

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни  
«Основи електрики та електроніки»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт  
(Аеронавігація)***

**за темою №1 – Основи електроніки**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1.

**Розробник:** викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

**Рецензенти:**

1. Інженер з технічного обслуговування, ремонту та діагностики авіаційної техніки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Калінін О.В.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

### **План лекції:**

1. Енергетична структура твердих тіл.
2. Електронна емісія.
3. Власна провідність напівпровідників.
4. Домішкова провідність напівпровідників.
5. Електронно-дірковий перехід напівпровідників.
6. Контактний перехід метал – напівпровідник.
7. Напівпровідникові резистори.
8. Напівпровідникові діоди.
9. Випрямні діоди.
10. Напівпровідникові стабілітрони.
11. Напівпровідникові варикапи.
12. Фото- і світлодіоди.
13. Транзистори.
14. Біполярні транзистори.
15. Польові транзистори.
16. IGBT-транзистори.
17. Тиристори.
18. Випрямлячі.
19. Однофазні некеровані випрямлячі.
20. Трифазні некеровані випрямлячі.
21. Керовані випрямлячі.
22. Ємнісний фільтр.
23. Інвертори.
24. Інвертори, ведені мережею.
25. Автономні інвертори.

### **Рекомендована література:**

#### **Основна література:**

1. В.І. Мілих «Електроніка та електромеханіка» Навчальний посібник, К.: Каравела, 2006 р. – 376 с.
2. Клонтаєвський Ю.П., Сосков Л.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид./За ред. А.Г. Соскова. - К.: Каравела, 2009. -416 с.
3. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. В.І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.
4. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник. – Львів: видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
5. Aircraft General Knowledge 2 - Electrics and Electronics - 2014

#### **Допоміжна література:**

1. Промислова електроніка: навч. посібник / укл.: Г.О. Андрушак, І.П. Козярський, Е.В. Майструк. – Чернівці: Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 120 с.

2. Power electronics handbook / Muhammad H. Rashid Ph.D., Fellow IEEE / Professor and Director. University of West Florida Joint Program and Computer Engineering / Printed in Canada, 2010. – 892 pages.

3. Aircraft Electrical and Electronic Systems Principles, operation and maintenance/Mike Tooley and David Wyatt/Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, First edition 2009

### **Інформаційні ресурси в Інтернеті:**

1. [https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/Електронні%20прилади%20та%20мікроелектроніка/Колонтаєвський\\_Промислова%20електроніка%202004.pdf](https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/Електронні%20прилади%20та%20мікроелектроніка/Колонтаєвський_Промислова%20електроніка%202004.pdf)
2. [http://eprints.kname.edu.ua/11615/1/Electron\\_SE.pdf](http://eprints.kname.edu.ua/11615/1/Electron_SE.pdf)
3. <https://www.coursehero.com/file/50550879/060-Navigation-2-Radio-Navigation-2014pdf/>
4. <https://www.pooleys.com/shop/cae-oxford-aviation/cae-oxford-aviation-atpl-manual-3-electrics-and-electronics/>
5. [https://www.academia.edu/8446456/Aircraft\\_Electrical\\_and\\_Electronic\\_Systems\\_Principles\\_operation\\_and\\_maintenance](https://www.academia.edu/8446456/Aircraft_Electrical_and_Electronic_Systems_Principles_operation_and_maintenance)

## Текст лекції

### 1. Енергетична структура твердих тіл.

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 лівову 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.

#### 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, а).

Для переходу електрона з валентної зони у вільну він повинен витратити енергію  $\Delta W$  (свою або отриману ззовні) на подолання так званої заборонної зони. 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  $\Delta W$ , 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.

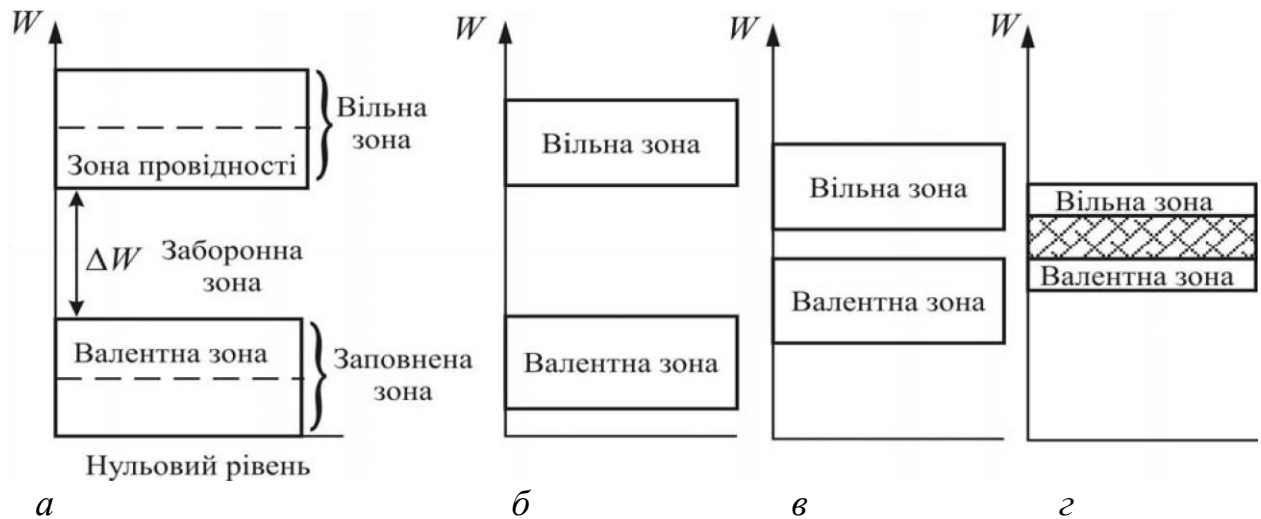


Рисунок 1.1 – Загальний характер розташування енергетичних зон за рівнем енергії  $W$  у твердому тілі (а) і взаємне розташування енергетичних зон у матеріалах: діелектричному (б), напівпровідниковому (в) і провідниковому (г)

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.

## 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;  $\phi_0$  – 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.

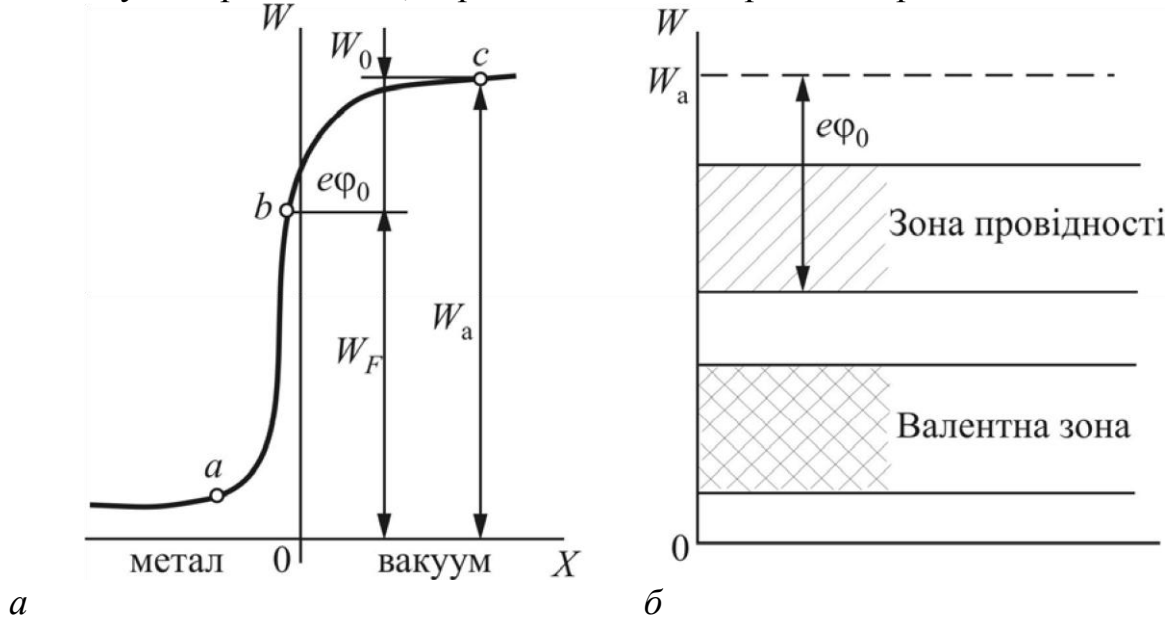


Рисунок 1.2 – Енергетичні діаграми виходу електронів: з металу (а); з напівпровідника (б)

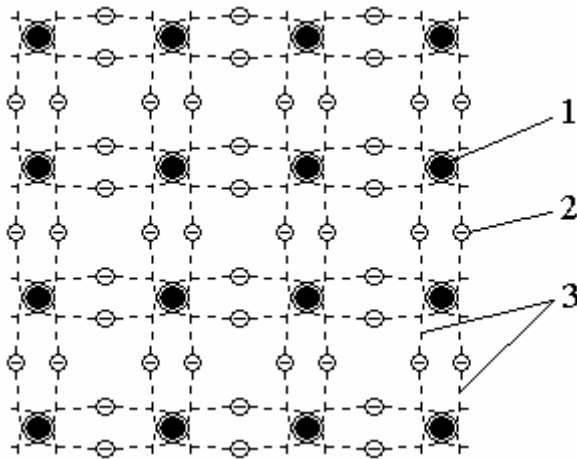
Наявність достатньої кількості вільних електронів дозволяє організувати їхній рух у вигляді електричного струму або пучка електронів і керувати цим рухом за допомогою електричних і магнітних полів.

### 3. 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  $\text{Cu}_2\text{O}$  і цинку  $\text{ZnO}$ , арсеніду галію GaAs, карбіду кремнію SiC, сульфиду 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.



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 од-

Рисунок 1.3 – Кристалічні ґратки ним, утворюючи елементарний кристал германію: 1 – атом; 2 – електрон;

речовини. Доки цей так званий *двохелек-*

3 – електронна оболонка *тронний* 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, а.

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.



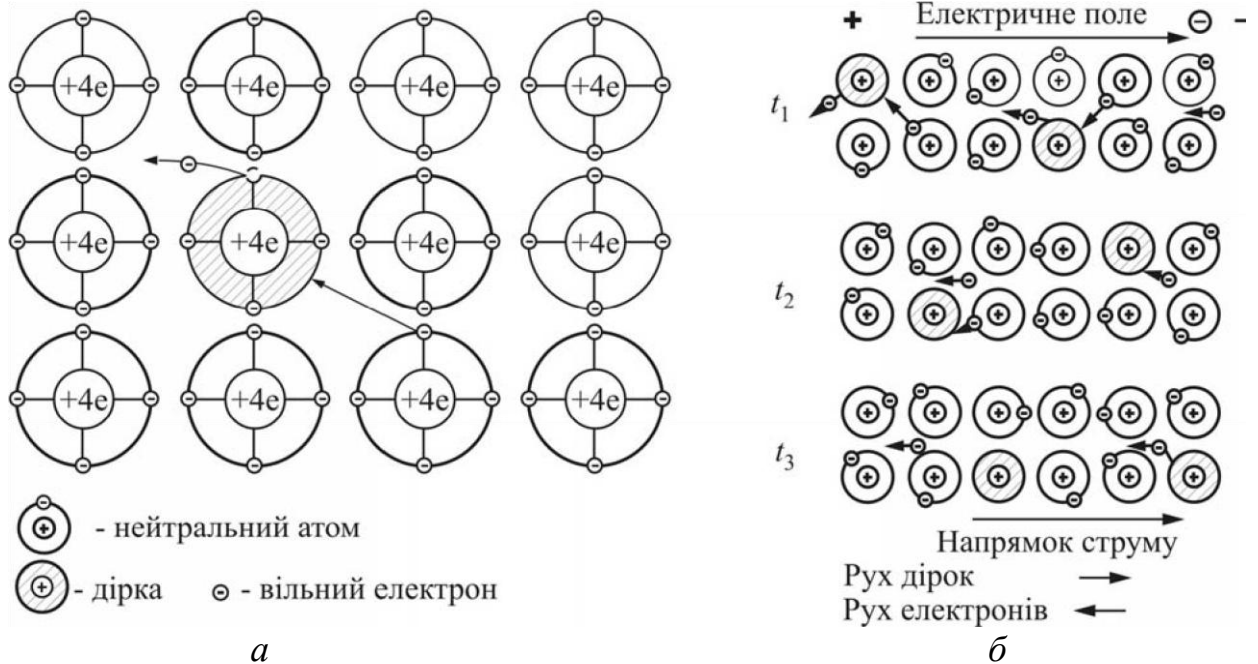


Рисунок 1.4 – Ковалентний зв'язок та утворення вільних електронів і дірок у чистому кремнії (а), а також їх пересування під впливом електричного поля у послідовні  $t_1... t_3$  миттєвості часу (б)

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*.

#### 4. Домішкова провідність напівпровідників.

Наявність домішок у напівпровіднику істотно змінює як значення, так і характер його провідності. Навіть невелика домішка (до 10 атомів на 10<sup>6</sup> 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, перетворюються на нерухомі позитивні іони. Кількість дірок, яка була в початковому напівпровіднику, у більшості своїй рекомбінує з надлишковими електронами, а ті, що залишаються, 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 електрони) 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 начебто рухаються дірки, які стануть *основними носіями* електричних зарядів (позитивних) (рис. 1.6). Невелика кількість нерекomboнованих електронів будуть *неосновними носіями* електричних зарядів (негативних). Такий напівпровідник з *дірковою провідністю* називається напівпровідником *p-типу*.

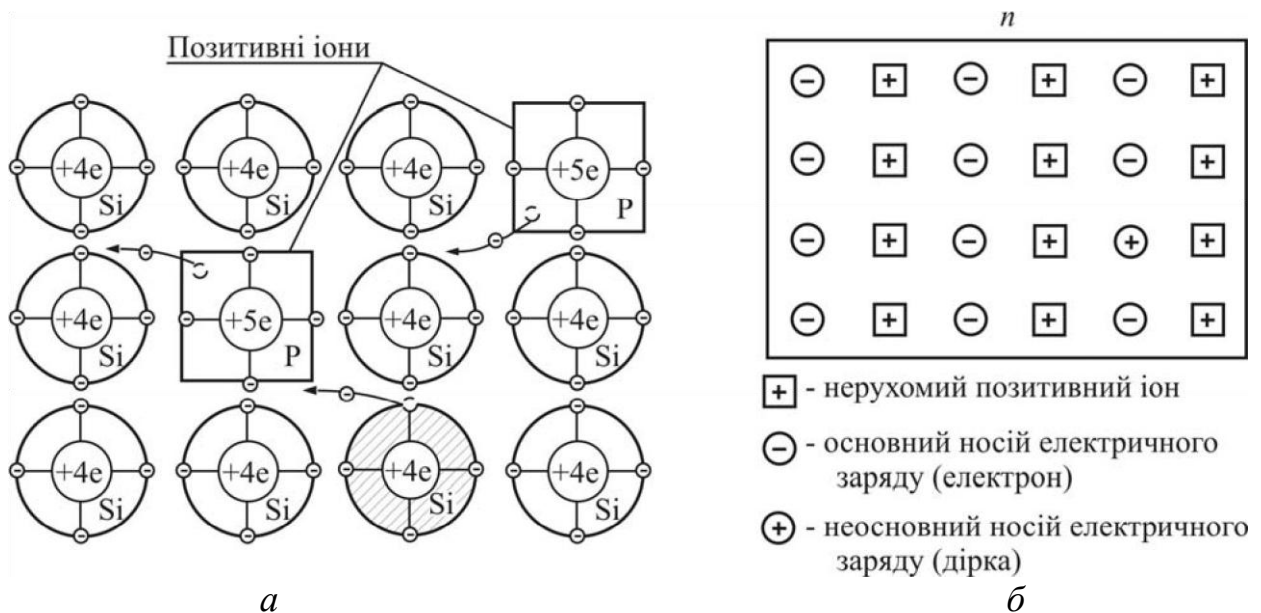


Рисунок 1.5 – Кристалічна структура чистого кремнію Si з домішкою фосфору P (а) і схематичне зображення напівпровідника *n*-типу (б)

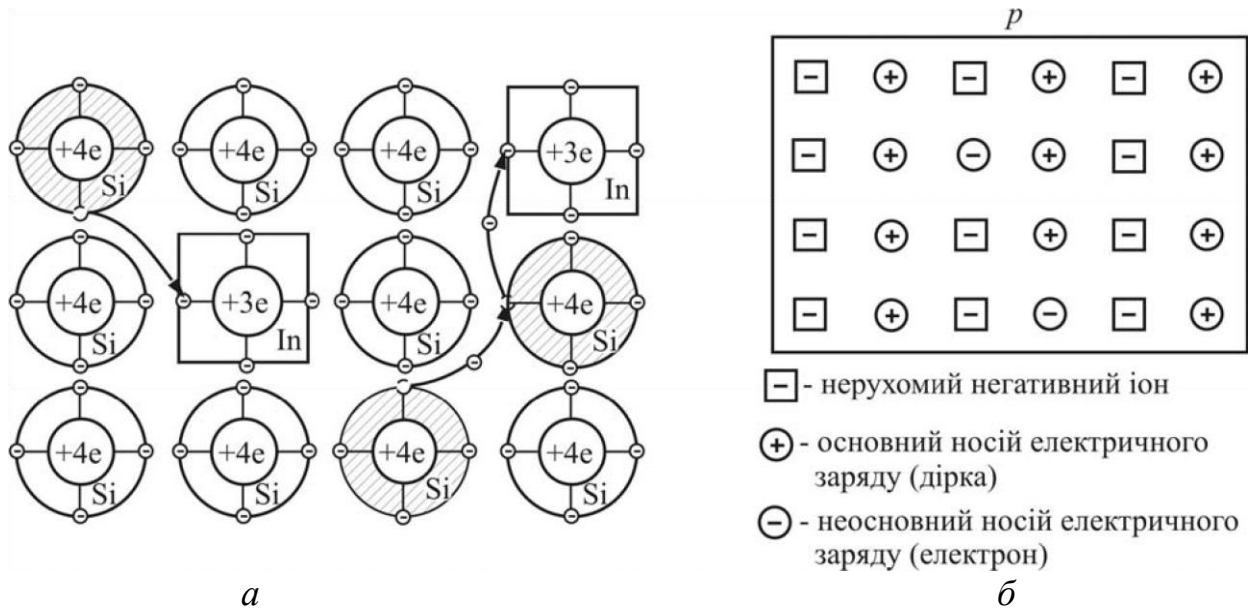


Рисунок 1.6 – Кристалічна структура чистого кремнію із домішкою індію In (а) і схематичне зображення напівпровідника  $p$ -типу (б)

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 стій, 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  $0,72$  eV (у германію) або з  $1,12$  eV (у кремнію) до  $0,01$  eV та  $0,07$  eV відповідно.

