8.9 – Стани тривходового дешифратора

x_1/\bar{x}_1	x_2/\bar{x}_2	x_3/\bar{x}_3	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	F
0/1	0/1	0/1	1	0	0	0	0	0	0	0	$y_0 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3$
0/1	0/1	1/0	0	1	0	0	0	0	0	0	$y_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3$
0/1	1/0	0/1	0	0	1	0	0	0	0	0	$y_2 = \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3$
0/1	1/0	1/0	0	0	0	1	0	0	0	0	$y_3 = \bar{x}_1 x_2 x_3$
1/0	0/1	0/1	0	0	0	0	1	0	0	0	$y_4 = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3$
1/0	0/1	1/0	0	0	0	0	0	1	0	0	$y_5 = x_1 \bar{x}_2 x_3$
1/0	1/0	0/1	0	0	0	0	0	0	1	0	$y_6 = x_1 x_2 \bar{x}_3$
1/0	1/0	1/0	0	0	0	0	0	0	0	1	$y_7 = x_1 x_2 x_3$

Кожна з цих функцій може реалізовуватися через тривходовий логічний елемент І (рис. 8.25).

Прямі x_1, x_2, x_3 та інверсні $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ значення вхідних змінних надходять на дешифратор безпосередньо з прямих та інверсних виходів регістра або лічильника, в яких записаний код числа.

Залежно від цього коду з'являється логічна "1" на відповідному виході.

Якщо, наприклад, $x_1 = 0$ (x_1 – старший розряд), а $x_2 = x_3 = 1$, то логічна “1” створюється тільки на виході y_3 , оскільки перемикаюча функція $\bar{x}_1 x_2 x_3 = 1$, а всі інші дорівнюють нулю.

Розглянутий дешифратор називається *одноступінчатим* або *лінійним*. Його перевагою є висока швидкодія, що визначається часом затримки сигналу в одному логічному елементі І, а недоліком – число входів логічного елемента. Максимальна розрядність чисел, що дешифруються, для лінійних дешифраторів, як правило, не перевищує $n = 4 \dots 8$.

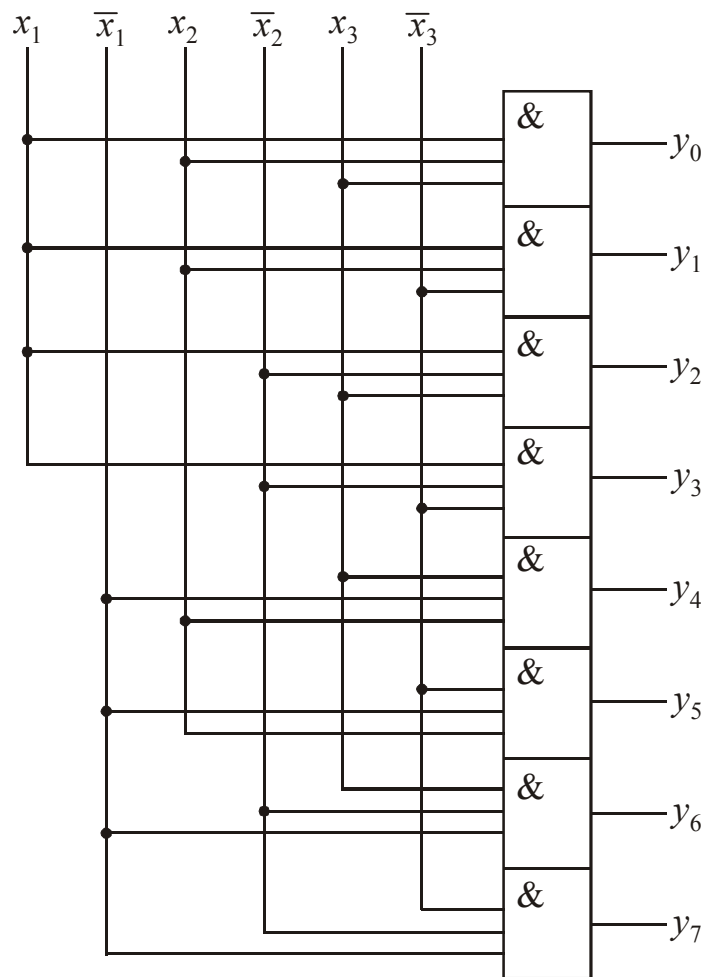


Рисунок 8.25 – Схема одноступінчатого дешифратора

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке система числення? Поясніть, що таке позиційна і непозиційна системи. Наведіть приклади цих систем.
2. Поясніть будову десяткової, двійкової та шістнадцяткової систем числення.
3. Поясніть пряме та зворотне перетворення числа з двійкової в шістнадцяткову систему числення.
4. Наведіть правила виконання арифметичних операцій додавання, віднімання та множення з двійковими числами.
5. Наведіть і поясніть основні логічні операції.
6. Наведіть умовні позначення логічних елементів, що реалізують логічні функції АБО, І, НІ, АБО-НІ, І-НІ та ЗАБОРОНА.
7. Наведіть результати логічних операцій АБО, І, НІ, АБО-НІ, І-НІ та ЗАБОРОНА.
8. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента АБО. Покажіть кодування сигналу цим елементом.
9. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента І. Покажіть кодування сигналу цим елементом.
10. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента НІ.
11. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента АБО-НІ.
12. Накресліть схему і поясніть роботу логічного елемента І-НІ.
13. Що таке тригер? Що таке статичний і динамічний тригери?
14. Наведіть схему і поясніть роботу симетричного тригера на біполярних транзисторах з колекторно-базовими зв'язками.
15. Наведіть схему і поясніть роботу тригера на біполярних транзисторах з лічильним запуском.
16. Опишіть структуру і класифікацію тригерів. Накресліть структурну схему тригерної системи.
17. Накресліть схему й умовне позначення асинхронного *RS*-тригера на логічних елементах АБО-НІ. Поясніть роботу цього тригера.
18. Наведіть схему та умовне позначення асинхронного *RS*-тригера на логічних елементах І-НІ. Поясніть роботу цього тригера.
19. Накресліть схему та умовне позначення синхронного *RS*-тригера на логіч-

них елементах І-НІ. Поясніть роботу цього тригера.

20. Накресліть схему та умовне позначення синхронного *RS*-тригера на логічних елементах АБО-НІ. Поясніть роботу цього тригера.

21. Наведіть схему та умовне позначення *D*-тригера на логічних елементах І-НІ. Поясніть роботу цього тригера.

22. Накресліть схему й умовне позначення асинхронного *JK*-тригера. Поясніть роботу цього тригера.

23. Наведіть схему та умовне позначення *T*-тригера, що виконаний на синхронних *RS*-тригерах. Поясніть роботу цього тригера.

24. Що таке регістр? Як вони розділяються за способом введення/виведення та характером подачі інформації, за числом тактів керування та видом виконуваних операцій?

25. Наведіть схему однофазного паралельного регістра та поясніть його роботу.

26. Наведіть схему парафазного паралельного регістра та поясніть його роботу.

27. Наведіть схему послідовного регістра на синхронних *RS*-тригерах та поясніть його роботу.

28. Що таке цифровий лічильник імпульсів? Накресліть функціональну схему і часові діаграми трирозрядного двійкового цифрового лічильника імпульсів. Поясніть роботу цього лічильника.

29. Накресліть функціональну схему десяткового (декадного) лічильника імпульсів на чотирьох тригерах. Поясніть роботу цього лічильника.

30. Що таке шифратор? Наведіть схему матричного шифратора і поясніть його роботу.

31. Що таке дешифратор? Наведіть схему одноступінчатого дешифратора і поясніть його роботу.

РОЗДІЛ 9

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МІКРОПРОЦЕСОРНУ ТЕХНІКУ

9.1. Загальні відомості про мікропроцесори

Мікропроцесори (МП) – це пристрої, що виконують функції програмної обробки інформації, включаючи її введення і виведення, прийняття рішень, арифметичні та логічні операції, і реалізуються вони з використанням технології мікросхем великого ступеня інтеграції. *Мікропроцесорна система* являє собою невелику ЕОМ, в якій можна виділити чотири основні пристрої: арифметико-логічний, керуючий, запам'ятовувальний та пристрій введення-виведення інформації, який звичайно називається периферійним (рис. 9.1).

Арифметико-логічний пристрій (АЛП) призначений для виконання арифметичних і логічних операцій над числами, поданими в двійковому коді.

Керуючий пристрій (УП) керує роботою АЛП та інших пристроїв мікропроцесорної системи за спеціальними командами, порядок виконання яких визначається заданою програмою.

Запам'ятовувальний пристрій (ЗП), або пам'ять, призначений для зберігання програм обробки, а також інформації (даних), що обробляється.

Пристрої введення-виведення (ПВВ) інформації, або периферійні пристрої, застосовуються для приведення вхідної інформації до вигляду, потрібного для введення в мікропроцесорну систему і виведення з неї результатів обробки інформації у належному вигляді, наприклад, послідовності чисел, таблиць, графіків.

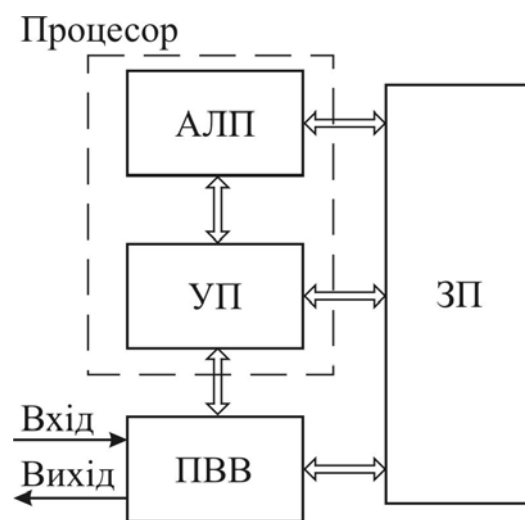


Рисунок 9.1 – Структурна схема мікропроцесорної системи

АЛП, тісно взаємодіючи з УП, створюють єдине ціле – центральний процесор, або скорочено процесор (від англ. *to process* – обробляти). Таким чином, *процесор* являє собою пристрій, призначений для автоматичної обробки інформації за заданою програмою.

Сучасна інтегральна технологія дозволяє виконувати елементи процесора у вигляді одної або декількох великих інтегральних схем. Такі процесори отримали назву *мікропроцесорів*.

За призначенням МП поділяються на універсальні (загального призначення) і спеціалізовані. Універсальні МП використовуються для вирішення різних задач і входять до складу ЕОМ широкого призначення. Спеціалізовані МП застосовуються для вирішення конкретної задачі за певною програмою.

Мікропроцесор та сумісні з ним постійний (ПЗП) і оперативний (ОЗП) запам'ятовувальні пристрої, а також велика інтегральна схема допоміжного призначення, що забезпечує сполучення МП з ПЗП, ОЗП і ПВВ, створюють *мікропроцесорний комплект*.

За конструктивною ознакою МП поділяються на однокристальні і багатокристальні. У багатокристальному МП його складові за ознакою виконуваних функцій і за ознакою розрядності розміщуються у різних кристалах. В однокристальних МП в одному кристалі виготовляються всі складові частини мікропроцесора. У мікроЕОМ в одному кристалі напівпровідника, крім МП, містяться генератор тактових імпульсів (таймер), пристрій керування ПВВ, невеликі ОЗП і ПЗП.

Будь-який МП оперує словами, які є послідовністю символів певної довжини: 4, 8, 12, 16 і 32 біт, або розрядів. Група бітів, яку спроможна обробити ЕОМ за один крок роботи, утворює машинне слово. Довжина машинного слова визначається числом розрядів одного регістра пам'яті ЕОМ.

Для мікропроцесорної техніки одним з основних понять є байт – восьмибітове слово, що використовується для обміну цифровою інформацією між вузлами мікропроцесорної системи. У байтах виражають довжину слів і ємність запам'ятовувального пристрою.

9.2. Структура мікропроцесора

Мікропроцесор містить три основні вузли: АЛП, УП і вузол регістрів (рис. 9.2). Для зв'язку між цими вузлами застосовується внутрішня шина даних. Вона складається з восьми ліній (для восьмирозрядного МП), якими передаються 8-розрядні слова (байти) і командна інформація. Передача слів по внутрішній шині даних здійснюється в обох напрямках, але в різні часові інтервали, які не перетинаються.

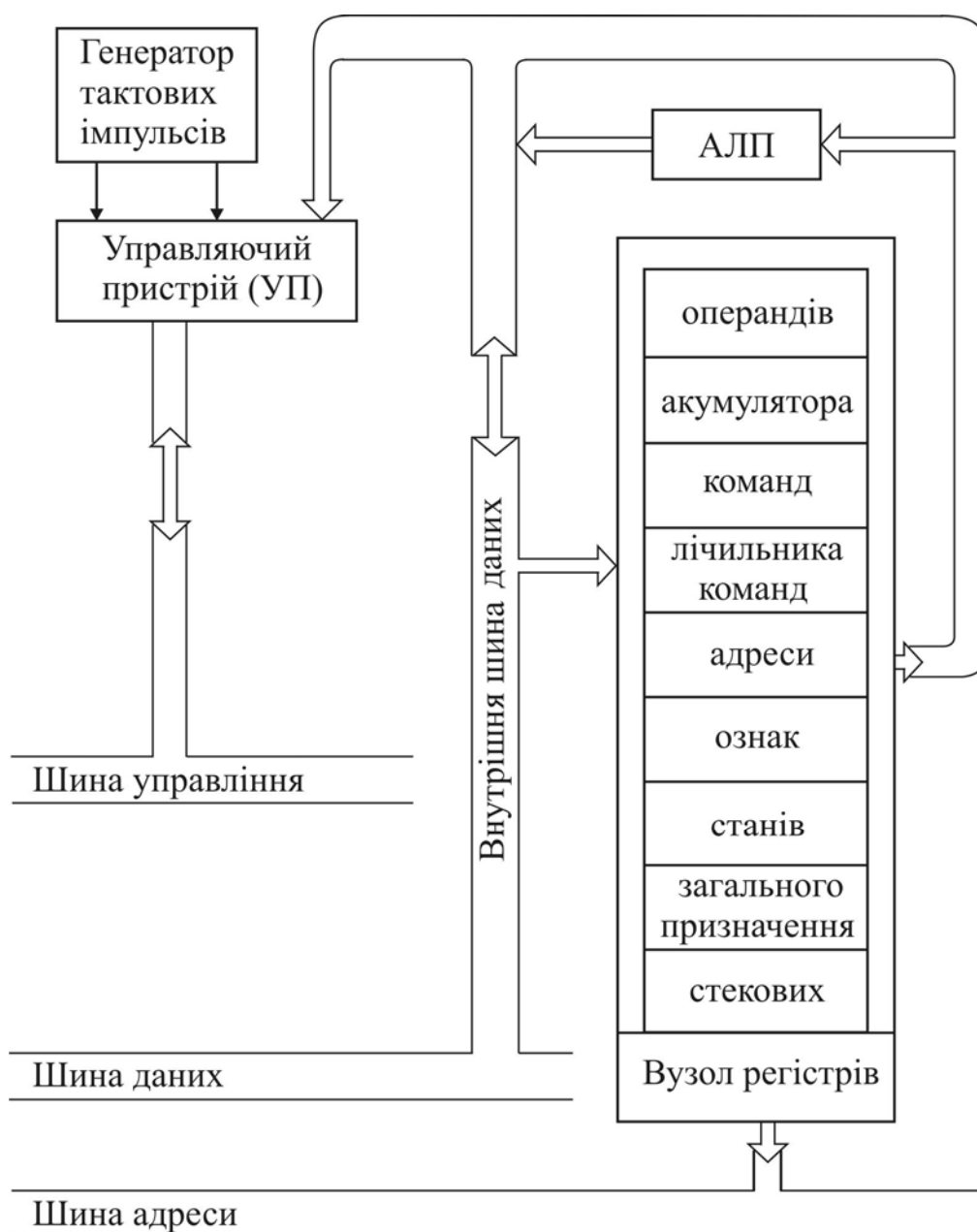


Рисунок 9.2 – Структурна схема мікропроцесора

Основною частиною, або ядром, мікропроцесора є АЛП, який здійснює об-

робку даних. Типові операції АЛП: додавання, віднімання, логічне додавання (АБО), логічне множення (І), додавання за модулем 2 (ВИКЛЮЧАЮЧЕ “АБО”), інверсія, зміщення, пересилка. Зазвичай АЛП має два входи, які називаються вхідними портами, та один вихід, або вихідний порт.

Дані на вхідні порти АЛП надходять з внутрішньої шини даних або зі спеціального регістра, який називається акумулятором, через буферні регістри, або регістри операндів, що призначені для тимчасового зберігання даних.

Буферний регістр, через який на вхід АЛП надходять дані з акумулятора, називають *буфером акумулятора*. Результат, отриманий при виконанні операції, з вихідного порту АЛП спрямовується в акумулятор, який називається також накопичувальним регістром. Буфер акумулятора виключає ситуацію, при якій вхід і вихід АЛП підключаються одночасно до акумулятора.

Роботою АЛП і внутрішніми регістрами керує УП, який бере з регістра команд чергову команду, дешифрує її, тобто визначає, яка операція повинна здійснюватися, і забезпечує виконання цієї операції в АЛП.

Послідовність надходження команд, необхідних для вирішення задачі, забезпечує регістр, який називається лічильником команд. Лічильник команд може мати більше число розрядів, ніж довжина слова даних. Наприклад, у 8-розрядних МП з об'ємом пам'яті $64 \text{ К} = 65536$ слів використовується 16-розрядний лічильник команд. В результаті можна записати команду в будь-яку комірку пам'яті.

Перед виконанням програми в лічильник команд записують число, яке визначає адресу першої програми, що зберігається в ЗП. Потім це число з лічильника команд переписується в 16-розрядний регістр адреси пам'яті. З регістра адреси пам'яті по шині адреси в пристрій керування пам'яттю відсилається адреса нової команди. За зазначеною адресою з ЗП здійснюється зчитування першої команди, яка переписується в регістр команд. Розглянутий цикл операцій називають *циклом вибірки* або *фазою адресації*.

Після запису команди в регістр УП здійснює її розпізнавання (декодування), і в АЛП надходять сигнали, що стимулюють виконання даної команди. Цей процес називають *циклом* або *фазою виконання команди*. Цикл вибірки разом із циклом виконання команди утворює *цикл команди*.

На початку циклу виконання команди показання лічильника команд

автоматично збільшуються на одиницю, і він налаштовується на наступну команду. Отже, в процесі виконання команди лічильник команд містить адресу наступної команди.

Регістр ознак, або *регістр прапорців*, застосовується для індикації різних ознак результатів операцій, що виконуються АЛП: нульового результату, переповнення тощо. Він складається з окремих тригерів, що називаються прапорцями, які залежно від прояву тої або іншої ознаки встановлюються в стан “0” або “1”.

Регістр станів сприймає інформацію з реєстра ознак і залежно від значень ознак дозволяє змінювати послідовність виконання команд і здійснювати так звані умовні переходи. При цьому змінюється вміст лічильника команд, і він налаштовується на вибірку не наступної, а потрібної команди. Таким чином, наявність команд умовного переходу робить МП більш універсальним, дозволяє обирати різні шляхи вирішення задачі залежно від тих умов, що виникають у ході вирішення.

Регістри загального призначення використовуються як запам’ятовувальні пристрої проміжних результатів обчислень, адрес та команд, а іноді і як акумулятори. Кількість таких реєстрів у МП може доходити до 16, причому розрядність їх може бути різною.

Окремі реєстри загального призначення можуть з’єднуватися між собою послідовно і розглядатися як один регістр з великим числом розрядів.

Стекові реєстри діляться на *реєстри стека* і *показчик стека*. Ці реєстри дозволяють без обміну із ЗП організувати необхідну послідовність виконання команд. Стекові реєстри підключені таким чином, що перша команда, яка записана в перший регістр, при записуванні другої команди “проштовхується” в другий регістр, а в перший записується друга команда. При записуванні третьої команди перша переходить у третій регістр, друга – в другий і т.д.. При виборі команд зі стека першою вибирається остання, потім передостання і т.д., подібно до того, як зі штабелю дров першою береться остання покладена дрова (від англ. *stack* – штабель).

Кількість реєстрів (глибина) стека є важливою характеристикою МП. Для збільшення глибини стека його часто організують у деякій області зовнішнього ЗП.

Показчик стека визначає адресу комірки (регістра) стека, заповненої останньою командою. Ця комірка називається вершиною стека. Після вибору команди зі стека вміст показчика стека зменшується на одиницю, а при записуванні у стек чергової команди – збільшується на одиницю.

Високостабільний генератор тактових імпульсів забезпечує взаємодію і координацію роботи всіх вузлів мікропроцесорної системи. За допомогою тактових імпульсів формуються машинні цикли і цикли команд. Машинним циклом називають час, необхідний для виймання одного байта інформації з пам'яті або виконання команди, яка визначається одним машинним словом.

9.3. Система команд мікропроцесора

Мікропроцесорна система повинна отримувати інформацію ззовні, оброблювати її та відсилати результати у зворотному напрямку. Вона виконує операції відповідно до визначених вхідних впливів, які називаються командами. Послідовність команд утворює програму, а сукупність команд, відомих МП, створює його систему команд.

Команда, як і дані, подається двійковим кодом, утворюючи машинне слово. Довжина командного слова може дорівнювати одному, двом і більш байтам, тобто містити 8, 16 і більше розрядів. Кожна команда повинна містити певну інформацію і визначати: 1) вид виконуваної дії (частина команди, яка визначає цю операцію, називається кодом операції – КОП); 2) джерело даних (цю інформацію містить поле адреси даних: адреси операнда 1 і операнда 2; 3) адресу результату; 4) адресу наступної команди. Узагальнена структурна схема команди МП наведена на рис. 9.3.

Код операції	Адреса операнда 1	Адреса операнда 2	Адреса результату	Адреса наступної команди
--------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------------

Рисунок 9.3 – Узагальнена структурна схема команди МП

Таким чином, у команді можна виділити дві основні частини – КОП та ад-

ресу. Код операції налаштовує МП на виконання потрібної операції, а адреса вказує місцеположення даних операндів, що беруть участь в операції.

