

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для здобувачів 3 та 1 с.т. курсу
освітньої програми
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм здобуття освіти
ступеню вищої освіти «Бакалавр»

УДК 621.382(073)

Укладачі: Рясна О.В., старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем.

Н Електронні пристрої в системах керування конспект лекцій:/ укл.: Рясна О.В. - Суми, 2025. – 78 с.

У конспекті лекцій представлено матеріал щодо сучасних напівпровідникових приладів та методів побудови силових перетворювальних пристроїв, які активно застосовуються в електроприводах і системах електропостачання. Розглядаються як однофазні, так і трифазні випрямлячі (керовані й некеровані), принципи побудови систем імпульсно-фазового керування, стабілізатори струму й напруги, регулятори змінного струму, інвертори (автономні та мережеві), імпульсні джерела живлення, а також перетворювачі частоти.

Цей конспект призначений для здобувачів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в закладах вищої освіти.

Рецензенти:

Козін В.М., к.т.н., доцент кафедри «Енергетика та електротехнічні системи» СНАУ;

Лобода В.Б., к.ф.-м.н., професор кафедри охорони праці та фізики СНАУ.

Відповідальний за випуск:

Чепіжний А.В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

Рекомендовано до видання Радою якості інженерно-технологічного факультету.
Протокол № 6 від « 20 » травня 2025 року

© Сумський національний
аграрний університет,

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	6
	КВАЛІФІКАЦІЙНІ АРАКТЕРИСТИКИ.....	8
1	ЛЕКЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ.....	9
	ТЕМА 1. ВСТУП. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ, СТИСЛА ХАРАКТЕРИСТИКА І ПЕРСПЕКТИВА ЇХ РОЗВИТКУ. СИЛОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ. ПРИНЦИПИ РОБОТИ P-N-ПЕРЕХОДУ	9
	ТЕМА 2. РЕЖИМИ РОБОТИ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ	19
	ТЕМА 3 СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ТИРИСТОРАМИ. СПОСОБИ КОМУТАЦІЇ ЗАПИРАННЯ ТИРИСТОРІВ. КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ В РЕЖИМІ „КЛЮЧА"	42
	ТЕМА 4. ОДНОФАЗНІ КЕРОВАНІ ВИПРЯМЛЯЧІ ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ НАВАНТАЖЕННЯ	47
	ТЕМА 5 ІНВЕРТОРИ ВЕДЕНІ ЖИВИЛЬНОЮ МЕРЕЖЕЮ. ІНВЕРТОРИ І СТАТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ. КЛАСИФІКАЦІЯ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ. ІНВЕРТОРИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ	52
	ТЕМА 6 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, КОНТРОЛЮ І ЗАХИСТУ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ І КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ. ЛІНІЙНІ І НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	60
	ТЕМА 7 ВТОРИННІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ. СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ. СТАБІЛІЗАТОРИ СТРУМУ	62
	ТЕМА 8. ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З БЕЗТРАНСФОРМАТОРНИМ ВХОДОМ. ПРИНЦИП ДІЇ І ОСНОВНІ СТРУКТУРНІ СХЕМИ	75
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

ВСТУП

У даному конспекті лекцій висвітлюються питання, пов'язані з електронними пристроями, що застосовуються в системах керування енергетичної (силової) електроніки. Ця галузь є важливою для перетворення, регулювання та управління параметрами електричної енергії під час її транспортування від джерела до кінцевого споживача.

Сучасні тенденції демонструють постійне зростання обсягів електроенергії, яка зазнає перетворення. Це зумовлює суттєве підвищення ролі силових електроніки, яка забезпечує ефективне з'єднання між генерацією енергії та її використанням, особливо в умовах підвищених вимог до точності керування і економного споживання електроенергії.

Сфера силових електроніки охоплює процеси комутації, регулювання та перетворення електроенергії із застосуванням напівпровідникових силових перетворювачів. Ці пристрої характеризуються високими енергетичними показниками, добрими регульовальними властивостями, компактністю, надійністю, а також здатністю до безконтактного керування струмами та напругами у силових електричних колах.

На сьогодні силова електроніка є однією з найінтенсивніше розвинених галузей, де активно впроваджуються передові досягнення в області напівпровідникових технологій, мікропроцесорної техніки та інформаційних систем. Сучасні напівпровідникові ключові елементи, які працюють у силових колах, демонструють параметри, максимально наближені до ідеальних. Системи керування переважно реалізовані на базі потужних мікроконтролерів з високою швидкістю, які, окрім основних функцій управління, забезпечують зручну взаємодію з користувачем і зовнішніми системами автоматизації.

У конспекті лекцій представлено матеріал щодо сучасних напівпровідникових приладів та методів побудови силових перетворювальних пристроїв, які активно застосовуються в електроприводах і системах електропостачання. Розглядаються як однофазні, так і трифазні випрямлячі (керовані й некеровані), принципи побудови

систем імпульсно-фазового керування, стабілізатори струму й напруги, регулятори змінного струму, інвертори (автономні та мережеві), імпульсні джерела живлення, а також перетворювачі частоти.

Цей конспект призначений для здобувачів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в закладах вищої освіти.

КВАЛІФІКАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Мета дисципліни – ознайомити студентів з основами сучасної електроніки, з принципами роботи елементів електричних кіл: діодів, стабілітронів, транзисторів, трансформаторів, з основами напівпровідникової техніки, з принципами роботи логічних елементів.

Завдання: навчити студентів розраховувати перехідні процеси, параметри транзисторних ключів великої потужності, вторинні джерела електроживлення, транзисторні підсилювачі постійного та змінного струму, імпульсні підсилювачі, застосовувати елементи електроніки в електронних пристроях систем керування.

Студенти повинні знати:

- основи аналізу електричних кіл постійного та змінного струмів;
- принципи аналізу перехідних процесів в електричних колах;
- властивості напівпровідників, особливості роботи р-п-переходу, побудову і параметри напівпровідникових приладів.
- основні схеми і прилади, в яких використовуються діоди, тиристори, потужні імпульсні транзистори.
- методи розрахунку підсилювачів різних типів на біполярних та польових транзисторах;
- особливості роботи біполярних транзисторів в імпульсному режимі;
- прилади управління виконавчими механізмами, трифазними і однофазними двигунами;
- основні структури і таблиці стану логічних елементів.

Студенти повинні вміти:

- розв'язувати типові задачі аналізу електричних кіл;
- розраховувати основні вузли електричних систем управління;
- застосовувати знання законів електротехніки для створення нових технічних пристроїв;
- аналізувати електронні схеми;
- створювати електричні схеми управління виконавчими механізмами.

1. ЛЕКЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

ТЕМА 1. ВСТУП. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ, СТИСЛА ХАРАКТЕРИСТИКА І ПЕРСПЕКТИВА ЇХ РОЗВИТКУ. СИЛОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ. ПРИНЦИПИ РОБОТИ P-N-ПЕРЕХОДУ

Після вивчення та опрацювання розділу, студенти повинні знати характеристику р-п-переходу та принцип роботи основних елементів електроніки: діода, стабілітрона, тиристора, біполярних і уніполярних транзисторів, оптронів. Вміти подати їх графічне позначення та визначити типи відповідно до їх маркування. Знати області та особливості використання конкретних елементів і вміти вибирати їх за паспортними даними.

Ключові терміни та поняття:

діод, тунельний діод, варикап, стабілітрон, фотодіод, світлодіод, біполярний транзистор, польовий транзистор, МДН- тиристор, оптрон, р-п перехід, вольт-амперна характеристика.

План

- 1. Вступ. Класифікація електронних пристроїв**
- 2. Стисла характеристика і перспектива розвитку електронних пристроїв**
- 3. Силові напівпровідникові прилади. Принципи роботи р-п-переходу**

1. Вступ. Класифікація електронних пристроїв

Електроніка — це наукова галузь, що досліджує фізичні процеси у напівпровідникових елементах, а також електричні властивості й характеристики пристроїв і схем, створених на їх основі.

Формування електроніки як окремої науки почалося на початку XX століття з винайдення електронної лампи — діода (В. Флемінг, 1904 р.). Наступним етапом став розвиток **напівпровідникової електроніки**, що розпочався після відкриття транзистора (У. Шоклі, У. Браттейн, Дж. Бардин, 1948 р.). Завдяки суттєвим перевагам над вакуумними лампами — меншим розмірам, зниженому енергоспоживанню та вищій надійності — транзистори стали основою для стрімкого розвитку електроніки у другій половині XX століття.

Важливим поштовхом до подальшого розвитку стало впровадження **інтегральних схем** (мікросхем), серійне виробництво яких розпочалося в 1960-х роках. Ці елементи значно прискорили прогрес у сфері **інформаційної електроніки** і дали змогу створювати надвеликі інтегральні схеми, що стали ключовими компонентами мікропроцесорів та ЕОМ. Завдяки їм підвищилась надійність апаратури, зменшилися її розміри й енергоспоживання.

Залежно від типу оброблюваних сигналів функціональні елементи, побудовані на базі мікросхем, поділяються на:

- **аналогові** — працюють із неперервними в часі сигналами, де вихід однозначно залежить від вхідного значення у певний момент часу;
- **дискретні (цифрові)** — функціонують із квантованими сигналами, які внаслідок цифрової обробки можуть частково втрачати точність відтворення, проте забезпечують ефективне представлення інформації у вигляді логічних рівнів.

У сучасній електроніці пріоритетним напрямом стало широке застосування **цифрових пристроїв**, які використовують кодування сигналів та їх представлення у вигляді чисел. Такі пристрої оперують логічними одиницями та нулями, що дозволяє подавати будь-яку інформацію у двійковій формі.

Кожен етап розвитку електроніки відповідає певному рівню науково-технічного прогресу та має характерні ознаки (див. табл. 1):

Таблиця 1 — Основні етапи розвитку електроніки

Етап	Роки	Елементна база	Характерні ознаки
Перший	1904–1948	Вакуумні електронні лампи	Великі габарити, високе енергоспоживання
Другий	1948–1960	Напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори	Менші розміри, вища надійність, використання друкованих плат
Третій	1960–1980	Інтегральні схеми	Блочна побудова, зниження енергоспоживання
Четвертий	1980 – дотепер	Великі й надвеликі інтегральні схеми	Пристрої з визначеною функціональністю, блочне компонування, програмована логіка

Електронні пристрої — це сукупність технічних засобів, побудованих на основі електронних компонентів, призначених для перетворення, передавання, оброблення та зберігання електричних сигналів. Вони становлять основу сучасної електроніки та широко застосовуються в системах автоматичного керування, зв'язку, обчислювальній техніці, побутовій апаратурі тощо.