## 5. 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.

Пояснимо 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 їхньому шляху збільшується і проходять тільки неосновні носії електричних зарядів.

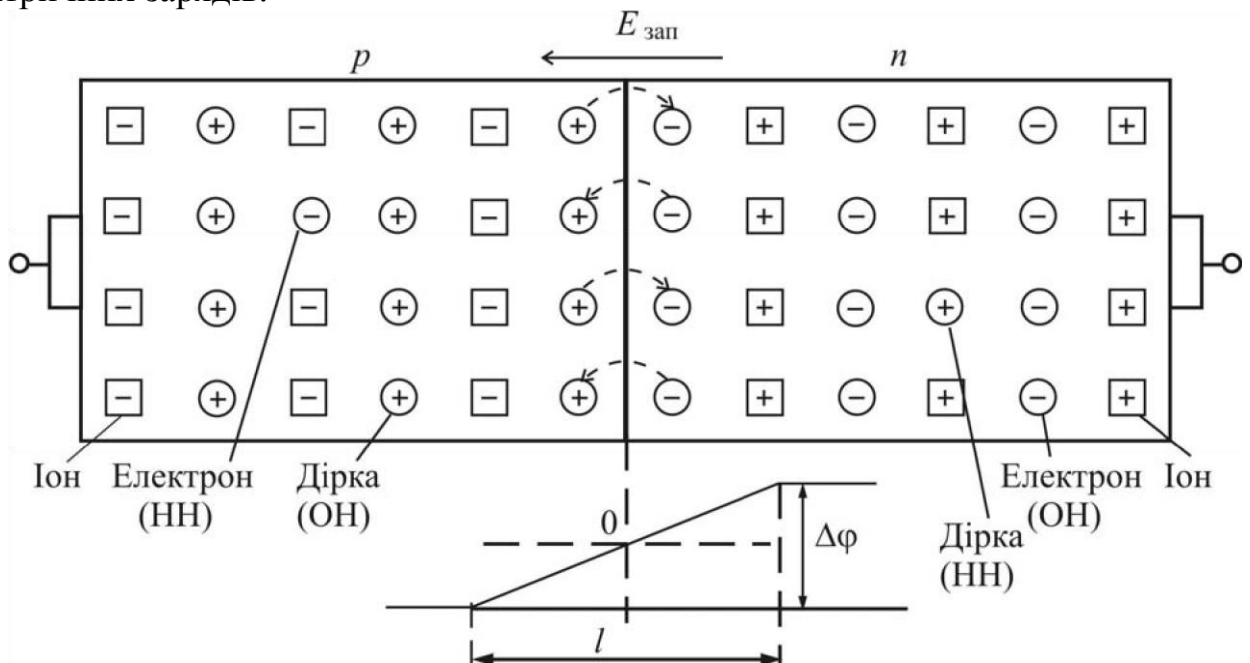


Рисунок 1.7 – Структура електронно-діркового переходу ( $p$ - $n$ -перехід)

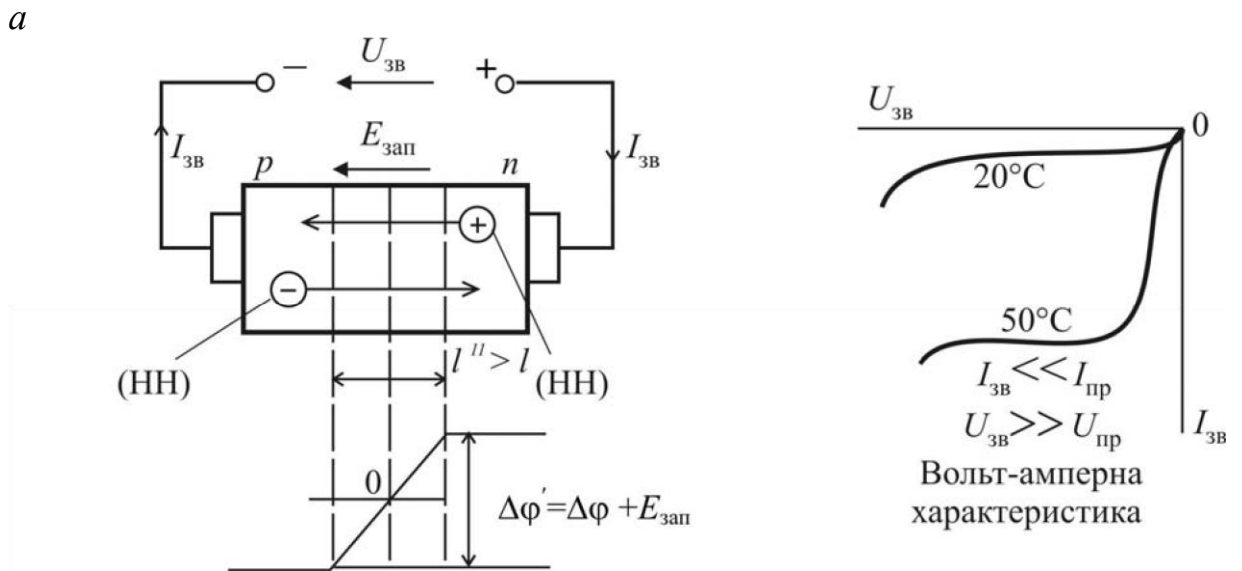
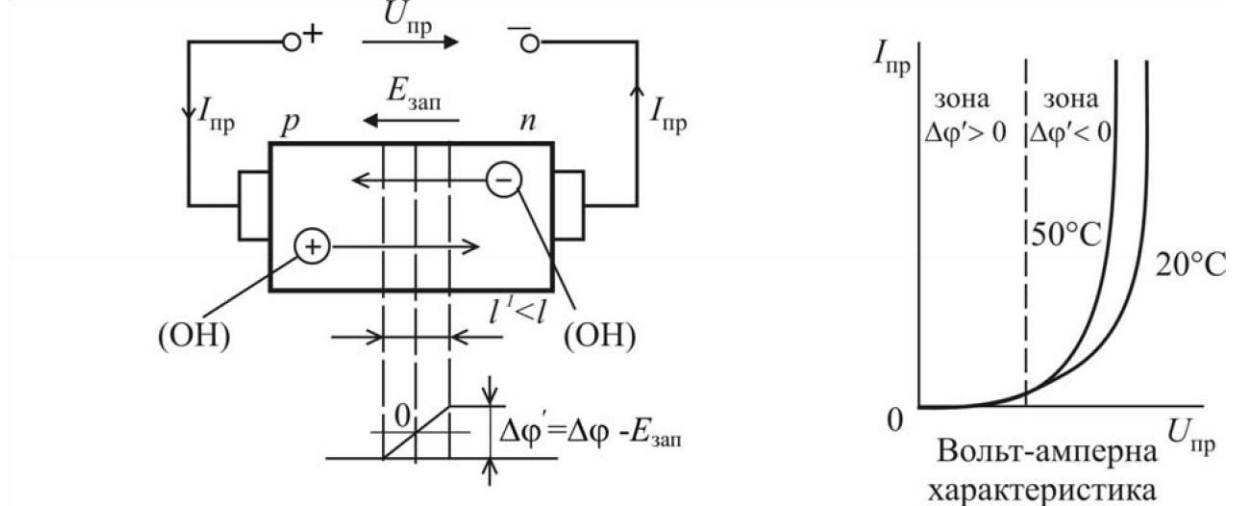
Таким чином, якщо «плюс» джерела електричної енергії підключити до  $p$  напівпровідника, а «мінус» – до  $n$  напівпровідника (це так зване *пряме*

включення), то, як тільки буде знятий потенціальний бар'єр ( $\Delta\phi = 0$ ), 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  $I_0$  залежить від прикладеної напруги відповідно з законом

$$I_0 = I_0 \exp(U/\phi_m), \quad (1.2)$$

де  $\phi_m$  – так званий «тепловий потенціал», що дорівнює приблизно 25 мВ.



б

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

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

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

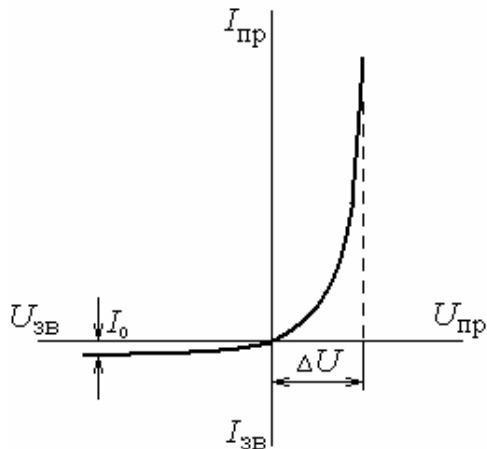


Рисунок 1.9 – Вольт-амперна характеристика  $p$ - $n$ -переходу

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 С. 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.

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

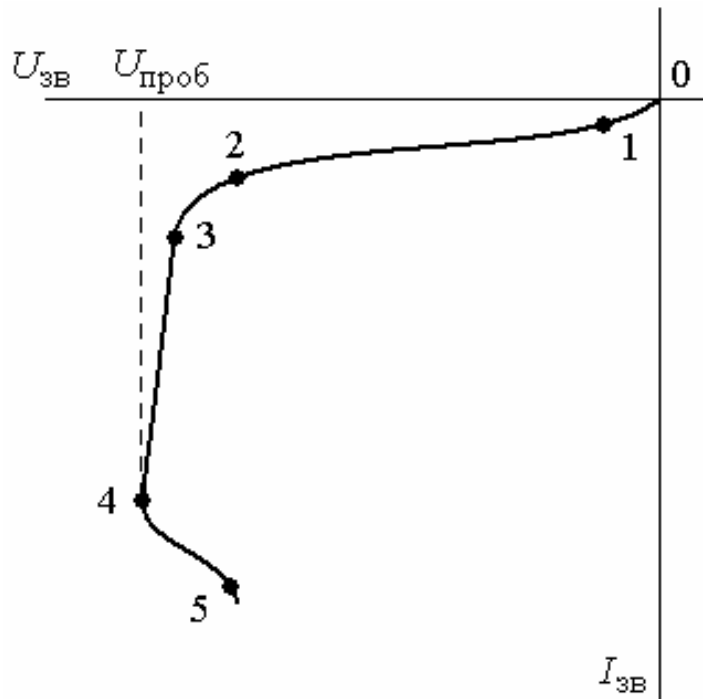


Рисунок 1.10 - Реальна зворотна характеристика  $p$ - $n$ -переходу

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 замкнуте електричне коло). За іншої полярності (зворотне включення) його опір великий – на рівні діелектриків, і можна вважати, що в цьому місці електричне коло є розірваним.

## 6. 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 отримає 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 напів провідника 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.



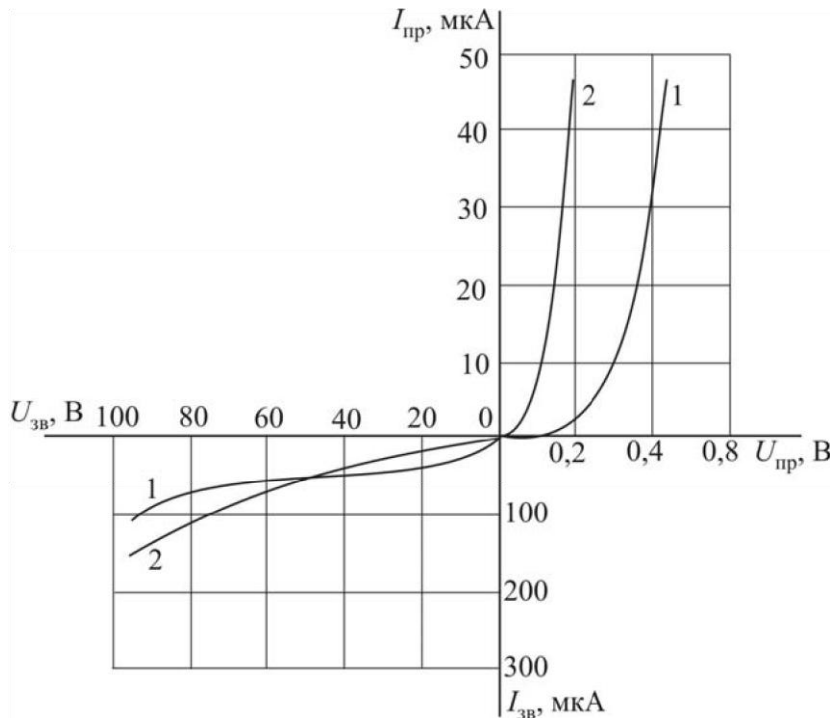


Рисунок 1.11 – Вольт-амперні характеристики:

1 – *p-n*-переходу; 2 – контактної пари «метал – напівпровідник» з випрямними властивостями

## 7. 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.

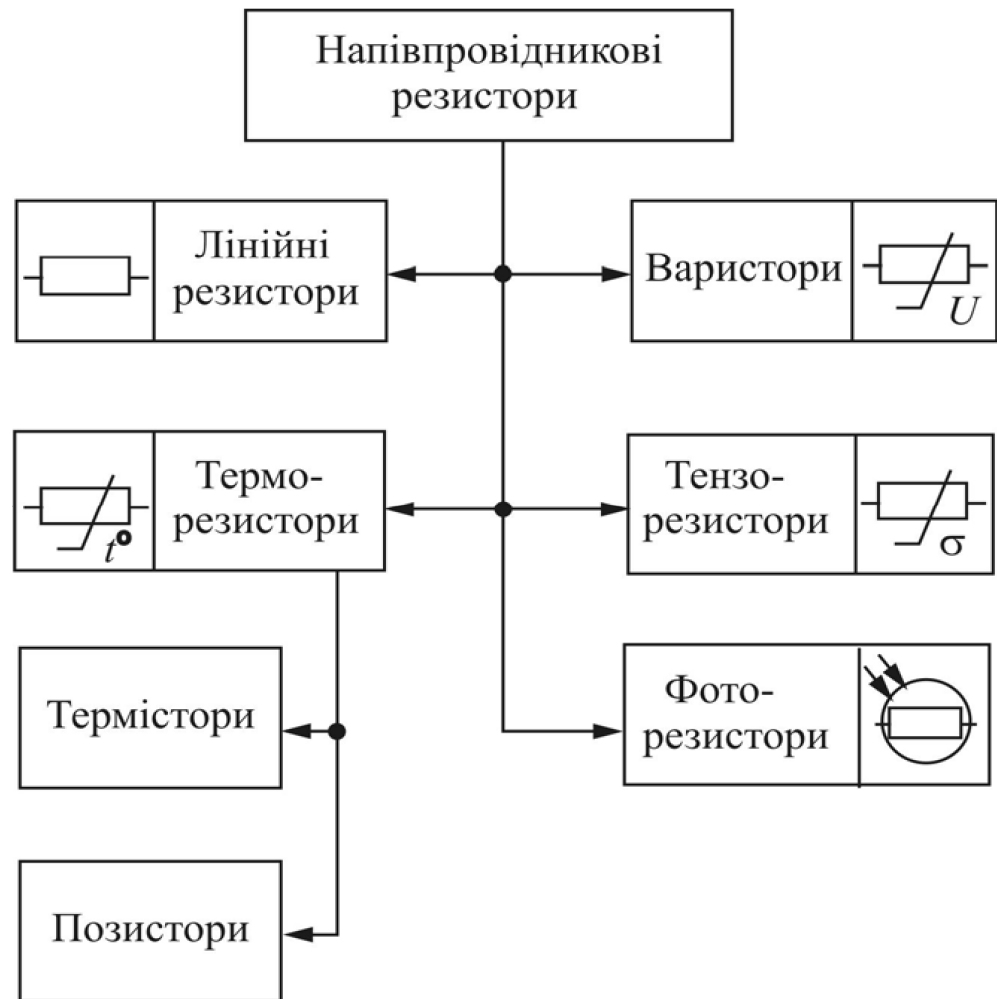


Рисунок 2.1 – Класифікація та умовні позначення напівпровідникових резисторів

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.