У сучасних обчислювальних системах найчастіше використовуються одно-адресні команди (16-розрядні), що містять КОП та адресу одного операнда. Якщо в операції беруть участь два операнди, то адреса другого операнда при цьому вважається відомою. Такою адресою найчастіше є акумулятор, в який другий операнд засилається до початку виконання операції. Результат операції також розміщується за фіксованою адресою, звичайно за адресою розміщення другого операнда.

Команди, що реалізують задану програму, через пристрій введення-виведення вводяться у певну частину ЗП.

Набір команд, виконуваних МП, поділяється на ряд груп, основними з яких є команди арифметичних і логічних операцій, пересилок, введення-виведення, керування, звернення до підпрограм і деякі спеціальні команди.

Команди арифметичних і логічних операцій забезпечують виконання операцій арифметичного додавання, віднімання і множення двійкових та двійко-десяткових чисел, їх порівняння, а також виконання операцій логічного додавання, логічного множення, додавання за модулем 2 (ВИКЛЮЧАЮЧЕ “АБО”), інверсію чисел, тобто заміну нулів одиницями, а одиниць – нулями тощо. Після виконання цих команд результат операції надходить в акумулятор або у зазначену в цих командах комірку ЗП.

Команди пересилок використовуються для пересилання даних з однієї комірки ЗП в іншу, в акумулятор або навпаки. Як правило, ці команди здійснюються без руйнування даних у початкових комірках, тобто після виконання команди пересилки у початковій і у знову зазначеній комірках пам’яті виявляються одні й ті ж самі дані. До команд пересилки відносять команди завантаження регістра, реєстрової пари та акумулятора, пересилки з регістра в реєстр, запису вмісту акумулятора в пам’ять.

Команди введення-виведення застосовуються для введення через шину даних вхідної інформації, поданої в двійковому коді, в акумулятор МП або для виведення вмісту акумулятора на пристрій відображення інформації. Введення або виведення інформації здійснюється відповідно за командами “Ввести” або “Вивести”.

Команди керування містять у собі команди безумовного й умовного переходів. За цими командами змінюється вміст лічильника команд і порушується послідовність виконання команд програми. При безумовному переході порушення послідовності виконання програми відбувається кожного разу при виконанні програми. При цьому адреса комірки, в якій зберігається команда і до якої здійснюється перехід, міститься в адресній частині команди, за якою здійснюється цей перехід.

При умовних переходах послідовність виконання команд програми порушується лише в тому випадку, коли результати обчислень, передбачені програмою, задовольняють деякій поставленій умові.

Команди звернення до підпрограм є різновидами команд керування. Звичайно підпрограми зберігаються в регістрах стека, які, в більшості випадків, розміщуються в ЗП. Запис інформації в стек називають завантаженням даних у стек, а вибір її зі стеку – вилученням даних зі стеку.

При зверненні до підпрограми спочатку відбувається заповнення поточного вмісту лічильника команд. Потім у лічильник записується адреса першої команди підпрограми. Останньою командою підпрограми є команда “Повернення з підпрограми”, за якою в лічильнику відновлюється число, що відповідає перерваній команді основної програми. За командою “Повернення з підпрограми” може також здійснюватися перехід від однієї підпрограми до іншої, якщо використовується вкладення підпрограм.

Особливою формою підпрограми є операція, яка називається перериванням. Вона полягає в тому, що припинення дій поточної програми здійснюється довільно за запитом зовнішнього керуючого сигналу. Оскільки переривання поточної програми може відбутися у будь-якому місці, необхідно забезпечити нормальну роботу МП після повернення з переривання. Для цього в початковий момент при надходженні команди на переривання виконується запам'ятовування вмісту регістрів акумуляторів, регістрів ознак і станів у стеку.

До *спеціальних команд* відносяться команди дозволу переривання, заборони переривання, операція зупинки і неробоча операція. При виконанні команди “Неробоча операція” жодні операції не виконуються, а вміст лічильника адрес збільшується на одиницю, після чого виконується наступна за порядком команда.

9.4. Принципи побудови мікропроцесорних систем

В основу побудови мікропроцесорних систем покладено три принципи: 1) магістральності; 2) модульності; 3) мікропрограмного керування.

Принцип магістральності визначає характер зв'язків між функціональними блоками мікропроцесорних систем – усі блоки з'єднуються з єдиною системною шиною.

Принцип модульності полягає у тому, що система будується на основі обмеженої кількості типів конструктивно і функціонально завершених модулів. Кожний модуль МП системи має вхід керування третім (високоімпедансним) станом. Цей вхід називається *CS (Chip Select)* – вибір кристала або *OE (Output Enable)* – дозвіл виходу. Дію сигналу *CS* для тригера показано на рис. 9.4.

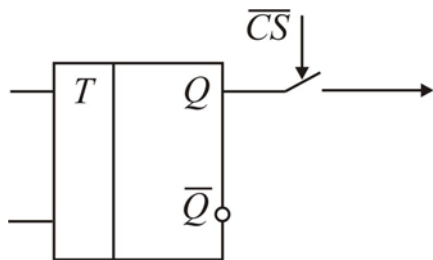


Рисунок 9.4 – До пояснення принципу модульності МП

Вихідний сигнал тригера Q з'явиться на виході лише при активному (у цьому випадку – нульовому) рівні сигналу CS . Якщо $CS = 1$, тригер переводиться у високоімпедансний стан. Вихід тригера є тристабільним, тобто може знаходитися в одному з трьох станів: логічної одиниці, логічного нуля або у високоімпедансному. У кожний момент часу до системної шини мікропроцесорної системи під'єднано лише два модулі – той, що приймає, і той, що передає інформацію. Інші знаходяться у високоімпедансному стані.

Принцип магістральності і модульності дозволяють нарощувати керуючі і обчислювальні можливості МП через під'єднання інших модулів.

Принцип мікропрограмного керування полягає у можливості здійснення елементарних операцій – мікрокоманд (зміщення, пересилки інформації, логічних операцій). Певною комбінацією мікрокоманд можна створити набір команд, який максимально відповідатиме призначенню системи, тобто створити *технологічну мову*. У секційних процесорах набір мікрокоманд можна змінити, використовуючи інші мікросхеми пам'яті мікрокоманд.

Узагальнену структурну схему мікропроцесорної системи показано на

рис. 9.5. До складу мікропроцесорної системи керування входять: 1) центральний процесор (ЦП), 2) постійний запам'ятовувальний пристрій ПЗП, 3) оперативний запам'ятовувальний пристрій ОЗП, 4) система переривань, 5) таймер, 6) пристрій введення-виведення ПВВ. Пристрої введення-виведення під'єднані до системної шини через інтерфейси введення-виведення.

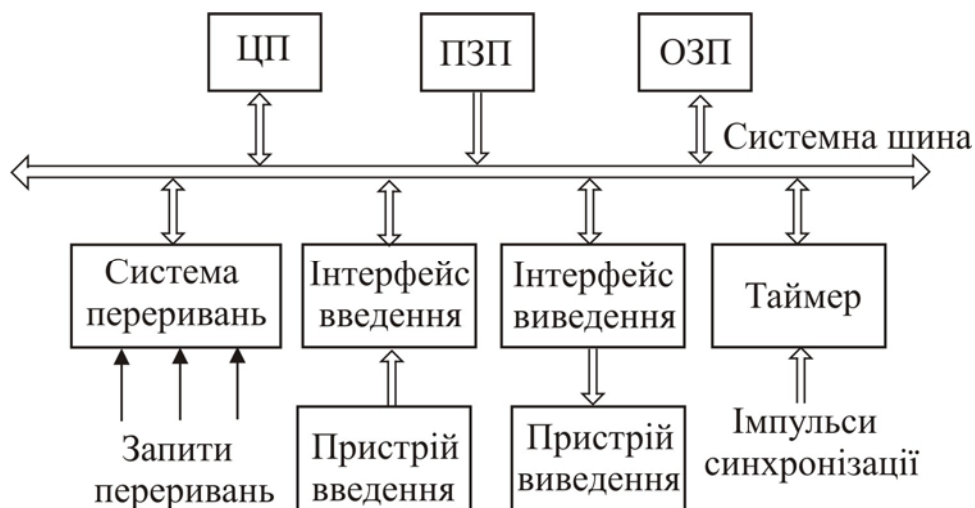


Рисунок 9.5 – Узагальнена структурна схема мікропроцесорної системи керування

Постійний та оперативний запам'ятовувальні пристрої складають *систему пам'яті*, яка призначена для збереження інформації у вигляді двійкових чисел. Постійний запам'ятовувальний пристрій призначений для збереження програм керування таблиць, констант. ОЗП – для збереження проміжних результатів обчислень. Пам'ять організовано у вигляді масиву комірок, кожна з яких має свою адресу і містить байт або слово. Байтом називається група з 8 біт, а слово може мати будь-яку довжину в бітах. Найчастіше під словом розуміють двійкове число довжиною два байти. Для звернення до комірки пам'яті необхідно видати її адресу на шину адреси.

Сегментом називається область пам'яті, яка починається з будь-якої адреси, кратної 16, і займає до 64 кбайт. Існують три основних сегменти: 1) сегмент кодів, 2) сегмент даних, 3) сегмент стека.

Сегмент кодів містить коди команд, які адресуються сегментним регістром кодів *CS* та регістром – лічильником команд *IP*. Регістр *CS* визначає початкову адресу сегмента кодів, а регістр *IP* – зміщення в сегменті (відстань від початку сегмента до комірки, в якій знаходиться адреса команди).

Сегмент даних містить дані, константи та робочі області, необхідні для виконання програми. Регістр *DS* містить початкову адресу сегмента даних, а зміщення в сегменті задається в команді.

Сегмент стека містить адреси повернення з підпрограм та дані. Регістр *SS* містить початкову адресу сегмента стека, а регістр *SP* – зміщення в сегменті.

Деякі операції використовують *додатковий сегмент даних*, початкова адреса якого задається регістром *ES*, а зміщення в сегменті визначається командою.

Двобайтове зміщення (16 біт) може знаходитися в межах від 0000_{16} до $FFFF_{16}$. Для звернення до будь-якої адреси у програмі виконується додавання адрес, які знаходяться в регістрі сегмента та зміщення. Наприклад, перший байт у сегменті кодів має зміщення нуль, другий байт – одиницю і т.д. до $FFFF_{16}$.

Конкретна адреса команди (для сегмента кодів), комірки пам'яті (для сегмента даних та додаткового сегмента) або комірки стека (для сегмента стека) визначається результатом додавання адреси сегмента, яка міститься у відповідному сегментному регістрі, та зміщення.

Модуль центрального процесора здійснює обробку даних і керує усіма іншими модулями системи. Центральний процесор, крім великої інтегральної схеми МП, містить схеми синхронізації та інтерфейсу із системною шиною. Він вибирає коди команд з пам'яті, дешифрує їх і виконує. Впродовж часу виконання команди – *командного циклу*, ЦП виконує такі дії:

- виставляє адресу команди на шину адреси АВ;
- отримує код команди з пам'яті та дешифрує його;
- обчислює адреси операнда і зчитує дані;
- виконує операцію, визначену командою;
- сприймає зовнішні керуючі сигнали (наприклад, запити переривань);
- генерує сигнали стану і керування, необхідні для роботи пам'яті та ПВВ.

Пристрої введення-виведення або зовнішні пристрої – це пристрої, призначені для введення інформації у МП або виведення інформації з нього. Прикладами ПВВ є дисплеї, друкувальні пристрої, клавіатура, цифро-аналоговий та аналого-цифровий пристрої, реле, комутатори. Для з'єднання ПВВ з системною шиною їх сигнали повинні відповідати певним стандартам. Це досягається за

допомогою інтерфейсів введення-виведення.

Інтерфейси введення-виведення називають також контролерами або адаптерами. Мікропроцесор звертається до інтерфейсів за допомогою спеціальних команд введення-виведення. При цьому МП виставляє на шину адреси *AB* адресу інтерфейсу, а по шині даних *DB* зчитує дані з пристрою введення або записує у пристрій виведення. На рис. 9.5 показано один інтерфейс введення і один інтерфейс виведення.

Система переривань дозволяє мікропроцесорній системі реагувати на зовнішні сигнали – запити переривань, джерелами яких можуть бути: сигнали готовності від зовнішніх пристроїв, сигнали від генераторів, сигнали з виходів датчиків. З появою запиту переривання ЦП перериває основну програму і переходить до виконання підпрограми обслуговування запиту переривання. Для побудови системи переривань мікропроцесорні комплекти (МПК) містять великі інтегральні схеми спеціальних програмованих контролерів переривань.

Таймер призначений для реалізації функцій, пов'язаних з відліком часу. Після того як МП завантажує в таймер число, яке задає частоту, затримку або коефіцієнт ділення, таймер реалізує необхідну функцію.

9.5. Архітектура мікропроцесорів

Поняття *архітектури мікропроцесора* визначає його складові частини, а також зв'язки та взаємодію між ними. Архітектура містить: 1) структурну схему самого МП; 2) програмну модель МП (описання функцій регістрів); 3) інформацію про організацію пам'яті (ємність пам'яті та способи її адресації); 4) опис організації процедур введення-виведення.

Існують два основних типи архітектури – фоннейманівська та гарвардська. *Фоннейманівську архітектуру* (рис. 9.6, *a*) запропонував 1945 р. американський математик Джон фон Нейман. Особливістю цієї архітектури є те, що програма і дані знаходяться у спільній пам'яті, доступ до якої здійснюється по одній шині даних і команд.

Гарвардську архітектуру реалізовано у 1944 р. в релейній обчислювальній машині Гарвардського університету (США). Особливістю цієї архітектури є те,

що пам'ять даних і пам'ять програм розділені і мають окремі шини даних і шину команд (рис 9.6, б), що дозволяє підвищити швидкодію МП системи.

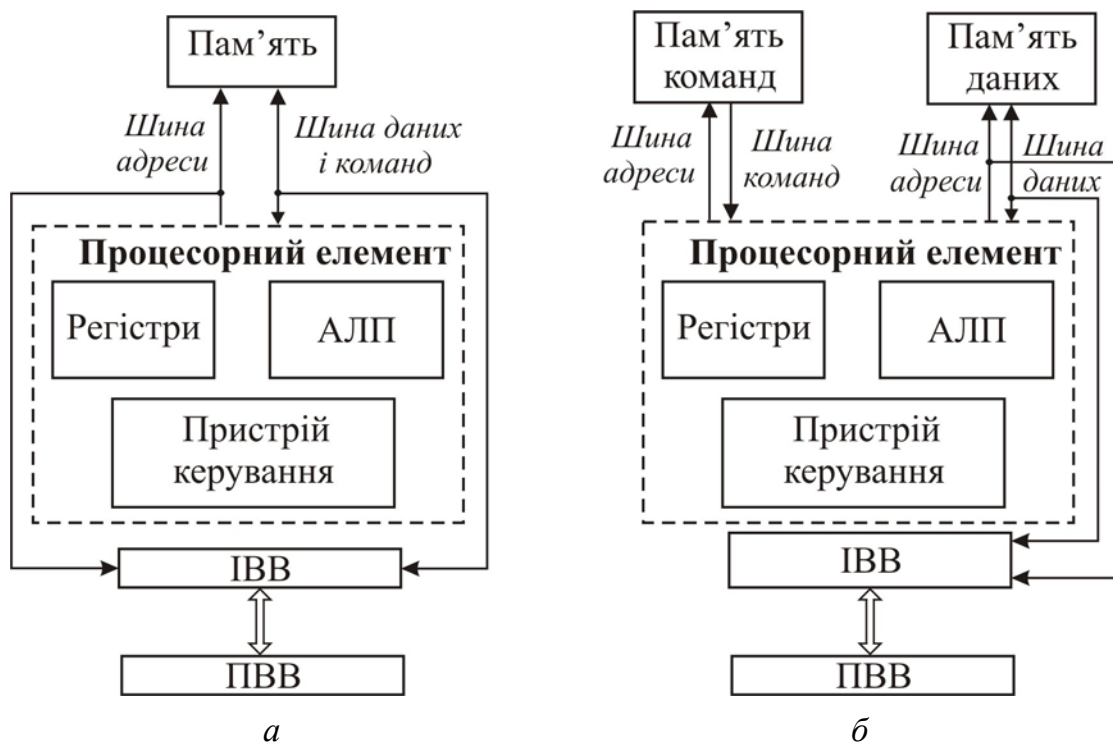


Рисунок 9.6 – Основні типи архітектури МП: (а) – фоннейманівська; (б) – гарвардська

Структурні схеми обох архітектур містять: процесорний елемент, пам'ять, інтерфейси введення/виведення (ІВВ) і ПВВ. Пам'ять і ІВВ для різних типів МП можуть бути як внутрішніми, тобто розміщуватися на тому ж кристалі, що і процесорний елемент, так і зовнішніми. Процесорний елемент містить регістри, арифметично-логічний пристрій (АЛП), пристрій керування і виконує функції обробки даних та керування процесами обміну інформації. Пам'ять забезпечує зберігання кодів команд програми і даних. Інтерфейси призначені для зв'язку з ПВВ (наприклад, з клавіатурою, дисплеєм, друкувальними пристроями, датчиками інформації). Усі елементи структурної схеми з'єднані за допомогою шин.

9.6. Побудова мікропроцесорних систем з використанням мікропроцесорних комплектів

Всі елементи мікропроцесорів із програмною логікою – операційний при-

стрій, пам'ять, що керується і блок мікропрограмного керування – можуть розміщуватися на одному кристалі, тобто весь мікропроцесор може бути виконаний у вигляді одної мікросхеми. Так реалізовано мікропроцесори у вітчизняних серіях мікропроцесорних комплектів КР580 і КР1810. Керуюча пам'ять мікропроцесорів такого типу зберігає набір мікропрограм, описаний в неї вже на етапі виготовлення мікросхеми на заводі. Кожна мікропрограма являє собою послідовність мікрокоманд, що забезпечує виконання деякої нескладної операції. При надходженні в мікропроцесор команди з операційного пристрою в пам'ять, що керується, знаходиться відповідна команді мікропрограма і шляхом послідовного зчитування її мікрокоманд здійснюється прийом з операційного пристрою операндів, виконання над ними деяких найпростіших дій і виклик з операційного пристрою чергової команди. Застосування процесора, виконаного на одній мікросхемі, спрощує побудову мікропроцесорної системи, скорочує число використовуваних у ній елементів, також спрощується процес програмування, тому що програмісту не потрібно записувати виконувани у кожному такті мікрокоманди.

Таке полегшення програмування супроводжується істотним зниженням швидкості вирішення задачі. Це пов'язано з тим, що система команд, якою забезпечується мікропроцесор при його заводському виготовленні, є універсальною у тому сенсі, що вона дозволяє програмувати рішення будь-якої задачі. Але при вирішенні конкретної задачі така фіксована система команд може виявитися неефективною: при користуванні нею виникне потреба у великій кількості команд, на виконання яких мікропроцесор буде витрачати багато часу. Програма виявляється більш ефективною (потребує меншої ємності пам'яті для її збереження і меншого часу для виконання), якщо для її побудови використовується спеціально підібрана для даної конкретної задачі система команд. Такий спосіб із введенням нових складених програмістом команд (тобто модифікація системи команд) виявляється неможливим у мікропроцесорах, реалізованих у вигляді одної мікросхеми. Розглянемо один з мікропроцесорних комплектів.

Мікропроцесорний комплект серії КР580 містить набір великих інтегральних схем для побудови мікропроцесорних систем невисокої швидкодії, що працюють з тактовою частотою до 2,5 МГц. В основному на МПК даної серії будуються мікропроцесорні системи, що вирішують задачі, пов'язані з ке-

керуванням різноманітними технологічними процесами. В табл. 1 приведено склад МПК серії КР580.

Таблиця 9.1 – Склад мікропроцесорного комплексу серії КР580

Тип мікросхеми	Найменування мікросхеми	Виконувана функція
КР580ВМ80А	8-розрядний паралельний центральний процесор (CPU)	Центральний процесор з фіксованою системою команд для обробки паралельної 8-розрядної інформації
КР580ВВ51А	Програмований послідовний інтерфейс (УСАПП)	Універсальний синхронно-асинхронний приймально-передавальний пристрій послідовного зв'язку
КР580ВВ55А	Програмований паралельний інтерфейс (ППІ)	Програмоване введення-виведення паралельної інформації різного формату
КР580ВІ53	Програмований таймер	Формує програмно-керовані тимчасові затримки для синхронізації керованих об'єктів в реальному масштабі часу
КР580ВТ57	Програмований контролер прямого доступу до пам'яті (ПКДП)	Високошвидкісний обмін інформацією між пам'яттю МПС і периферійними пристроями
КР580ВН59	Програмований контролер переривань (ПКП)	Обслуговує до восьми запитів на перериванні від зовнішніх пристроїв
КР580ГФ24	Генератор тактових імпульсів (ГІ)	Формує дві послідовності тактових імпульсів, необхідні для роботи центрального процесора
КР580ВК28 КР580ВК38	Системний контролер	Формує сигнали, призначені для керування різними пристроями, що входять до МПС
КР580Ва86 КР580ВА87	Шинний формувач	Двонапрямковий 8-розрядний шинний формувач з високою навантажувальною здатністю і трьома станами
КР580ІР82 КР580ІР83	Буферний регістр	8-розрядний буферний регістр з трьома станами
КР580ВГ75	Програмований інтерфейс електронно-променевої трубки	Контролер виведення інформації з пам'яті МПС на екран електронно-променевої трубки

КР580ВВ79	Програмований інтерфейс клавіатури і дисплея	Контролер введення-виведення для клавіатури і дисплея
КР580ВК91А	Інтерфейс мікропроцесор – канал загального користування	Пристрій сполучення МП з інформаційно-вимірювальною системою
КР580ВА93	Приймач мікропроцесор – канал загального користування	Програмований приймач

Комплект має наступні особливості. У ньому передбачена велика інтегральна схема центрального процесора, що містить в одній мікросхемі операційний і керуючий пристрої. Це істотно спрощує побудову мікропроцесорної системи. Крім того, для полегшення програмування при керуванні мікросхемами МПК застосовується фіксований набір команд. Однак використання такого фіксованого набору команд знижує швидкодію мікропроцесорної системи. Це пов'язано з тим, що запропонований користувачу стандартний набір команд може виявитися погано пристосованим для вирішення конкретної задачі.