За функціональним призначенням електронні пристрої поділяються на такі основні класи:

1. **Підсилювальні пристрої** — призначені для підсилення сигналів (операційні підсилювачі, підсилювачі потужності).
2. **Генераторні пристрої** — формують електричні сигнали певної частоти та форми (генератори, таймери).
3. **Перетворювальні пристрої** — здійснюють перетворення електричних параметрів (випрямлячі, стабілізатори, інвертори).
4. **Комутаційні пристрої** — забезпечують керування потоками сигналів і електричної енергії (ключі, реле, мультиплексори).
5. **Інформаційно-обчислювальні пристрої** — виконують логічні операції та обробку даних (мікроконтролери, процесори, ІМС логіки).

6. **Вимірювальні та сенсорні пристрої** – призначені для реєстрації фізичних величин і перетворення їх у електричні сигнали (датчики, аналого-цифрові перетворювачі).

Кожен із зазначених класів може включати як дискретні елементи (транзистори, діоди), так і складні інтегральні мікросхеми, що виконують функції цілих підсистем.

2. Стисла характеристика і перспектива розвитку електронних пристроїв

Сучасні електронні пристрої характеризуються високим ступенем інтеграції, малою енергоспоживаністю, компактністю, високою швидкістю та надійністю. Основу сучасної елементної бази становлять напівпровідникові компоненти, зокрема інтегральні мікросхеми (ІМС), мікроконтролери, логічні елементи, аналогові та цифрові сигнальні процесори.

Сучасна тенденція розвитку електронних пристроїв полягає у:

- **Мініатюризації** компонентів та схем за рахунок наноелектроніки та технологій систем-на-кристалі (SoC);
- **Підвищенні інтеграції** – поєднанні різних функціональних блоків (аналого-цифрові, обчислювальні, сенсорні) в одному чипі;
- **Енергозбереженні** – розробці пристроїв з наднизьким енергоспоживанням;
- **Інтелектуалізації** – використанні адаптивних, самонавчальних алгоритмів на рівні апаратного забезпечення;
- **Універсалізації** – створенні багатоцільових платформ для застосування в різних системах керування;
- **Інтеграції з цифровими мережами** – у тому числі в межах концепцій Інтернету речей (IoT), промислової автоматизації (IIoT) та кіберфізичних систем.

Перспективи розвитку електронних пристроїв тісно пов'язані з впровадженням нових матеріалів (графен, GaN, SiC), новітніх елементних структур (CMOS, FinFET,

квантові точки), а також подальшою автоматизацією та інтелектуалізацією технічних систем. З огляду на це, знання принципів роботи, структури та характеристик сучасних електронних пристроїв є необхідними для ефективного проектування і впровадження сучасних систем керування.

3. Силкові напівпровідникові прилади. Принципи роботи р-п-переходу

Основою напівпровідникової електроніки є елементи, які виробляють на базі природних напівпровідників: германію, кремнію, селену, арсеніду галію тощо. Власна концентрація вільних носіїв заряду (електронів і дірок) таких напівпровідників знаходиться в межах 10^{16} - 10^{18} в 1 см³. Для збільшення провідності (зменшення питомого опору напівпровідника) додатково збільшують кількість вільних носіїв заряду. Цей процес називають легуванням. Якщо напівпровідник легувати донорними домішками, то збільшується кількість вільних електронів (до 10^{20} в 1 см³), і, відповідно, він характеризується електронною провідністю (**п-провідність**). У випадку легування акцепторними домішками збільшується кількість дірок, тобто визначальною є діркова провідність (**р-провідність**). Отже, в напівпровідникових елементах електричний струм може утворюватись двома носіями заряду - **електронами та дірками**.

Дія роботи напівпровідникового елемента необхідна наявність двох зон з різним типом провідностей. Це приводить до утворення електронно-діркового переходу (р-п-переходу), який визначає характеристику цих елементів (рис. 1, а). На межі цих зон, внаслідок дифузії електронів та дірок з однієї зони в іншу, утворюється шар без вільних носіїв заряду (запінний шар).

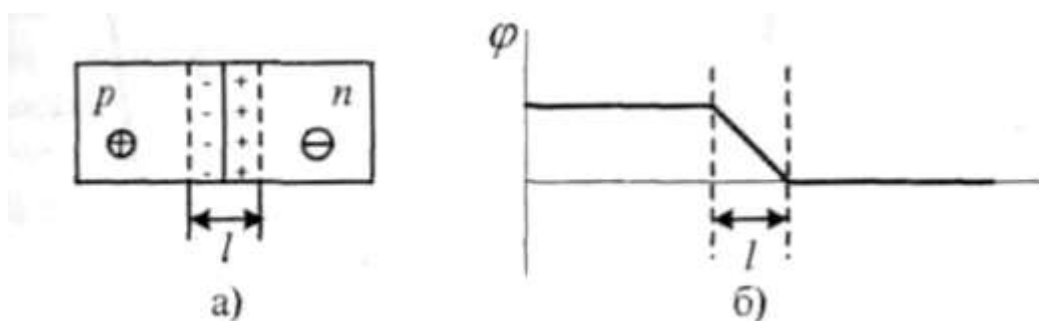


Рис. 1. Утворення р-п-переходу (а) та потенціального бар'єра (б)

Цей шар має значний електричний опір і характеризується контактною різницею потенціалів (рис. 1,б), яку називають потенціальним бар'єром. Ширина цього шару становить декілька мікрометрів.

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

Одним з найпоширеніших елементів електроніки є діод (рис. 2), робота якого визначається властивостями р-п-переходу, що керується зовнішнім електричним полем (прикладеною напругою між зоною з р-провідністю та зоною з n-провідністю).

* Електрод, який під'єднаний до області з р-провідністю називають **анодом**, а електрод, який під'єднаний до області з n-провідністю називають **катодом**.

* Якщо додатний потенціал напруги прикласти до анода, а від'ємний - до катода, то таку напругу називають **прямою**, в протилежному випадку - **зворотною** (рис. 2, а).

Зі збільшенням прямої напруги $U_{пр}$ від нуля до значення, яке дорівнює величині потенціального бар'єра (таке значення називають напругою відкриття $U_{від}$, струм діода поступово наростає й зумовлений, в основному, неосновними носіями заряду. Якщо ж значення $U_{пр} \geq U_{від}$, то це приводить до зникнення потенціального бар'єру, внаслідок чого вільні носії заряду переходять з однієї зони в іншу й струм починає стрімко наростати (рис.2, в). Значення напруги $U_{від}$ залежить від матеріалу напівпровідника і знаходиться в межах $(0,4 \div 1,2)$ В.

Такий стан діода називають **відкритим**, тобто через діод проходить електричний струм, а його опір знаходиться в межах від 0,2 Ом до 1 Ом, залежно від типу елемента. На практиці опір діода в стані провідності приймають рівним нулеві.

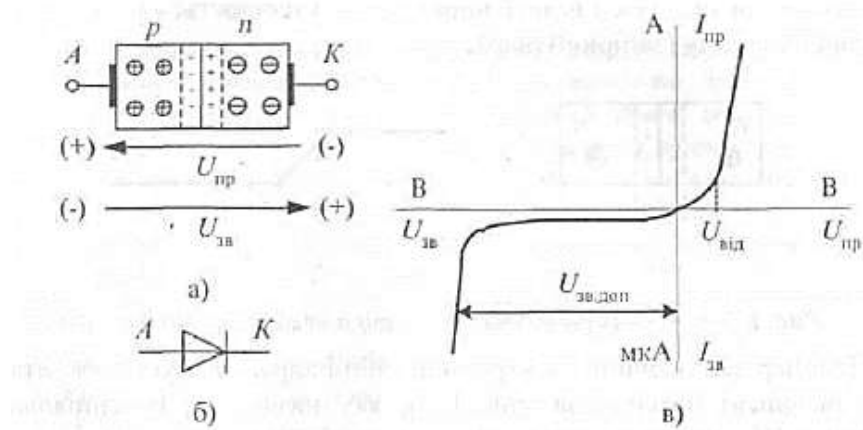


Рис. 2. Напівпровідниковий діод: структура (а), схемне зображення (б) та вольт-амперна характеристика (в)

Якщо до діода прикласти напругу зворотної полярності (рис. 2, а), то ширина запірної області збільшується, вільні носії заряду не мають змоги переходити з однієї зони в іншу і струм через діод не проходить. В цьому стані його електричний опір значно збільшується ($\approx 10^3$ Ом) і такий стан діода називають **закритим**. В закритому стані через діод проходить зворотний струм $I_{зв}$, який зумовлений тепловим дрейфом неосновних носіїв заряду, але його величина в сотні разів менша від $I_{пр}$ і практично ним можна знехтувати.

У випадку, коли прикладена зворотна напруга є більшою від значення $U_{зв.доп}$, відбувається пробивання p - n переходу і зворотний струм стрімко наростає. Це призводить до перегрівання діода й теплового пробою переходу (рис.2, в), тобто відбувається руйнування p - n переходу.

Напівпровідникові діоди використовуються переважно в схемах для випростування змінного струму в постійний, а також в інших схемах автоматики та керування. Промисловість випускає діоди зі струмом до 1000А, а також для роботи у високочастотних та імпульсних схемах.

Основні параметри, за якими вибирається діод: $I_{пр.доп}$ — допустиме значення струму через діод; $U_{зв.доп}$ - допустиме значення напруги, що прикладається до діода у зворотному напрямі; $I_{зв}$ - значення зворотного струму.

Напівпровідникові стабілітрони — це елементи, для яких робочою є

зворотна частина вольт-амперної характеристики, що забезпечує стабілізацію напруги в пристроях стабілізації (рис. 3). Якщо напруга на навантаженні дорівнює $U_{зв.доп}$, напруга стабілітрона $U_{ст}$, майже не змінюється при зміні струму в широкому діапазоні. Цю властивість стабілітрона використовують для стабілізації напруги на навантаженні. В пристроях стабілізації стабілітрон вмикається на зворотну напругу, тобто додатний потенціал кола подається на катод.