#### Лінійні резистори

Лінійні резистори виготовляють зі слаболегованого 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.

#### 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 карбиду 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.

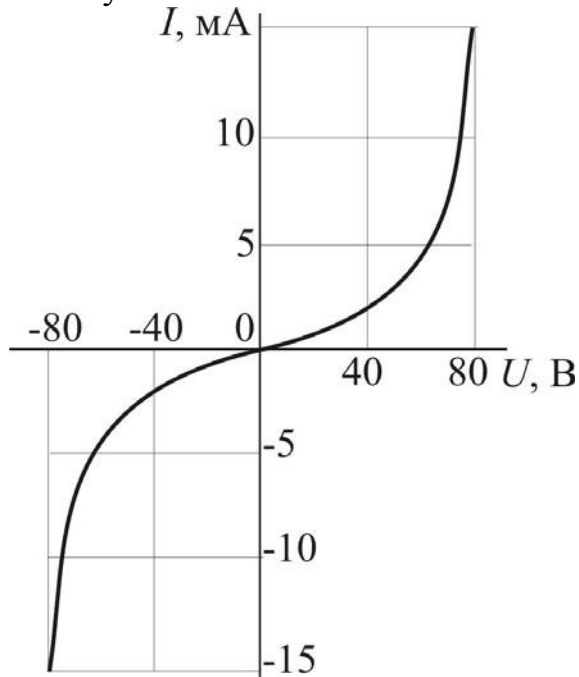


Рисунок 2.2 – Вольт-амперна характеристика варистора

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.

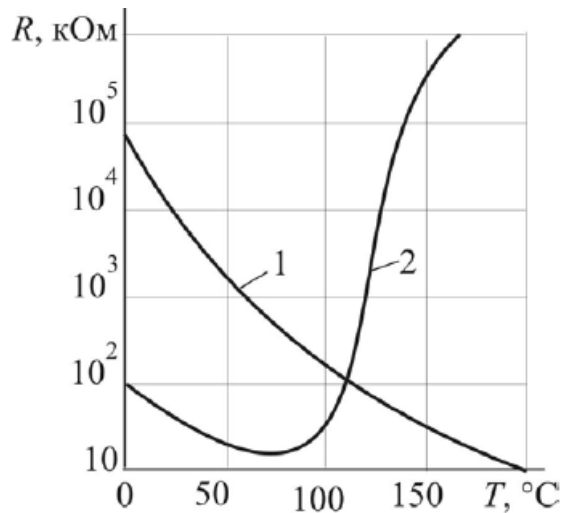


Рисунок 2.3 – Температурні характеристики терморезисторів:  
1 – термістора; 2 – позистора

### 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.

### 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 невеликі 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).

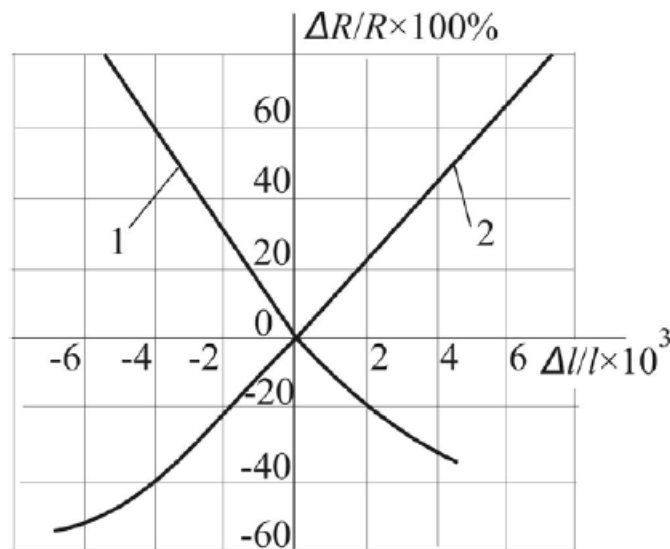


Рисунок 2.4 – Деформаційні характеристики тензорезисторів:  $n$ -типу (1),  $p$ -типу (2)

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  $+150$ .

### 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 прошки 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  $I_\Phi$  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  $\lambda$ . 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.

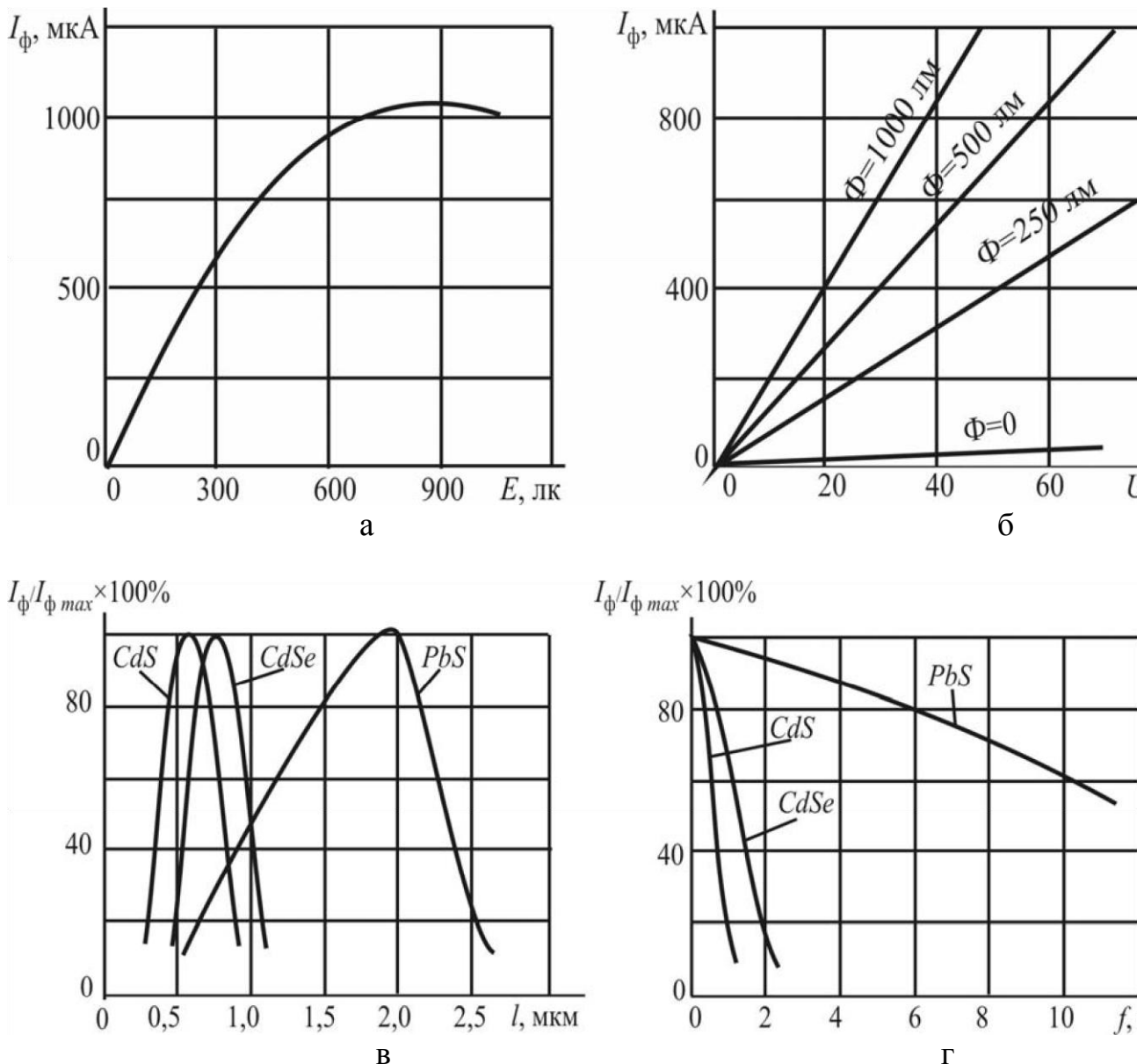


Рисунок 2.5 – Характеристики фоторезисторів: (а) – світлова; (б) – вольт-амперна; (в) – спектральна; (г) – частотна

## 8. Напівпровідникові діоди.

Загальні відомості про напівпровідникові діоди.

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

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

У площинних діодах р-n-перехід утворюється внаслідок послідовних дифузій при високій температурі домішок елементів III і V валентної групи з середовищ з їхніми парами. У точкових діодах р-n-перехід утворюється в пластинці кремнію або германію з електропровідністю n-типу, коли в неї вплавають сталевий загострений тонкий дріт, короткочасно пропускаючи

великий струм. Пластинка невелика: площа поверхні близько 1 мм<sup>2</sup>, товщина 0,1...0,6 мм.

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

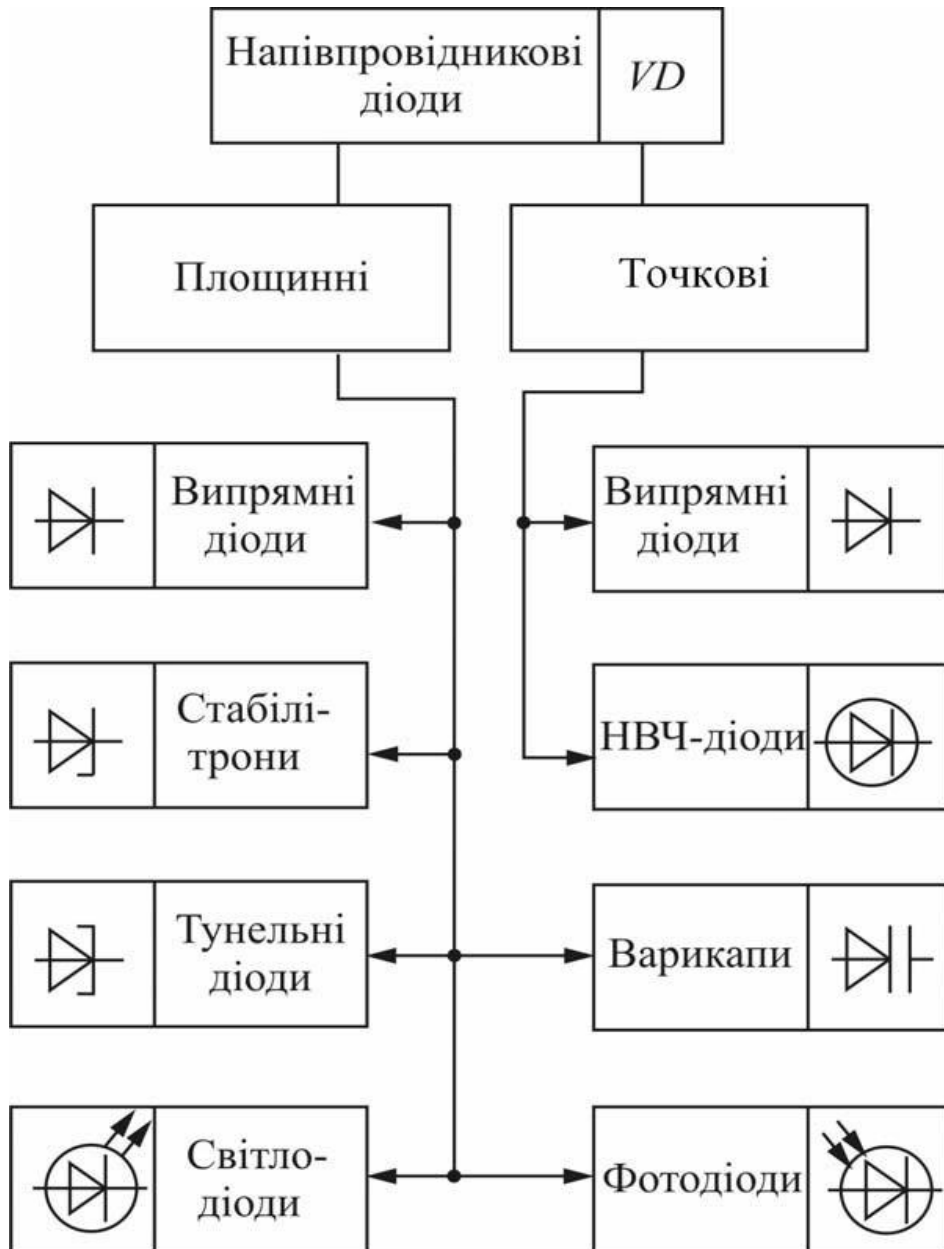


Рисунок 2.6 – Класифікація і умовні позначення напівпровідникових діодів

### 9. 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 р-п-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 зворотне 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,в 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,г, 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.