Усі мікросхеми МПК серії КР580 призначені для роботи в діапазоні температур $-10...+70^{\circ}\text{C}$. Мікросхема центрального процесора КР580ВМ80А вимагає три джерела напруги живлення: $+12\text{ В} \pm 5\%$, $+5\text{ В} \pm 5\%$, $-5\text{ В} \pm 5\%$; мікросхема генератора тактових імпульсів КР580ГФ24 – два джерела: $+12\text{ В} \pm 5\%$, $+5\text{ В} \pm 5\%$; усі інші мікросхеми – одне джерело $+5\text{ В} \pm 5\%$.

9.7. Загальні поняття про мікроЕОМ

МікроЕОМ призначені передусім для заміни спеціалізованих логічних схем і застосовуються як складова частина різних інформаційно-керуючих систем.

На разі можна виділити такі типи мікроЕОМ, на основі яких можна побудувати багатомашинні й мультимікропроцесорні обчислювальні системи:

- *Керуючі вбудовані мікроЕОМ*. Вони застосовуються для вирішення локальних задач керування об'єктами і можуть використовуватися як контролери пристроїв, що під'єднуються до великої ЕОМ, або як керуючі машини ниж-

ніх контурів керування;

- *Керуючі мікроЕОМ.* Призначені для побудови систем керування досить складними об'єктами або процесами: технологічними лініями, вимірними комплексами тощо;

- *Обчислювальні інженерні мікроЕОМ.* Вони призначені для індивідуального використання. Зовнішні пристрої такої ЕОМ можуть вбудовуватися в корпус машини, а їх комплект містить мінімально необхідні пристрої для обчислювальних робіт та обробки даних: цифрову, алфавітно-цифрову та функціональну клавіатуру, алфавітно-цифровий індикатор, друкувальний пристрій, зовнішній запам'ятовувальний пристрій.

Поява мікропроцесорних комплектів великих інтегральних схем спричинила появу принципово нових напрямів застосування цифрової обчислювальної техніки і дозволила здійснювати вбудоване керування, розподілене керування, розподілені обчислення.

Одним з різновидів мікроЕОМ є калькулятори. Мікропроцесор як прилад з високим ступенем інтеграції з погляду технології є результатом удосконалення калькулятора, виконаного на окремому кристалі. Деякі великі інтегральні схеми, що називаються мікропроцесорами, призначені насамперед для калькуляторів. Калькулятори поділяються на прості та програмовані.

Прості калькулятори призначаються для проведення найпростіших обчислень (рис. 9.7). Вони можуть обробляти, враховуючи незначну інформаційну ємність запам'ятовувального пристрою, тільки обмежену множину чисел.

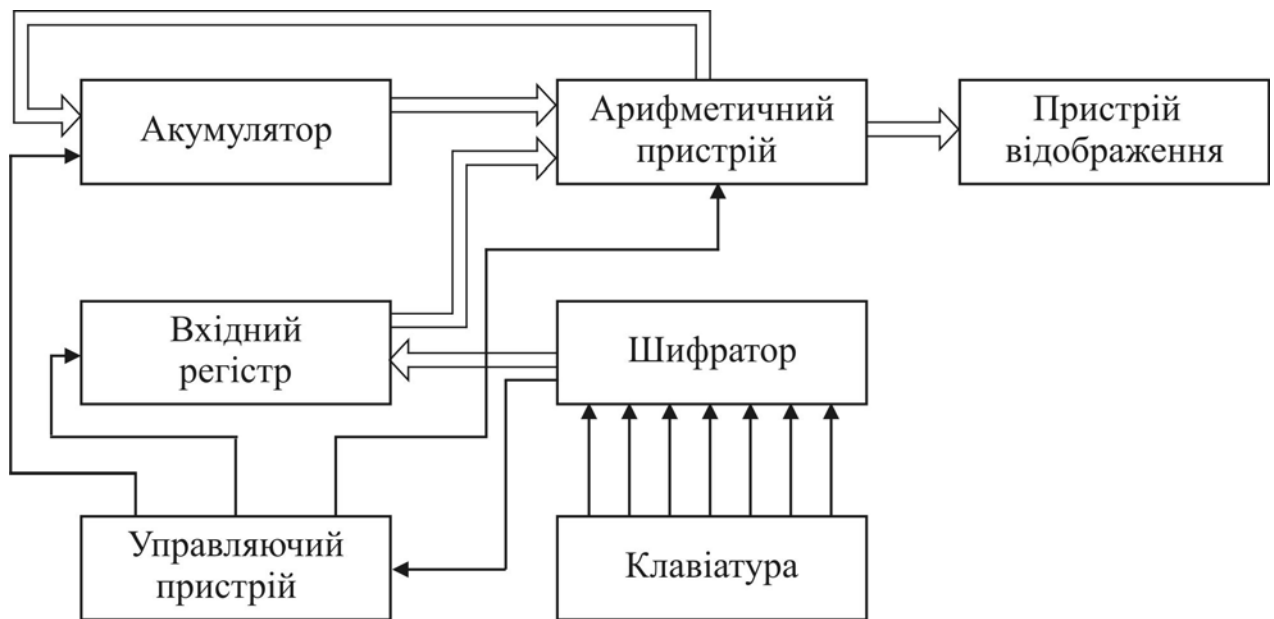


Рисунок 9.7 – Структурна схема простого калькулятора

Непрограмований простий калькулятор містить два регістри: вхідний та акумулятор. Арифметичні операції виконуються в арифметичному пристрої над числами, які надходять з цих двох регістрів. Результати зберігаються в акумуляторі, вміст якого можна подати на пристрій відображення. Клавіатура забезпечує можливість введення чисел та символів операцій, тобто команд, які повинні бути виконані над заданими числами.

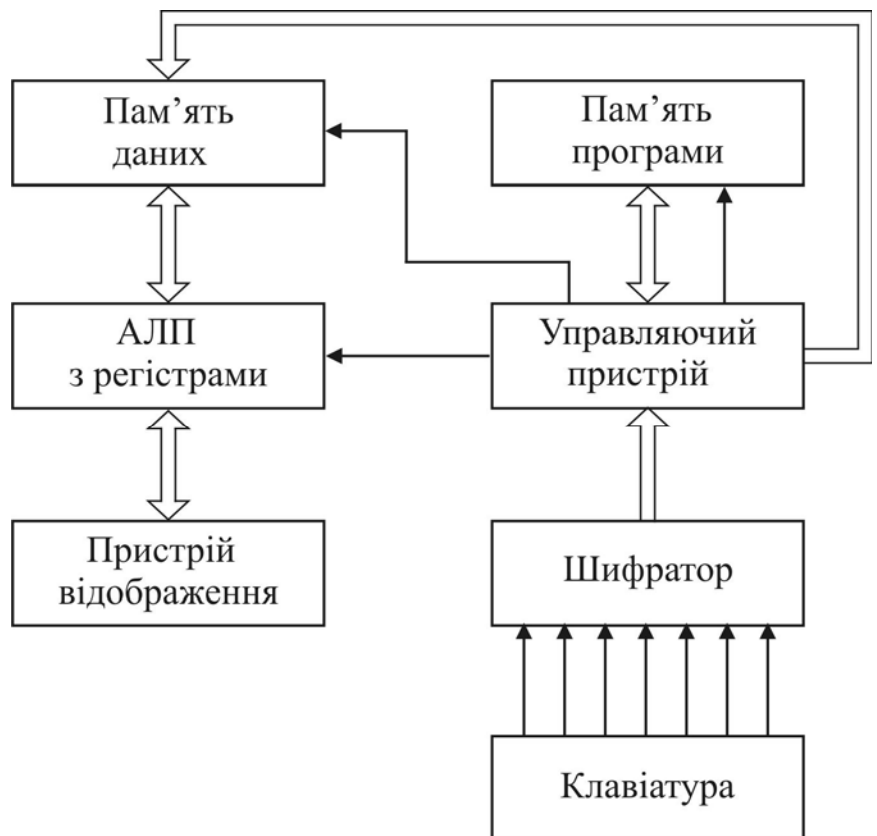


Рисунок 9.8 – Структурна схема програмованого калькулятора

Програмований калькулятор (рис. 9.8) містить дві області

пам'яті: одну – для зберігання даних (початкових і результатів проміжних обчислень), іншу – для запису програми, тобто послідовності керуючих команд або операцій, які необхідно виконати над даними. Інформаційна ємність пам'яті може бути обрана оптимальною для даної задачі.

Програма вводиться з клавіатури через шифратор і керуючий пристрій у пам'ять програми, а вхідні дані – в пам'ять даних. У режимі виконання програми, який задається з клавіатури, коди команд послідовно вибираються з пам'яті програми і надходять у керуючий пристрій. На основі цих кодів керуючий пристрій виробляє сигнали керування, які, надходячи на різні пристрої калькулятора, забезпечують виконання записаної програми.

Калькулятор може бути корисною складовою частиною керуючої або обчислювальної системи. Однак його використання обмежено діапазоном виконуваних арифметичних операцій.

МікроЕОМ виконують великий набір операцій, мають чималий комплект периферійного обладнання і тому широко використовуються в різних галузях народного господарства.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке мікропроцесори? Наведіть структурну схему і поясніть роботу мікропроцесорної системи.

2. Що таке однокристальний і багатокристальний мікропроцесор?
3. Що таке біт, розряд, машинне слово, байт?
4. Наведіть структурну схему і поясніть роботу мікропроцесора.
5. Назвіть три основні вузли мікропроцесора. Яким чином здійснюється зв'язок між ними?
6. Що таке арифметико-логічний пристрій і для чого він потрібен? Назвіть основні його операції.
7. Назвіть основні шини в мікропроцесорі і поясніть їх призначення.
8. Назвіть основні регістри в мікропроцесорі і поясніть їх призначення.
9. Що таке лічильник команд? Поясніть його роботу.
10. Що таке регістр ознак або регістр прапорців? Поясніть його роботу.
11. Що таке регістр станів? Поясніть його роботу.
12. Що таке регістри загального призначення? Поясніть їх роботу.
13. Що таке стекові регістри? Поясніть їх роботу.
14. Що таке генератор тактових імпульсів? Яке його призначення?
15. Назвіть систему команд мікропроцесора та поясніть їх призначення.
16. Наведіть і поясніть узагальнену структурну схему команди мікропроцесора.
17. Назвіть основні команди арифметичних і логічних операцій.
18. Яке призначення і принцип роботи команд пересилок?
19. Яке призначення і принцип роботи команд управління?
20. Поясніть основні принципи побудови мікропроцесорних систем.
21. Наведіть і поясніть узагальнену структурну схему мікропроцесорної системи керування
22. Що таке мікроЕОМ? Назвіть основні їх типи.
23. Наведіть структурну схему простого калькулятора та поясніть його роботу.
24. Наведіть структурну схему програмованого калькулятора та поясніть його роботу.
25. Назвіть галузі і сфери застосування мікроЕОМ, програмованого та простого калькуляторів.

РОЗДІЛ 10

ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МАШИН

Запам'ятовувальні пристрої (ЗП) електронно-обчислювальних машин призначені для зберігання, запису і видачі інформації, потрібної для розв'язання задач на ЕОМ. Такою інформацією можуть бути вхідні та вихідні дані, програми розв'язання задач, різні константи, проміжні і кінцеві результати обчислень, різного виду допоміжні матеріали тощо.

10.1. Типи запам'ятовувальних пристроїв та їх характеристики

Записувана інформація зберігається і зчитується в ЕОМ, подається у вигляді слів або складів у двійковому коді. Кожне слово або склад розташовуються у *комірці пам'яті (КП)*, яка складається з запам'ятовувальних елементів. Один запам'ятовувальний елемент може зберігати число 0 або 1. Про такий елемент кажуть, що він має ємність 1 біт. Якщо в комірці пам'яті є N запам'ятовувальних елементів, то її ємність становить N бітів. Число запам'ятовувальних елементів в КП визначає розрядність КП і розрядність слова, що записується в ній. Восьмирозрядне, або восьмибітове, слово називають *байтом*.

Операцію вилучення із ЗП слова, яке там зберігається, називають *зчитуванням* інформації, а операцію запису в комірку пам'яті ЗП нового слова – *записом* інформації. Для звернення до тієї або іншої комірки пам'яті кожна КП має свою адресу або номер. Такі ЗП називаються *адресними*. За способом доступу до необхідної КП розрізняють ЗП з послідовним, циклічним або довільним доступом.

Крім адресних, існують і безадресні запам'ятовувальні пристрої, в яких

звернення до заданих КП здійснюється за спеціальними (асоціативними) ознаками слів, що зберігаються в пам'яті ЕОМ.

Конструктивно КП з'єднуються у пристрій, який називають *блоком пам'яті* (БП). Загальна кількість КП становить *ємність ЗП*, яка виражається в бітах і визначається як добуток кількості КП на їх розрядність. Іноді ємність ЗП виражається в байтах або словах.

Під *швидкодією ЗП* розуміють час, що витрачається на одне звернення до пам'яті ЕОМ для запису або зчитування інформації. Швидкодія ЗП визначає швидкість розрахункових процесів.

Збільшення ємності ЗП супроводжується зниженням швидкодії ЕОМ. Тому ЗП будуються на ієрархічному принципі, згідно з яким пам'ять ЕОМ складається із сукупності ЗП з різною ємністю і швидкодією (рис. 10.1). Серед них можна виділити надоперативні, оперативні, постійні, зовнішні і буферні ЗП.

Надоперативні ЗП мають період звернення десяти або соті частки мікросекунди і ємність $10^2 \dots 10^5$ біт.

Оперативні ЗП (ОЗП) мають період звернення $0,5 \dots 10$ мкс і ємність $10^4 \dots 10^6$ біт. ОЗП призначені для зберігання програм обчислення і даних, які використовуються для обчислень.

Постійні ЗП (ПЗП) мають період звернення $0,1 \dots 10$ мкс і ємність $10^4 \dots 10^7$ біт. У ПЗП інформація записується при їх виготовленні і в подальшому не змінюється.

Зовнішні ЗП мають період звернення від десятків мілісекунд до десятків і сотень секунд, ємність $10^6 \dots 10^{10}$ біт. Ці ЗП призначені для зберігання великих

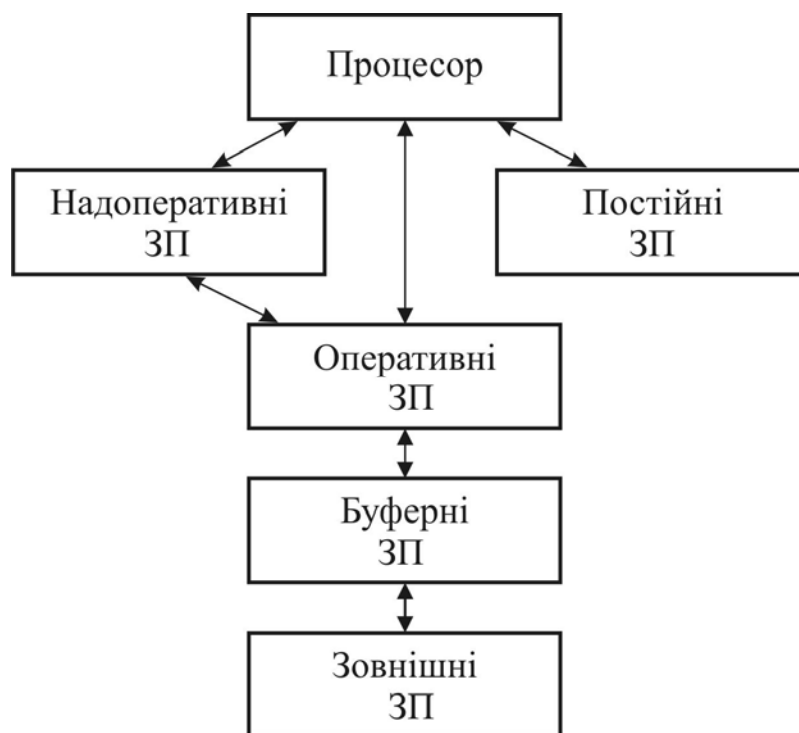


Рисунок 10.1 – Ієрархічна схема побудови пам'яті ЕОМ

масивів інформації, які безпосередньо в обчислювальному процесі не використовуються і за необхідності передаються в ОЗП через буферні ЗП.

Буферні ЗП застосовують як проміжний пристрій пам'яті, через який здійснюється обмін інформацією між ОЗП і зовнішнім ЗП. Період звернення – від одиниць мікросекунд до десятків і сотень мілісекунд, ємність – $10^5 \dots 10^8$ біт.

Для побудови ЗП слід використовувати середовище, елементи якого мають два або більше станів стійкої рівноваги. В ЕОМ першого і другого покоління у ЗП широко застосовувались феритові осердя. Для створення блоків пам'яті на феритових осердях були потрібні складні та трудомісткі операції з прошивки осердь.

Головним недоліком ЗП на феритових осердях є значний час звернення, який перевищує 0,5 мкс, що обмежує швидкодію ЕОМ. З розвитком мікроелектроніки в якості запам'ятовувальних елементів почали використовуватись інтегральні біполярні та МДН-транзистори, транзистори з індукованим каналом, прилади з зарядовим зв'язком.

10.1.1. Запам'ятовувальні елементи на біполярних структурах

Як найпростіший запам'ятовувальний елемент можна використовувати *RS*-тригер (рис. 10.2). Запам'ятовувальний елемент побудований на базі багатомітерних транзисторів *VT1* або *VT2* (див. рис. 6.6). Керування роботою такого тригера відбувається за допомогою потенціалів U_a , $U_{оп}$ і U_p , які подаються в адресну A_i та розрядні P_i і P_j шини. Певні співвідношення між потенціалами U_a , $U_{оп}$ і U_p забезпечують зберігання, запис або зчитування інформації.

У режимі зберігання інформації потенціали адресної та розрядних шин повинні задовольняти співвідношенню $U_a < (U_{оп} = U_p)$. При цьому тригер знаходиться в одному зі стійких станів, коли один з транзисторів (*VT1* або *VT2*) відкритий, а інший – закритий. Через емітер *1* відкритого транзистора протікає струм, а

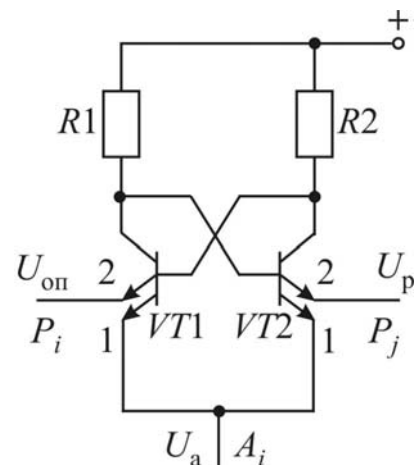


Рисунок 10.2 – Схема інтегрального запам'ятовувального елемента на біполярних структурах

струми емітерів 2 обох транзисторів відсутні. Будемо вважати, що тригер знаходиться в одиничному стані, у якому транзистор $VT2$ відкритий, а транзистор $VT1$ – закритий.

Зчитування одиниці з тригера полягає в пропусканні струму через регістрову шину P_j . При цьому стан тригера повинен залишитись попереднім. Унаслідок цього для зчитування одиниці потрібно переключити емітери відкритого транзистора $VT2$, що досягається збільшенням потенціалу емітера 1 у порівнянні з потенціалом емітера 2 ($U_a > U_p$). Для того щоб при цьому зберегти одиничний стан тригера, необхідно зберегти рівність потенціалів емітерів 2 обох транзисторів. Таким чином, для зчитування інформації з тригера має бути виконана умова $U_a > (U_{оп} = U_p)$.

Для запису одиниці слід забезпечити умови: $U_{оп} > U_p$ та $U_a > U_{оп}$. Якщо при цьому тригер знаходиться в одиничному стані, то його стан не зміниться, тільки на момент запису відбудеться переключення емітерів 1 і 2 відкритого транзистора $VT2$. Якщо ж перед записом одиниці тригер знаходиться в нульовому стані ($VT1$ – відкритий, а $VT2$ – закритий), то при одночасному виконанні умов $U_{оп} > U_p$ і $U_a > U_{оп}$ відбудеться його переключення в одиничний стан.

10.1.2. Запам'ятовувальні елементи на МДН-транзисторах

На рис.10.3 показано схему запам'ятовувального елемента на інтегральному тригері, утвореному МДН-транзисторами з каналами p -типу. Активними елементами тригера є транзистори $VT1$ і $VT2$, динамічними навантаженнями яких служать транзистори $VT3$ і $VT4$. Керування тригером при записуванні та зчитуванні інформації здійснюється через транзистори $VT5$ і $VT6$.

У режимі зберігання інформації потенціали розрядних шин P^0 і P^1 дорівнюють нулю, а потенціал шини A дорівнює напрузі живлення $+U_{п}$. Внаслідок цього напруги на

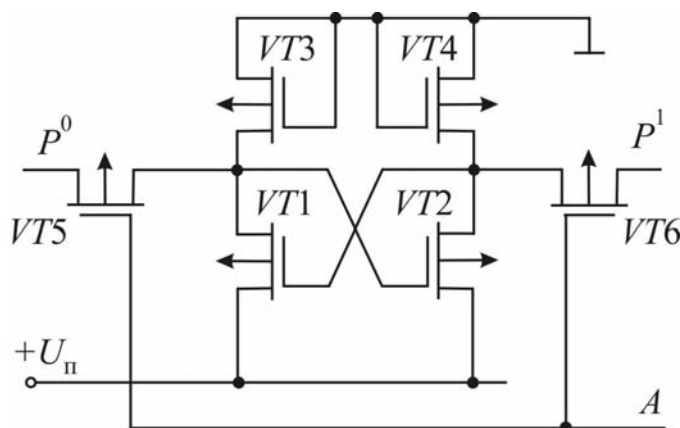


Рисунок 10.3 – Схема інтегрального запам'ятовувального елемента на МДН-транзисторах

затворах $U_{зi}$ транзисторів $VT5$ і $VT6$ мають знак плюс і обидва транзистори закриті. Тригер знаходиться в одному зі стійких станів. Припустимо, що тригер знаходиться у стані зберігання одиниці, при якому транзистор $VT1$ закритий, а транзистор $VT2$ – відкритий. При цьому потенціал витоку закритого транзистора $VT1$ близький до нуля, а відкритого транзистора $VT2$ близький до $+U_{п}$.