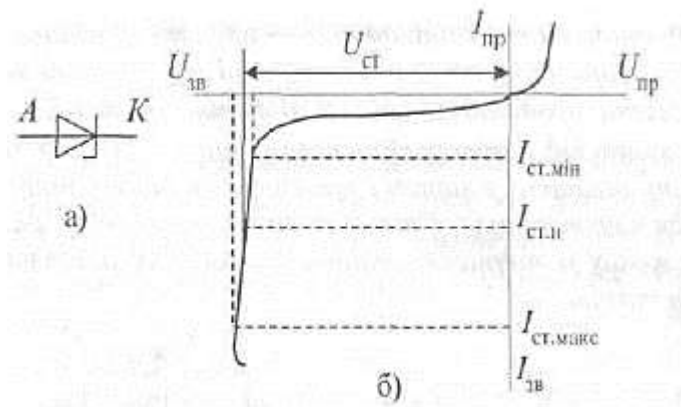


Рис. 3. Напівпровідниковий стабілітрон: схемне зображення (а) та вольт-амперна характеристика (б)

Основними параметрами стабілітрона є напруга стабілізації $U_{ст}$, мінімальний

струм стабілізації $I_{ст.мін}$ та максимальний струм стабілізації $I_{ст.макс}$. Важливим параметром для стабілітрона є також динамічний опір, який характеризує зміну напруги стабілітрона при зміні його струму

$$R_{\pi} \cong \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$$

Сучасні стабілітрони випускають на напругу стабілізації в межах

(1÷1000) В при максимальному струмі стабілізації 20 А.

Тунельні діоди. В генераторах високої частоти та імпульсних перемикачах використовуються діоди, які характеризуються від'ємним динамічним опором (штрихова ділянка вольт-амперної характеристики на рис. 4). Такі діоди називаються тунельними, а основними їх величинами є пікове значення струму $I_{\text{пik}}$ та відношення пікового значення до мінімального (струму впадини) $I_{\text{пik}}/I_{\text{впад}}$.

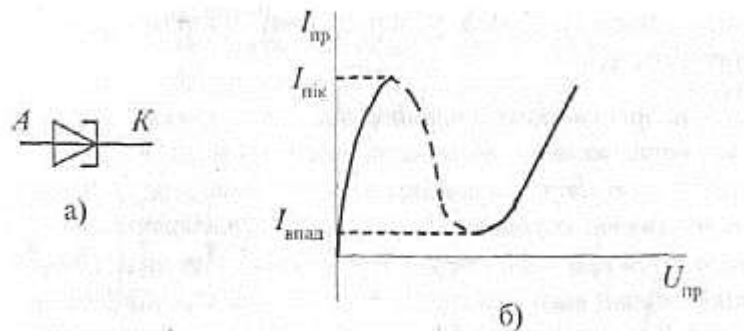


Рис. 4. Схемне зображення (а) та вольт-амперна характеристика (б) тунельного діода

Фотодіоди та світлодіоди - це напівпровідникові елементи, в яких використовуються електричні та оптичні явища. Під час освітлення фотодіода (рис. 5, а) виникає фото-ЕРС, величина якої залежить від напівпровідникового матеріалу ($0,5 \div 0,87$) В. У світлодіоді навпаки: у випадку прикладання прямої напруги випромінюється квант світла. Світлодіоди виготовляють з таких напівпровідникових матеріалів, кванти світла яких знаходяться у видимому діапазоні.

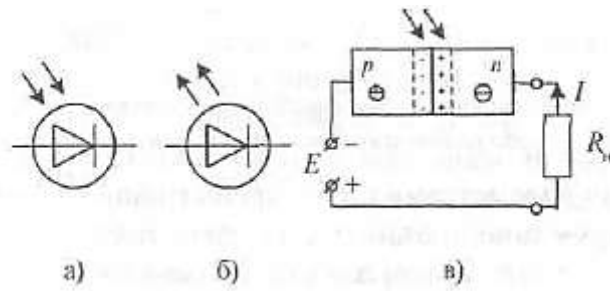


Рис. 5. Схемне зображення фотодіода (а), світлодіода (б) і схема увімкнення фотодіода (в)

Сфера застосування цих елементів досить широка - від систем автоматики й первинних перетворювачів до сонячних батарей космічних кораблів.

На даний час, крім описаних елементів, використовуються напівпровідникові елементи, в яких вольт-амперна характеристика керується магнетним полем (магнетодіоди), тиском або деформацією (тензодіоди) чи використовується ємність р-п переходу (варикапи).

Маркування діодів містить таку інформацію:

1 символ - літера або цифра, що вказує на матеріал напівпровідника (Г(1) - германій; К(2) - кремній; А(3) - арсенід галію);

2 символ - літера, що визначає клас діода (Д - випростувальні, універсальні, імпульсні діоди; В - варикапи; С - стабілітрони; Ц - випростувальні стовпи, блоки; А - високочастотні діоди; С - стабілітрони; И - тунельні діоди; Ф - фотодіоди; Л - світлодіоди);

3 символ - цифра, яка вказує на призначення: 1,2 - випростувальні; 3 - магнетодіоди; 4 - універсальні тощо;

4, 5 символи - двозначне число, що вказує на порядковий номер розробки (в стабілітронах - напругу стабілізації);

6 символ - літера, яка вказує на особливість параметрів.

Наприклад: КД108Б - кремнієвий діод випростувальний, номер розробки 08, група параметрів Б; 2С156А - кремнієвий стабілітрон, напруга стабілізації 5,6 В, група параметрів А.

ТЕМА 2 РЕЖИМИ РОБОТИ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

План

1. Режими роботи силових напівпровідникових приладів

1. Режими роботи силових напівпровідникових приладів

1.1. Силові напівпровідникові елементи

Класифікація силових напівпровідникових елементів, яка історично склалася на шляху їх розвитку представлена на рис.1.1.



Рис. 1.1 Класифікація силових напівпровідникових приладів

Далі більш детально розглянемо основні силові напівпровідникові прилади зазначені на рис.1.1.

1.1.1. Діоди

Напівпровідниковий діод – прилад, що має два зовнішніх виводи, та містить один p - n перехід. Зовнішні виводи називають анод (А) та катод (К) - рис.1.2, а, б. Існують різні типи діодів, графічні зображення деяких з них наведено на рис.1.2, в.



Рис. 1.2 Напівпровідниковий діод

а) графічне позначення; б) структура; в) графічні зображення деяких типів діодів

Фізично силовий діод являє собою p - n перехід, побудований на базі, наприклад, кремнієвої структури з різними типами провідності. Струм, що протікає в напрямку анод – катод, називається $I_{пр}$ – прямий струм, а в напрямку катод – анод $I_{зс}$ – зворотній струм.

На рис.1.3 зображено статичну (а) та динамічну (б) вольт-амперну характеристики (ВАХ) напівпровідникового діода.

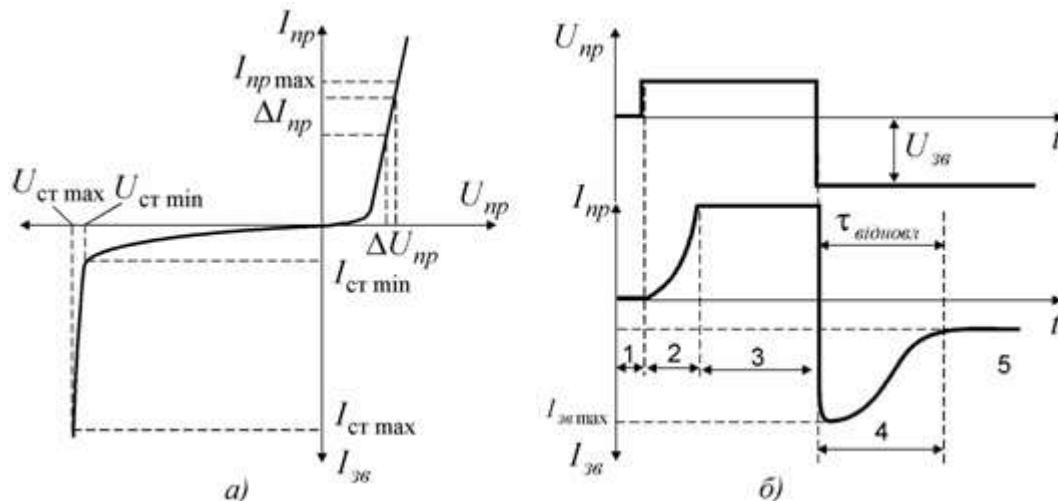


Рис. 1.3 ВАХ напівпровідникового діода:

а) статична характеристика; б) динамічна характеристика

На динамічній характеристиці (рис.1.3, б) можна виділити такі інтервали:

- 1 – діод вимкнений $U_{пр} = 0$, $I_{пр} = 0$;
- 2 – до діода прикладена пряма напруга, він відкривається;
- 3 – діод відкритий;
- 4 – до діода прикладена зворотна напруга, він закривається протягом часу $\tau_{відновл}$;
- 5 – діод закритий, до нього прикладена зворотна напруга.

Основні параметри діодів, та їх позначення.

Постійна пряма напруга $U_{пр}$ – постійна напруга на діоді при заданому прямому струмі.

Постійна зворотна напруга U_{ze} – постійна напруга прикладена до діода у зворотному напрямку.

Постійний прямий струм I_{np} – постійний струм, що протікає через діод у прямому напрямку.

Постійний зворотний струм I_{ze} – постійний струм, що протікає через діод у зворотному напрямку при заданій зворотній напрузі.

Середній прямий струм $I_{np,ср.}$ – прямий струм, усереднений за період.

Середній зворотний струм $I_{ze,ср.}$ – зворотний струм, усереднений за період.

Диференціальний опір діода $r_{диф}$ – відношення збільшення напруги на діоді до збільшення його струму. $r_{диф} = \Delta U_{np} / \Delta I_{np}$

Максимально допустимі параметри: До них відносяться всі перераховані вище, але з максимально допустимими рівнями напруг та струмів, перевищення яких призводить до виходу приладу з ладу. Необхідно відзначити, що по максимально допустимих параметрах вибираються діоди для роботи в пристроях і визначаються максимальним допустимим значенням параметра, з індексом “max”.