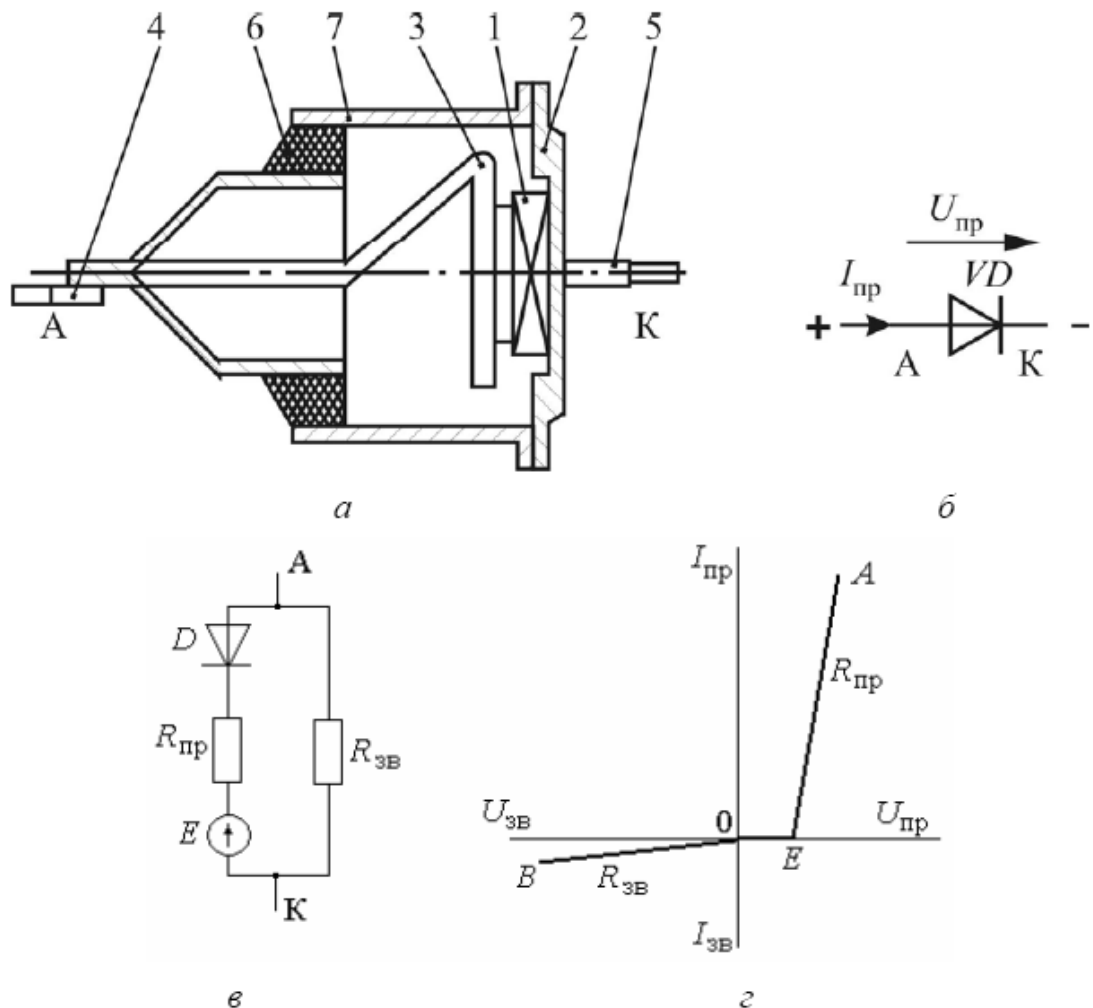


Рисунок 2.7 – Конструкція (а), умовне позначення (б), еквівалентна схема (в) і ідеалізована вольт-амперна характеристика напівпровідникового випрямного діода: 1 – пластина кристалу напівпровідника; 2 – кристалотримувач; 3 – електрод; 4,5 – виводи (А – анод, К – катод); 6 – прохідний ізолятор; 7 – корпус

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

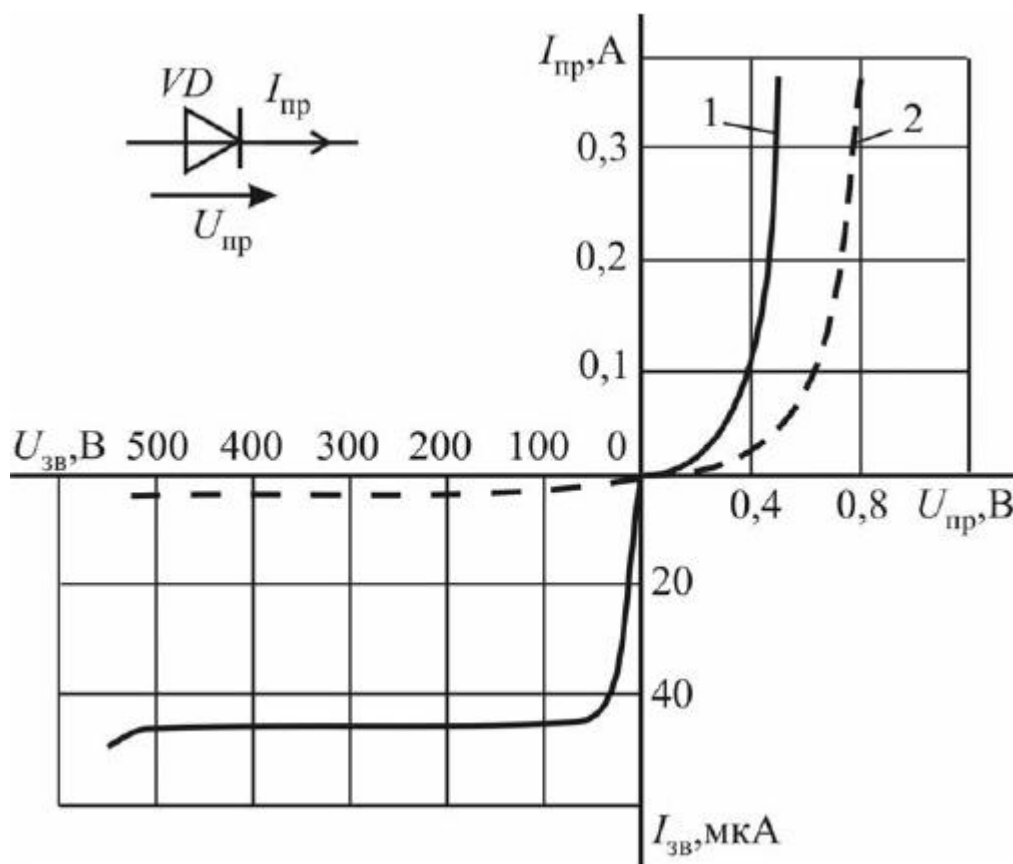


Рисунок 2.8 – Вольт-амперні характеристики германієвого (1) і кремнієвого (2) випрямних діодів

Показовим є те, 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  $U_{пр}$  у декілька десятків вольт, то виникне неприпустимо великий прямий струм  $I_{пр}$  і за декілька секунд діод розжариться та зруйнується. Але при одноразовому короточасному включенні діод не встигне перегрітися і зруйнуватися. Як правило, напівпровідникові діоди допускають 50–100-кратне перевантаження за струмом протягом 0,1 с.

При включенні напівпровідникового діода на зворотну напругу  $U_{зв}$  в ньому виникає незначний зворотний струм  $I_{зв}$ , зумовлений неосновними носіями електричних зарядів. Надмірне підвищення зворотної напруги може

призвести до теплового пробою р-п-переходу і руйнування діода. Тому більшість випрямних діодів надійно працюють при зворотних напругах, не вищих за 0,7...0,8 від пробивних. Навіть короточасне 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.

## 10. 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  $U_{ст}$ .

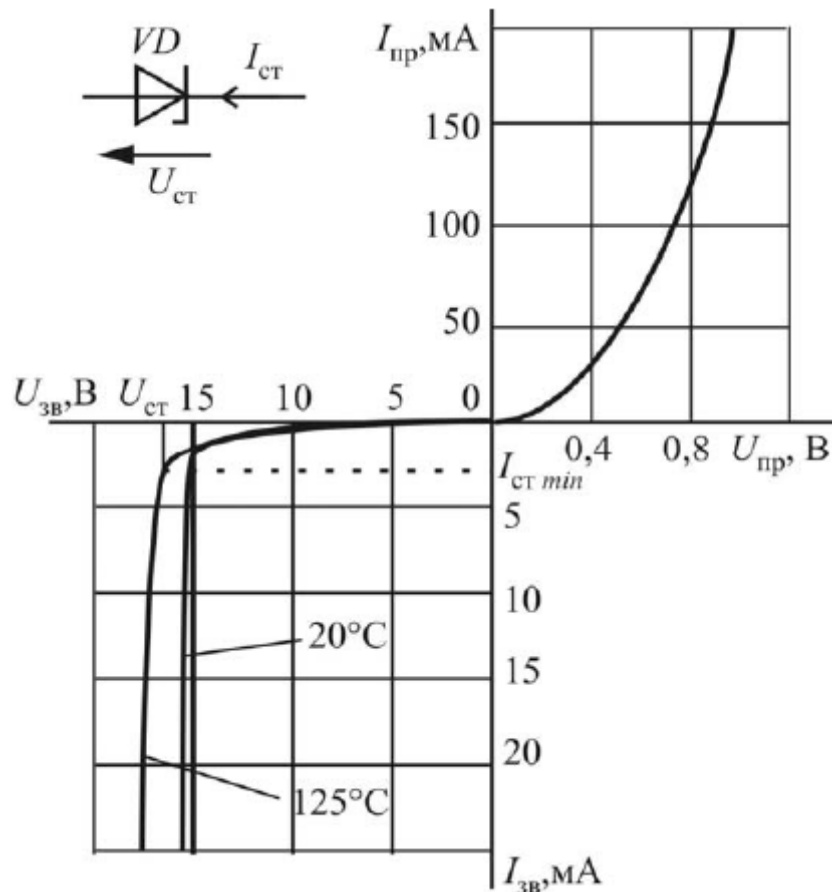


Рисунок 2.9 – Вольт-амперна характеристика стабілітрона

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

$$TKU = \frac{1}{U_{ст}} \cdot \frac{dU_{ст}}{dT} \cdot 100\%$$

Стабілітрони виготовляють на напруги стабілізації від 1 до 1000 В, за зворотними струмами на ділянці стабілізації від  $I_{ст min} \approx 1 \dots 10$  мА до  $I_{ст max} \approx 50 \dots 200$ . Значення мінімального струму  $I_{ст max} \approx 50 \dots 2000$  мА, тобто

$$\frac{I_{ст max}}{I_{ст min}} \approx 50 \dots 200.$$

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

$R_d = 0,5 \dots 200$  Ом. Температурний коефіцієнт напруги  $TKU$ , що показує на скільки відсотків змінюється напруга стабілітрона при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$ , для більшості стабілітронів дорівнює  $(-0,05 \dots +0,2) \text{ \%} / ^\circ\text{C}$ , а для

прецизійних стабілітронів, наприклад КС196В, досягає  $\pm 0,0005\%$  /  $^{\circ}\text{C}$  в діапазоні температур від  $-60$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такі стабілітрони використовуються у перевірочних електровимірювальних приладах високого класу.

### 11. 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.

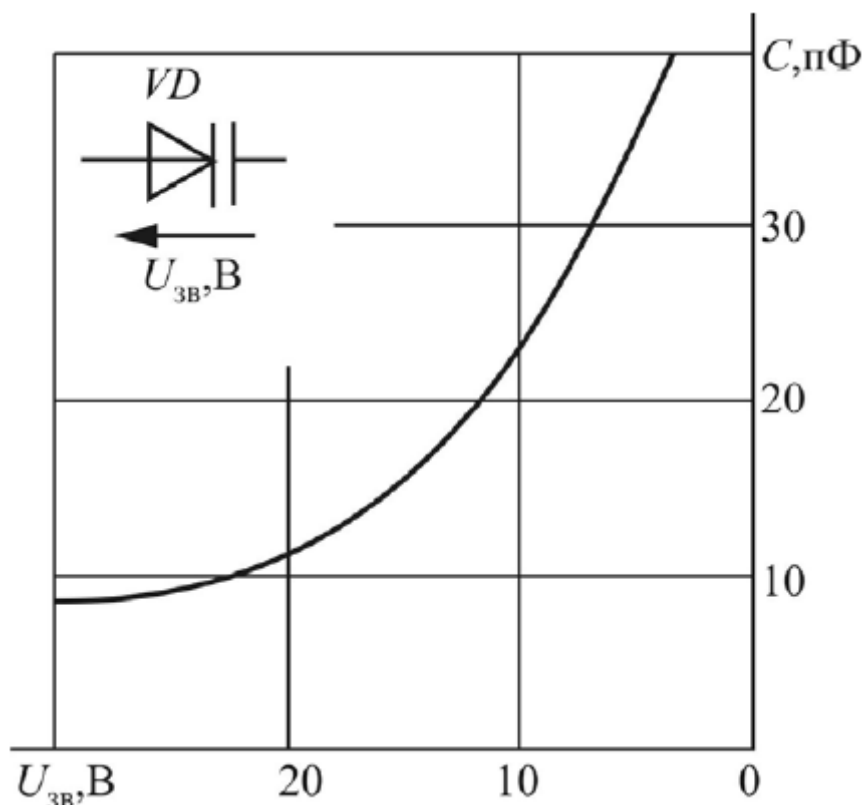


Рисунок 2.10 – Залежність ємності варикапа від зворотної напруги  $U_{зв}$

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

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

### 12. Фото- і світлодіоди.

Взаємодія оптичного випромінювання (видимого, інфрачервоного або ультрафіолетового) з носіями електричного заряду в замикаючому шарі р-п-переходу визначає роботу фотодіодів і світлодіодів.

У фотодіоді внаслідок освітлення р-п-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  $0,3 \times 0,3 \times 0,2 \text{ мм}^3$ , 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  $\eta$  – 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 ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ );

$\nu$  – частота випромінювання;

$e$  – електричний заряд електрона ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ );

$U$  – 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;  $\eta_i$  – коефіцієнт інжекції;  $\eta_0$  – 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  $\eta_0$  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.

### 13. 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).

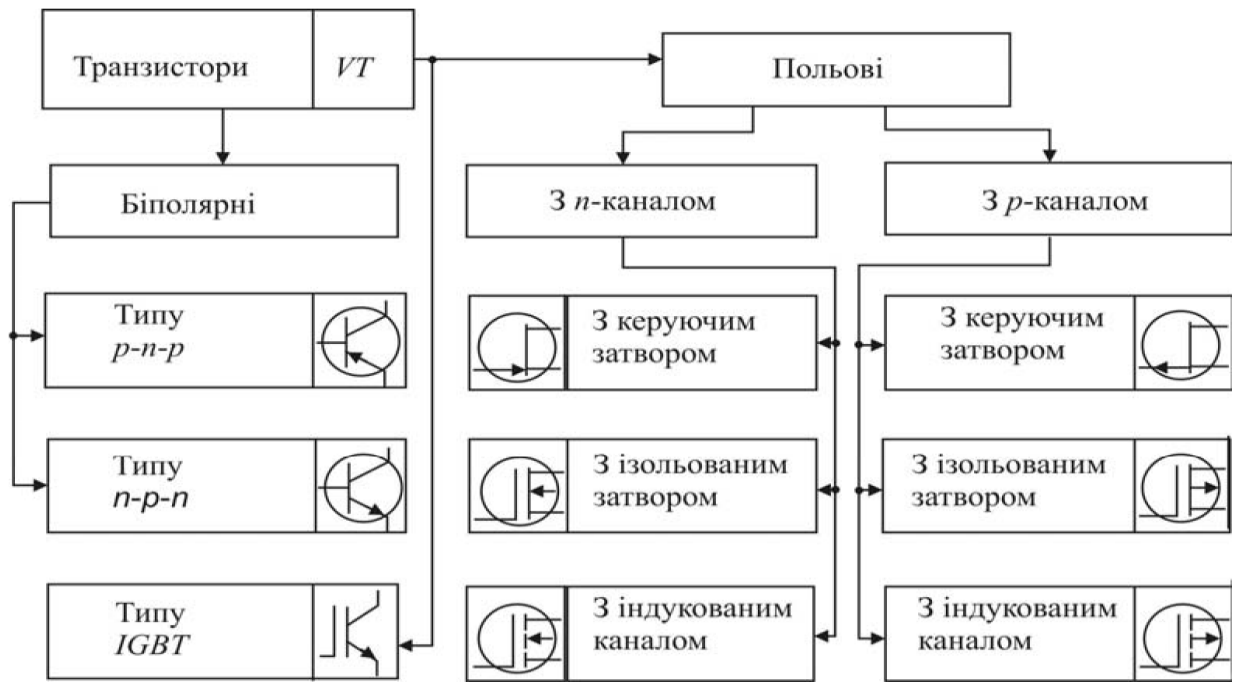


Рисунок 2.11 – Класифікація та умовні позначення транзисторів

#### 14. Біполярні транзистори.

Біполярний транзистор структурно складається з трьох шарів з провідністю р- 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 «-».

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, р-п-перехід між емітером та базою відкривається й основні носії електричних зарядів долають вузький шар бази та збираються проти р-п-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  $I_C$  пройде через колектор. Поясним цей процес більш детально на прикладі р-п-р транзистора (рис.2.14).

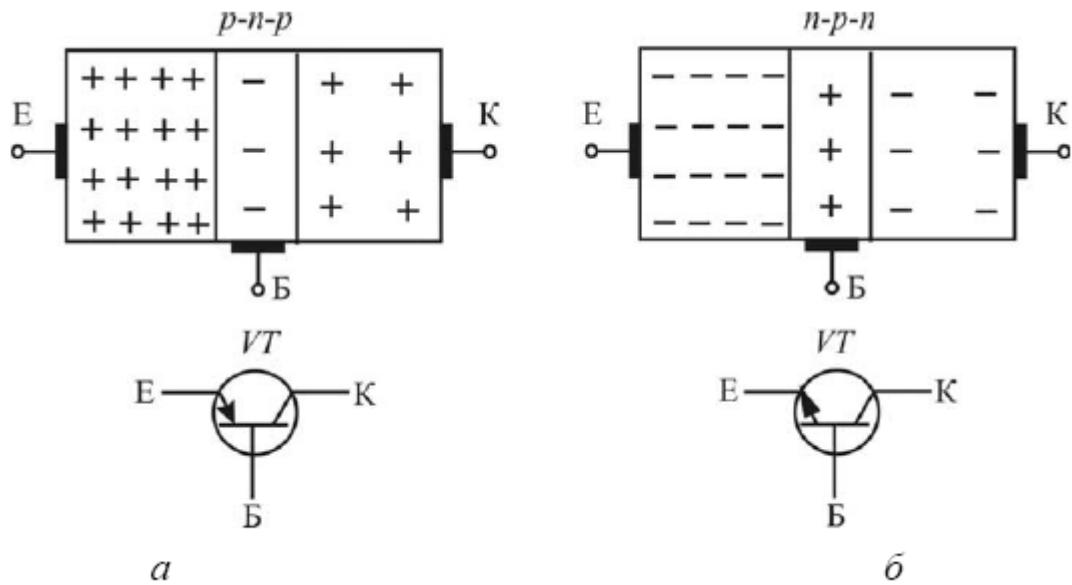


Рисунок 2.12 – Структура та умовне позначення біполярних транзисторів типів p-n-p (а) і n-p-n (б)

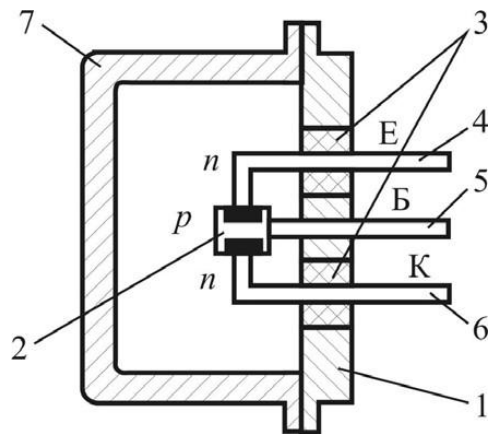


Рисунок 2.13 – Конструкція малопотужного біполярного транзистора:  
1 – основа; 2 – кристал напівпровідника; 3 – ізолюючі втулки;  
4, 5, 6 – виводи емітера Е, бази Б, колектора К; 7 – корпус

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.