Для зчитування записаної інформації потенціал адресної шини A зменшують до нуля. У результаті відкривається транзистор $VT6$, оскільки напруга $U_{зi}$ цього транзистора стає негативною і за абсолютним значенням більше граничної. Внаслідок цього в розрядній шині P^1 з'являється високий потенціал, близький до потенціалу витоку транзистора $VT2$. Транзистор $VT5$ при цьому залишається закритим, оскільки для нього $U_{зi} \approx 0$, і в розрядній шині P^0 зберігається нульовий потенціал.

При записуванні інформації у тригер потенціал шини A також зменшується до нуля, а зміни потенціалів розрядних шин P^0 і P^1 залежать від записуваної інформації. Наприклад, якщо у тригер необхідно записати нуль, то потенціал розрядної шини P^1 зберігається нульовим, а потенціал розрядної шини P^0 збільшується до $+U_{п}$. В результаті відкривається транзистор $VT1$ і відбувається збільшення потенціалу витоку цього транзистора, яке передається на затвор транзистора $VT2$. Внаслідок цього транзистор $VT2$ закривається. При записуванні одиниці потенціал розрядної шини P^0 зберігається нульовим, а потенціал шини P^1 збільшується до $+U_{п}$. Транзистор $VT6$ відкривається, що викликає відпирання транзистора $VT2$ і запирання транзистора $VT1$.

Розглянутий запам'ятовувальний елемент на МДН-транзисторах належить до класу статичних запам'ятовувальних пристроїв. Існують також запам'ятовувальні елементи динамічних ЗП, у яких інформація запам'ятовується на ємності затвора МДН-транзистора.

ЗП на МДН-транзисторах мають більший час звернення, ніж ЗП на біполярних структурах, проте вони характеризуються меншою споживаною потужністю і більшою щільністю розміщення інформації.

10.1.3. Запам'ятовувальні пристрої на базі функціональної електроніки

Розглянуті вище запам'ятовувальні елементи є елементами інтегральної мікроелектроніки, схемотехнічний шлях розвитку яких пов'язаний з виготовленням на одному кристалі напівпровідника великої кількості електронних приладів, з'єднань між ними та ізолюючих шарів.

В останні роки проводяться дослідження нових фізичних принципів і ефектів з метою створення принципово нових електронних пристроїв. Цей напрям отримав назву *функціональної електроніки*. Робота приладів функціональної електроніки заснована на використанні для обробки і зберігання інформації динамічних неоднорідностей в однорідному об'ємі твердого тіла – гановських електричних доменів, циліндричних магнітних доменів (ЦМД), пакетів зарядів у приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), поверхневих та об'ємних акустичних хвиль тощо. Тривалість існування динамічних неоднорідностей може бути короткочасною (в ПЗЗ) або довготривалою (в приладах на ЦМД). Такі неоднорідності утворюються за допомогою фізичних методів та зникають при знятті зовнішнього фактора збудження. Динамічні неоднорідності мають здатність керованого переносу по об'єму тіла та можуть здійснювати перенесення сигналу як в аналоговій, так і в дискретній формах.

Запам'ятовувальні пристрої на приладах із зарядовим зв'язком. У приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) в якості динамічних неоднорідностей використовуються пакети зарядів неосновних носіїв, які утворюються біля поверхні напівпровідника під дією зовнішнього електричного поля.

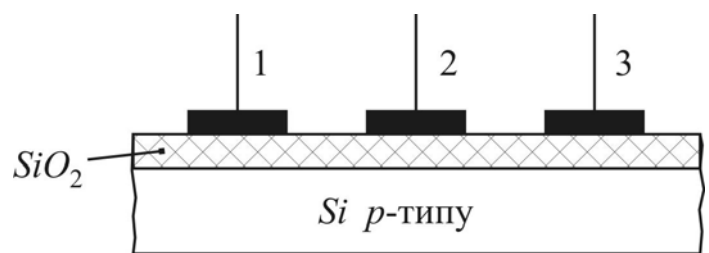


Рисунок 10.4 – Структура ПЗЗ

Структура ПЗЗ являє собою ланцюжок МДН-конденсаторів (рис. 10.4). Якщо на один з електродів (1, 2 або 3) подати позитивну напругу, то основні носії – дірки – перейдуть у глибину основи і під цим електродом утвориться збіднена на основні носії ділянка, яка має назву *потенціальної ями*. В цю поте-

нціальну яму зберуться неосновні носії – електрони, які утворять у ній деякий заряд (зарядовий пакет). Якщо тепер подати напругу на другий електрод так, що $U_2 > U_1$, то під цим електродом утвориться більш глибока потенціальна яма, в яку перейде заряд неосновних носіїв з першої потенціальної ями. Відстані між електродами мають бути дуже малими, щоб зарядові пакети перетікали з однієї потенціальної ями в іншу без втрат на дифузію.

На рис. 10.5 наведено структуру тритактного зсувного регістра на ПЗЗ.

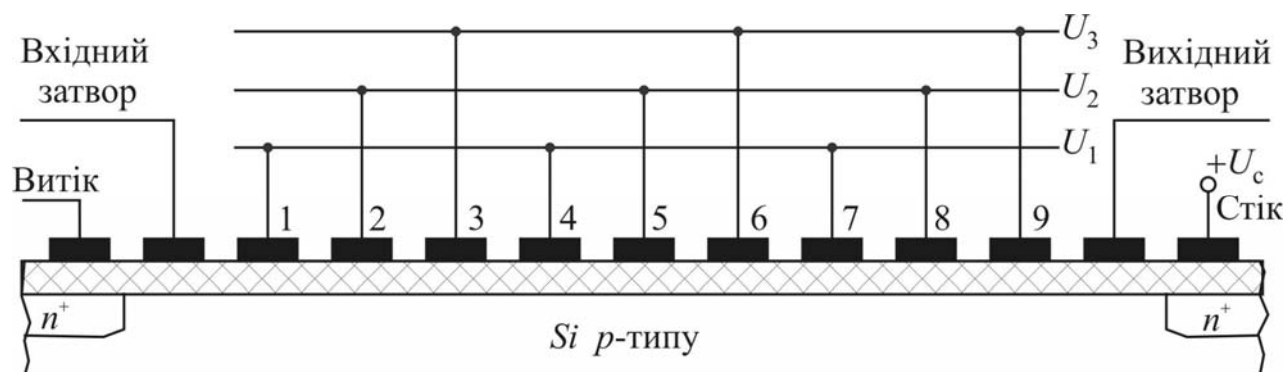


Рисунок 10.5 – Структура зсувного регістра на ПЗЗ

Він являє собою МДН-транзистор з великою кількістю затворів, у якому можна виділити три секції. Перша секція – вхідна – вміщує у собі витік та вхідний затвор. Всі інші затвори, які підключені до шин U_1 , U_2 і U_3 , утворюють другу секцію, яка називається секцією переносу. Третя секція – вихідна – складається з вихідного затвору і стоку. Якщо на вхідний затвор подати напругу, що перевищує критичне значення $U_{вх} > U_{кр}$, і достатньо велику напругу на перший затвор секції переносу, то під вхідним затвором утворюється канал n -типу, а під першим затвором секції переносу виникає потенціальна яма. У цю яму з витоку по каналу перейде частина електронів, які утворять у ній пакет носіїв заряду.

У наступному такті знімається напруга з вхідного затвору. Провідниковий канал між витоком і першою потенціальною ямою зникає, а заряд, що залишився в потенціальній ямі, зберігається. Це є рівнозначним запису в дану комірку логічної одиниці. Відсутність заряду в потенціальній ямі буде відповідати логічному нулю.

Якщо після запису логічної одиниці в першу потенціальну яму подати напругу на другий затвор секції переносу $U_2 > U_1$, то під другим затвором буде

утворена більш глибока потенціальна яма, в яку перейдуть електрони з першої потенціальної ями. Для подальшого переміщення електронів у бік стоку напругу U_1 зменшують до нуля і подають напругу на третій затвор $U_3 > U_2$. При цьому електрони з другої потенціальної ями перейдуть у третю, яка утворена під цим затвором. Таким чином, здійснюючи комутацію різними за значеннями напругами U_1 , U_2 і U_3 , можна пересувати пакет неосновних носіїв заряду від витоку до стоку.

Після перенесення заряду в потенціальну яму під дев'ятим затвором секції переносу подається напруга на вихідний затвор $U_{\text{вих}} > U_{\text{пор}}$. Між стоком та останньою потенціальною ямою утворюється канал n -типу, яким електрони з потенціальної ями почнуть переходити в область стоку, створюючи в колі стоку електричний струм. Якщо ж у потенціальну яму було записано логічний нуль, то струм у колі стоку не з'явиться або буде дуже малим.

Для керування роботою пристроїв на ПЗЗ необхідні генератори, що формують синхронізовані між собою періодичні послідовності тактових імпульсів.

Запам'ятовувальні пристрої на циліндричних магнітних доменах. Циліндричні магнітні домени (ЦМД) являють собою малі області, утворені в магнітних плівках. Намагніченість цих областей протилежна намагніченості плівки (рис. 10.6).

Розміри ЦМД можуть бути від одиниць до десятків мікрометрів. Енергія ЦМД тим менша, чим менше значення магнітного поля. Тому вони намагаються перейти з області сильних магнітних полів в область слабших полів, які називаються магнітними енергетичними ямами. На цій властивості засновано керування рухом ЦМД. Зміна магнітного поля у плівці, тобто переміщення магнітних ям, здійснюється за допомогою спеціального обертального магнітного поля.

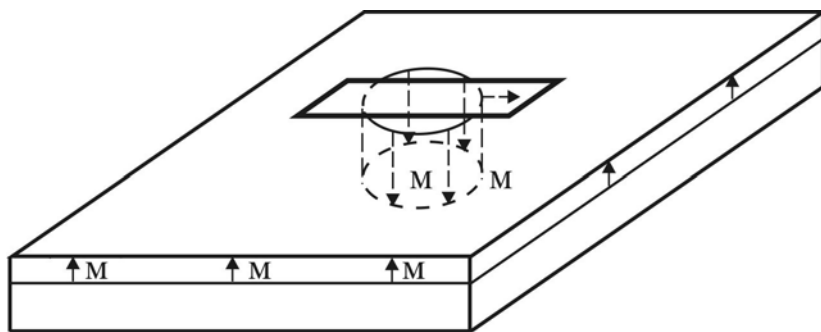


Рисунок 10.6 – Запам'ятовувальний елемент на ЦМД

Пам'ять, що утворена на основі ЦМД, має високу швидкодію (тривалість

циклу $5 \cdot 10^{-7}$ с, зчитування – $1 \cdot 10^{-7}$ с, запису – $1,5 \cdot 10^{-4}$ с) і стійкість до радіації. ЦМД дозволяє здійснювати багаторазовий перезапис інформації, а записана інформація зберігається і при відключенні джерел живлення.

10.2. Пристрої зберігання інформації

Розрізняють пристрої зберігання інформації, реалізовані у вигляді електронних схем, і накопичувачі інформації, за допомогою яких дані записуються на будь-який носій, наприклад магнітний або оптичний. Пристрої, що являють собою електронні схеми, відрізняються швидким доступом до даних, але не дозволяють зберігати великі об'єми інформації. Накопичувачі інформації, навпаки, дають можливість зберігати великі об'єми інформації, але час її запису і зчитування триваліший.

10.2.1. Магнітні накопичувачі

Накопичувачі на гнучких магнітних дисках. Гнучкий диск (англ. floppy disk), або дискета, – носій невеликого об'єму інформації, який являє собою гнучкий пластиковий диск у захисній оболонці. Використовується для перенесення даних з одного комп'ютера на інший і для розповсюдження програмного забезпечення.

Дискета складається з круглої полімерної підкладки, покритої з обох боків магнітним окислом і поміщеної в пластикову упаковку, на внутрішню поверхню якої нанесено очищувальне покриття. В упаковці зроблено з двох боків радіальні прорізи, через які головки зчитування/запису накопичувача отримують доступ до диска. Спосіб запису двійкової інформації на магнітному середовищі називається *магнітним кодуванням*. Воно полягає у тому, що магнітні домени в середовищі вибудовуються уздовж доріжок у напрямі прикладеного магнітного поля своїми північними і південними полюсами. зазвичай встановлюється однозначна відповідність між двійковою інформацією та орієнтацією магнітних доменів.

Інформація записується по концентричних доріжках (треках), які діляться на сектори. Кількість доріжок і секторів залежить від типу і формату дискети.

Сектор зберігає мінімальну порцію інформації, яка може бути записана на диск або зчитана з нього. Ємність сектора є постійною і становить 512 байтів (рис. 10.7). На разі найбільше розповсюдження мають дискети з наступними характеристиками: діаметр 3,5 дюйма (89 мм), ємність 1,44 Мбайт, число доріжок 80, кількість секторів на доріжках 18. Дискета встановлюється у накопичувач на гнучких магнітних дисках (англ. floppy-disk drive), автоматично в ньому фіксується, після чого механізм накопичувача розкручується до частоти обертання 360 хв^{-1} . В накопичувачі обертається сама дискета, магнітні головки залишаються нерухомими. Дискета обертається тільки при звертанні до неї.

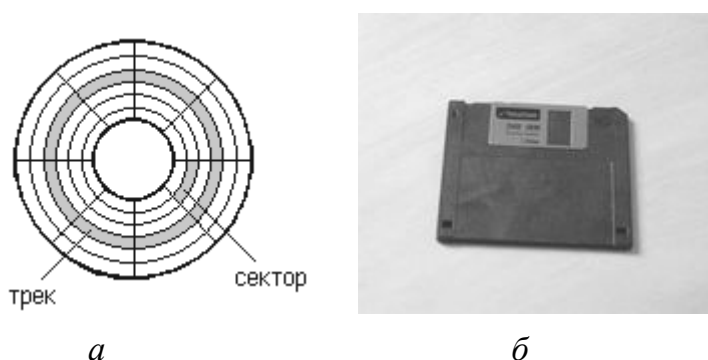


Рисунок 10.7 – Поверхня магнітного диска (а) і зовнішній вигляд дискети 3½" (б)

Жорсткий диск. Жорсткий диск (англ. hard disk drive, HDD, інші назви: вінчестер, накопичувач на жорстких магнітних дисках – НЖМД) – пристрій для збереження інформації – програм і даних. Свою назву «вінчестер» жорсткий диск отримав завдяки фірмі ІВМ, яка в 1973 випустила жорсткий диск моделі 3340, вперше об'єднавши в одному нероз'ємному корпусі диски і зчитувальні головки. При його розробці інженери використали коротку внутрішню назву «30-30», що означало два модулі по 30 Мб кожний. Kenneth E. Naughton, керівник проекту, за співзвучністю з позначенням гвинтівки «30-30» компанії «Winchester» запропонував назвати цей диск «вінчестером».

На відміну від «гнучкого» диска (дискети) інформація в жорсткому диску записується на алюмінієві або скляні пластини – платери, обидві поверхні яких покриті шаром феромагнітного матеріалу. Зчитувальні головки в робочому режимі не торкаються поверхні пластин завдяки тонкому прошарку повітря, яке утворюється при швидкому обертанні дисків (рис. 10.8).

Як і у дискети, робочі поверхні платерів розділені на кільцеві концентричні доріжки, а доріжки – на сектори. Головки зчитування-запису разом з їх несучою конструкцією та дисками вміщено у герметично закритий корпус, який називається *модулем даних*. При установці модуля даних на дисковод він автоматично з'єднується з системою, яка підкачує очищене охолоджене повітря. Поверхня платера має магнітне покриття товщиною всього лише в 1,1 мкм, а також шар мастила для захисту головки від пошкодження при опусканні і підніманні на ходу.

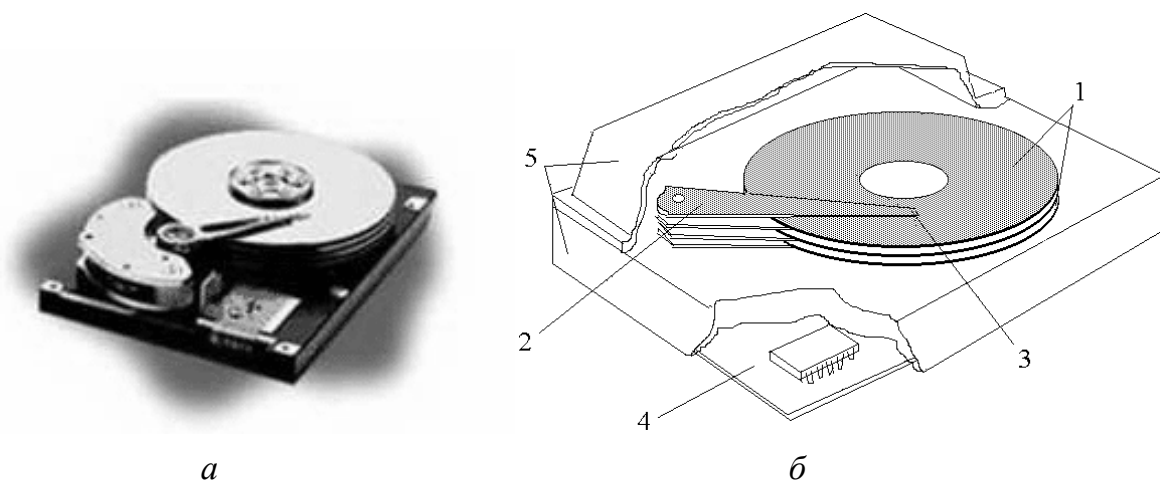


Рисунок 10.8 – Зовнішній вигляд (а) та будова (б) жорсткого диска зі знятою кришкою корпусу: 1 – пластини; 2 – пристрій позиціонування; 3 – головки; 4 – плата контролера; 5 – корпус

При обертанні платера над ним утвориться повітряний шар, який забезпечує повітряну подушку для зависання головки на висоті 0,5 мкм над поверхнею диска. Накопичувач на жорстких магнітних дисках також містить позиціюючий пристрій, корпус і контролер. Позиціюючий пристрій забезпечує переміщення головок до потрібного місця на поверхні пластин. Корпус служить для кріплення інших елементів конструкції, а також для захисту пластин і головок від механічних ушкоджень і пилу. Контролер керує усіма електричними та електромеханічними вузлами накопичувача та забезпечує передачу інформації з комп'ютера та назад.

Жорсткі диски мають дуже велику ємність: від 10 до 100 Гбайт. У сучасних моделей швидкість шпинделя (обертаючого вала) зазвичай становить 7200 об/хв, середній час пошуку даних 9 мс, середня швидкість передачі даних до 60

Мбайт/с. На відміну від дискети, жорсткий диск обертається безперервно.

10.2.2. Технології запису даних на магнітні накопичувачі

Метод паралельного запису. На даний момент метод паралельного запису являє собою найбільш поширену технологію запису інформації на НЖМД (рис. 10.9, а).

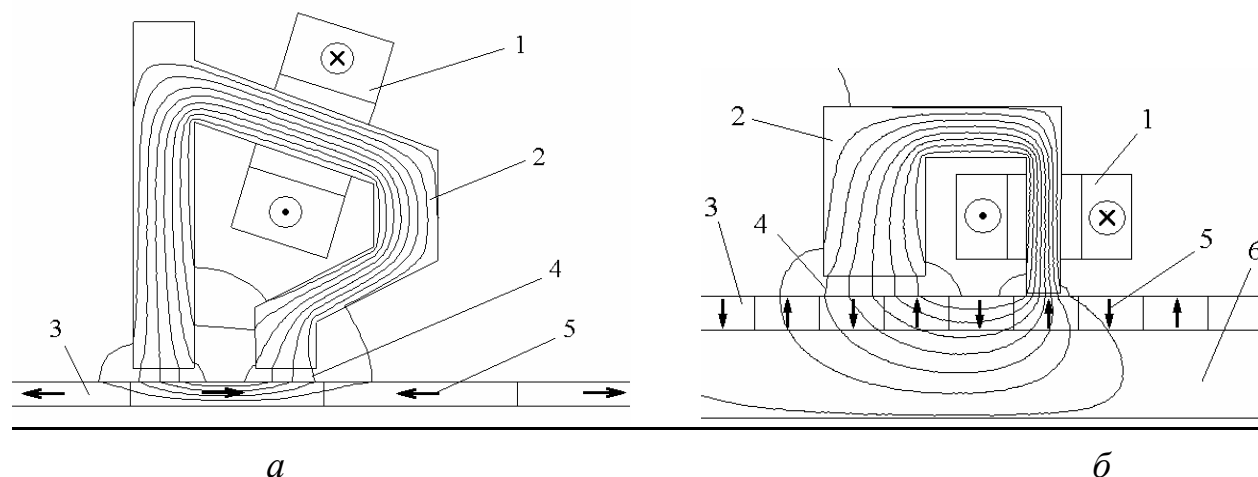


Рисунок 10.9 – Паралельний (а) і перпендикулярний (б) запис інформації:
1 – котушка; 2 – сталеве осердя; 3 – магнітний шар; 4 – силові лінії магнітного поля; 5 – намагніченість домену; 6 – ферромагнітна підкладка

Біти інформації записуються за допомогою маленької головки, яка, проходячи над поверхнею обертового диска, намагнічує мільярди горизонтальних дискретних областей – доменів. Кожна з цих областей є логічним нулем або одиницею, залежно від намагніченості. На сьогоднішній день домени стають настільки малими, що гостро постає питання про їхню стабільність. Подальший розвиток цієї технології під питанням, багато фахівців вважають цей метод таким, що вичерпав себе. Щільність запису при використанні цього методу на даний момент дорівнює 150 Гбіт/дюйм² (23 Гбіт/см²).