Імпульсний діод — різновид напівпровідникових діодів, призначених для роботи в швидкодіючих імпульсних схемах. Імпульсний діод має малу бар’єрну ємність та малий час відновлення зворотного опору. Бар’єрна ємність – ємність p-n переходу напівпровідникової структури.

Для імпульсних діодів використовують наступні параметри:

Імпульсна пряма напруга $U_{np,ім}$ – пікова пряма напруга на діоді при заданому імпульсі прямого струму.

Імпульсна зворотна напруга $U_{ze,ім}$ – пікова зворотна напруга на діоді, включаючи як однократні викиди, так і періодично повторювані.

Загальна ємність C_d – ємність, обмірювана між виводами діода при заданих напрузі й частоті.

Час встановлення прямої напруги $\tau_{вст}$ – інтервал часу з моменту подачі імпульсу прямого струму на діод (при нульовій напрузі зсуву) до досягнення заданої прямої напруги на діоді.

Час відновлення зворотного опору $\tau_{від}$ – інтервал часу з моменту проходження струму через нуль після перемикаання діода зі стану заданого струму в стан заданої напруги до моменту досягнення заданого зворотного струму.

Заряд перемикаання $Q_{пк}$ – частина накопиченого заряду, що переходить до зовнішнього ланцюга при зміні напрямку струму із прямого на зворотне.

Стабілітрон — напівпровідниковий діод, на виводах якого напруга залишається майже постійною, при зміні в деяких межах величини електричного струму, що протікає в ньому.

Для стабілітронів характерними є такі параметри:

Напруга стабілізації $U_{ст}$ – напруга на стабілітроні при заданому струмі стабілізації.

Допустиме відхилення напруги стабілізації від номінального $U_{ст.ном.}$ – максимально допустиме відхилення напруги стабілізації від номінального для стабілітронів даного типу.

Диференціальний опір стабілітрона $r_{ст}$ – відношення збільшення напруги стабілізації до збільшення струму, що його викликало.

Температурний коефіцієнт напруги стабілізації $\alpha_{ст}$ – відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютної зміни температури навколишнього середовища при постійному струмі стабілізації.

Повна ємність стабілітрона C – ємність між виводами стабілітрона при заданій напрузі.

Варикап — напівпровідниковий діод, робота якого базується на залежності бар'єрної ємності переходу від зворотної напруги. Варикапи використовуються в якості елементів з електрично керованою ємністю в схемах перестройки частоти коливального контуру.

Для варикапів характерними є такі параметри:

Ємність варикапа C_n – ємність, що вимірюється між виводами при заданій зворотній напрузі.

Коефіцієнт перекриття по ємності K_c – відношення ємностей варикапа при двох заданих зворотних напругах.

Добротність варикапа Q – відношення реактивного опору на даній частоті змінного сигналу до опору втрат при заданій ємності або зворотній напрузі.

Постійний зворотний струм варикапа $I_{зв}$ – постійний струм, що протікає через діод у зворотному напрямку при заданій зворотній напрузі.

Випрямляючі діоди

Застосовуються для перетворення змінного струму в пульсуючий і є основним компонентом блоків живлення. Конструкція силового діода зображена на рис.1.4.

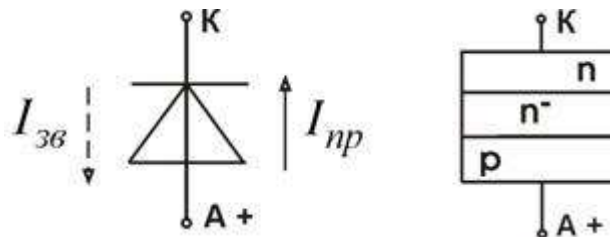


Рис. 1.4 Напівпровідниковий силовий діод

а) позначення; б) структура

Фізично силовий діод являє собою p - n перехід, побудований на базі кремнієвої структури з різними типами провідності. Для забезпечення протікання значних струмів площа p - n переходу має бути значно більшою ніж у інших типів діодів.

Для забезпечення високих значень пробивної напруги $U_{зс}$ конструкція силових діодів має певні особливості. Поміж високолегованими областями p та n знаходиться n^- слаболегована область. При зворотній напрузі в зоні n^- виникає широка область збіднена носіями заряду, за рахунок цього зменшується напруженість в області p - n переходу.

При прямій напрузі за рахунок інжекції область n^- заповнюється рухомими носіями заряду, тому на опір діода в прямому включенні вона практично не впливає.

Як приклад у табл.1.1, 1.2 наведено характеристики діода КД134 та діодної зборки КД135

Таблиця 1.1

Параметри	Познач	Min	Max	Од. вимір.
Пряма напруга КД134А9 при $I_{np} = 150$ мА КД134АС9, КД134БС9, КД134ВС9 при $I_{np} = 150$ мА КД135Б9 при $I_{np} = 200$ мА	U_{np}	1,2 1,2 1,0	1,6 1,6 1,4	В
Зворотній струм ($U_{зс} = 400$ В) Т=25°C Т=100°C	$I_{зс}$		1 10	мкА
Ємність ($U_{зс} = 0$ В) КД134А9 КД134АС9, КД134БС9, КД134ВС9 КД135Б9	С		1 1 5	пФ

Електричні параметри діода КД134 та діодної зборки КД135

Таблиця 1.2

Температурні характеристики

Параметри	Познач	Значення	Од. вимір
Тепловий опір перехід - середовище	$Z_{Т(П-С)}$	600	°C/Вт
Тепловий опір перехід - корпус	$Z_{Т(П-С)}$	260	°C/Вт

Високочастотні діоди

Для побудови високочастотних діодів використовуються p - i - n структури. Завдяки своїй відносній простоті ці структури починаючи з 50-х років знайшли застосування в конструкціях багатьох різновидів напівпровідникових діодів, починаючи від високовольтних випрямних до фотодіодів і гетеролазерів.

Найбільше застосування $p-i-n$ діоди знайшли у приладах ВЧ- і СВЧ-діапазонів для керування рівнем і (або) фазою СВЧ-сигналів, комутації ВЧ- і СВЧ-потужності в лініях передач, для захисту радіотехнічної апаратури від випадкових СВЧ-імпульсів, для стабілізації СВЧ-потужності, а також в атенюаторах ВЧ-діапазона.

У вітчизняній практиці $p-i-n$ -діоди СВЧ-діапазону одержали назву перемикальних і обмежувальних (залежно від роду використання), у ВЧ-діапазоні їх називають комутаційними й регульованими резистивними (для атенюаторів). У закордонній літературі в їхній назві збережений конструктивно-технологічний маркер «PIN-Diodes».

Останнім часом через різке розширення виробництва засобів зв'язку, і переговорних пристроїв, зокрема спеціального призначення, спостерігається постійне збільшення попиту на $p-i-n$ -діоди, що заходять все більше застосування як в апаратурі спеціального призначення, так і у комерційній електроніці.

Структура типового $p-i-n$ -діода зображена на рис.1.5.

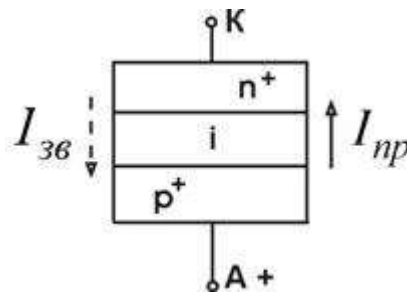


Рис. 1.5 Структура $p-i-n$ -діода

Така структура характеризується тим, що між двома сильно легованими областями дуже низького опору n^+ і p^+ перебуває активна базова i -область із високим питомим опором (типово $r_i > 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, іноді до $r_i = 200 - 4000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) і відносно великим часом життя електронів і дірок ($t_{\text{эф}} \sim 0,1-1,0 \text{ нс}$). Товщина бази лежить у межах 3-30 мкм.

Таким чином, при роботі у СВЧ і частково ВЧ діапазонах $p-i-n$ -діод (без урахування паразитних параметрів C_k і L_k) являє собою лінійний резистор, опір якого при прямому зсуві $r_{\text{пр}}$ значно менше, ніж при зворотному $r_{\text{зв}}$, при цьому $r_{\text{пр}}$ залежить від прямого струму.

Як приклад наведемо характеристики діода 2(K)507A

Корпус

Б КД105

Пробивна напруга $U_{\text{зв}}$, В

500 - 300

Розсіювана потужність P , Вт

5

Загальна ємність C_d , пф

0,8 - 1,2

Накопичений заряд $Q_{\text{нк}} / I_{\text{пр}}$, Нк/мА

200/100

Прямий опір $r_{\text{пр}} / I_{\text{пр}}$ Ом/мА

1,5/100

[Діод Шотки](#)

Названий на честь німецького фізика Вальтера Шотке — напівпровідниковий діод з малим падінням напруги при прямому включенні. Діоди Шотки використовують перехід метал-напівпровідник як бар'єр Шотки (замість p - n переходу, як у звичайних діодах). Допустима зворотна напруга діодів Шотки, що випускають промислово обмежена 250 В. На практиці більшість діодів Шотки застосовується в низьковольтних ланцюгах при зворотній напрузі порядку одиниць і декількох десятків вольт.

Переваги :

1. Мале пряме падіння напруги близько 0,2-0,4 В. Настільки мала пряма напруга властива тільки діодам Шотки з максимальною зворотною напругою порядку десятків вольт.

2. Бар'єр Шотки також має меншу електричну ємність переходу, що дозволяє помітно підвищити робочу частоту. Ця властивість використовується в інтегральних мікросхемах, де діодами Шотки шунтуються переходи транзисторів логічних елементів. У силовій електроніці мала ємність переходу (тобто короткий час відновлення) дозволяє будувати випрямлячі на частоти в сотні кГц і вище. Наприклад, діод MBR4015 (15 В, 40 А), оптимізованими під височастотне випрямлення, нормований для роботи при d/dt до 1000 В/мс.