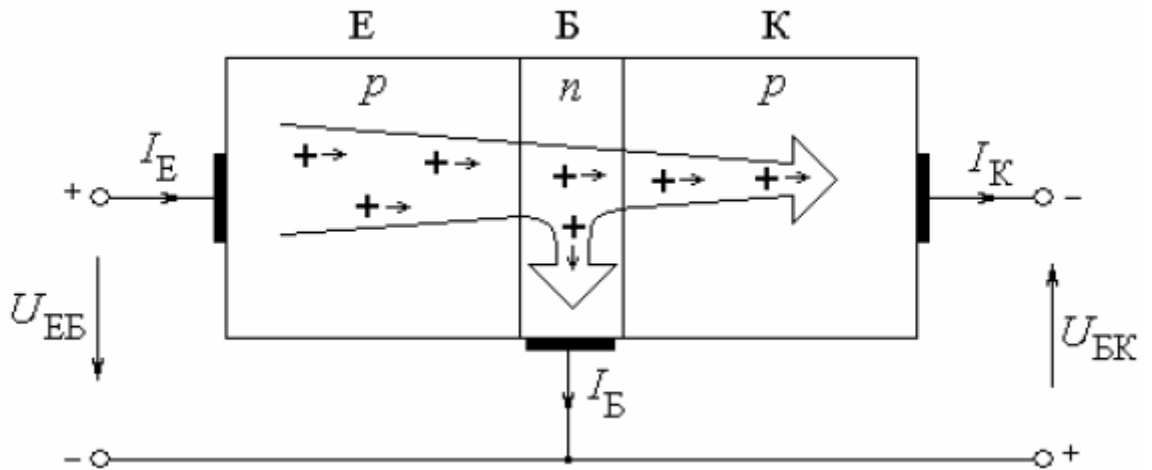


Рисунок 2.14 – До пояснення принципу роботи біполярного транзистора; дірки позначені «+»

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 р-п-перехід зумовлений дірками.

Іжектовані 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 р-п-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 поляризації – 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 йти 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).

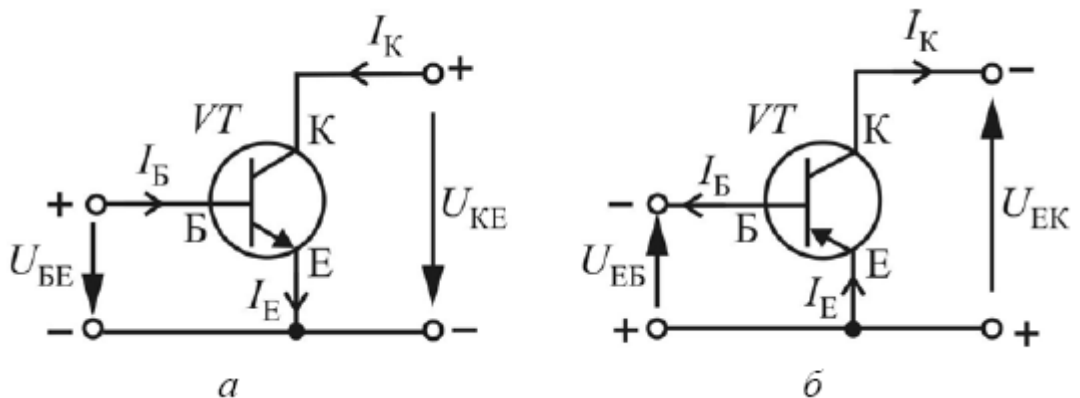


Рисунок 2.15 – Включення за схемою зі спільним емітером біполярних транзисторів типів n-p-n (а) і p-n-p (б)

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 застосування 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  $\Delta I_B$ ,  $\Delta U_{BE}$ ,  $\Delta I_K$ ,  $\Delta U_{KE}$  (рис. 2.17). Дві з цих величин можна вважати незалежними, а дві інші – їх функціями:  $U_{BE} = F_1(I_B, U_{KE})$  та  $I_K = F_2(I_B, U_{KE})$ .

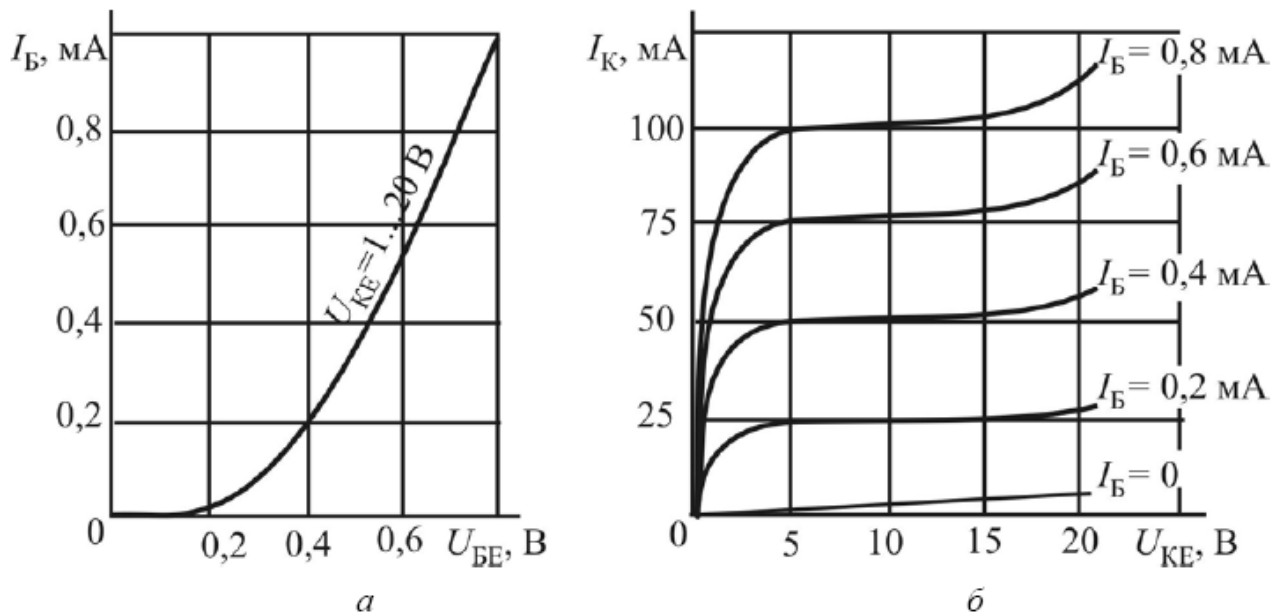


Рисунок 2.16 – Вольт-амперні характеристики біполярного транзистора:  
(а) – вхідна; (б) – вихідні

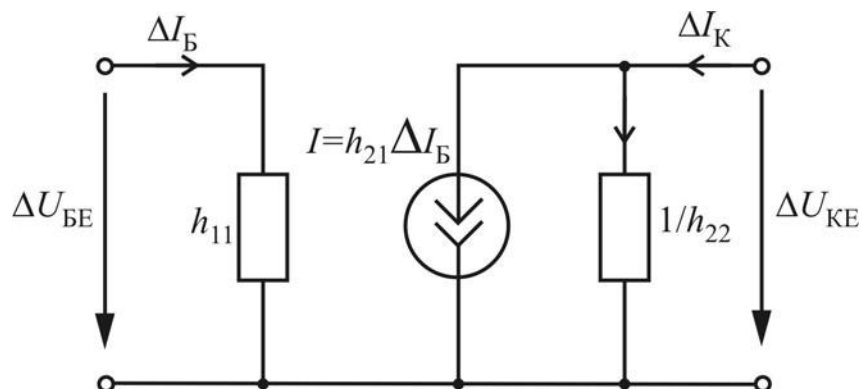


Рисунок 2.17 – Схема заміщення біполярного транзистора р-п-типу, включеного за схемою зі спільним емітером

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

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

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

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

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

де коефіцієнти  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$  визначаються за вхідною і вихідними вольтамперними 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  $h_{21}$  – коефіцієнт 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 р-п-переходів, є таким самим, як і у напівпровідникових діодів. Особливо сильно на роботу транзисторів впливає нагрів і менш суттєво – охолодження (до  $-60^\circ\text{C}$ ). 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 ІКБО. Приблизне значення струму при нагріві можна визначити з рівняння

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

де  $I_{КБОт}$  – величина  $I_{КБО}$  при підвищеній температурі;  $I_{КБОн}$  – величина  $I_{КБО}$  при нормальній температурі ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta t$  – 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  $125\ldots150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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  $500\ldots600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На частотні властивості транзисторів великий вплив мають ємності р-ппереходів. Зі збільшенням частоти ємнісний опір зменшується і шунтувальна дія ємностей зростає. Тому еквівалентна схема транзистора на високих частотах, крім суто активних опорів, містить ємності  $C_E$  і  $C_K$ , які шунтують емітерний і колекторний переходи. Особливо шкідливого впливу на роботу транзистора завдає ємність  $C_K$ , оскільки на високих частотах ємнісний опір

$$\frac{1}{\omega_B C_K}$$

являється 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  $0,1\text{ мкс}$ . 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, інжекттовані 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  $\alpha_0$  і  $\beta_0$  – коефіцієнти підсилення за струмом при частоті  $f = 0$ ;

$f_\alpha$  і  $f_\beta$  – граничні частоти транзистора в схемах зі спільною базою і спільним емітером відповідно.

Таким чином, з підвищенням частоти струму транзистора зменшується коефіцієнт передачі за струмом  $h_{21}$ . На практиці граничною частотою  $f_{gr}$  вважається така, при якій  $h_{21}$  зменшується у 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			
	$U_{KE \max}, \text{В}$	$I_{K \max}, \text{А}$	$h_{21}$	$f_{gr}, \text{МГц}$
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

### 15. 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 р-п-переходами (канальні або уніполярні транзистори);
- польові транзистори з ізолюваним затвором (МДН- або МОНтранзистори), 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-оксиднапівпровідник).

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

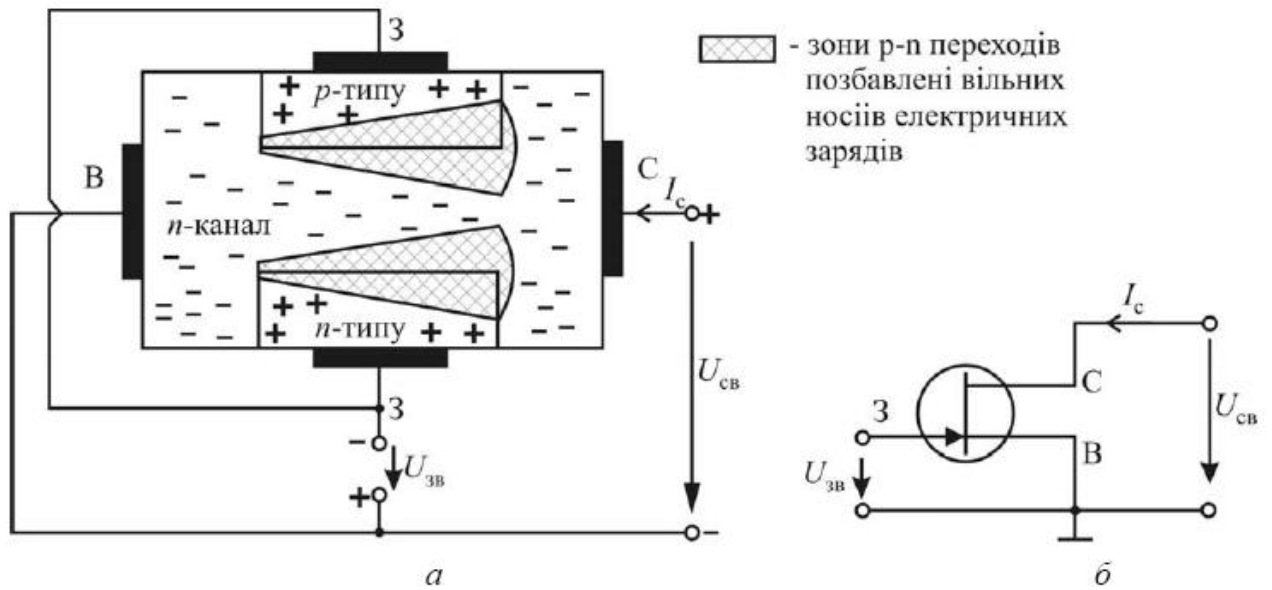


Рисунок 2.18 – Структура (а), умовне позначення і схема включення (б) польового транзистора з керованими р-п-переходами і *n*-каналом

Він підключається до електричного кола за допомогою двох електродів: стік (C) і витік (B). До напівпровідників протилежного типу, завдяки яким канал проходить між двома р-п-переходами, приєднуються керуючі електроди – затвори (3). Значення струму в каналі залежить від напруги між стоком і витоком  $U_{св}$  та опору самого каналу, який визначається його шириною, близькою до ширини прилеглих р-п-переходів. Чим вище зворотна напруга між затвором і витоком  $U_{зв}$ , тим більше розширюються вільні від зарядів р-п-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 р-п-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 енергетичні витрати на керування майже до нуля.

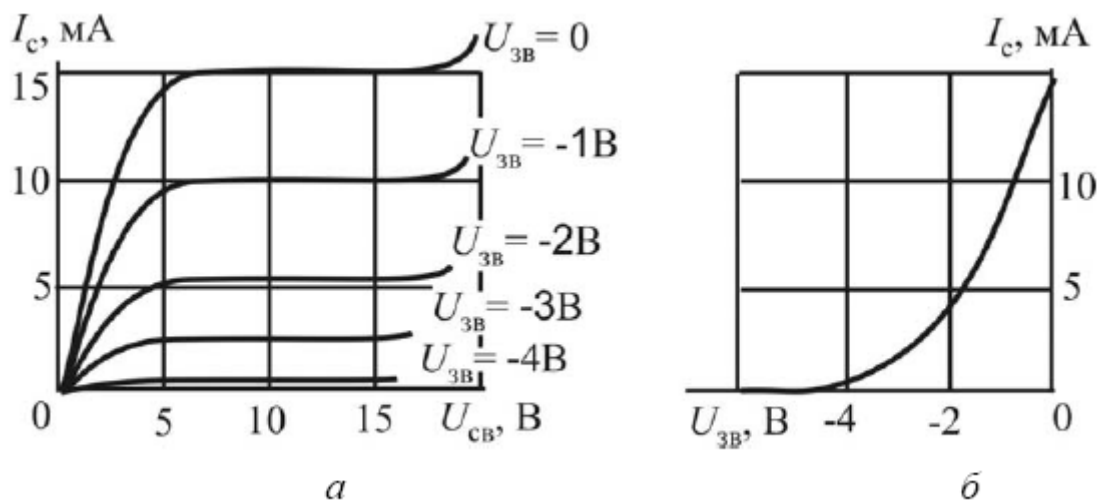


Рисунок 2.19 – Вольт-амперні характеристики польового транзистора з n-каналом: (а) вихідні; (б) передаточні

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. Області стоку  $C$  і витоку  $B$  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 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.