Метод перпендикулярного запису. Для того щоб вирішити проблему з подальшим збільшенням щільності запису, багато виробників розглядають технологію, за якою біти інформації зберігалися б у вертикальних доменах (рис. 10.9, б). Це дозволить використати більш сильні магнітні поля і знизити площу

матеріалу, необхідну для запису одного біта. Істотно більшого виграшу обіцяє застосування перпендикулярного запису, для якого придатні магнітні домени з перпендикулярним (а не паралельним поверхні диска) магнітним полем. Це дозволяє зменшити поздовжні розміри домену, трохи збільшивши при цьому його висоту. Крім того, сусідні інвертні біти (1 і 0) уже не звернені один на одного однойменними полюсами, які, як відомо, відштовхуються. Отже, це дає можливість зменшити ще й розмір міждоменого простору порівняно з класичною технологією запису, що, у свою чергу, дозволить ще збільшити ємність вінчестерів. Записуюча головка повинна мати всього один основний полюс осердя, другий полюс буде допоміжним.

Основний полюс осердя створює сильне магнітне поле, лінії якого виходять перпендикулярно магнітній поверхні диска; проходячи через спеціальний внутрішній магнітний шар, вони замикаються на широкому допоміжному полюсі осердя. Природно, найсильнішим буде поле поблизу основного полюса – там і відбудуватиметься перемагнічування домену; біля широкого допоміжного полюса поле буде занадто слабким, щоб впливати на поверхню диска, і вона при запису залишиться без змін.

Щільність запису експериментального прототипу 200 Гбіт/дюйм² (31 Гбіт/см²), в подальшому планується довести щільність до 400...500 Гбіт/дюйм² (60...75 Гбіт/см²).

Метод теплового магнітного запису. Метод теплового магнітного запису (*Heat assisted magnetic recording – HAMR*) на разі активно розробляється. Цей метод ґрунтується на точковому підігріві диска, внаслідок чого головка намагнічує дуже маленькі ділянки його поверхні. Особливість HAMR полягає у використанні магнітних матеріалів з високою коерцитивною силою, які забезпечують високу термостабільність записаних ділянок поверхні. Для запису інформації магнітний домен попередньо розігрівається за допомогою сфокусованого лазерного пучка. Діаметр пучка і визначає розмір ділянки, яка відповідає одному біту інформації. При підвищенні температури домену відбувається суттєва зміна його магнітних властивостей (зменшується коерцитивна сила), і, таким чином, нагріті ділянки стають здатними до намагнічування. Після того як

диск охолоджується, намагніченість «закріплюється».

10.2.3. Оптичні накопичувачі

Компакт-диск («CD», «CD-ROM») – оптичний носій у вигляді диска з отвором у центрі, інформація з якого зчитується за допомогою лазера. Абревіатура «CD-ROM» означає «Compact Disk Read Only Memory» і позначає компакт-диск як носій інформації широкого застосування. CD-ROM являє собою прозорий полімерний диск діаметром 12 см і товщиною 1,2 мм, на один бік якого напилено відбиваючий світло шар алюмінію, захищений від ушкоджень шаром прозорого лаку. Товщина напилення становить декілька мікронів.

На відміну від магнітних дисків, компакт-диски мають не безліч кільцевих доріжок, а одну – спіральну. У зв'язку з цим кутова швидкість обертання диска лінійно зменшується в процесі просування читаючої лазерної головки до краю диска.

Інформація на диску записується у вигляді спіральної доріжки так званих пітів (поглиблень), видавлених на полікарбонатному шарі. Кожний піт має приблизно 125 нм у глибину і 500 нм у ширину. Довжина піта варіюється від 850 нм до 3,5 мкм. Відстань між сусідніми доріжками спіралі – 1,5 мкм. Дані з диска читаються за допомогою лазерного променя з довжиною хвилі 780 нм, який просвічує полікарбонатний шар, відбивається від алюмінієвого і зчитується фотодіодом. Промінь лазера утворює на відбивальному шарі пляму діаметром приблизно 1,5 мкм. Оскільки диск читається з нижнього боку, кожен піт виглядає для лазера як підвищення. Місця, де такі підвищення відсутні, називаються площадками.

Для роботи з CD-ROM до комп'ютера підключають накопичувач CD-ROM, який перетворює послідовність поглиблень і виступів на поверхні CD-ROM у послідовність двійкових сигналів. Для цього використовується зчитувальна головка з мікролазером і фотодіодом. Глибина западин на поверхні диска дорівнює чверті довжини хвилі лазерного світла. Якщо у двох послідовних тактах зчитування інформації промінь світла лазерної головки переходить з виступу на дно западини або назад, різниця довжин шляхів світла в цих тактах змінюється на півхвилю, що викликає посилення або послаблення прямого і відбитого від

диска променів світла, які спільно потрапляють на фотодіод.

Якщо в послідовних тактах зчитування довжина шляху світла не змінюється, то і стан фотодіода залишається незмінним. У результаті струм через фотодіод утворює послідовність двійкових електричних сигналів, що відповідають сполученню западин і виступів на доріжці (рис. 10.10).

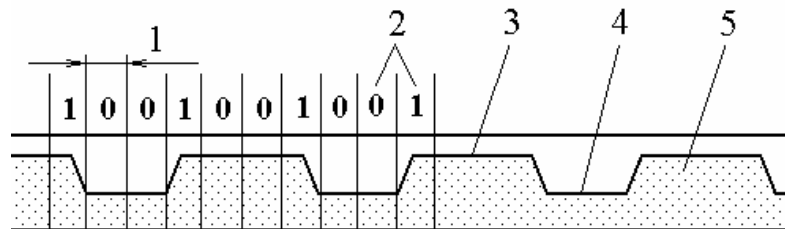


Рисунок 10.10 – Структура доріжки CD-ROM: 1 – довжина області даних (300 нм); 2 – біти інформації; 3 – виступ; 4 – западина; 5 – профіль доріжки

CD-ROM мають високу питому інформаційну ємність. Зчитування інформації з CD-ROM відбувається з достатньо високою швидкістю, хоча і помітно меншою, ніж швидкість роботи накопичувачів на жорсткому диску. CD-ROM є простими і зручними в роботі, мають низьку питому вартість зберігання даних, практично не зношуються, не можуть бути уражені вірусами, з них неможливо випадково стерти інформацію.

Компакт-диск CD-R для запису. CD-R (Compact Disc-Recordable) – різновид компакт-диску (CD), розроблений компаніями Philips і Sony для одноразового запису інформації.

Полікарбонатний диск має спіральну доріжку для напрямку променя лазера при записуванні та зчитуванні інформації. Диск з боку, де знаходиться ця спіральна доріжка, покритий записуючим шаром, котрий складається з дуже тонкого шару органічного барвника і зверху нанесеного відбивального шару зі срібла, його сплаву або золота. Цей відбивальний шар покривається захисним фото-полімеризованим лаком і доводиться до тверднення ультрафіолетовим світлом. І вже на цей захисний шар наносяться різні надписи фарбою.

Чисті CD-R диски мають службову доріжку з записаними даними. Ця доріжка містить часові мітки і передбачає, що промінь лазера робить записування

по спіральній доріжці, як і на звичайних компакт-дисках. Замість друкування пітів – фізичних поглиблень у матеріалі диска, як у випадку CD, у разі CD-R дані записуються на диск променем лазера підвищеної потужності, щоб фізично «пропалити» органічний барвник записуючого шару. Коли барвник нагрівається вище визначеної температури, він руйнується і змінює відбивні властивості – темніє. Таким чином, при записуванні, керуючи потужністю лазера, на записуючому шарі отримують чергування темних і світлих плям, котрі при читанні інтерпретуються як піти.

При читанні лазер має значно меншу потужність, ніж при записуванні, і не руйнує барвник записуючого шару.

Відбитий від відбивального шару промінь потрапляє на фотодіод, а якщо промінь потрапляє на темну – «пропалену» – ділянку, то промінь майже не проходить крізь нього до відбивального шару і фотодіод реєструє послаблення світлового потоку. Під час читання диск у приводі крутиться на шпинделі, а читаючий промінь залишається нерухомим і спрямовується слідкуючою системою на доріжку з даними. Світлі і темні ділянки доріжки, що чергуються, породжують зміну світлового потоку відбитого променю і переводяться в зміну електричного сигналу, який далі і перетворюється в біти інформації електричною системою привода – «декодується».

Пропалювання записуючого шару є необоротним хімічним процесом, тобто одноразовим. Тому записану на CD-R інформацію не можна стерти, але можна записувати частинами, які називають сесіями.

Компакт-диск CD-RW для перезапису. CD-RW (Compact Disc ReWritable) дозволяє не тільки записувати інформацію, але і багаторазово стерти вже записані дані. У компакт-диску CD-RW записуючий шар виготовляється зі спеціального сплаву, який можна нагріванням приводити в два різних стійких агрегатних стани – аморфне та кристалічне. Цей сплав зазвичай виготовляється зі срібла (Ag), індію (In), сурми (Sb) і телуру (Te). При запису (або стиранні) промінь лазера нагріває ділянку доріжки і переводить її в один з стійких агрегатних станів, які характеризуються різним ступенем прозорості. Читаючий промінь лазера має меншу потужність і не змінює стан записуючого шару, а ді-

лянки з різною прозорістю, що чергуються, формують картину, аналогічну пітам і площадкам звичайних штампованих CD.

10.2.4. Флеш-пам'ять

Назву Flash вперше застосувала компанія Toshiba у 1984 р. для опису своїх нових мікросхем, у яких доступ до даних здійснюється «in a flash», тобто швидко, миттєво. Флеш являє собою твердотільний напівпровідниковий пристрій, який не потребує додаткової енергії для збереження даних. Таку пам'ять прийнято називати енергонезалежною. Дані з флеш-носія можна скільки завгодно раз зчитувати й обмежене число раз перезаписати. Останнє пов'язано з тим, що перезапис йде через стирання, яке призводить до зносу мікросхеми. У флеш-накопичувачах немає рухомих частин. Це істотно знизило споживання енергії при записуванні, а також у 5–10 разів порівняно з жорсткими дисками збільшило механічне навантаження, яке здатен витримувати пристрій пам'яті. Завдяки компактним розмірам, високому рівню надійності і низькому енергоспоживанню твердотільні накопичувачі активно використовуються у сучасних портативних пристроях.

Розроблена компанією Toshiba мікросхема отримала назву NAND від застосованої логічної схеми NOT AND («НІ-І»). Пізніше компанія Intel випустила свій варіант флеш-пам'яті NOR (NOT OR, «НІ-АБО»). Базовим елементом цих схем є флеш-комірка, яка складається з польового двохзатворного транзистора (рис. 10.11). У спеціальній електрично ізольованій області знаходяться два затвори – керуючий (control) і плаваючий (floating). На підкладці розташовано витік і стік. Одна комірка флеш-пам'яті містить один транзистор, який у найпростішому випадку зберігає один біт інформації.

Діапазон заряду до 5000 електронів на плаваючому затворі відповідає

логічній одиниці, вище 30 тис. – логічному нулю. Наявність або відсутність за-

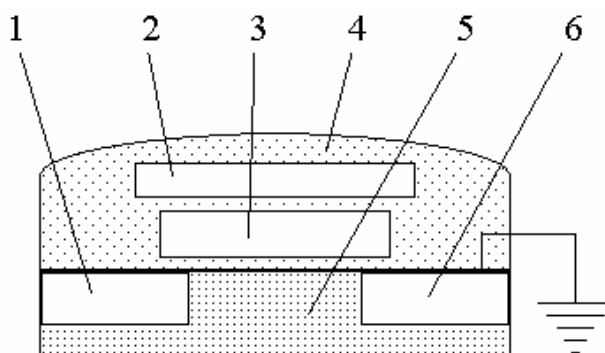


Рисунок 10.11 – Схема комірки флеш-пам'яті: 1 – стік; 2 – керуючий затвор; 3 – плаваючий затвор; 4 – діелектрик; 5 – підкладка; 6 – витік

ряду на плаваючому затворі визначає характер інформації, що зберігається в комірці, тобто плаваючий затвор є програмуєчим елементом комірки.

Розпізнавання стану плаваючого затвора відбувається за допомогою вимірювання граничної напруги транзистора. Процес запису інформації для комірок NOR і NAND різний. У комірках NOR запис здійснюється *методом інжекції «гарячих» електронів* (вони мають енергію, достатню для подолання потенціального бар'єру, що створюється перед плаваючим затвором). Через вплив сигналу на керуючий затвор унаслідок зміненої різниці потенціалів між стоком і виток, виникає електричний струм, на плаваючий затвор впорскуються електрони, змінюючи його заряд. У комірках NAND запис здійснюється *методом тунелювання електронів*.

Метод тунелювання, або тунельний ефект, відноситься до квантових явищ. Інжекцію і тунелювання можна образно описати наступним чином. Уявіть собі, що потенціальний бар'єр – це паркан, який можна або перестрибнути, або знайти якийсь прохід крізь нього. Щоб перестрибнути (впорскнути), потрібна додаткова енергія, а для того щоб пройти наскрізь (тунелювати), необхідні в тому чи іншому вигляді відповідні проходи. Класична фізика таку можливість заперечує, але електрони за певних умов можуть пройти крізь потенціальний бар'єр, навіть якщо їх повна енергія менша за необхідну для його перестрибування, тобто вони не перескакують, а просочуються крізь нього (див. рис. 10.12).

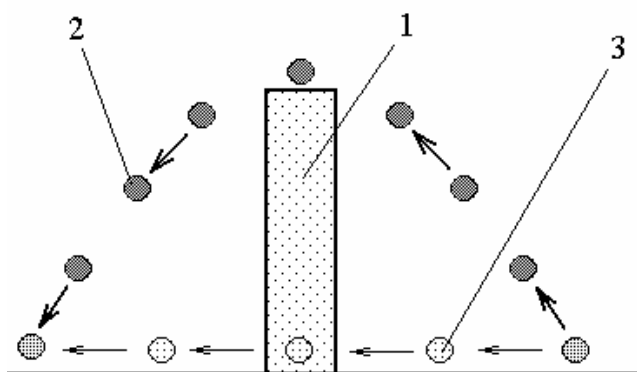


Рисунок 10.12 – Схема тунелювання і впорскування електронів:
1 – потенціальний бар'єр; 2 – електрони, що впорскуються;
3 – електрони, що тунелюють

Процес стирання інформації в комірках NOR і NAND заснований на тунельному ефекті. На керуючий затвор подається висока напруга протилежної по-

лярності (зворотної тій, що була), й електрони з плаваючого затвора переходять на витік.

Схема організації з'єднань між комірками (тобто архітектура) флеш-пам'яті у NOR і NAND різна. У мікросхемах NOR застосовується паралельний інтерфейс – до кожного транзистора підводиться індивідуальний контакт, а в NAND інтерфейс є послідовним: контактна матриця розташовується в місцях перетину рядків і стовпців транзисторів. Архітектура NAND дозволяє значно зменшити розмір мікросхеми і тим самим знизити її собівартість. Різниця в архітектурі зумовлює різне застосування цих типів пам'яті. Мікросхеми NAND забезпечують вищу щільність збереження інформації, тому для записування/збереження великої кількості інформації використовується переважно саме ця мікросхема (флеш-накопичувачі, карти пам'яті). Однак для роботи, яка потребує побайтового довільного доступу (наприклад, для збереження програмного коду BIOS, мобільних телефонів), архітектурі NOR віддається перевага, оскільки швидкість довільного доступу в неї вища.

10.2.5. Перспективні типи накопичувачів інформації

Оптичний носій Blue Ray Disc. Хоча практично всі формати оптичних носіїв інформації є несумісними між собою, технології всюди дуже схожі: використовується лазер, що якимось чином модифікує поверхню диска, в результаті чого записується інформація. Так було і з CD, які тривалий час залишаються неймовірно популярними, і з DVD, і з новим форматом, який у найближчому майбутньому, можливо, замінить два перших – йдеться про Blue Ray Disc. Ємність диска з однобічним записом досягає 27 Гб, її можна подвоїти (тобто довести до 54 Гб), зробивши диски двосторонніми. У звичайних приводах CD і DVD для читання і записування використовується червоний лазер з довжиною хвилі 785 нм і 650 нм відповідно, а в Blue Ray – блакитний лазер з довжиною хвилі 405 нм, що дозволяє фокусувати його з більшою точністю й, отже, зчитувати та пропалювати на поверхні диска більше пітів на одиницю площі.

Багатошарові оптичні диски. В основі роботи багатошарових оптичних флуоресцентних дисків (FMD – Fluorescent Multilayer Disk) лежить кардинально інший принцип, ніж у CD або DVD. У традиційних оптичних накопичу-

вачах лазерний промінь відбивається від непрозорої підкладки диска, і за рахунок цього відбувається зчитування; в FMD приймається не відбите від підкладки світло, а світло, що випускається речовиною диска під впливом лазера, тобто флуоресцентне. Інша відмінність: FMD-диски багат шарові, число шарів в існуючих зразках – декілька десятків, але планується довести їх кількість до 1000. У CD або DVD проблему багат шаровості досі не вдалося вирішити, оскільки внаслідок інтерференції та деяких інших факторів практично неможливо розрізнити світло, відбите від різних шарів диска. А у флуоресцентних дисках це робиться досить легко. Спочатку лазер фокусується на певному шарі і викликає його флуоресценцію, потім це випущене світло реєструється фотоприймачем. Матеріал, що містить записану інформацію, при проходженні крізь нього світла змінює його довжину хвилі. Чим більше шлях, тим довшою буде хвиля, за рахунок цього можна визначити глибину необхідного шару і зчитати інформацію.

Голографічна пам'ять. Голографічна пам'ять базується на тих же принципах оптики, що й традиційні оптичні диски. Основна відмінність полягає в тому, що для запису інформації в цьому випадку використовується не поверхня (площина), і навіть не набір шарів, як передбачається зробити у FMD-дисках, а весь об'єм носія. Голограма – це тривимірне зображення якогось предмета або принаймні таке зображення, що сприймається по-різному в залежності від того кута, під яким на нього дивляться.

Для запису інформації теж застосовується лазерний промінь. Він направляється на спеціальну керуючу матрицю (світловий модулятор), елементи якої кодують біти інформації, наприклад, темний елемент – 0, світлий – 1, світло від матриці падає вже безпосередньо на носій (диск), а точніше на ту його частину, де формується зображення матриці. Для того щоб дані з диска можна було прочитати, потрібно освітити його ділянку лазером з такою ж самою довжиною хвилі, тоді відбите світло відтворить зображення керуючої матриці, зробить її точну копію. Під різними кутами відбите світло формує різне зображення, що є характерним для всіх голограм, а це дозволяє записувати в один і той самий об'єм багато «відбитків» керуючої матриці, досягаючи високої щільності упаковки даних.

Нанотехнологія і прилади на її основі. Розвиток сучасної електроніки і мікротехніки здійснюється в напрямку зменшення розмірів електронних пристроїв. Логічним кроком при цьому є застосування нанотехнології. Нанотехнологія це галузь науки і техніки, яка розробляє пристрої, що мають надзвичайно малі розміри – порядку нанометра (10^{-9} метра).

Нанотехнологія розвивається за такими основними напрямками:

- виготовлення електронних схем, елементи яких складаються з декількох атомів;
- складання різних пристроїв за рахунок маніпуляції з окремими атомами і молекулами;
- створення механізмів і роботів розміром з молекулу.

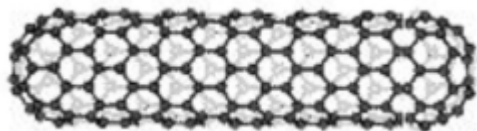


Рис.10.14 – Молекула нанотрубки

У 1981 році фахівці з компанії ІВМ розробили перший інструмент для маніпуляції з окремими атомами – тунельний мікроскоп. За допомогою цього мікроскопа можна не тільки бачити окремі атоми, але й піднімати та пересувати їх. Традиційні ж методи виробництва працюють з порціями речовини, яка складається з мільйонів атомів. Перехід від маніпуляції з речовиною до маніпуляції окремими атомами являє собою якісний стрибок розвитку техніки.

Одна з головних задач нанотехнології полягає у створенні робота розмірами з бактерію та менше, здатного «будувати» з атомів різноманітні об'єкти, а також формувати самого себе з тих же самих атомів, тобто «розмножуватись», як це роблять справжні бактерії. Такий робот повинен бути виготовлений з окремих частин з атомарною точністю. Зробити це можна буде за допомогою керованого механосинтезу – формування хімічних зв'язків за рахунок механічного зближення електронних оболонок атомів одна до одної.

Об'єктом нанотехнології є подрібнені до нанорозмірів метали, нові сполу-



Рисунок 10.13 – Перспективні галузі застосування нанотехнології

ки вуглецю та пластмаси, вироблені в особливих умовах. У різних сполученнях такі матеріали дають речовини з новими властивостями, заданими людиною. Це, наприклад, папір, який не горить і не промокає, пластик, який світиться у темряві, пластик, що проводить електричний струм, пластик з фотоефектом на рівні сучасних сонячних батарей, змазки, які знижують тертя на 30 – 50%, електроліт для елементів живлення, що утримує заряд у десятки разів довше від звичайного, та багато інших розробок (рис. 10.13).

У 1991 році були винайдені нанотрубки – довгі циліндричні вуглецеві утворення. Молекула нанотрубки має більше мільйона атомів вуглецю і являє собою трубку діаметром близько 1 нм (рис. 10.14).