3. Завдяки кращим динамічним характеристикам і малим ємностям переходу випрямлячі на діодах Шотки відрізняються від традиційних діодних випрямлячів зниженим рівнем перешкод.

Недоліки:

1. При короткочасному перевищенні максимальної зворотної напруги діод Шотки виходить із ладу, на відміну від кремнієвих діодів, які переходять у режим зворотного пробоя, і за умови не перевищення максимальної потужності, що розсіюється на діоді, після падіння напруги кремнієвий діод повністю відновлює свої властивості.

2. Діоди Шотки характеризуються підвищеними (щодо звичайних кремнієвих діодів) зворотними струмами, що зростають із ростом температури кристала

Диністор – напівпровідниковий прилад, що має три p - n переходи, зовнішні виводи виконані лише від крайніх областей (p та n). На рис.1.6 зображено диністор, його структуру та вольт-амперну характеристику.

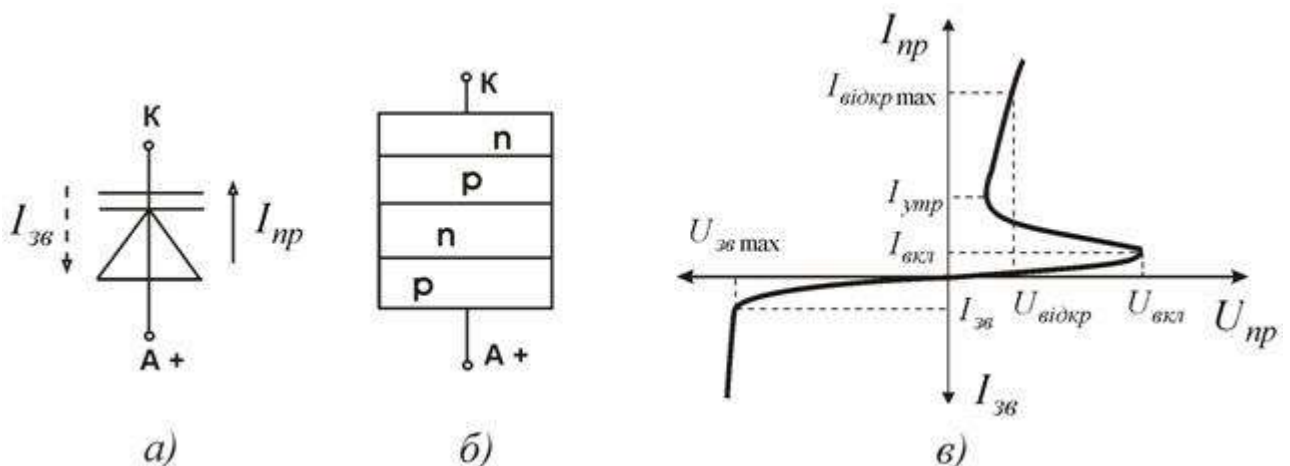


Рис. 1.6 Диністор: а) позначення диністора; б) структура диністора; в) ВАХ диністора

Якщо плавно збільшувати напругу, струм через диністор буде спочатку незначно зростати (рис.1.6, в). При цьому диністор практично закритий. Такий стан буде поки напруга на диністорі не стане дорівнювати напрузі включення $U_{\text{екл}}$. В цей момент в чотирьох шаровій структурі настає лавиноподібний процес зростання струму і диністор переходить у відкритий стан. Падіння напруги на ньому різко зменшиться (це видно на рис.1.6, в), а струм через диністор тепер буде визначатися опором навантаження, але він не повинен перевищувати максимально допустимого значення $I_{\text{відкр max}}$.

Напруга, при якій диністор відкривається, називають напругою включення $U_{\text{екл}}$, а відповідний цьому значенню струм - струмом включення $I_{\text{екл}}$.

У відкритому стані диністор може знаходитися до тих пір, поки прямий струм через нього буде перевищувати мінімально допустимий струм $I_{\text{утр}}$, що називається струмом утримання.

Зворотна вітка характеристики диністора схожа на характеристику діода. Подача на диністор зворотної напруги вище допустимого $U_{\text{зв max}}$ може вивести диністор з ладу.

1.1.2. Тиристори

Тиристор - це перемикаючий напівпровідниковий прилад, що пропускає струм в одному напрямку. Його називають напівпровідниковим керованим вентилем (Silicon Controlled Rectifier, SCR).

Тиристор має три виводи, один із яких - керуючий електрод - використовується для управління станом тиристора. При подачі імпульсів управління на відкривання тиристора він різко переходить у включений стан.

Основні властивості тиристора:

1. Тиристор, як і діод, проводить в одному напрямку, проявляючи себе як випрямляч;
2. Тиристор переводиться з виключеного стану у включене при подачі сигналу на керуючий електрод і, отже, як вимикач має два стійких стани. Проте для повернення тиристора у виключений (розімкнутий) стан необхідно виконати спеціальні умови;
3. Керуючий струм, необхідний для переведення тиристора із закритого стану у відкрите, значно менше робочого;
4. Середній струм через навантаження, яке включене послідовно з тиристором, можна точно регулювати залежно від тривалості включеного стану тиристора.

Структура тиристора

Тиристор - керований трьохелектродний напівпровідниковий прилад, що складається із чотирьох кремнієвих шарів p та n типу, що чергуються.

Графічне позначення, структура та статична характеристика тиристора наведені на рис.1.7, а-в.

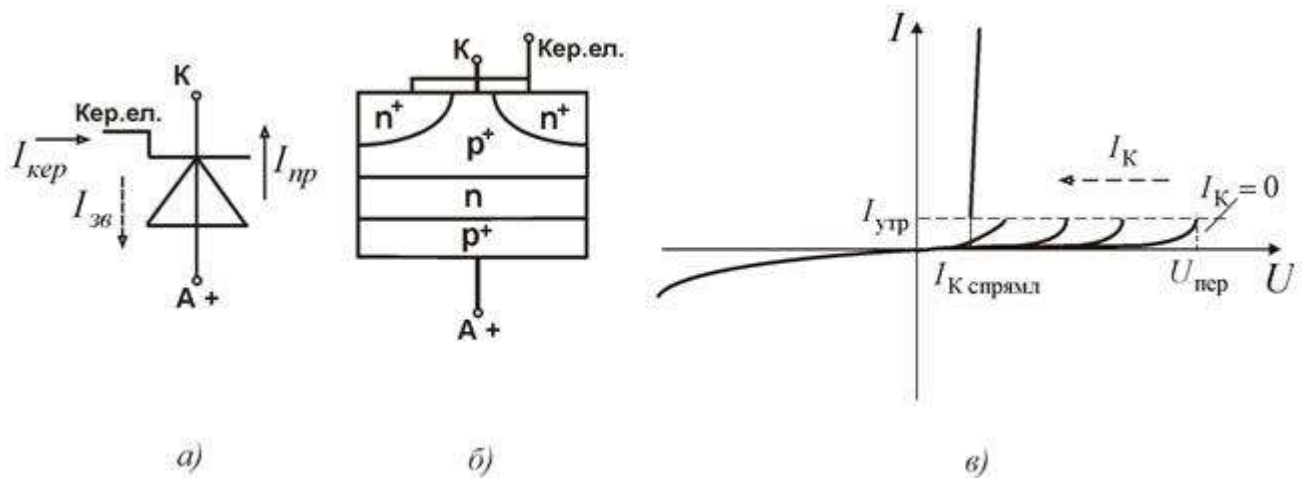


Рис. 1.7 Тиристор: а) позначення тиристора; б) структура тиристора;
в) статична ВАХ тиристора

Принцип вмикання за допомогою керуючого електрода.

При відсутності струму керуючого електрода його переключення відбувається при напрузі $U_A > U_{пер}$. При наявності струму керування напруга переключення буде тим меншою, чим більший струм керування. При певній величині струму керування $I_{К\text{ спрямл}}$, яку називають *струмом спрямлення*, тиристор включиться при будь якій прямій напрузі більше нуля (рис.1.7, в). Процес переключення тиристора протікає лавиноподібно з часом включення $t_{екл} = 1 \dots 5$ мкс.

Після того як тиристор ввімкнено імпульс управління на керуючому електроді уже не потрібен і його можна зняти, при цьому тиристор залишиться у включеному стані.

Для вимикання тиристора необхідно зменшити його анодний струм до величини меншої за струм утримання $I_{утр}$. При роботі тиристора в колах змінного струму його виключення відбувається природнім шляхом кожного разу коли змінюється полярність струму, що проходить через тиристор. При роботі тиристора в колах постійного струму для його виключення необхідно використовувати допоміжні пристрої – вузли примусової комутації.

До основних параметрів тиристорів відносять:

U_{max} – максимальне значення амплітуди робочої напруги тиристора в закритому стані;

$I_{max\text{ сер}}$ – максимальне середньоквадратичне значення струму через тиристор ;

I_{max} – максимальний ударний неповторюваний струм у відкритому стані;

I_{2t} – захисний показник. Якщо в пристрої із застосуванням тиристора встановлений захисний прилад, наприклад, плавкий запобіжник, значення його I_{2t} повинне бути менше, ніж у тиристора;

$P_{у max}$ – максимальна імпульсна потужність, що розсіється у керуючому електроді;

$I_{y \max}$ – максимальний імпульсний струм керуючого електрода;

$U_{y \max}$ – максимальна імпульсна напруга керуючого електрода;

$U_{oc \max}$ – максимальний спад напруги на тиристорі при проходженні короткого імпульсу струму;

$I_{y.вм}$ – постійний струм керуючого електрода, що вмикає;

$U_{y.вм}$ – постійна напруга керуючого електрода, що вмикає;

$I_{утр}$ – струм утримання;

R_T – тепловий опір перехід-навколишнє середовище.

У табл.1.3 наведено основні параметри деяких тиристорів фірми Motorola

Таблиця 1.3

Тиристор и	U_{max} х	I_{max} х	$I_{утр}$ р	I_{2t}	$P_{y \max}$ х	$I_{y \max}$ х	$U_{y \max}$ х	$U_{oc \max}$ х	$I_{y.в}$ м	$U_{y.в}$ м	$I_{утр}$ р	R_T	Тип корп .
MCR100-3	100	0,8	10	0,41 5	0,1	1	5	1,7 (1 А)	0,2	0,8	5	20 0	ТО- 92
MCR100-4	200												
MCR100-6	400												
MCR100-8	600												

Повністю керований тиристор (GTO)

Перші подібні тиристори з'явилися в 1960 р. у США. Вони одержали назву Gate Turn Off (GTO). У середині 90-х років були розроблені повністю керовані тиристори з кільцевим виводом керуючого електрода. Вони одержали назву Gate Commutated Thyristor (GCT) і стали в подальшому розвитком GTO-технології.