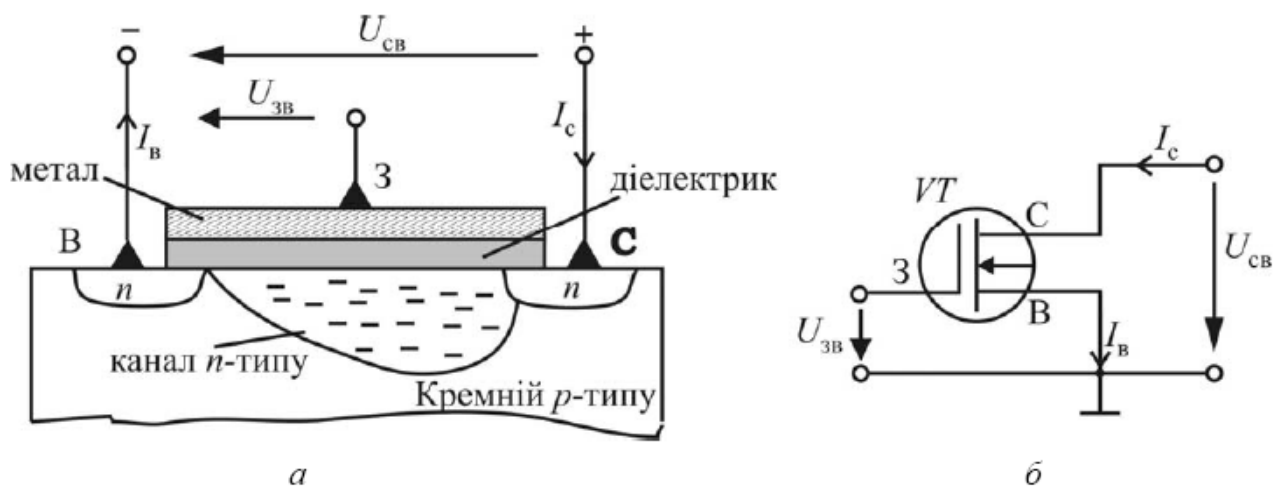


Рисунок 2.20 – Структура (а), умовне позначення і схема включення (б) польового транзистора з  $n$ -каналом та ізолюваним затвором



В режимі збіднення струм в каналі зменшується, в режимі збагачення – збільшується. Таким чином, на відміну від польового транзистора з керованими р-п-переходами, транзистор з ізолюваним затвором може працювати з нульовою, від’ємною або позитивною напругою на затворі (рис. 2.21, а).

Більш того, якщо зовсім не легувати канал, а індукувати його, втягуючи, наприклад, електричним полем від позитивного потенціалу на затворі електрони з кремнієвої підкладки р-типу, то транзистор пропускати 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).

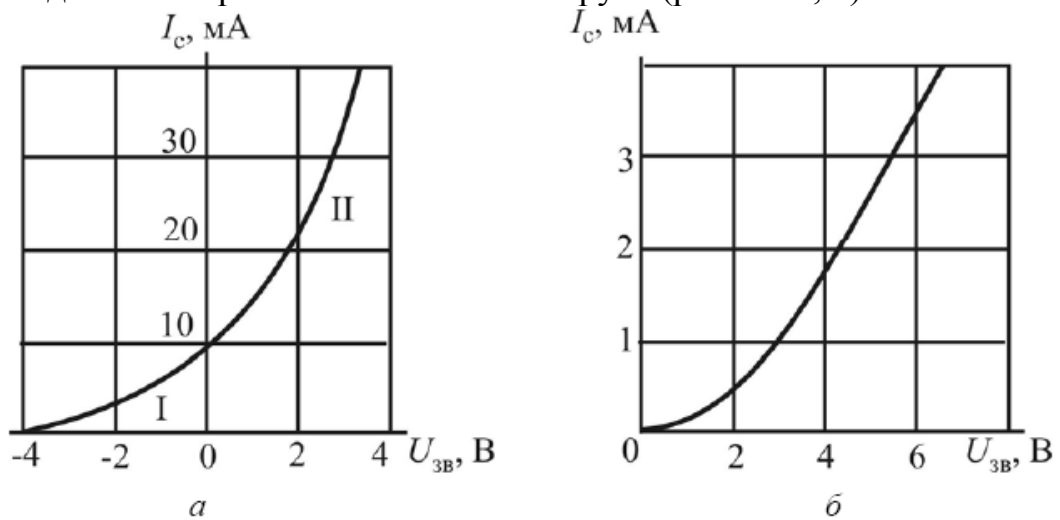


Рисунок 2.21 – Вольт-амперні характеристики польових транзисторів з ізолюваним затвором: (а) – із початковим каналом п-типу (I – режим збіднення; II – режим збагачення); (б) – з індукованим каналом п-типу

## 16. 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 ізолюваним 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 З не подана позитивна напруга, канал МДН-транзистора є перекритим і на базу біполярного транзистора рп-р не подається струм. Відповідно, він залишається теж закритим і не пропускає струм від колектора К до емітера Е, між якими утримується велика напруга (IGBT закритий).

При подачі на затвор позитивної напруги (кілька вольт) з шару р 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).

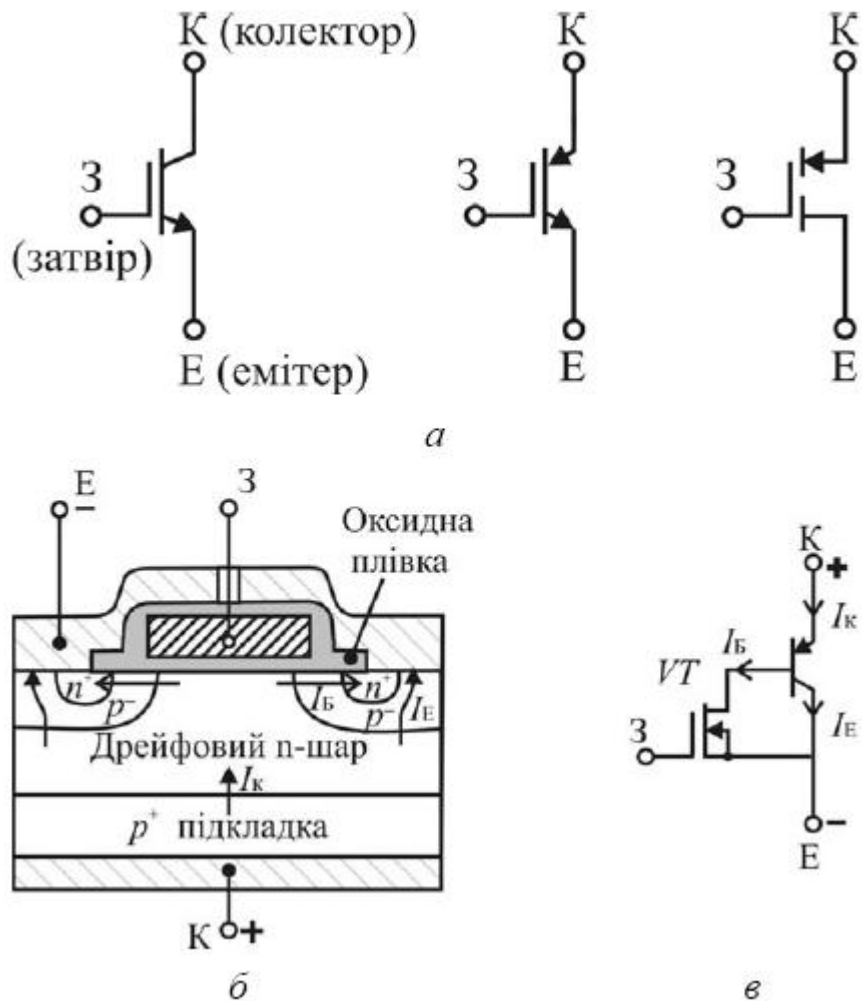


Рисунок 2.22 – Транзистор IGBT: умовні позначення (а); структура базової комірки (б); спрощена схема (в)



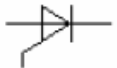
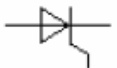
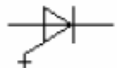
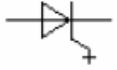
Внаслідок того що підвищення температури IGBT по-різному впливає на опори біполярного транзистора і МДН-транзисторів, загальний температурний коефіцієнт в зоні робочих струмів є позитивний, що дозволяє зберігати переваги польового транзистора (збільшення температури не призводить до збільшення струму).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

### 17. Тиристори.

Тиристором називається напівпровідниковий прилад вентильного типу, який відкривається для пропускання електричного струму при досягненні порогового 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 р- і n-типів. Зазвичай таких прошарків чотири з трьома р-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 ще 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 р-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  $U_{вкл}$  на тиристорі ширина переходу П2 стає близькою до нуля, і він відкривається для основних носіїв електричних зарядів, концентрація яких зростала з підвищенням напруги. Починається їх лавиноподібний рух, 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).

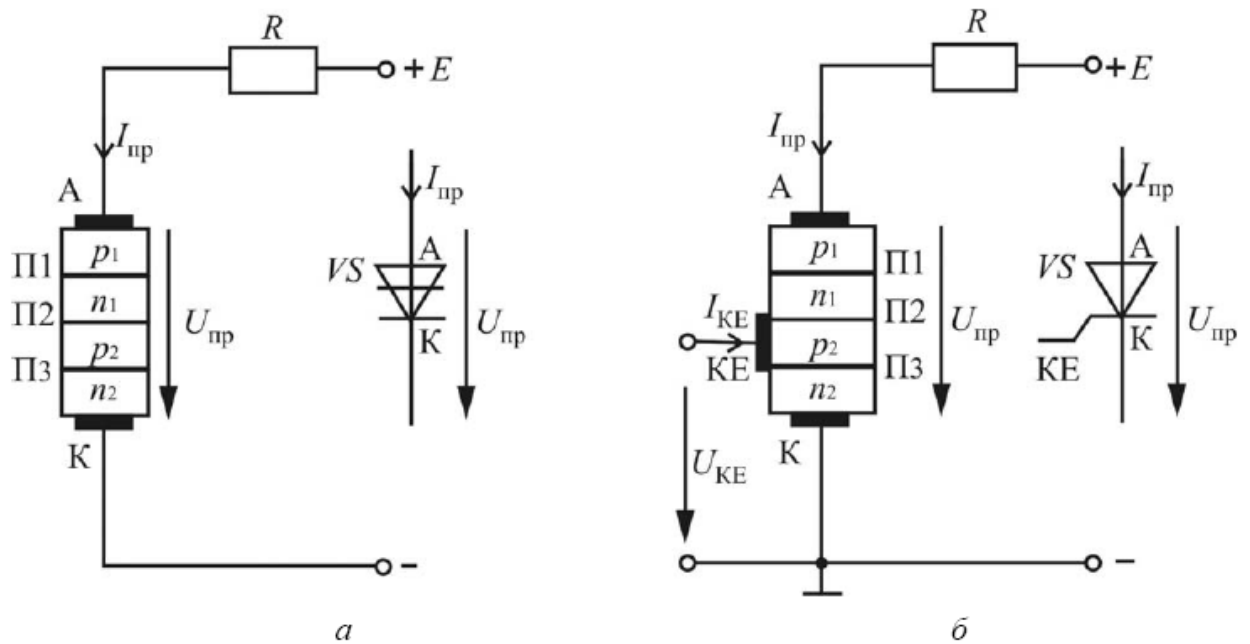


Рисунок 2.23 – Структура і умовні позначення диністора (а) і триністора (б): А – анод; К – катод; КЕ – керуючий електрод

Напруга  $U_{вкл}$ , 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.

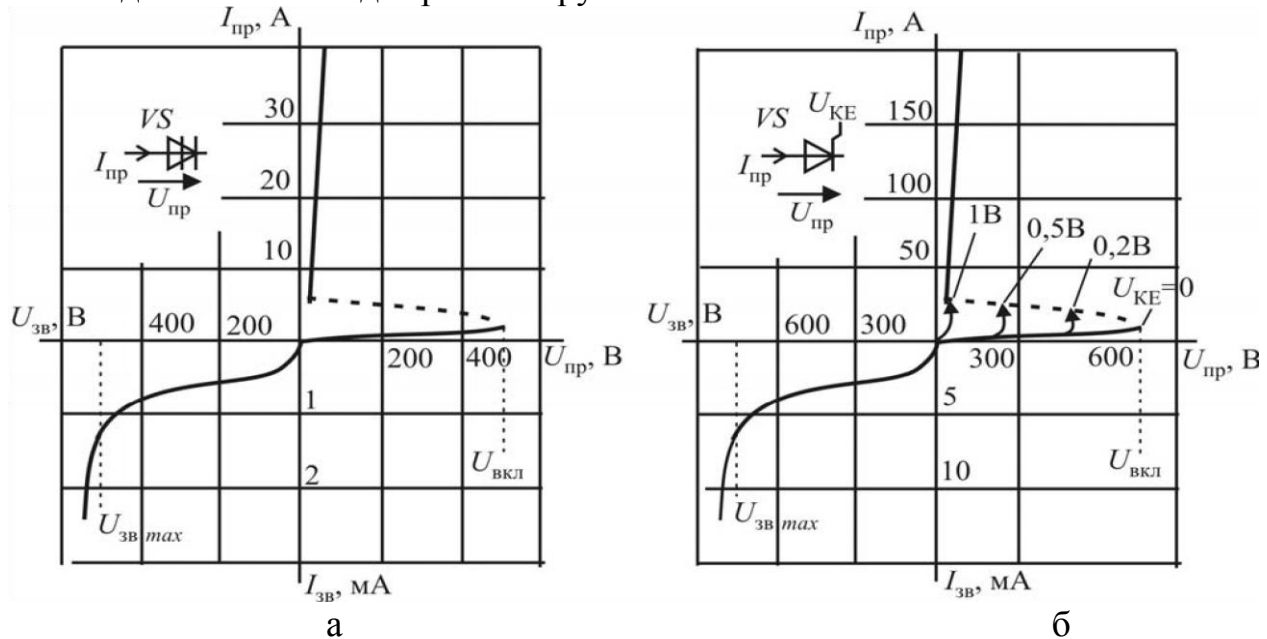


Рисунок 2.24 – Вольт-амперні характеристики диністора (а) і триністора (б)

Якою мірою знижується пробивна напруга залежно від напруги  $U_{КЕ}$  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).

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

Структури некерованих симетричних тиристорів показано на рис. 2.24.

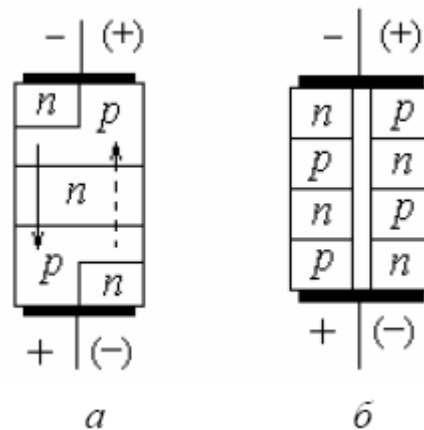


Рисунок 2.25 – Структури симетричних тиристорів

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

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

Тиристиори використовують в керованих випрямлячах та інверторах як малої, так і великої потужності, в комутаційній апаратурі різного роду. Виготовляють тиристиори 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.

## 18. Випрямлячі.

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 багатofазний (найчастіше трифазний) змінний 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  $u_{01}$ .

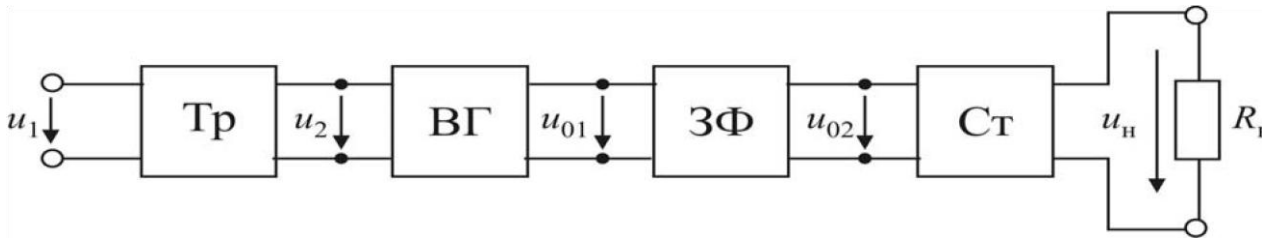


Рисунок 3.1 – Структурна схема випрямляча:

Тр – трансформатор; ВГ – вентиляна група; ЗФ – згладжувальний фільтр;  
Ст – стабілізатор постійної напруги

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 активноіндуктивне 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  $I_{нсп}$ ,  $U_{нсп}$ ;
- максимальне значення зворотної напруги діода  $U_{зв\ max}$ ;
- потужність навантаження  $P_{нсп} = U_{нсп} I_{нсп}$ ;
- амплітуда основної гармоніки випрямленої напруги  $U_{осн\ m}$ ;
- коефіцієнт пульсації випрямленої напруги  $p = U_{осн\ m} / U_{нсп}$ ;
- діючі значення струмів і напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора  $I_1$ ,  $U_1$ ,  $I_2$ ,  $U_2$ ;
- типова потужність трансформатора  $S_{тр} = 0,5 \cdot (S_1 + S_2)$ , де  $S_1 = U_1 I_1$ , а  $S_2 = U_2 I_2$ ;
- коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta = P_{нсп} / (P_{нсп} + P_{тр} + P_v)$ , де  $P_{тр}$  – втрати у трансформаторі;  $P_v$  – втрати у вентилях.