Нанотрубка є пустотілою всередині, а її поверхня складається з атомів вуглецю, що утворюють шестикутники. Через те, що всередині нанотрубки пуста, в неї можна вбудовувати атоми інших речовин. Нанотрубка в 6 разів легша та в 50–100 разів міцніша за сталь. Жоден з існуючих матеріалів не має такого набору механічних, електромагнітних та оптичних властивостей, як нанотрубка завтовшки з волосину. Нанотрубка залежно від розміру і форми може мати провідникові або напівпровідникові властивості. Наприклад, якщо трубка пряма, вона є провідником, а якщо скручена або вигнута – напівпровідником. Транзистори, побудовані на базі таких нанотрубок, в сотні разів менші тих, що застосовуються в сучасних мікросхемах. Починаючи з 2001 р., коли фірма ІВМ презентувала перший одноелектронний транзистор, створено декілька різних варіантів подібних пристроїв. Нанотрубка в такому транзисторі буде виконувати функцію елемента доступу, а витік, стік і сама архітектура польового транзистора залишаються без змін. Одна з особливостей нанотранзистора полягає в поліпшеному ємнісному зв'язку між нанотрубною і затвором, який посилює донорство як електронів, так і дірок, а також розповсюдження заряду уздовж нанотрубки на великі відстані.

Вже розроблено вуглецеву мономолекулярну структуру у вигляді нанотрубки, яка повністю реалізує один з трьох основних логічних елементів – елемент логічного заперечення НІ, що перетворює двійкову одиницю в нуль і навпаки. Особливість створеного елемента полягає у тому, що вихідний сигнал у нього вище, ніж вхідний, приблизно в півтора рази. Потім дослідники сконструювали

на основі нових пристроїв інвертор, логічне АБО-НІ, а також тригер і мультівібратор.

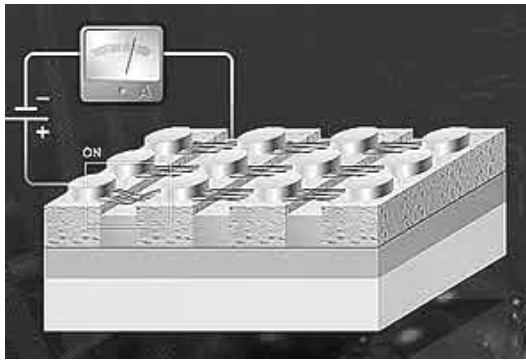
Співробітникам фірми General Electric вдалося отримати унікальний напівпровідниковий пристрій на основі вуглецевих нанотрубок. Цей пристрій може працювати і як діод, і в як транзистор. Він виконаний за звичайною схемою шляхом з'єднання двох напівпровідників: одного з електронною, іншого – з дірковою провідністю. У випадку традиційних напівпровідників на базі кремнію тип провідності задається за допомогою домішок, що створюють надлишок або нестачу електронів у структурі речовини. Надлишок або нестача електронів у нанотрубках створюється за допомогою електричного поля. Для цього в нанодіод вводиться мініатюрний електрод з розділеним на дві частини затвором. Два розташованих в одній площині затвори з'єднуються з двома половинами нанотрубки. У такий спосіб утворюється пристрій, схожий на звичайний польовий транзистор, де затвор також розділений на дві незалежні частини. Щоб отримана система функціонувала як нанодіод, потрібно подавати на один затвор позитивну напругу, а на інший – негативну. В результаті такої операції з'явиться *p-n*-перехід, необхідний для роботи діода. Якщо ж подавати на затвори однакову (тільки позитивну або тільки негативну) напругу, вийде нанотранзистор, який працює за схемою *p-n-p* або *n-p-n*, залежно від знаку прикладеної напруги.

Фахівці компанії Infineon Technologies AG створили напівпровідниковий матеріал з використанням нанотрубок, призначений для застосування в силових приладах. Звичайні наноматеріали не витримують високих напруг та струмів, і для виробництва силових пристроїв використовується традиційний кремній. Але розробникам з цієї компанії вдалося показати, що нанотрубки є цілком придатними для створення ще мініатюрніших та дешевших перемикачів для керування, наприклад, світлодіодами або мініатюрними електродвигунами з мінімальними втратами енергії. Для цього приблизно 300 вуглецевих нанотрубок упакували в щільні пучки, і вони працювали як транзистори при напрузі 2,5 В та силі струму 2 мА. Для створення такого польового транзистора потрібен тільки однокроковий літографічний процес. Контакти витоку і стоку виготовляли з паладію, субстратом служила кремнієва пластина, хоча може бути використано й інший провідний матеріал. Потім на цю основу нарощували на-

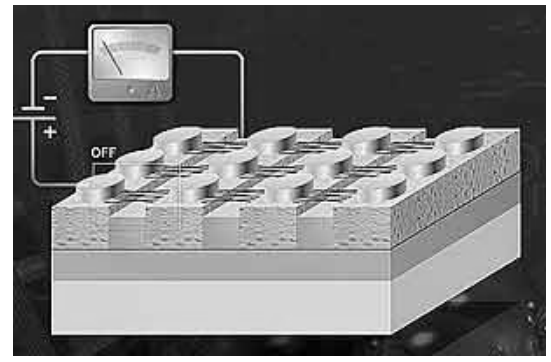
нанотрубки таким чином, щоб кількість розташованих паралельно трубок була достатньою для забезпечення контакту між витоком і стоком. Створений прототип дозволяв керувати світлодіодами і мікродвигунами.

Компанія Nantero розробляє нові технології енергонезалежної оперативної пам'яті NRAM (Nanotube-based Random Access Memory) на основі вуглецевих нанотрубок. Запам'ятовувальний пристрій складається з двох кремнієвих підкладок, на яких особливим чином розміщені масиви нанотрубок. Технологія ґрунтується на властивості еластичності нанотрубок та ефекті притягнення атомів вуглецю один до одного під впливом сил Ван-дер-Ваальса. Нанотрубки закріплюються на кремнієвій підкладці, а під ними на відстані приблизно 120 нм розташовується вуглецевий субстрат. Мала відстань між сусідніми підкладками разом з незначними розмірами нанотрубок дозволяють досягти швидкостей записування-читання порядку 0,5 нс.

У запропонованій архітектурі кристалів шар нанотрубок наноситься на підкладку. Потім методом звичайної літографії на ньому "вичерчують" електричні контакти, з'єднані один з одним «товстими» стрічками з нанотрубок. При цьому просторова орієнтація нанотрубок і ступінь їх ідентичності не мають значення. Головне, щоб стрічки виявляли потрібні механічні властивості. Електричний заряд невеликої сили, що виникає на нижній підкладці, притягує до останньої групу нанотрубок, розташованих над нею. Далі притягнуті нанотрубки утримуються в такому стані під дією сил Ван-дер-Ваальса до появи наступного електричного заряду. Завдяки такому пристрою звисаючі нанотрубки можуть відігравати роль бітів пам'яті: «піднятий» стан – «0», «опущений» – «1» (рис. 10.15). Оскільки в кожному окремому переході між зазначеними станами бере участь декілька десятків нанотрубок, створюється надмірність, що захищає систему від випадкових втрат інформації. В «замкненому» і «розімкненому» станах система з нанотрубок має різний електричний опір, за рахунок чого є можливим зчитування інформації.



a



б

Рисунок 10.15 – Запис інформації в комірці NRAM:
 (а) – записано «1»; (б) – записано «0»

В останні роки в компанії Hewlett-Packard на основі нанотехнології створили прототип комп'ютерної пам'яті ємністю 64 біта та розмірами порядку 1 мкм. За допомогою сітки з накладених платинових дротиків, що перехрещуються, забезпечується зчитування та запис «0» або «1» шляхом переміщення окремих молекул. У свою чергу, компанія Intel розробила надзвичайно ефективний 3D-нанотранзистор та перейшла до 3D компоновки наносхем.

Таким чином, на основі нанотехнології створюються електронні прилади з унікальними властивостями.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке запам'ятовувальні пристрої ЕОМ? Поясніть їх призначення.
2. Назвіть і поясніть призначення основних типів запам'ятовувальних пристроїв.
3. Що таке комірка пам'яті? Чим визначається її розрядність?
4. Наведіть і поясніть ієрархічну схему побудови пам'яті ЕОМ.
5. Що таке блок пам'яті? Чим визначається його ємність?
6. Що являють собою надоперативні оперативні, постійні, зовнішні та буферні запам'ятовувальні пристрої?
7. Наведіть схему інтегрального запам'ятовувального елемента на біполярних структурах і поясніть його роботу.
8. Наведіть схему інтегрального запам'ятовувального елемента на МДН-транзисторах і поясніть його роботу.
9. Наведіть структуру і поясніть роботу запам'ятовуючого пристрою на приладах з зарядовим зв'язком.
10. Наведіть структуру і поясніть роботу зсувного регістра на приладах з зарядовим зв'язком.
11. Наведіть структуру і поясніть роботу запам'ятовувального пристрою на циліндричних магнітних доменах.
12. Поясніть структуру і роботу накопичувача на гнучкому магнітному диску.
13. Поясніть структуру і роботу накопичувача на жорсткому магнітному диску.
14. Наведіть схему і поясніть перпендикулярну та паралельну технології запису даних на магнітні накопичувачі.
15. Поясніть метод теплового магнітного запису даних на магнітні накопичувачі.
16. Назвіть та охарактеризуйте основні типи оптичних накопичувачів інформації.
17. Що таке CD-ROM? Накресліть структуру доріжки CD-ROM. Поясніть принцип зберігання інформації на цьому накопичувачі.
18. Що являють собою компакт-диски CD-R і CD-RW? Яким чином вони побудовані?

19. Що таке флеш-пам'ять? Накресліть схему комірки флеш-пам'яті і поясніть її роботу.
20. Поясніть процес запису інформації для комірок NOR і NAND флеш-пам'яті.
21. Поясніть схему організації з'єднань комірок NOR і NAND флеш-пам'яті.
22. Наведіть умовну схему і поясніть методи тунелювання і інжектування електронів.
23. Поясніть будову і принцип роботи оптичного носія Blue Ray Disc.
24. Поясніть будову і принцип роботи багатошарових оптичних дисків.
25. Поясніть будову і принцип роботи голографічної пам'яті.
26. Що таке нанотехнології? Назвіть основні напрямки розвитку нанотехнологій.
27. Що таке нанотрубка? Поясніть її будову й основні властивості.
28. Поясніть будову і принцип роботи наноприладів.
29. Поясніть будову і принцип зберігання інформації в комірці NRAM.

ПРИСТРОЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

11.1. Електронно-променева трубка

Для передачі інформації у вигляді зображення на екрані, наприклад у телевізорах, осцилографах, дисплеях ЕОМ та у ряді інших випадків, найчастіше використовується електронно-променева трубка (ЕПТ). Робота такої трубки ґрунтується на тому, що керований електронний промінь висвічується, потрапляючи на покритий люмінофором екран, який разом з витягнутою вздовж променя трубкою утворює сильний вакуумований замкнений простір.

Трубки можуть бути з фокусуванням потоку електронів у промінь електричним або магнітним полем і з електричним або магнітним керуванням відхилення цього променя.

11.1.1. Електростатична електронно-променева трубка

Електронно-променева трубка з фокусуванням і відхиленням променя електричним полем називається *електростатичною трубкою* (рис. 11.1). Основні елементи ЕПТ: скляний балон, електронний прожектор, відхиляюча система та екран.

Балон (Б) має циліндричну форму з розширенням у вигляді конуса і призначений для підтримання в трубці необхідного вакууму та захисту електродів від механічних та кліматичних впливів. Частина внутрішньої поверхні балона Б покрита провідним шаром (ПШ) з графітом, який називається *аквадагом*. На ПШ подають позитивну відносно катода напругу.

Електронний прожектор призначений для створення сфокусованого електронного потоку (променя) з потрібною густиною струму. Він складається з термоелектронного катода К, всередині якого знаходиться підігрівач (модулятор М) керуючого електрода першого (A_1) та другого (A_2) анодів. Модулятор та аноди виконано у вигляді порожнистих циліндрів, розташованих на одній осі з циліндричним катодом К.

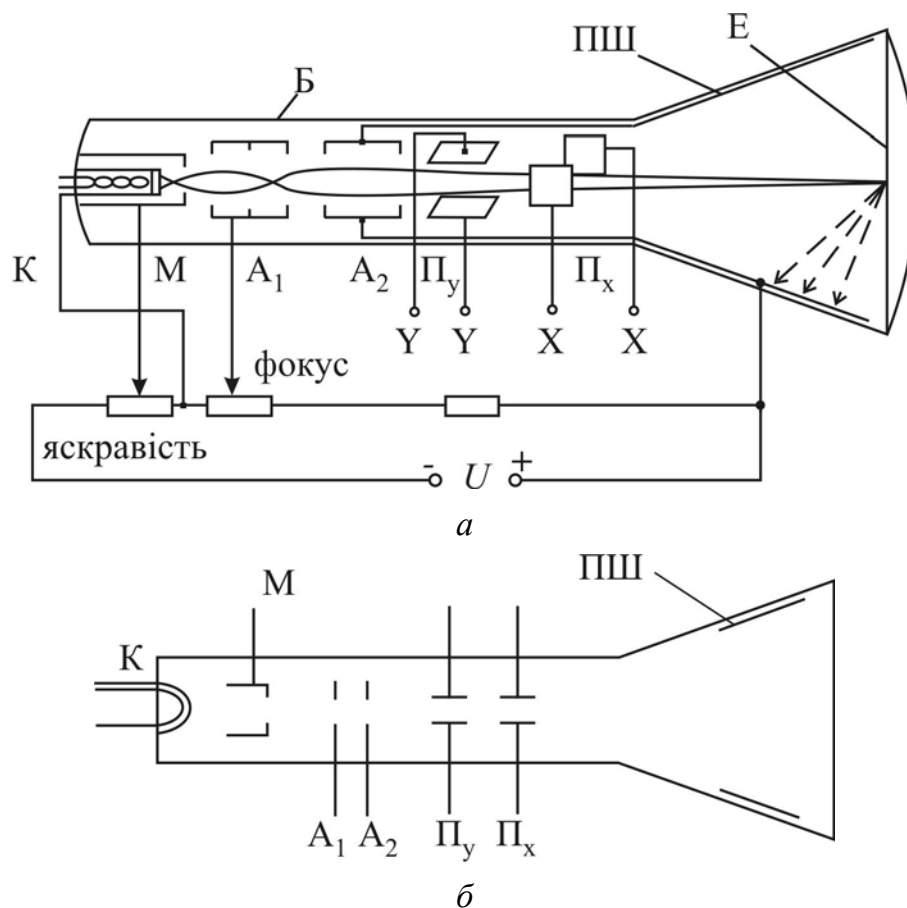


Рисунок 11.1 – Принципова будова (а) і умовне позначення (б) електростатичної ЕПТ: К – катод; М – модулятор; A_1 , A_2 – перший і другий аноди; Π_y , Π_x – пластини вертикального і горизонтального відхилення променя; ПШ – провідний шар (аквадаг); Б – балон; Е – екран

Потенціал на модуляторі нижчий порівняно з катодом і регулюється в межах від нуля до декількох десятків вольт. На аноди подаються позитивні напруги: декілька сотень вольт на перший і декілька кіловольт – на другий. Модулятор призначений для керування щільністю електронного потоку, а отже, і яскравістю світної плями на екрані Е електронно-променевої трубки та для попереднього фокусування променя.

Між модулятором і першим анодом створюється електричне поле, яке фокусує всі електрони, що вилітають з катода та проходять крізь отвір модулятора. Між першим і другим анодами створюється друга електростатична лінза. На відміну від першої – короткофокусної, вона є довгофокусною: її фокус розташований на осі ЕПТ у порожнині екрана Е.

Відхиляюча система призначена для спрямування сфокусованого електронного променя в будь-яку точку екрана. Це досягається дією на електронний

промінь поперечного електричного поля, створюваного двома парами відхиляючих пластин P_x і P_y . Напруга, підведена до них, наводить електричне поле, яке відхиляє електронний промінь у бік позитивно зарядженої пластини. Пластини P_y відхиляють промінь по вертикалі і називаються пластинами вертикального відхилення або Y -пластинами, а пластини P_x – пластинами горизонтального відхилення або X -пластинами.

Екран електронно-променевої трубки, призначений для перетворення електричних сигналів у світлові, покритий спеціальною речовиною – люмінофором, який світиться при потраплянні на нього сфокусованого потоку електронів. В якості люмінофорів використовуються сульфід цинку і цинку-кадмію, силікат цинку, вольфрамат кальцію і кадмію. Такі екрани називають *люмінесцентними*.

На світіння люмінофора витрачається лише частина енергії електронного променя. Решта енергії передається електронам екрана E , внаслідок чого виникає вторинна електронна емісія з поверхні екрана. Вторинні електрони притягуються провідним шаром ПШ, розташованим на внутрішній поверхні балона. Провідний шар ПШ звичайно буває графітовим, називається, як уже зазначалось, аквадагом і з'єднується з другим анодом A_2 .

11.1.2. Отримання зображення на екрані електронно-променевої трубки

Механізм отримання зображення на екрані ЕПТ базується на тому, що пластини горизонтального відхилення променя дають його часову розгортку. Це досягається завдяки ГЛН. При лінійному зростанні напруги (рис. 11.2, *a*, ділянка АБ) переміщення світлової точки по екрану буде прямо пропорційно часу. Потім напруга розгортки U_p стрімко падає до початкового значення (ділянка БВ) і світлова точка майже миттєво повертається у початковий стан. Око цього не помічає. Далі цикл зміни світлового променя повторюється. Світлова лінія на екрані, яка утворюється цією напругою, являє собою вісь часу.

Далі, залежно від того, як подається напруга на пластини вертикального відхилення променя (безперервно, дискретно, з пересуванням осі часу та ще будь-як), можна передавати зображення на екран, ув'язавши його з часом.

Наприклад, якщо синусоїдальну напругу

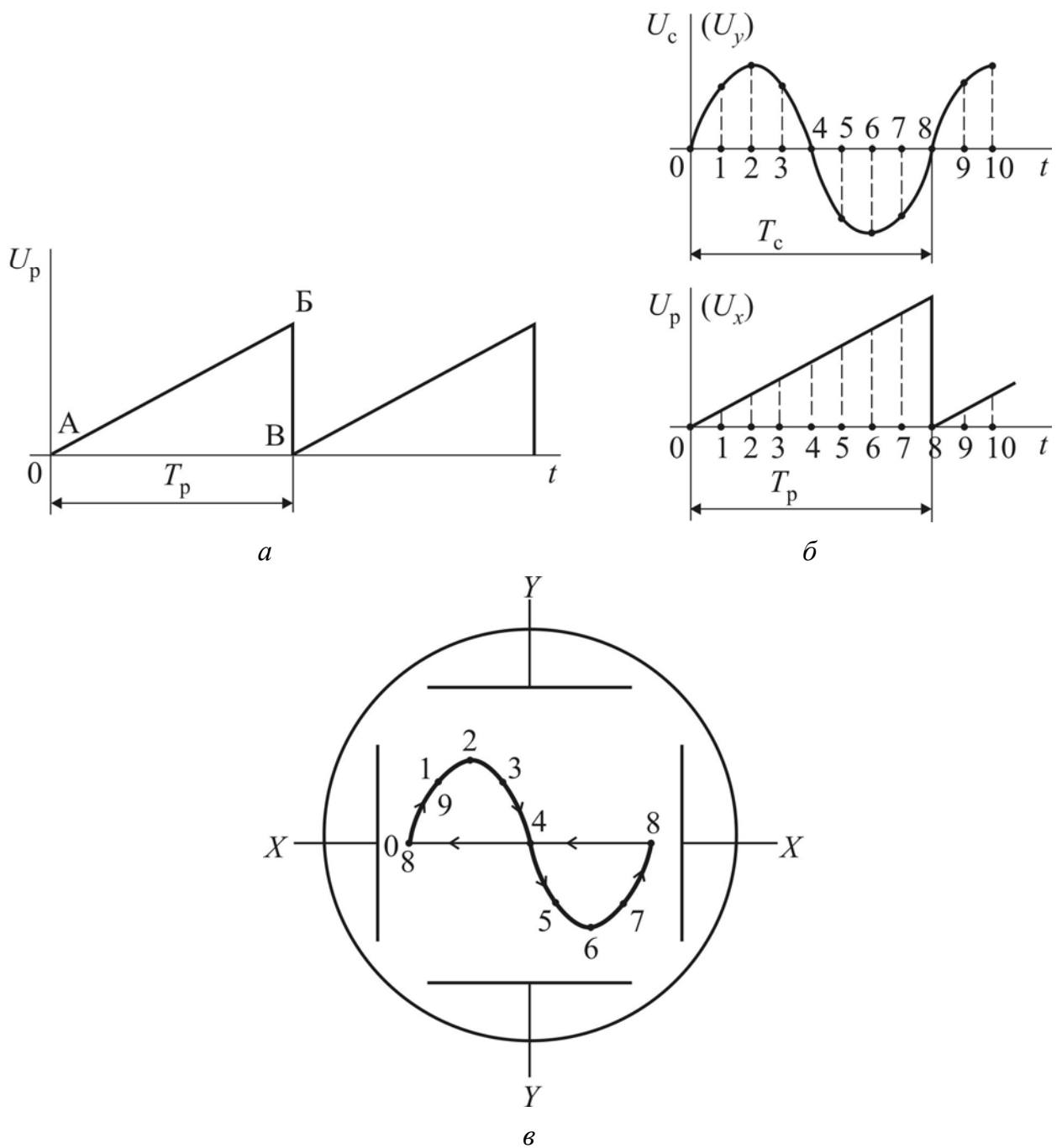


Рисунок 11.2 – Принцип отримання осцилограми досліджуваної синусоїдальної напруги: *a* – пилкоподібна напруга розгортки; *б* – напруга на вертикальних U_c і горизонтальних U_p пластинах; *в* – переміщення променя на екрані

$$u_c(t) = U_m \sin \omega t \quad (11.1)$$

підвести до X -пластин вертикального відхилення, а пилкоподібну напругу розгортки U_p на горизонтально відхиляючі X -пластини (рис. 11.2, б), то електронний промінь одночасно переміщуватиметься у вертикальному напрямку під

дією напруги u_c і в горизонтальному під дією напруги U_p . При цьому промінь буде окреслювати на екрані розгорнуту в часі діаграму досліджуваної напруги (рис. 11.2, в).