GTO тиристор - повністю керований напівпровідниковий прилад, в основі якого лежить класична чотирьохшарова структура. Такий тиристор включають і виключають подачею позитивного й негативного імпульсів струму на електрод керування. Подібно звичайному тиристорі, він має катод К, анод А, та керуючий електрод (іноді позначається G – gate) (рис.1.8, а.).

На схематичному розрізі тиристорної структури (рис.1.8, б) нижній вивід - анодний. Анод контактує із шаром p . Далі (знизу нагору) розташовані: базовий шар n , базовий шар p (що містить вивід керуючого електрода) і шар n , що безпосередньо контактує з катодним виводом. Чотири шари утворюють три p - n -переходи: перший між шарами p і n ; другий між шарами n і p ; третій між шарами p і n (рис.1.8, б).

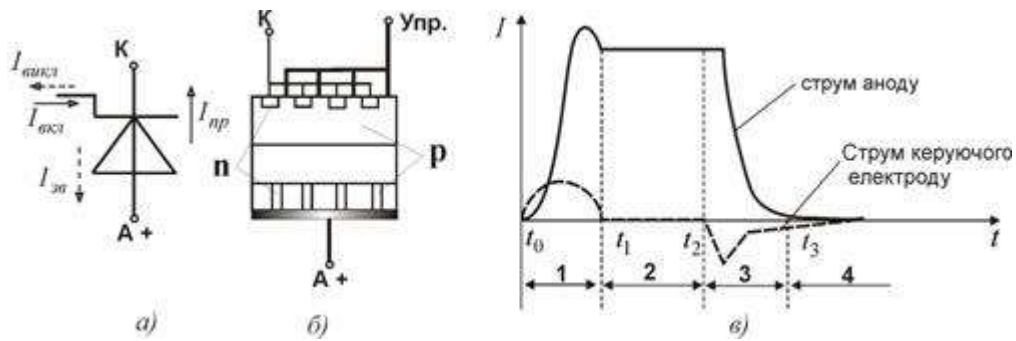


Рис. 1.8 GTO тиристор: а) позначення тиристора; б) структура тиристора;
в) зміна струму анода та керуючого електроду

Розходження в структурах різних тиристорів полягає в іншому розташуванні горизонтальних і вертикальних шарів з n - і p -провідностями. Найбільшої зміни у сучасних тиристорах зазнав катодний шар. Він виготовляється з кількох сотень елементарних осередків, рівномірно розподілених по площі й з'єднаних паралельно. Таке виконання забезпечує рівномірне зниження струму по всій площі напівпровідникової структури при вимиканні приладу. Базовий шар p , незважаючи на те що виконаний як єдине ціле, має велику кількість контактів керуючого електроду (приблизно рівне числу катодних осередків), також рівномірно розподілених по площі й з'єднаних паралельно. Базовий шар n виконаний аналогічно відповідному шару звичайного тиристора. Анодний шар p має шунти (зони n), що з'єднують n -базу з анодним контактом через невеликі розподілені опори. Анодні шунти застосовують у тиристорах, що не мають зворотної здатності. Вони призначені для зменшення часу вимикання приладу за рахунок поліпшення умов виймання зарядів з базової області n .

Основне виконання тиристорів GTO - таблеткове з чотирьохшаровою кремнієвою пластиною, затиснутою через термокомпенсуючі молибденові диски між двома мідними основами, що мають підвищену тепло- і електропровідність. Із кремнієвою пластиною контактує керуючий електрод, що має вивід у керамічному корпусі. Прилад затискається контактними поверхнями між двома половинами охолоджувачів, ізольованих одна від одної й має конструктивне використання, обумовлене типом системи охолодження (рис.1.8, б).

У циклі роботи тиристора GTO розрізняють чотири інтервали:

1) включення, 2) провідний стан, 3) вимикання, 4) вимкнений стан.

На рис.1.8, в першому інтервалу – включення відповідає інтервал часу $t_0 - t_1$. Перехід тиристорної структури з виключеного стану у відкритий можливий тільки при позитивній прямій напрузі між анодом і катодом. Чотири шари утворюють три p - n -переходи: 1 - між шарами p і n ; 2 - між шарами n і p ; 3 - між шарами p і n (рис.1.8, б). Переходи 1 і 3 зміщуються в прямому напрямку й не перешкоджають проходженню носіїв зарядів. Вся напруга прикладається до середнього переходу 2, що зміщується у зворотному напрямку. Біля переходу 2 утвориться зона, збіднена носіями зарядів, що одержала назву області об'ємного заряду. Щоб включити тиристор GTO, до керуючого електроду й катода по колу

керування прикладається напруга позитивної полярності (вивід «+» до шару p). У результаті у колі протікає струм включення $I_{\text{вкл}}$.

GTO тиристори мають жорсткі вимоги до крутості фронту di_G/dt і амплітуди I_{Gm} струму керування. Через перехід 3, крім струму витоку, починає протікати струм включення $I_{\text{вкл}}$. Електрони, що створюють цей струм, будуть інжектуватися з шару n у шар p . Далі частина з них буде переноситися електричним полем базового переходу 2 у шар n . Одночасно збільшиться зустрічна інжекція дірок із шару p у шар n і далі в шар p , тобто відбудеться збільшення струму, створеного неосновними носіями зарядів. Сумарний струм, що проходить через базовий перехід 2, перевищує струм включення, відбувається відкриття тиристора, після чого носії зарядів будуть вільно переходити через всі його чотири області.

Інтервал 2 - провідний стан (інтервал часу $t_1 - t_2$ на рис.1.8, в).

У режимі протікання прямого струму немає необхідності в струмі $I_{\text{вкл}}$, якщо анодний струм перевищує величину струму утримання $I_{\text{утр}}$. Однак на практиці, для того щоби всі структури GTO тиристора постійно перебували в провідному стані, необхідна підтримка струму, передбаченого для даного температурного режиму. Таким чином, протягом часу включення й знаходження в провідному стані система керування формує струм позитивної полярності. У провідному стані всі області напівпровідникової структури забезпечують рівномірний рух носіїв зарядів (електронів від катода до анода, дірок — у зворотному напрямку). Через переходи 1, 2 протікає анодний струм, через перехід 3 — сумарний струм анода й керуючого електрода.

Інтервал 3 – вимикання (інтервал часу $t_2 - t_3$ на рис.1.8, в).

Для вимикання тиристора GTO при незмінній полярності напруги, до керуючого електрода й катода по колу керування прикладається напруга негативної полярності. Вона викликає струм вимикання $I_{\text{вклл}}$, протікання якого веде до розсмоктування основних носіїв заряду (дірок) у базовому шарі p . Інакше кажучи, відбувається рекомбінація дірок, що надійшли в шар p з базового шару n , і електронів, що надійшли в цей же шар по керуючому електроду.

З часом звільнення від них базового переходу 2 тиристор починає закриватися. Цей процес характеризується різким зменшенням прямого струму тиристора за короткий проміжок часу до невеликої величини. Відразу після запирання базового переходу 2 починає закриватися перехід 3, однак за рахунок енергії, запасеної в індуктивності ланцюгів керування, він ще якийсь час перебуває у відкритому стані.

Після того як вся енергія, запасена в індуктивності ланцюга керування, буде витрачена, перехід 3 з боку катода повністю закривається. З цього моменту струм через тиристор дорівнює струму витоку, що протікає від анода до катода через ланцюг керуючого електрода. Процес рекомбінації, вимикання тиристора, багато в чому залежить від крутизни фронту і амплітуди зворотного струму керування. Щоб забезпечити необхідні крутизну фронту і амплітуду цього струму, на керуючий

електрод потрібно подати напругу, що не повинна перевищувати величини, припустимої для переходу 3.

Інтервал 4 – вимкнений стан (інтервал часу від t_3 рис.1.8, в).

У цьому режимі до керуючого електрода й катода залишається прикладеною напруга негативної полярності від блоку керування. По ланцюгу керування протікає сумарний струм, що складається зі струму витоку тиристора й зворотного струму керування, що проходить через перехід 3. Останній зміщується у зворотному напрямку. Таким чином, у тиристорі GTO, що перебуває в прямому стані, що блокує, два переходи (2 і 3) зміщені у зворотному напрямку, і утворені дві області просторового заряду. Протягом усього часу вимикання й стану, що блокує, система керування формує напругу негативної полярності.

Захисні ланцюги. Використання тиристорів GTO вимагає застосування спеціальних захисних ланцюгів. Вони збільшують масогабаритні показники, вартість перетворювача, іноді вимагають додаткових охолоджувальних пристроїв, однак є необхідними для нормального функціонування приладів.

Контрольні питання

1. Наведіть ВАХ напівпровідникового діода.
2. Привести динамічну характеристику діода.
3. Що таке максимально допустимі параметри діода? Навести приклади.
4. Привести структуру силового діода.
5. Навести структуру ВЧ діода, пояснити основні відмінності.
6. Які основні переваги діодів Шотки?
7. Які недоліки діодів Шотки, якщо вони існують?
8. Що таке диністор? Приведіть його ВАХ.
9. Назвіть основні властивості тиристора.
10. Яку структуру має тиристор?
11. Наведіть умовне графічне позначення тиристора.
12. Наведіть ВАХ тиристора.
13. Які особливі моменти можна відзначити в керуванні тиристором?
14. Що таке GTO тиристор? Його основні відмінності від напівкеруваного тиристора.
15. Наведіть динамічну характеристика GTO тиристора, назвіть її основні робочі інтервали.

1.1.3. Транзистори

Біполярний транзистор (БТ) – напівпровідниковий прилад, що складається із двох послідовних p - n -переходів, робота якого заснована на використанні двох типів носіїв заряду (електронів та дірок). В залежності від порядку чергування напівпровідникових шарів із різним типом провідності (p - та n - типу) біполярні транзистори поділяють на дві основні групи: 1) p - n - p - типу; 2) n - p - n - типу.