### 19. Однофазні некеровані випрямлячі.

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

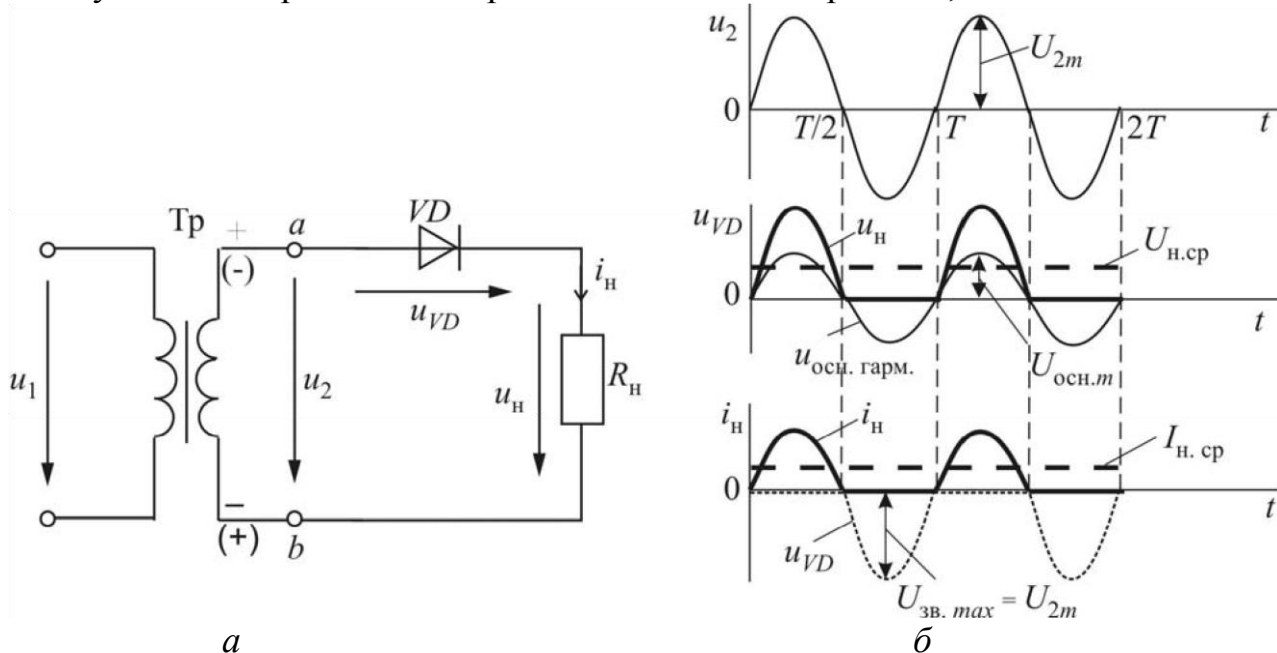


Рисунок 3.2 – Схема (а), часові діаграми напруг і струмів (б) однопівперіодного однофазного випрямляча

Однопівперіодний випрямляч складається з трансформатора Тр, до вторинної обмотки якого послідовно приєднано діод VD і навантаження  $R_H$ . Якщо в першому півперіоді потенціал точки  $a$  вище потенціалу точки  $b$ , то діод

$$i_H = \frac{u_2}{R_H}$$

знаходиться під прямою напругою і через  $R_H$  проходить струм

$u_H = R_H \cdot i = u_2$ . 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  $u_H = R_H \cdot i = 0$ , 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  $U_{\max \text{ доп}}$  з приблизно 30 % запасом:  $U_{\max \text{ доп}} \geq 1,3 U_{2m}$ . Середнє значення випрямленого струму має бути не більше допустимого середнього

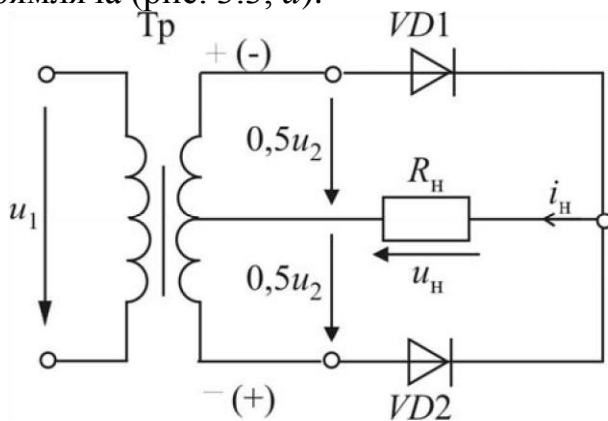
значення прямого струму:  $I_{\text{прер}} > I_{\text{нспр}}$ . Необхідно також дотримуватись максимально допустимої частоти, за якої діод ще зберігає свої вентиляльні властивості.

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.

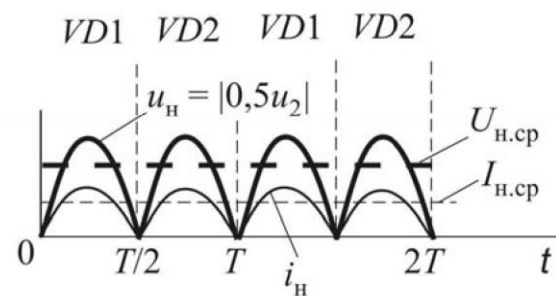
Таблиця 3.1 – Параметри некерованих випрямлячів при роботі на активне навантаження

Схема випрямляча	$U_{\text{н ср}}$	$p$	$I_{\text{н ср}}$	$U_{\text{зв max}}$
<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  $R_{\text{н}}$  однопівперіодних випрямляча (рис. 3.3, а).



а



б

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  $R_{\text{н}}$  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  $R_H$  проходить струм  $i = \frac{u_2}{2R_H}$ , відповідно

$$u_H = R_H i_H = \frac{u_2}{2}$$

(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  $R_H$ . Кожна пара діодів ( $VD1, VD3$  і  $VD2, VD4$ ) працює по черзі.

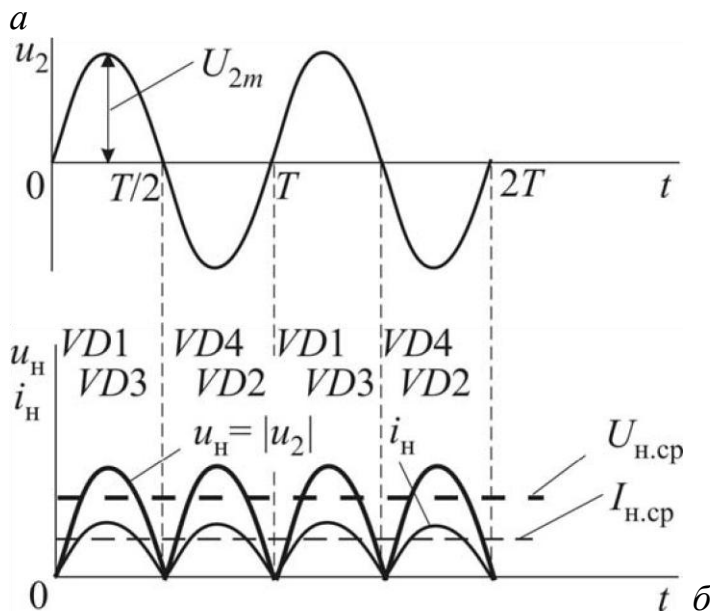
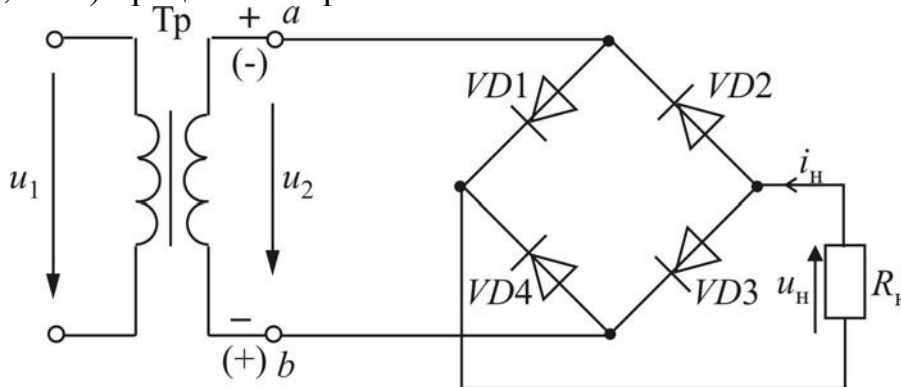


Рисунок 3.4 – Схема (а) та часові діаграми випрямлених струму і напруги (б) однофазного мостового випрямляча

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  $u_H = R_H \cdot i = u_2$ .

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

## 20. 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.

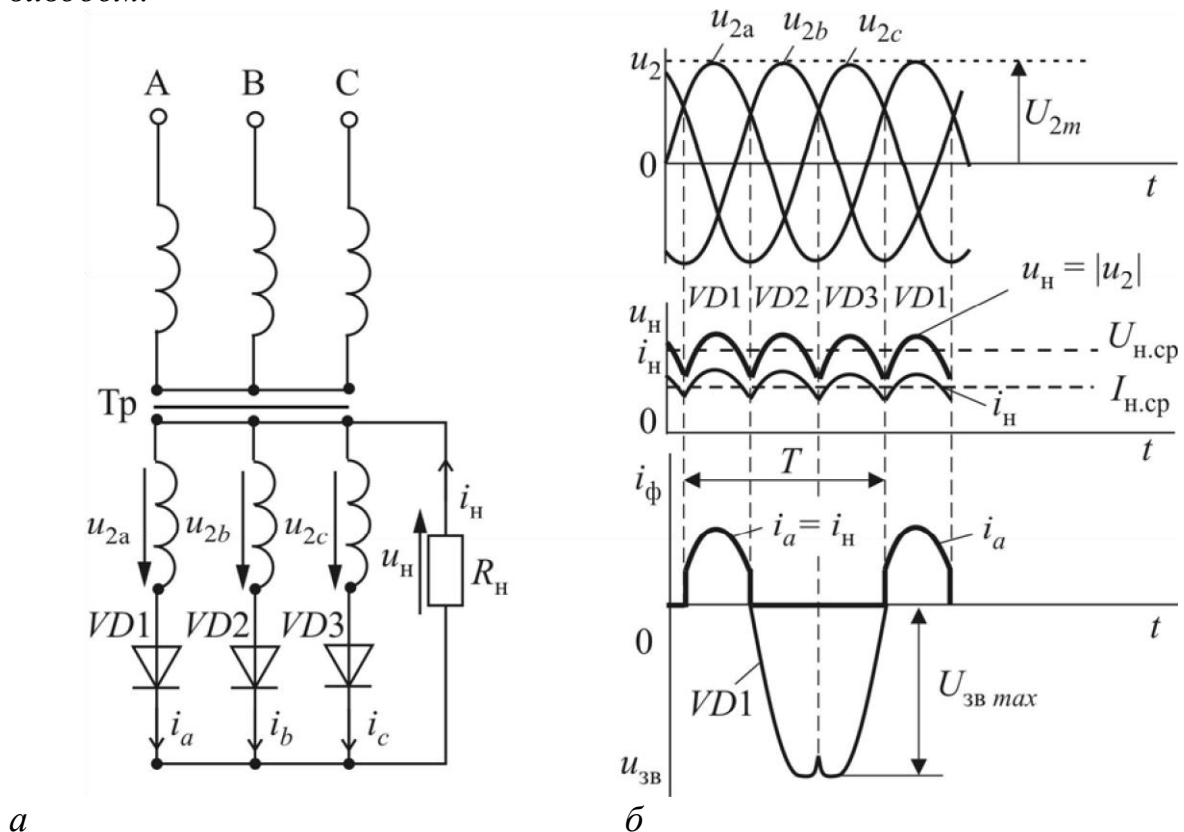


Рисунок 3.5 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) трифазного випрямляча з нейтральним виводом

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).

## 21. 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.

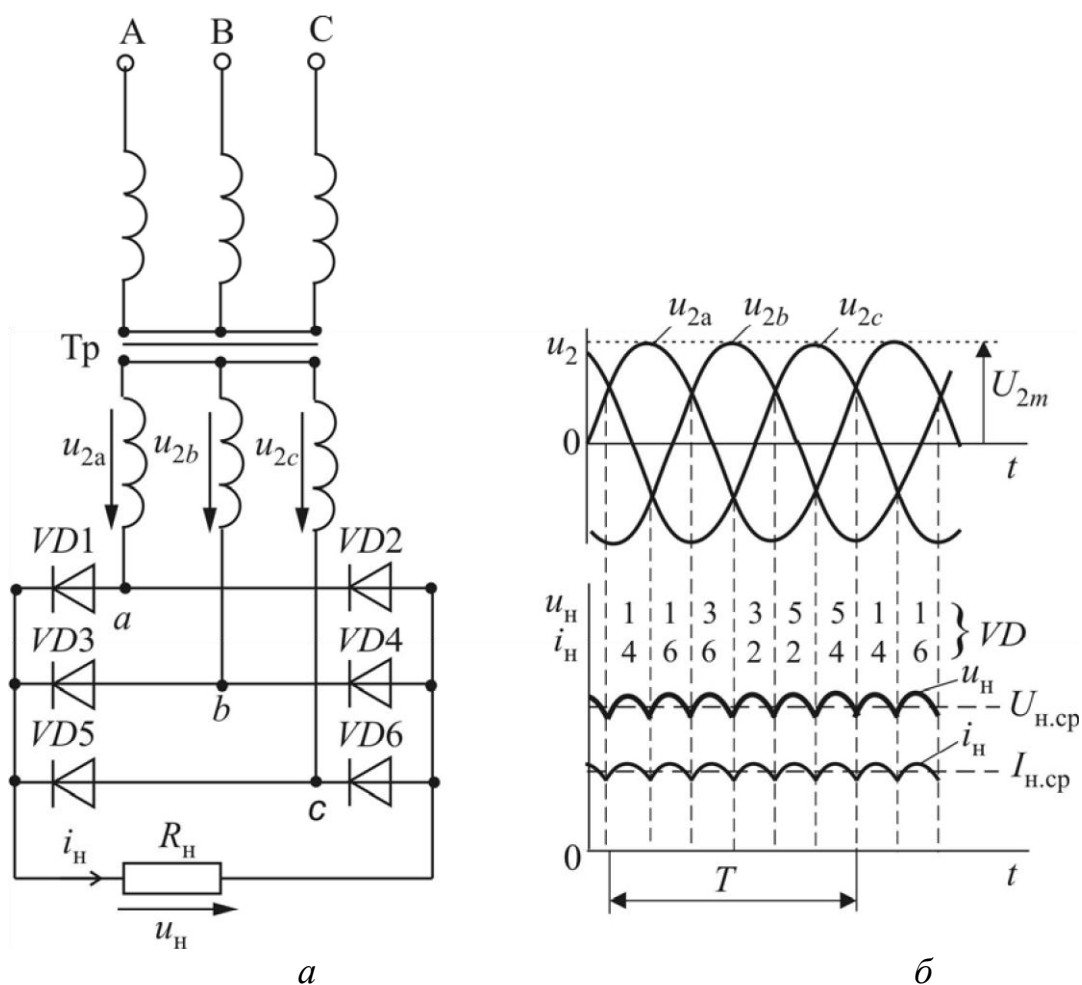


Рисунок 3.6 – Схема (а) і часові діаграми напруг і випрямленого струму (б) трифазного мостового випрямляча

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  $\alpha$ .

Одна зі схем, що забезпечує зміну кута  $\alpha$ , 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  $90^\circ$ . 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  $\alpha$  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, а зображено схему однофазного однопівперіодного керованого випрямляча.

До його складу входить фазообертач, який утворюють резистор  $R_2$  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  $R1$ .