Для отримання нерухомого зображення на екрані необхідно, щоб при кожному переміщенні променя вздовж лінії розгортки на нього діяли, кожен раз в одних і тих же точках розгортки, однакові напруги на Y -пластини.

Повний збіг окремих зображень, що повторюються, буде в тому випадку, коли період розгортки буде дорівнювати цілому числу N періодів досліджуваної напруги, тобто

$$T_p = N \cdot T_c, \quad (11.2),$$

де T_c – період сигналу (11.1).

Ця умова називається *синхронізацією періоду напруги розгортки з періодом досліджуваного сигналу*.

11.1.3. Електронно-променева трубка з магнітним керуванням

Будова ЕПТ з магнітним фокусуванням і магнітним відхиленням променя показана на рис. 11.3, а.

Електронна пушка складається з катода K , модулятора M та двох анодів A_1 і A_2 . Анод A_2 з'єднаний всередині балона B з провідним шаром ПШ – аквадагом. До фокусувальної котушки $ФК$ підводиться постійна напруга, внаслідок чого крізь неї проходить постійний струм, який утворює навколо котушки неоднорідне магнітне поле. Система відхилення променя по вертикалі і по горизонталі складається з двох пар відхиляючих котушок $ВК$, розташованих перпендикулярно одна до одної та до осі трубки (рис. 11.4, а).

При магнітному керуванні чутливість до відхилення променя менше залежить від значення напруги прискорення, ніж при електростатичному. Внаслідок цього в ЕПТ з магнітним керуванням вдається отримати кут відхилення до 57° , а відповідно, більше відхилення при невеликій довжині трубки

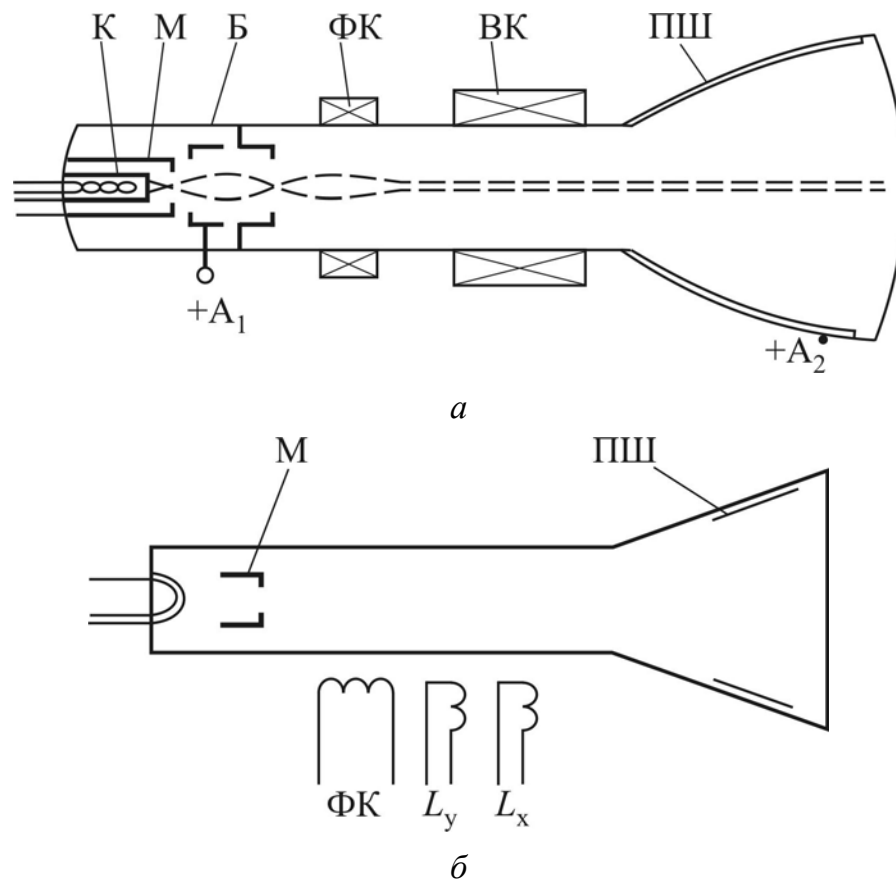


Рисунок 11.3 – Принципова будова (а) і умовне позначення (б) ЕПТ з магнітним управлінням: К – катод; М – модулятор; A_1 , A_2 – перший і другий аноди; ФК – фокусуєча котушка; ВК – відхиляючі котушки; ПШ – провідний шар; Б – балон

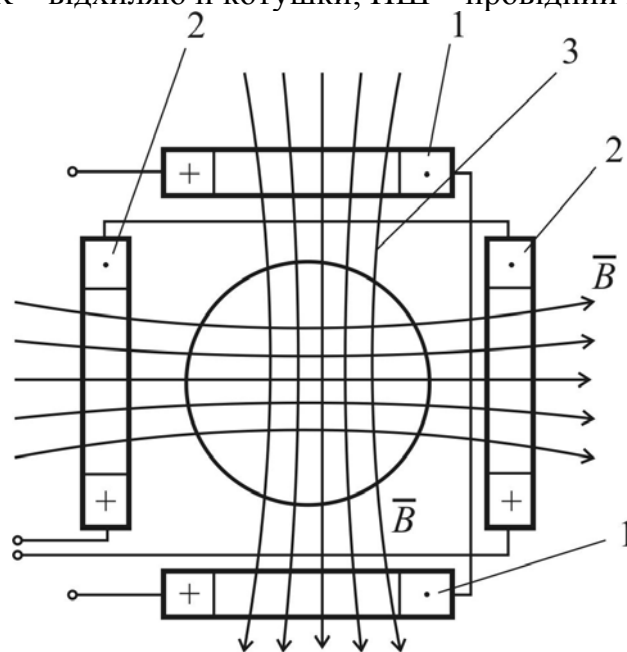


Рисунок 11.4 – Відхиляюча система променя ЕПТ: 1 – котушки горизонтального відхилення L_x ; 2 – котушки вертикального відхилення L_y ; 3 – силові лінії магнітного поля

11.1.4. Електронно-променева трубка для кольорового зображення

Екрани електронно-променевої трубки, які застосовуються для отримання кольорового зображення, містять зерна люмінофорів з синім, червоним і зеленим світінням – тріади, розташовані у певному порядку (рис. 11.5).

Всередині горловини трубки знаходяться три автономні електронні прожектори, встановлені так, що їхні електронні пучки сходяться на певній відстані від екрана. У порожнині перерізу променів розташована тіньова (кольоророздільна) маска, що являє собою тонкий металевий лист злегка увігнутої форми, в якому зроблено дуже багато (~1 млн.) круглих отворів малого діаметра (частки міліметра).

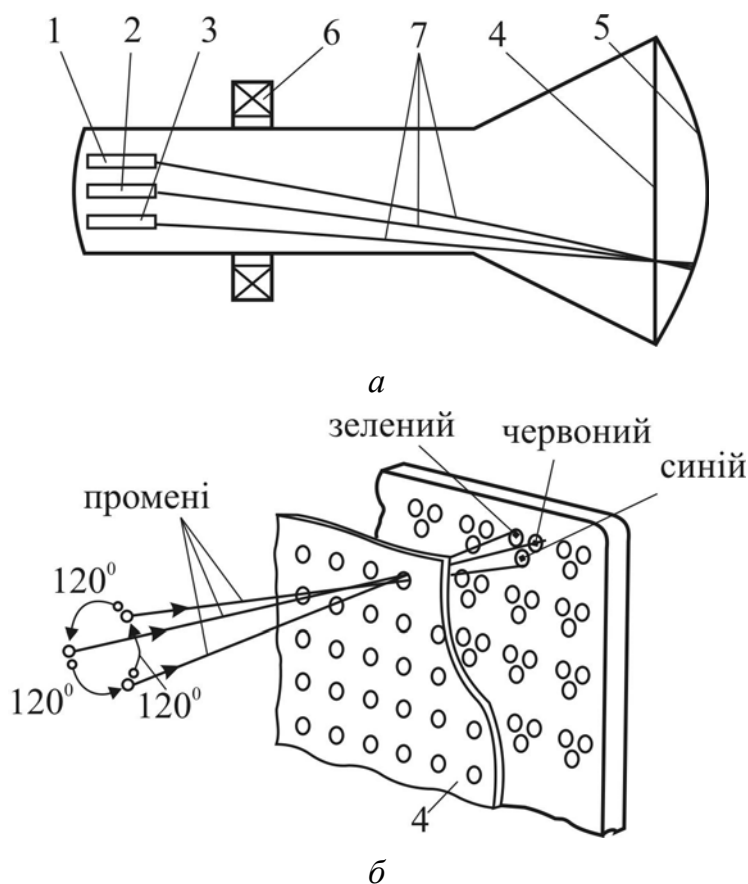


Рисунок 11.5 – Кольоровий кінескоп: *а* – схематична будова; *б* – елемент тіньової маски та екран; 1, 2, 3 – електронний прожектор для отримання відповідно червоного, зеленого і синього кольорів; 4 – тіньова (кольоророздільна) маска; 5 – екран; 6 – відхиляюча система; 7 – електронні промені

Після проходження через отвори у масці кожен з електронних променів

потрапляє на свій елемент тріади. Внаслідок змішування трьох кольорів різної яскравості відбувається світіння потрібного кольору. Через малість розмірів світних елементів екрана око спостерігача вже при невеликому віддаленні від екрана сприймає сумарне світіння всіх комірок, кольори яких залежать від інтенсивності електронного променя кожного прожектора.

11.2. Літерно-цифрові індикатори

11.2.1. Загальні відомості про літерно-цифрові індикатори

У пристроях відображення інформації, поряд з електронно-променевими трубками, знаходять широке застосування різноманітні літерно-цифрові індикатори, побудовані на різній фізичній основі.

Перше покоління індикаторних приладів характеризується невеликим числом фізичних явищ, що використовуються, відносно низькими значеннями ККД і яскравості, великими габаритами, однокольоровістю, великою керуючою напругою. Представниками цього покоління є газорозрядні і вакуумні розжарювальні та електролюмінісцентні індикатори.

До другого покоління індикаторних приладів можна віднести напівпровідникові і рідкокристалічні індикатори, а також багаторозрядні люмінесцентні та плазмові монодисплеї. Ці прилади характеризуються високою яскравістю світіння, економічністю, підвищеною інформаційною ємністю, багатокольоровістю.

Літерно-цифрові газорозрядні індикатори є іонними приладами тліючого розряду, в яких світіння газу в процесі іонізації використовується для оптичної індикації сигналів, що відображаються.

11.2.2. Знакові індикатори тліючого розряду

У балоні з неоном вміщено катоди, які вигнуті з дроту у вигляді цифр або інших знаків і розташовані один за одним. На рис. 11.6, *a* показано лише перші два катоди у вигляді цифр 1 і 2.

У буквено-цифрових індикаторах є 10 катодів у вигляді цифр від 0 до 9. Анод зазвичай зроблений з дротової сітки.

При подаванні напруги між анодом та одним з катодів виникає світіння газу (біля катода), тобто видно знак, який світиться. Товщина лінії, що світиться, дорівнює приблизно 1...2 мм. Світіння спостерігається через прозорий балон приладу.

Випускаються також аналогічні індикатори з так званими сегментними катодами, що синтезують зображення (рис. 11.6, б). Включення цих катодів у тій або іншій комбінації дає зображення світної цифри або знаку. Газорозрядні індикатори виконуються як з торцевою, так і з бічною індикацією.

11.2.3. Знакові розжарювальні вакуумні індикатори

Знакові розжарювальні вакуумні індикатори дають синтезоване зображення у вигляді цифр або букв, яке складається з розжарювальних дротиків (рис.11.7).

У балоні з вакуумом на теплостійкій ізоляційній платі розміщено вольфрамові дротики (волоски розжарювання). Один вивід у них робиться спільним. Підключення до джерела розжарювання тої або іншої комбінації дротиків дає зображення цифри або букви, яке світиться. Світіння жовтого кольору відповідає робочій температурі біля 1200 °С. Довговічність знакових розжарювальних вакуумних індикаторів становить десятки тисяч годин.

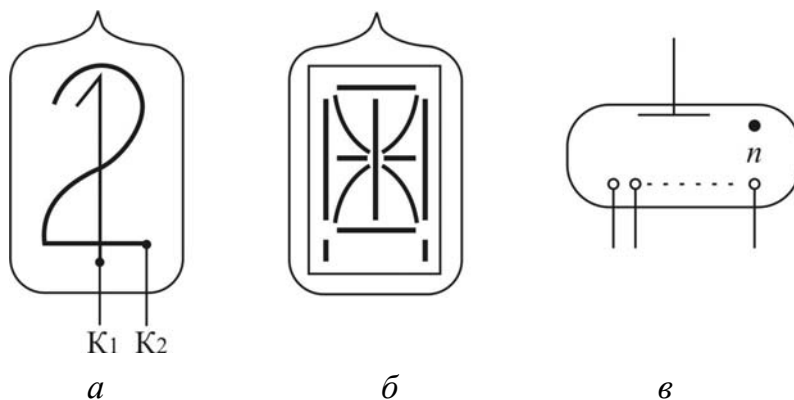


Рисунок 11.6 – Варіанти пристрою (а, б) і умовне графічне позначення (в) знакового індикатора тліючого розряду

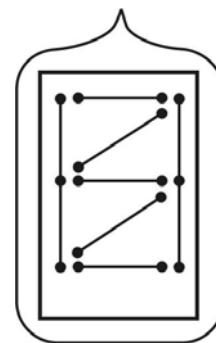


Рисунок 11.7 – Знаковий розжарювальний вакуумний індикатор

11.2.4. Вакуумні люмінесцентні індикатори

Вакуумні люмінесцентні індикатори – це багатоанодні тріоди, які мають оксидний катод прямого розжарювання, сітку та аноди-сегменти, покриті люмінофором (рис. 11.8). Вакуумні люмінесцентні індикатори зовнішньо являють собою мініатюрні електронні лампи. Вони належать до триелектродних приладів, у яких електрони, що виділяються нагрітим катодом, прискорюються в електричному полі сітки керування та бомбардують сегменти анода, покриті люмінофором. Всередині балона 5 послідовно один до одного розташовані (рис. 11.8, *a*): катод прямого розжарювання 1, сітка 2 і декілька анодів 3 – сегментів, розміщених на спільній керамічній пластині 4.

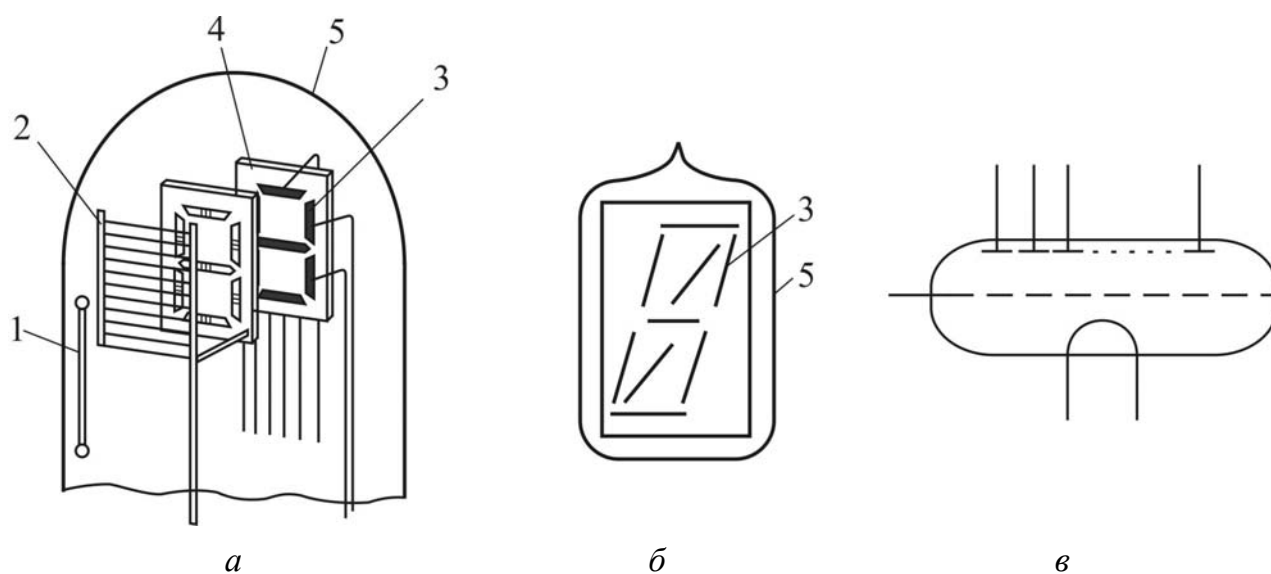


Рисунок 11.8 – Вакуумний люмінесцентний індикатор: *a* – конструктивна схема; *б* – вигляд балона з анодами; *в* – умовне позначення: 1 – катод прямого накаливання; 2 – сітка; 3 – анод; 4 – керамічна пластинка; 5 – балон

Ці індикатори призначені для роботи в колах виводу інформації, створення знаків в обчислювальних і вимірювальних пристроях широкого призначення. Основним недоліком газорозрядних індикаторів є необхідність використання порівняно високих напруг, що викликають запалювання відповідного газового проміжку.

11.2.5. Електролюмінесцентні індикатори

В електролюмінесцентних індикаторах використовується явище електролюмінесценції, яке полягає в тому, що деякі речовини спроможні випромінювати світло під дією електричного поля. За будовою ці індикатори являють собою плоский конденсатор (рис. 11.9). На металевий електрод 4 нанесено шар діелектрика 3 – органічної смоли з люмінесцентним порошком, основу якого становить сульфід або селенід цинку. Додавання до люмінофора активаторів дозволяє отримати світіння різного кольору. Зверху люмінесцентний шар покритий електропровідною прозорою плівкою 2. Для захисту від зовнішніх впливів служить скляна пластинка 1.

Якщо до електродів 2 і 4 прикласти змінну напругу, то під дією електричного поля в шарі 3 виникне світіння.

Прозорий електрод 2 зазвичай виготовляється з окису олова і є суцільним, а електрод 4 має форму цифр, букв або сегментів для формування синтезованих знаків. Електрод 4 може бути растровим, тобто складатися з ряду смуг, або матричним – з великою кількістю точкових елементів.

Найбільш поширеними є буквено-цифрові сегментні індикатори. Для зображення цифр вони мають від 7 до 9 сегментів, а індикатори з 19 сегментами дозволяють висвічувати всі цифри і букви російського й латинського алфавітів. Звичайно електролюмінесцентні індикатори виготовляються в пластмасових корпусах. Для їх живлення застосовується змінна синусоїдальна напруга 220 В частотою від 400 до 1200 Гц. Перевагою цих індикаторів є невелике споживання потужності при відносно високій яскравості зображення, плоска конструкція, висока механічна міцність, довгий строк служби.

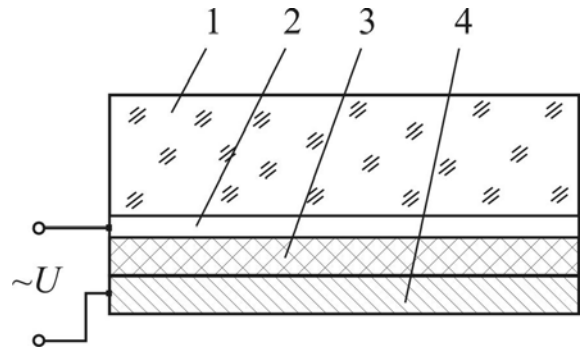


Рисунок 11.9 – Принципова будова електролюмінесцентного індикатора: 1 – скляна пластинка; 2 – електропровідна прозора плівка; 3 – діелектрик; 4 – металевий електрод

11.2.6. Рідкокристалічні індикатори

Рідкокристалічні індикатори базуються на використанні так званих рідких кристалів, що являють собою певні органічні речовини з упорядкованим розташуванням молекул, характерним для кристалів. Рідкі кристали складаються з

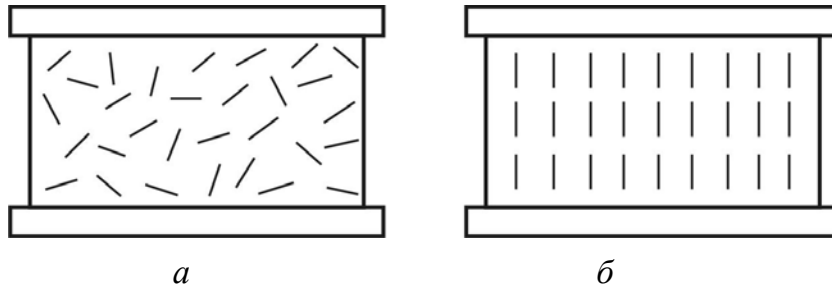


Рисунок 11.10 – Рідкокристалічна комірка:
a – неупорядкована структура без поля; *б* – упорядкована структура при наявності електричного поля

ланцюжкових, ниткоподібних органічних молекул, витягнутих у певних напрямках (рис. 11.10).

При температурі 15–70 °С під дією електричного поля орієнтація молекул стає упорядкованою

(рис. 11.10, *б*), а в речовині виникає ефект динамічного розсіювання світла (як такого, що проходить крізь речовину, так і відображеного).

У результаті цього коефіцієнт заломлення світла змінюється, і рідкий кристал, непрозорий у нормальному стані, починає пропускати світло. Внаслідок того що рідкокристалічні комірки самі не випромінюють світло, вони використовуються спільно з яким-небудь зовнішнім джерелом світла.

Елементарна рідкокристалічна комірка – індикатор (рис. 11.11) складається з двох скляних пластин 2, покритих з внутрішнього боку шаром електропровідного матеріалу 3 і 5, а також із розташованого між ними рідкого кристала 1 товщиною 8...25 мкм.

Один з електродів 3 є прозорим, а інший 5 – може бути або прозорим, якщо індикатор працює на пропускання світла, або дзеркальним, якщо індикатор працює на відбиття. Електроди 3 і 5 розділені ізоляційною прокладкою 4.