На рис. 1.9, а-б зображено найпростішу структуру транзисторів відповідно як p - n - p -типу, так і n - p - n -типу. Основний принцип роботи від типу біполярного транзистора не залежить, але тип транзистора визначає тип основних носіїв, що забезпечують протікання струму, і полярність напруг, що підключаються.

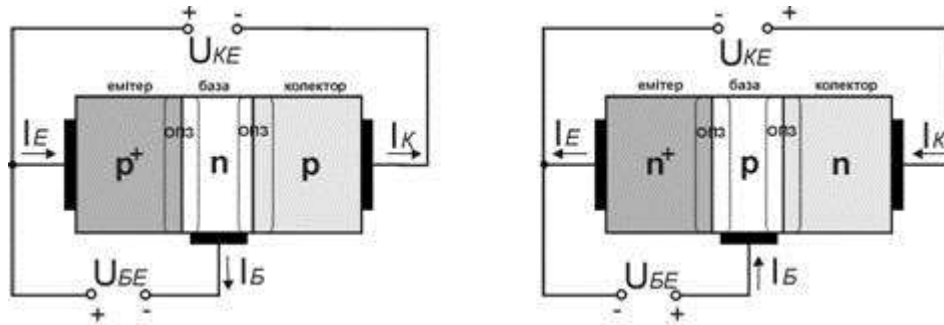


Рис. 1.9 Структура біполярного транзистора:

а) – р-п-р-типу; б) – н-р-п-типу;

Середня напівпровідникова область в структурі наведеній на рис. 1.9, а-б, що має відмінний від двох інших областей тип провідності, називається базовою областю, а електрод, що приєднується до неї та виконує роль керуючого електрода – базою транзистора. Дві інші напівпровідникові області, що мають протилежний до бази тип провідності та утворюють разом із базою два *p-n*- переходи із областю просторового заряду (ОПЗ), називаються емітерною та колекторною областю. Відповідно електроди приєднані до кожної із цих областей називаються емітером та колектором. Головною відмінністю між ними є те, що емітер є більш легованим напівпровідником, колектор має більший за площею *p-n*-перехід, а ширина бази є значно меншою поперечних розмірів *p-n*-переходів.

На рис. 1.10, а-б наведено умовні графічні позначення біполярних транзисторів.

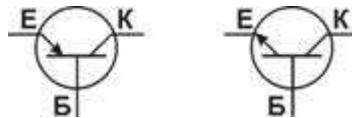


Рис. 1.10 Умовні графічні позначення біполярних транзисторів:

а) – р-п-р - типу; б) – н-р-п - типу;

Кожен із двох *p-n*-переходів в біполярному транзисторі можна за допомогою зовнішньої напруги зміщувати як у прямому, так і у зворотному напрямі, в залежності від чого розрізняють такі режими роботи біполярного транзистора:

1. Режим відсічки – обидва *p-n*-переходи зворотно зміщені, тобто закриті;
2. Активний режим – емітерний *p-n*-перехід зміщений у прямому напрямі, а колекторний *p-n*-перехід зворотно зміщений;
3. Інверсний режим – подібний до активного режиму (колекторний *p-n*-перехід зміщений у прямому напрямі, а емітерний - зворотно зміщений);
4. Режим насичення – обидва *p-n*-переходи зміщені у прямому напрямі.

В режимі 1 роботи біполярного транзистора база та обидва переходи збіднені на основні рухливі носії заряду (напруги U_{KE} , U_{BE} мають протилежну полярність ніж на рис. 1.9), внаслідок чого струм через обидва *p-n*-переходи майже відсутній, а сам транзистор має дуже високий опір, що може вважатися як розрив в ланцюгу.

В режимі 2 роботи біполярного транзистора емітерний *p-n*-перехід зміщений у прямому напрямі, а колекторний – у зворотному. Прикладена до емітерного

переходу напруга (полярності U_{KE} , U_{BE} співпадають із зображеними на рис. 1.9) зменшує його потенціал, і тоді із емітера в базу інжектуються електрони (основні носії заряду в даному транзисторі), невелика частина з яких або дифундує назад до емітерної області, або рекомбінує із дирками (основними носіями в базі). Більша ж частина електронів минає невелику область бази і надходить до зворотно зміщеного колекторного переходу, що екстрагує дані носії в колекторну область. Таким чином створюється колекторний струм I_K , який практично рівний емітерному струму $I_E = I_K + I_B$, за умовою невеликих втрат на рекомбінацію в базі транзистора ($I_B \ll I_K$, $I_B \rightarrow 0$). Тобто біполярний транзистор є струмовим приладом, так як змінюючи невеликий струм бази I_B можна змінювати значний струм колектора I_K . Коефіцієнт передачі по струму α пов'язує колекторний та емітерний струми і дорівнює $\alpha = I_K / I_E = 0,9 \div 0,999$.

Режим 3 роботи біполярного транзистора подібний за механізмом до режиму 2, з умовою переміни функцій емітерного та колекторного p - n -переходів. Проте внаслідок гіршого підсилення, ніж в режимі 2, даний режим роботи біполярного транзистора майже не використовується.

В режимі 4 роботи біполярного транзистора обидва p - n -переходи знаходяться у відкритому стані, внаслідок чого електрони в базу, окрім емітерної області, також інжектує колекторна область. Через це база та обидва p - n -переходи перенасичуються основними носіями (електронами) і опір всієї структури стає мінімальним. Тому коло, що містить біполярний транзистор в даному режимі, можна вважати короткозамкненим.

За типами включення біполярного транзистора в схему розрізняють:

1. Схему із спільною базою;
2. Схему із спільним емітером;
3. Схему із спільним колектором („емітерний повторювач”);

На рис. 1.11, *а-в* зображено основні схеми включення біполярного транзистора в схему.

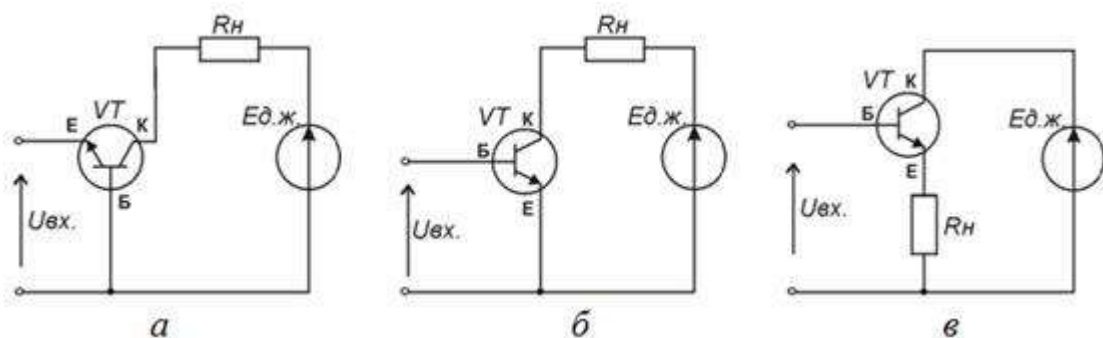


Рис. 1.11 Основні схеми включення біполярного транзистора в схему:

а) із спільною базою; *б)* із спільним емітером; *в)* із спільним колектором.

Схема із спільною базою (рис.1.11, *а*) має невеликий вхідний опір (десятки Ом), так як в цьому випадку вхідний ланцюг представляє собою відкритий емітерний p - n -перехід, та не підсилює струм, тому коефіцієнт підсилення по струму

рівний $K_{i\text{ СБ}} = I_K / I_E = \alpha = 0,9 \dots 0,99$. Дана схема має найкращі температурні та частотні властивості серед усіх схем включення БТ. Вхідна і вихідна характеристики для даної схеми включення біполярного транзистора наведені відповідно на рис. 1.12, б та рис. 1.12, а.

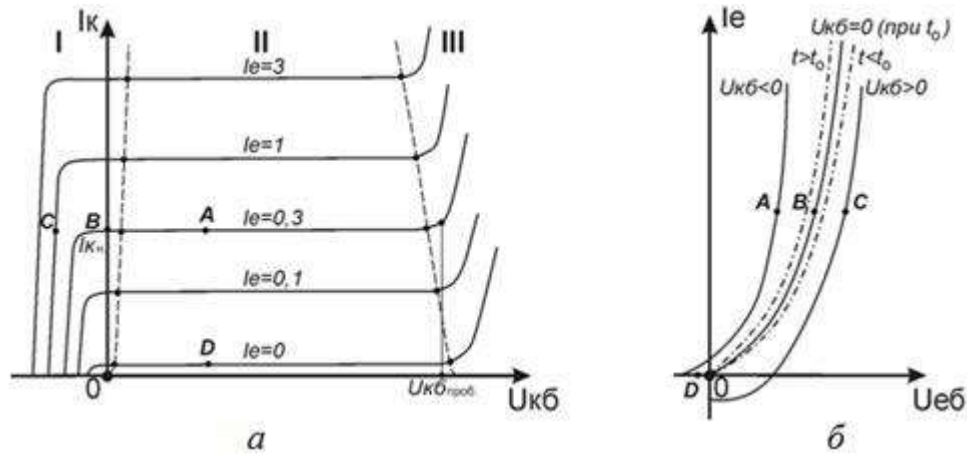


Рис. 1.12 Характеристики біполярного транзистора
р-п-р-типу в схемі із спільною базою:

а) вихідна характеристика; б) вхідна характеристика.

На рис. 1.12, б зображено залежність вхідної характеристики від температури (штрих-пунктирні лінії), при її збільшенні $t > t_0$ або зменшенні $t < t_0$.

На вихідній характеристиці біполярного транзистора (рис. 1.12, а) в схемі із спільною базою (рис. 1.11, а) розрізняють три робочі зони:

- I. Область насичення (точки С та В на рис. 1.12, а та рис. 1.12, б);
- II. Область підсилення або активна зона (точка А на рис. 1.12, а та рис. 1.12, б), що також містить зону відсічки (точка D на рис. 1.12, а та рис. 1.12, б), за умови відсутності емітерного струму $I_E = 0$;
- III. Область пробою.