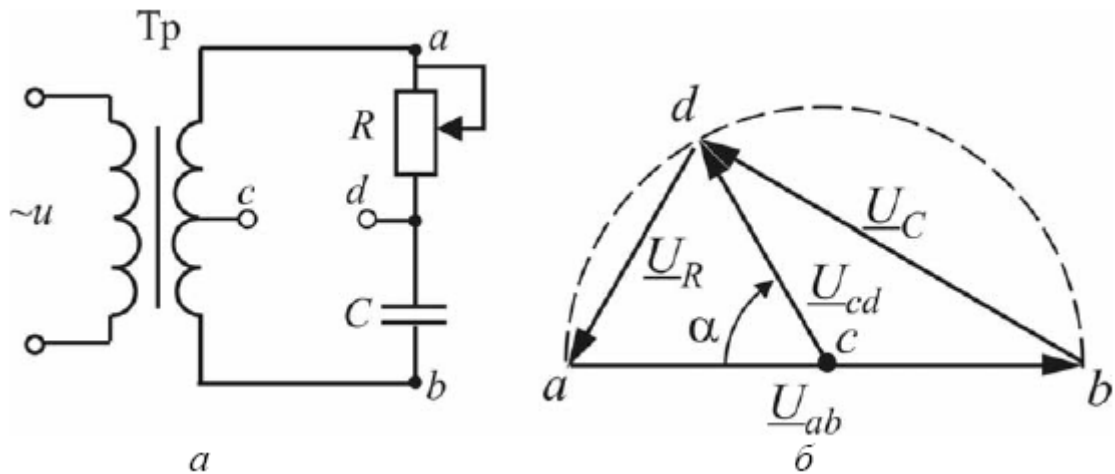


Рисунок 3.7 – Схема (а) і векторна діаграма (б) фазообертача

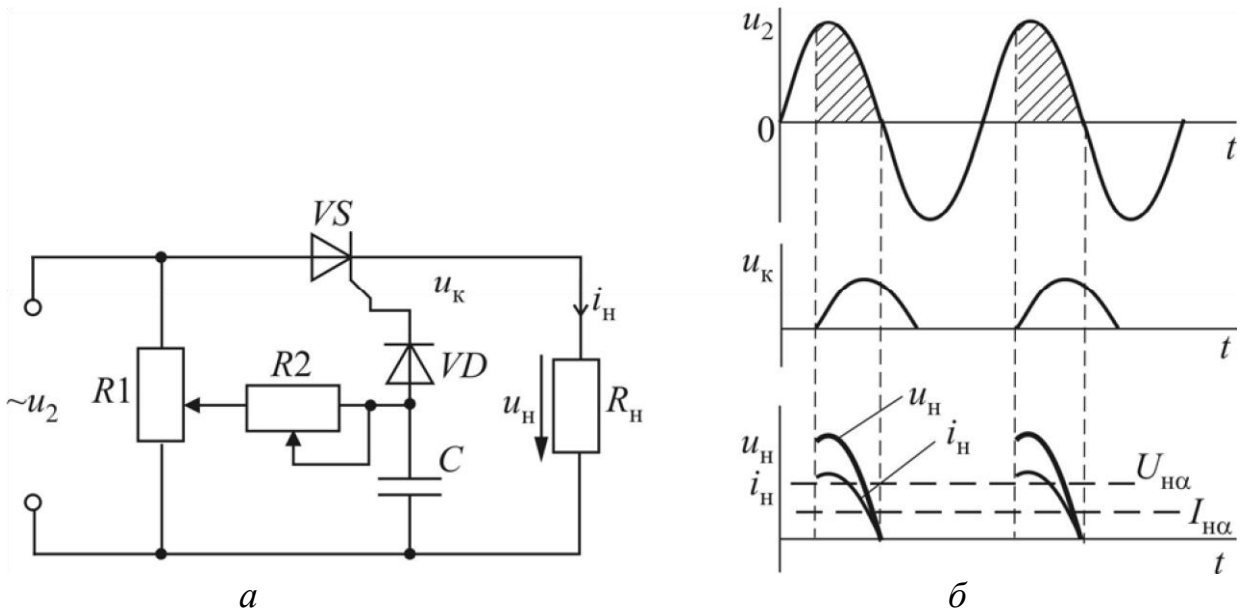


Рисунок 3.8 – Схема (а) і часові діаграми напруги і струму (б) однофазного однопівперіодного керованого випрямляча

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  $\alpha$ :

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

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

Аналогічно працюють більш складні керовані випрямлячі: однофазні двопівперіодні, 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.

## 2. Згладжувальні фільтри

Використання випрямлячів з рівнем пульсацій, які мають місце на виході з вентильної 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 вентильної 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

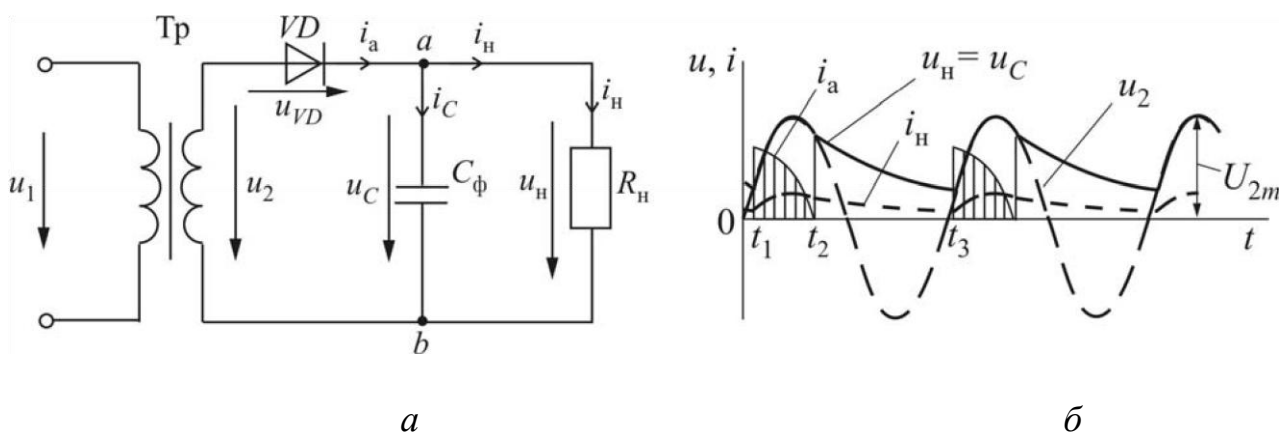
$$q = p_{\text{вх}} / p_{\text{вих}}, \quad (3.2)$$

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).

### 2.2. Ємнісний фільтр.

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



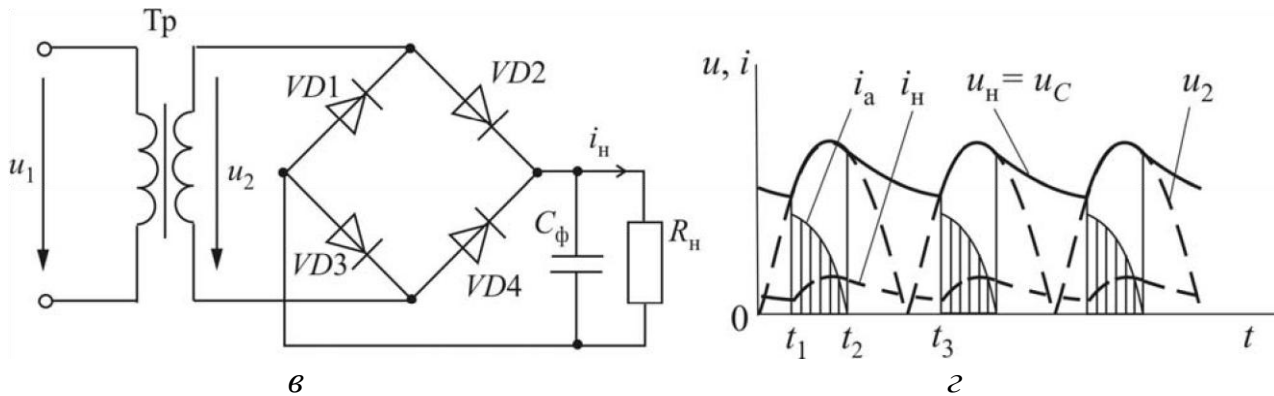


Рисунок 3.9 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) однопівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром та схема (в) і часові діаграми напруг і струмів (г) мостового випрямляча з ємнісним фільтром

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  $C_\phi$ , 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  $C_\phi$ .

Час розрядки конденсатора визначає стала часу  $\tau_{розр} = C R_{\phi H}$ . Тому чим більше  $C_\phi$  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:

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

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

Відповідно до останньої формули, якщо стала часу  $\tau_{розр} \geq 10T_{осн}$ , то коефіцієнт пульсацій  $p_{вих}$  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  $C_\phi$  додається опір  $R_\phi$ , 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.

### 23. 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 сильнострумівих 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*.

### 24. Інвертори, ведені мережею.

На рис. 3.16 зображено схему інвертора, веденого мережею, який залежно від кута регулювання  $\alpha$  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  $Tr$ .

Напрямок струму в первинній обмотці відповідає напрямку струму у вторинній обмотці, що визначається кутом регулювання  $\alpha$ . Напрямок напруг в первинній та вторинній обмотках трансформатора задається електричною мережею і від кута  $\alpha$  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 двопівперіодного інвертора. Але якщо напруга і струм у первинній веденого мережею обмотці трансформатора повністю або більш 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).



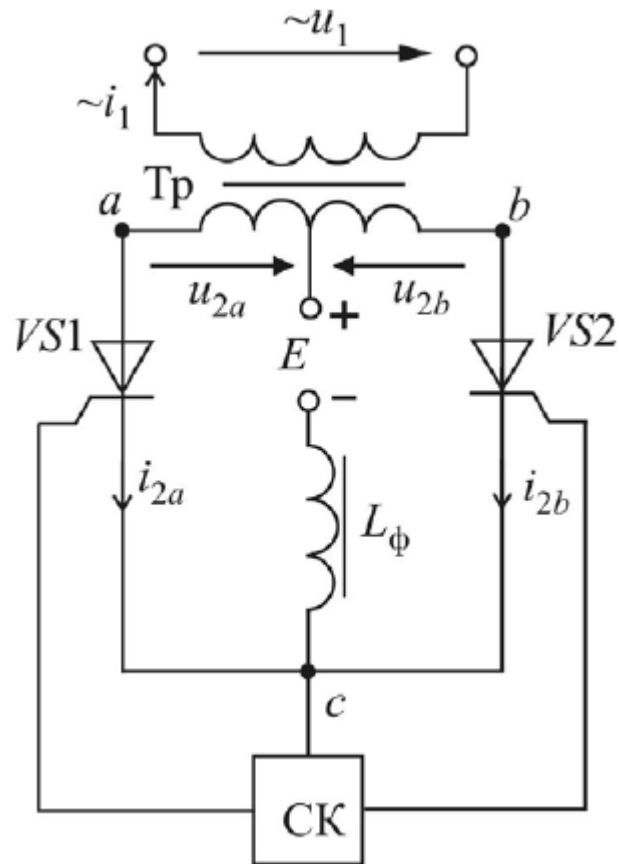


Рисунок 3.16 – Схема однофазного енергію постійного струму (рис. 3.17, а).

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  $\alpha$  береться меншим  $180^\circ$  на кут  $\beta$ , 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.

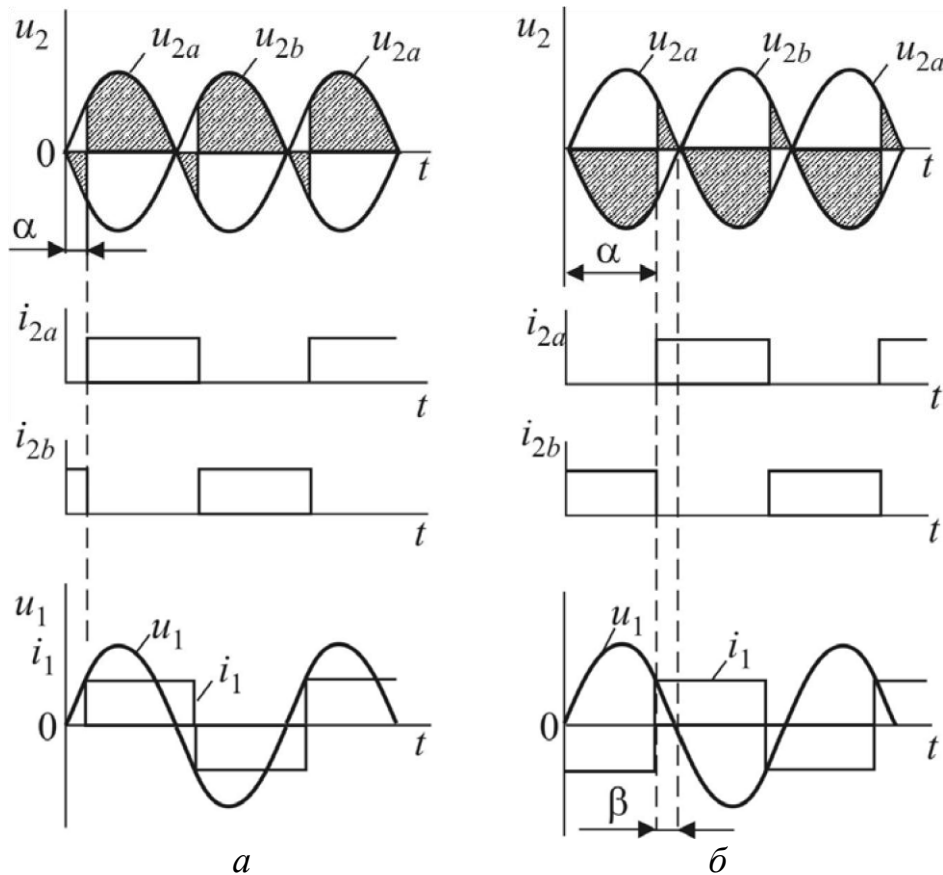


Рисунок 3.17 – Часові характеристики однофазного двопівперіодного інвертора, веденого мережею, при роботі в режимі випрямляча (а) і в режимі інвертора (б)

## 25. 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 тиристори. 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.

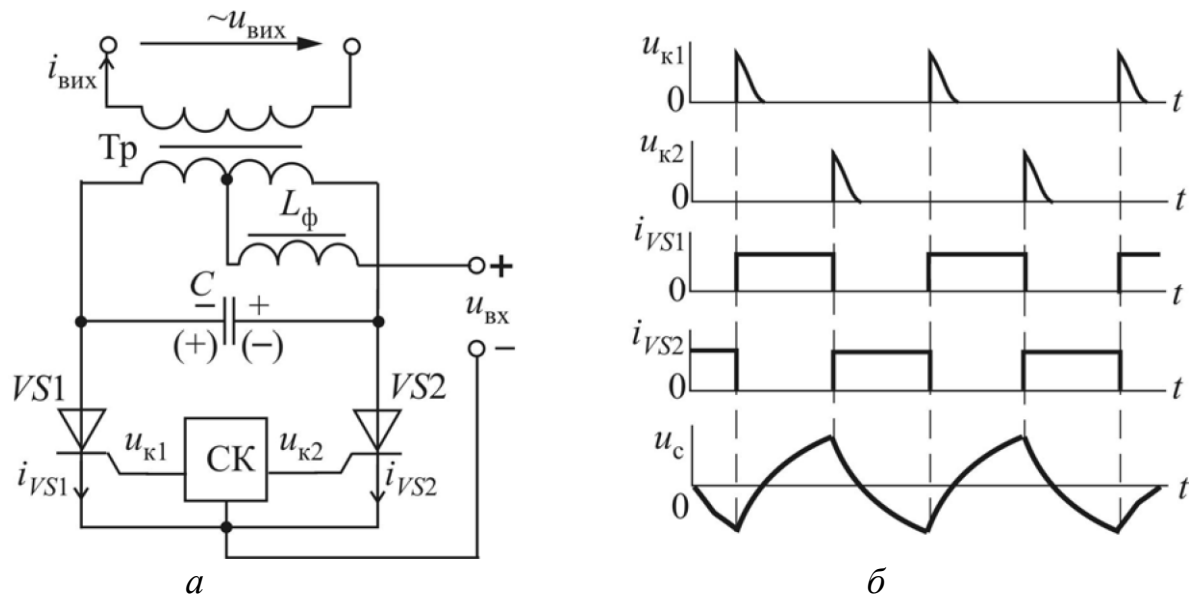


Рисунок 3.18 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) автономного інвертора

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.