Джерела світла, необхідні для роботи індикаторів на рідких кристалах, можна розташовувати як перед ними, так і по-

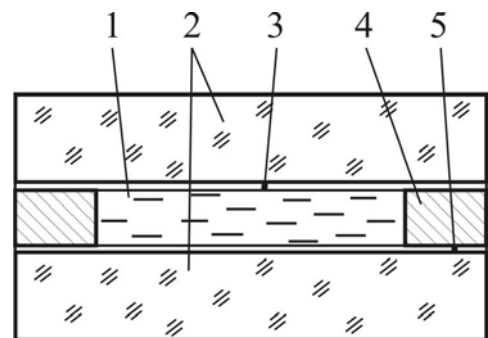


Рисунок 11.11 – Конструкція елементарної рідкокристалічної комірки (індикатора): 1 – рідкий кристал; 2 – скляні пластини; 3 – прозорий електрод; 4 – ізоляційна прокладка; 5 – прозорий або відбивний електрод

заду них. У першому випадку позаду цифрових сегментів встановлюють дзеркальну пластину (рис. 11.12, а), світло відбивається від неї і проходить крізь сегменти, прозорість яких залежить від значення сили струму, що пропускається крізь них. При роботі індикатора у відбивних променях як джерело світла можна використовувати навколишнє освітлення.

У другому випадку джерело світла (мініатюрні лампи розжарювання або люмінесцентні випромінювачі) розташовують так, як показано на рис. 11.12, б. Замість дзеркальної пластини береться матово-чорна. Індикатор працює в світлі, що проходить. При використанні відповідних фільтрів можна отримати кольорове зображення тих або інших знаків.

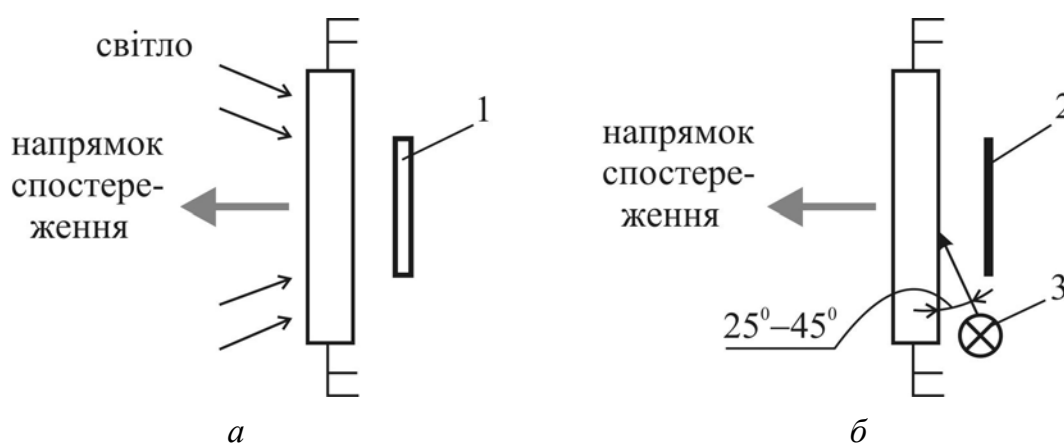


Рисунок 11.12 – Схеми, що ілюструють роботу рідкокристалічної комірки: а – на відбиття світла; б – на пропускання світла: 1 – дзеркальна пластинка; 2 – матово-чорна пластинка; 3 – освітлювальна лампа

Рідкокристалічні індикатори є економічними. Струм, що споживається для відтворення одного знака, не перевищує 1 мкА. Довговічність індикаторів досягає десятків тисяч годин.

Час проявлення або зникання знака доходить до 0,2 с.

11.3. Дисплеї

11.3.1. Загальні відомості про дисплеї

Дисплеї – це кінцеві пристрої інформаційних систем, що служать для візуального відображення інформації і зв'язку людини з ЕОМ.

Всі дисплеї можна поділити на дві групи: ті, що випромінюють світло та ті, що його модулюють. *Світловипромінювальний дисплей* повинен давати світіння достатньої яскравості. Можна виділити такі типи світловипромінювальних дисплеїв:

- *електронно-променеві дисплеї*, що використовують електронно-променеві трубки;
- *дисплеї на світловипромінювальних діодах*, що, як правило, мають невеликі (декілька сантиметрів) лінійні розміри і низьку (не більше 5 В) напругу живлення;
- *дисплеї на газорозрядних елементах* (плазмові дисплеї), які мають дві взаємно перпендикулярні системи електродів у вигляді провідних смуг. Між електродами міститься інертний газ – неон, ксенон або суміш газів. Такі системи називають газорозрядними індикаторними панелями;
- *електролюмінісцентні дисплеї*, які складені з електролюмінісцентних індикаторів.

Основні типи світломодулюючих дисплеїв:

- *рідкокристалічні дисплеї* споживають малу потужність, дають гарну видимість зображення, мають низьку вартість;
- *електрохромні дисплеї* засновані на використанні електрохромного ефекту, який полягає в тому, що деякі речовини, наприклад, триоксид вольфраму WO_3 , під дією електричного поля або при проходженні струму змінюють свій колір. При подаванні напруги 0,5...1,5 В плівка WO_3 набуває синього кольору, а при зміні полярності напруги – початкового кольору. Ці дисплеї споживають невелику потужність і мають “пам’ять”, тобто зберігають кольорове зображення деякий час (хвилини) без споживання потужності;
- *електрофорезні дисплеї* базуються на явищі електрофорезу: під дією електричного поля в рідині пересуваються завислі частинки, наприклад частинки пігменту в фарбованій рідині, притягуючись або відштовхуючись до електрода залежно від знаку потенціалу. Рідина обирається з гарними діелектричними властивостями для зменшення споживаного струму. Пігмент повинен мати колір, що різко відрізняється від кольору рідини. Напруга для такого дисплея становить десятки вольт. Строк служби може досягати десятків тисяч годин, забезпечуючи десятки мільйонів перемикань.

Серед світломодулюючих дисплеїв одним з найбільш перспективних є плазмовий дисплей на газорозрядних елементах.

11.3.2. Багаторозрядні плазмові дисплеї панельного типу

Електронна частина багаторозрядних плазмових дисплеїв панельного типу створена двома металічними решітками (електродами), які закріплюються на прозорих скляних пластинах і формують зображення (рис. 11.13).

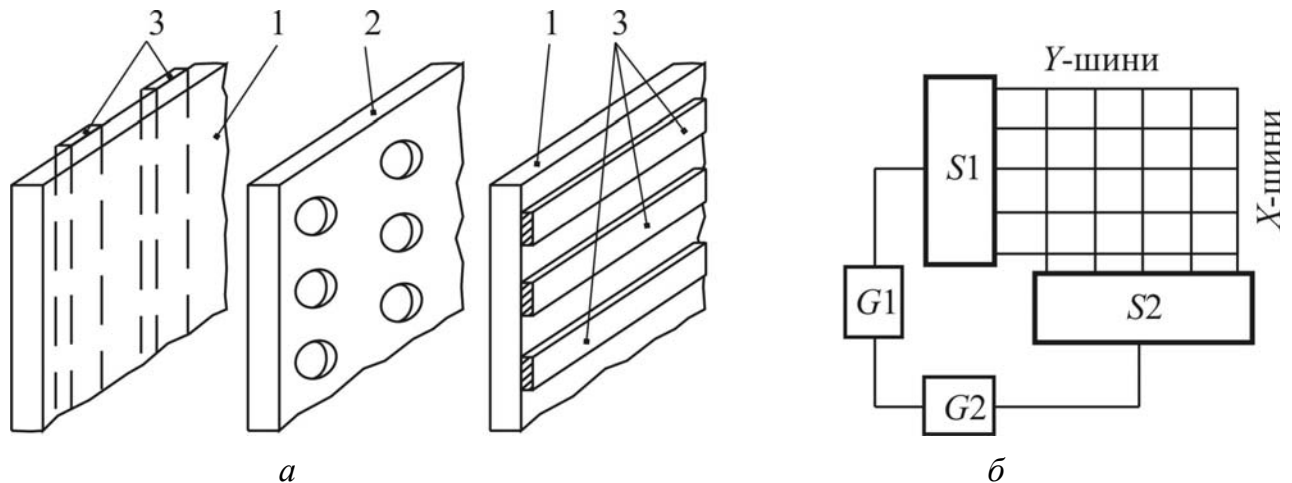


Рисунок 11.13 – Основні конструктивні елементи (а) і схема пристрою керування (б) плазмового дисплея панельного типу: 1 – скляні пластини; 2 – центральна мозаїчна пластина; 3 – електроди; S1, S2 – комутатори; G1 – генератор підтримуючої напруги; G2 – генератор “пишучих” (“стираючих”) імпульсів

Пластини потім зварюються по контуру, а створена плоска посудина вакуумується, заповнюється інертним газом (неоном, ксеноном або сумішшю газів) і герметизується. Екран дисплея являє собою керамічну мозаїчну пластину, в якій зроблено багато отворів, що утворюють ізольовані один від одного розрядні проміжки. Плоска конструкція дисплея (його товщина не перевищує декількох міліметрів) дозволяє будувати на їхній основі матричні екрани (плазмові панелі), які містять не менше $10^4 \dots 10^5$ елементарних газорозрядних комірок при роздільній здатності 10...20 ліній/см. На екрані можуть висвічуватися різні символи і цілі картини.

Високочастотний екран живиться двома збуджуючими напругами від генераторів G1 і G2: синусоїдною опорною з частотою в декілька кілогерц, яка підтримує розряд, і запишуючою (або стираючою) у вигляді коротких прямоку-

тних імпульсів, що “підпалюють” ту або іншу комірку (рис. 11.13, б). Напруги, що виробляються генераторами, підводяться до відповідних шин панелі через спеціальні комутатори $S1$ і $S2$, які дозволяють керувати зображенням, що формується на екрані. Пристрої керування плазмовим дисплеєм звичайно збираються на інтегральних мікросхемах і монтуються на задньому боці панелі.

Для отримання кольорового зображення виготовляється прозора панель, кожний шар якої генерує світіння певного кольору (звичайно червоного, зеленого та синього), а потрібна кольоровість забезпечується керуванням яскравістю світіння відповідного шару. Так, неон дає помаранчеве свічення. Іноді на підкладку, на якій розташовані електроди, наносять люмінофор, що дає світіння іншого кольору. Живлення цих дисплеїв можна здійснювати постійним або змінним струмом.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Поясніть принцип роботи та галузі застосування електронно-променевої трубки.
2. Наведіть будову і поясніть роботу електростатичної електронно-променевої трубки.
3. Поясніть механізм отримання зображення на екрані електронно-променевої трубки
4. Поясніть принцип отримання зображення нерухомої синусоїдної напруги на екрані осцилографа.
5. Наведіть будову і поясніть роботу електронно-променевої трубки з магнітним керуванням.
6. Поясніть роботу відхиляючої системи променя електронно-променевої трубки з магнітним керуванням.
7. Наведіть будову і поясніть роботу електронно-променевої трубки для кольорового зображення.
8. Що таке буквено-цифрові індикатори? Назвіть представників і дайте характеристику індикаторних приладів першого і другого покоління.
9. Наведіть будову, умовне графічне позначення і поясніть принцип роботи знакового індикатора тліючого розряду.

10. Наведіть будову і поясніть принцип роботи знакового розжарювального вакуумного індикатора.
11. Наведіть будову, умовне графічне позначення і поясніть принцип роботи вакуумного люмінесцентного індикатора.
12. Наведіть будову і поясніть принцип роботи електролюмінесцентного індикатора.
13. Наведіть будову і поясніть принцип роботи рідкокристалічних індикаторів.
- 14.
15. Накресліть конструкцію і поясніть роботу елементарної рідкокристалічної комірки.
16. Зобразіть схеми, що ілюструють роботу рідкокристалічної комірки на відбиття і на пропускання світла, і поясніть їх роботу.
17. Що таке дисплей? Назвіть основні типи та охарактеризуйте світловипромінювальні дисплеї.
18. Назвіть основні типи та охарактеризуйте світломодулюючі дисплеї.
19. Наведіть основні конструктивні елементи, схему пристрою керування і поясніть роботу плазмового дисплея панельного типу.
20. Поясніть роботу плазмового дисплея панельного типу, що дає кольорове зображення.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЛП	– арифметико-логічний пристрій
Б	– база
БП	– блок пам'яті
В	– витік
ВГ	– вентильна група
ВСП	– вузькосмуговий (вибірковий) підсилювач
ГП	– генератор пилкоподібних імпульсів
ДВЖ	– джерело вторинного живлення
Е	– емітер
ЕН	– елемент опорної напруги
ЕОМ	– електронно-обчислювальна машина
ЕПТ	– електронно-променева трубка
ЕРС	– електрорушійна сила
З	– затвор
ЗП	– запам'ятовувальний пристрій
ЗФ	– згладжувальний фільтр
ІМС	– інтегральна мікросхема
К	– колектор
КЕ	– керуючий елемент
ККД	– коефіцієнт корисної дії
КОП	– код операції
КП	– комірка пам'яті
МДН	– метал-діелектрик-напівпровідник
МОН	– метал-оксид-напівпровідник
МП	– мікропроцесор
МПК	– мікропроцесорний комплект
НВЧ	– надзвичайно висока частота
НЖМД	– накопичувач на жорстких магнітних дисках
ОЗП	– оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОП	– операційний підсилювач

ПВВ	– пристрій вводу-виводу
ПВЧ	– підсилювач високої частоти
ПЗЗ	– прилад з зарядовим зв'язком
ПЗП	– постійний запам'ятовувальний пристрій
ПЕ	– підсилювальний елемент
ПНЧ	– підсилювач низької частоти
ППС	– підсилювач постійного струму
ПШ	– провідний шар
РЕ	– регулюючий елемент
С	– стік
СБ	– спільна база
СЕ	– спільний емітер
СК	– спільний колектор
Ст	– стабілізатор постійної напруги
Тр	– трансформатор
ШСП	– широкосмуговий підсилювач
УП	– керуючий пристрій
ЦМД	– циліндричний магнітний домен
ЦП	– центральний процесор

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. – М.: Совет. радио, 1980. – 424 с.
2. Гилмор Ч. Введение в микропроцессорную технику. – М.: Мир, 1984. – 334 с.
3. Жеребцов И. П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 382 с.
4. Криштафович А.К., Трифонюк В. В. Основы промышленной электроники. – М.: Высш. шк., 1985. – 288 с.
5. Руденко В. С., Сенько В. И., Трифонюк В. В. Основы промышленной электроники. – К.: Вища школа, 1985. – 400 с.
6. Основы промышленной электроники / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков А.Е., Краснопольский и др. /Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1986. – 336 с.
7. Морозов А. Г. Электротехника, электроника и импульсная техника. – М.: Высш. шк., 1987. – 448 с.
8. Справочник по микропроцессорным устройствам / А.А. Молчанов, В. И.Корнейчук, В. П.Тарасенко и др. – К.: Техника, 1987. – 228 с.
9. Гершунский Б. С. Основы электроники и микроэлектроники. – К.: Вища школа, 1987. – 422 с.
10. Галкин В. И. Промышленная электроника. – Минск: Высш. шк., 1989. – 336 с.
11. Руденко В.С., Трифонюк В.В., Ромашко В.Я. Промислова електроніка: Підручник. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.
12. Корнеев В. В., Киселев А. В. Современные микропроцессоры. – М.: НОЛИДЖ, 1998. – 240 с.
13. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника: Учебник для вузов / Под ред. Глудкина О.П. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. – 768 с.
14. Перетворювальна техніка: Підручник / Ю.П.Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов та ін. /За ред. В.С.Руденка. – Ч.2. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
15. Калабеков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учеб-

- ник для технікумов. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. – 336 с.
16. Сенько Л.І., Ясінський В.В. Елементна база електронних пристроїв. – К.: Обереги, 2000. – Т.1. – 300 с.
 17. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
 18. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник у 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. та ін. – Харків: Фоліо, 2002. – Т. 2. Аналогові та імпульсні пристрої. – 510 с.
 19. Мікропроцесорна техніка / Ю. І. Якименко, Т.О. Терещенко, Є. І. Сокол та ін. / За ред. Т. О. Терещенка. – К.: Видавництво “Політехнік”, 2003. – 440 с.
 20. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки / Ф. П. Шкрабець, Д. В. Циценков, Ю. В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: ДНГУ, 2004. – 515 с.
 21. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум / За ред. А. Г. Соскова. – К.: Каравела, 2004. – 432 с.
 22. Батоврин В., Бессонов А., Мошкин В. LabView: практикум по електроніке и микропроцессорной технике. – М: ДМК Пресс, 2005. – 182 с.
 23. Долбня В. Т., Сакара Ю. Д., Миланіч Т. В. Електроніка і мікросхемотехніка. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – 204 с.
 24. Мілих В.І., Шавьолкін О.О. Електротехніка, електромеханіка та мікропроцесорна техніка: Підручник / За ред. Мілих В.І. – К.: Каравела, 2007. – 688 с.
 25. Спеціалізовані мікроконтролерні системи. Теорія і практика: Підручник / Є.І. Сокол, І.Ф. Домнін, О.М.Рисований та ін. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 252 с.
 26. Грищук Ю.С. Микропроцессорные устройства: Учебное пособие. – Харьков: НТУ "ХПИ" 2007. – 280 с.
 27. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. М.: Высш. шк., 2008 – 800 с.
 28. <http://vozom.ho.ua/MP/page14.html>.
 29. <http://uk.wikipedia.org>.
 30. <http://shkola.lv/index.php?mode=cht&chtid=459>.

31. <http://it.fitib.altstu.ru/neud/emt/index.php>.
32. http://do.bti.secna.ru/lib/book_electronics/content.html.
33. http://piiit.narod.ru/subject/cifr_f/electronica_i_mpt.html.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Розділ 1. ФІЗИЧІНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ	7
1.1. Енергетична структура твердих тіл	7
1.2. Напівпровідникові матеріали	10
1.3. Напівпровідникові контактні переходи	15
Запитання для самоконтролю	21
Розділ 2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ	23
2.1. Напівпровідникові резистори	23
2.2. Напівпровідникові діоди	29
2.3. Транзистори	36
2.4. Тиристори	50
Запитання для самоконтролю	53
Розділ 3. ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЖИВЛЕННЯ	55
3.1. Випрямлячі	55
3.2. Згладжувальні фільтри	65
3.3. Стабілізатори	69
3.4. Інвертори	74
3.5. Помножувачі напруги	77
Запитання для самоконтролю	80
Розділ 4. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ	82
4.1. Загальні відомості і параметри підсилювачів	82
4.2. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі зі спільним емітером	84
4.3. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі	89
4.4. Режими роботи підсилювального каскаду	91
4.5. Каскадні підсилювачі напруги з резистивно-ємнісним зв'язком	94
4.6. Підсилювачі потужності	96
4.7. Підсилювачі постійного струму	98

4.8. Зворотні зв'язки в підсилювачах	102
4.9. Вибіркові підсилювачі	103
4.10. Загальні відомості про операційні підсилювачі	106
4.11. Функціональні схеми на операційних підсилювачах	110
Запитання для самоконтролю	115
Розділ 5. ГЕНЕРАТОРИ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ	118
5.1. Умови самозбудження автогенераторів	118
5.2. <i>LC</i> -автогенератори	120
5.3. <i>RC</i> -автогенератори	121
Запитання для самоконтролю	123
Розділ 6. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ	124
6.1. Загальні поняття про інтегральні мікросхеми	124
6.2. Гібридні інтегральні мікросхеми	125
6.3. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми	127
6.4. Оптоелектроніка	130
6.5. Кріоелектроніка	133
6.6. Біоелектроніка	135
Запитання для самоконтролю	137
Розділ 7. ЕЛЕМЕНТИ ІМПУЛЬСНОЇ ТЕХНІКИ	139
7.1. Параметри імпульсних сигналів	139
7.2. Електронні ключі	141
7.3. Амплітудні обмежувачі і селектори імпульсів	145
7.4. Генератори пілкоподібних імпульсів	147
Запитання для самоконтролю	149
Розділ 8. ЕЛЕМЕНТИ ЦИФРОВОЇ І МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ	151
8.1. Системи числення	151
8.2. Логічні елементи	153
8.3. Тригери	158
8.4. Регістри	171
8.5. Цифрові лічильники імпульсів	175

8.6.	Шифратори і дешифратори	179
	Запитання для самоконтролю	182
Розділ 9.	ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МІКРОПРОЦЕСОРНУ ТЕХНІКУ	185
9.1.	Загальні відомості про мікропроцесори	185
9.2.	Структура мікропроцесора	187
9.3.	Система команд мікропроцесора	190
9.4.	Принципи побудови мікропроцесорних систем.....	193
9.5.	Архітектура мікропроцесорів.....	196
9.6.	Побудова мікропроцесорних систем з використанням мік- ропроцесорних комплектів.....	198
9.7.	Загальні поняття про мікроЕОМ.....	201
	Запитання для самоконтролю	204
Розділ 10.	ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ЕЛЕКТРОННО- ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МАШИН	205
10.1.	Типи запам'ятовувальних пристроїв та їх характеристики ...	205
10.2.	Пристрої зберігання інформації	213
	Запитання для самоконтролю	229
Розділ 11	ПРИСТРОЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ	232
11.1.	Електронно-променева трубка	232
11.2.	Літерно-цифрові індикатори	239
11.3.	Дисплеї	244
	Запитання для самоконтролю	247
	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	249
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	251

Навчальне видання

Болюх Володимир Федорович

Данько Володимир Григорович

Основи електроніки та мікропроцесорної техніки

Навчальний посібник для студентів
усіх неелектротехнічних спеціальностей

Роботу для видання рекомендував д.т.н., проф. В. І. Мілих

Редактор

Комп'ютерний набір та верстка

План 20__ р., поз. 8

Підп. до друку __.__.__. Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетн.

Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.

Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк. . Наклад __ прим. Зам. №

Ціна