Схема із спільним емітером (рис. 1.11, б) має найбільший серед усіх схем коефіцієнт підсилення по струму $K_{i\text{ СБ}} = I_K / I_E = \beta = \alpha / (1 - \alpha)$, а також великий вхідний опір. Саме тому дана схема ввімкнення біполярного транзистора є найбільш використовуваною. Проте ця схема поступається в якості частотних та температурних властивостей схемі із спільною базою.

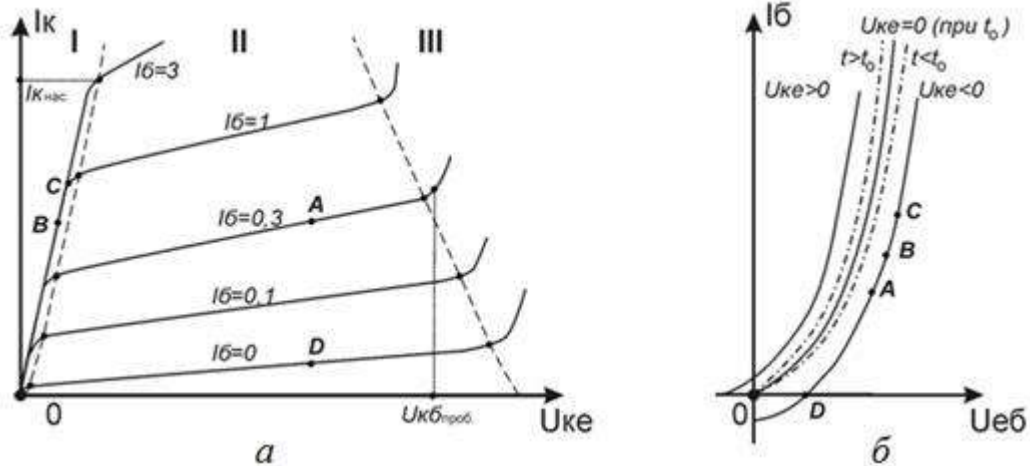


Рис. 1.13 Основні характеристики БТ *p-n-p*-типу в схемі із спільним емітером:

а) вихідна характеристика; б) вхідна характеристика.

Як і у випадку схеми із спільною базою, на вихідній характеристиці БТ (рис.1.13, а) в схемі із спільним емітером (рис.1.11, а) розрізняють три робочі зони:

- I. Область насичення (точки C та B на рис.1.13, а та рис.1.13, б);
- II. Область підсилення або активна зона (точка A на рис.1.13, а та рис.1.13, б), із зоною відсічки (точка D на рис.1.13, а та рис.1.13, б) за умови $I_E = 0$;
- III. Область пробою.

Схема із спільним колектором (рис.1.11, в) має великий вхідний опір, проте дана схема не підсилює напругу. В даному режимі роботи транзистора коефіцієнт передачі по струму рівний $K_{i\text{СК}} = I_E / I_E = \beta + 1 = 1 / (1 - \alpha)$.

На сьогоднішній день існує дуже широка класифікація біполярних транзисторів, переважна більшість з яких створюються на основі кремнію. Біполярні транзистори класифікують як за потужністю (для малих, середніх, великих потужностей), так і за максимальною частотою роботи (низькочастотні і середньочастотні, високочастотні і надвисокочастотні).

Основним недоліком біполярних транзисторів є наявність явища вторинного пробою, що відсутній у польових транзисторів. Вторинний пробій лавиноподібно розвивається після первинного та характеризується швидким наростанням струму колектора і повною некерованістю, на відміну від польових транзисторів, що зберігають керуючі властивості аж до моменту пробою.

До основних параметрів біполярного транзистора відносяться:

- P_{max} ($P_{i\text{max}}$) — максимальна (максимальна імпульсна) розсіювана потужність;
- $I_{K\text{max}}$ — максимальний струм колектора;
- $I_{Ki\text{max}}$ — максимальний імпульсний струм колектора;
- $U_{KE\text{max}}$ — максимальна напруга колектор-емітер;
- $U_{KB\text{max}}$ — максимальна напруга колектор-база;
- $U_{EB\text{max}}$ — максимальна напруга емітер-база;

$I_{КБЗБ.}$ – зворотній струм колектора;

$I_{ЕБЗБ.}$ – зворотній струм емітера;

$h_{11} = U_1 / I_1$ – вхідний опір транзистора (при $U_2 = 0$ по змінному струму);

$h_{22} = U_2 / I_2$ – вихідна провідність транзистора (при $i_1 = 0$ по змінному струму);

$K_i = h_{21} = i_2 / i_1$ – коефіцієнт передачі по струму (при $U_2 = 0$ по змінному струму);

$f_{гр.}$ – максимальна частота коефіцієнта передачі по струму, при якій $|h_{21E}| = 1$;

C_K – ємність колекторного переходу;

C_E – ємність емітерного переходу;

Так як h - параметри ($h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$) є загальноновживаними в довідковій літературі, а також те, що даний параметр найчастіше приводиться для схеми із спільним емітером ($h_{сЕ}$), то зв'язок $h_{сЕ}$ із параметрами для схем із спільною базою ($h_{сБ}$) і спільним колектором ($h_{сК}$) виражається наступними формулами:

$$\begin{aligned} h_{11сБ} &\approx h_{11сЕ} / (1 + h_{21сЕ}); & h_{12сБ} &\approx h_{11сЕ} h_{22сЕ} / (1 + h_{21сЕ}); & h_{21сБ} &\approx -h_{21сЕ} / (1 + h_{21сЕ}); & h_{22сБ} &\approx h_{22сЕ} / (1 + h_{21сЕ}); \\ h_{11сК} &= h_{11сЕ}; & h_{12сК} &= 1 / (1 + h_{12сЕ}); & h_{21сК} &\approx -(1 + h_{21сЕ}); & h_{22сК} &\approx h_{22сЕ}; \end{aligned}$$

Зв'язок h - параметрів із напругами і струмами в певній схемі з'єднання має вигляд:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11} I_1 + h_{12} U_2; \\ I_1 &= h_{21} I_1 + h_{22} U_2; \end{aligned} \quad (1.1)$$

Як приклад, в табл. 1.4 наведено параметри двох біполярних транзисторів n - p - n -типу.

Таблиця 1.4

	КТ603В	2N5831
P_{max} , мВт	500	630
I_{Kmax} , мА	300	300
$I_{Ki max}$, мА	600	—
$U_{КБ max}$, В	15	140
$U_{ЕБ max}$, В	15	160
$U_{ЕБ max}$, В	3	—
$I_{КБЗБ.}$, мкА	5	0,05 мкА
$I_{ЕБЗБ.}$, мкА	3	—
h_{11E} , Ом	—	—
h_{22E} , мкСм	—	—

$h_{21E}(U_{KE}, I_E)$	10...80 (2 В, 150 мА)	80(5 В, 10мА)
$f_{гр.}, \text{МГц}$	200	100
$C_K, \text{пФ}$	15	4
$C_E, \text{пФ}$	40	–

Польовий транзистор (ПТ) – напівпровідниковий прилад робота якого заснована на модуляції опору напівпровідникового матеріалу поперечним електричним полем. В них використовується ефект зміни величини області просторового заряду (ОПЗ).

Польові транзистори діляться на два основні класи:

1. З керуючим p - n -переходом (ПТКП, англ. JFET);
2. Із структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН, англ. MOSFET), у якій затвор ізолюваний від робочого напівпровідника діелектриком.

Так як в якості діелектрика найчастіше використовують оксид кремнію, то МДН-транзистори також ще називають МОН-транзисторами.

На рис.1.14 зображено структуру транзисторів з керуючим p - n -переходом. Характерною особливістю таких польових транзисторів є те, що їх затвор ізолюваний від каналу, що проводить струм, зворотнзмщеним p - n -переходом.

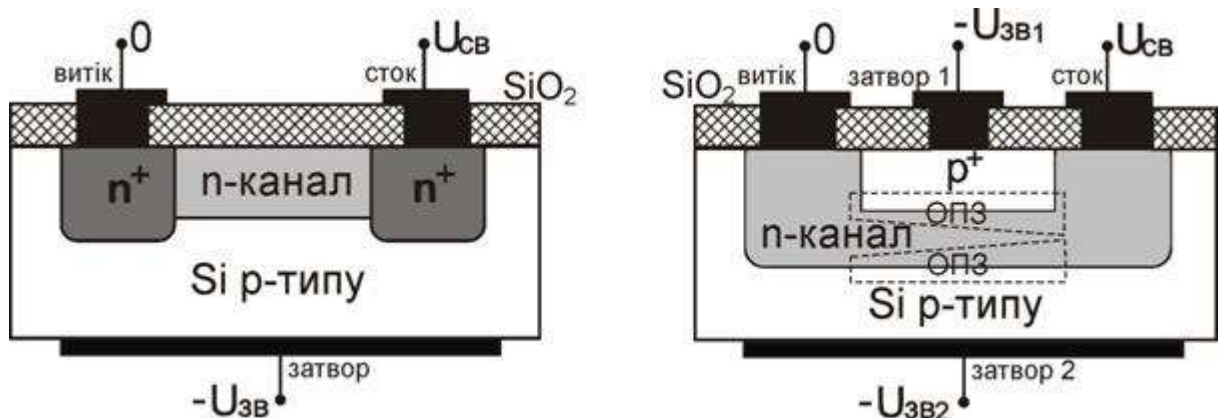


Рис. 1.14 Структура n -канального польового транзистора з керуючим p - n -переходом:

а) з одним керуючим електродом; б) з двома керуючими електродами.

Даний транзистор має один (рис. 1.14, а) або два (рис. 1.14, б) електроно-дірочних переходи, що зміщенні у зворотному напрямі. При зміні зворотної напруги на p - n -переході варіюється величина ОПЗ на межі p - та n -областей, а отже змінюється і опір каналу, по якому проходить керований потік основних зарядів. Електрод, з якого в канал надходять основні носії заряду, називається витоком, а електрод в який із каналу витікають основні носії – стоком. Електрод, що слугує для керування величиною каналу, називається затвором.

Польові транзистори, на відміну від біполярних, є уніполярними приладами. Канал провідності в польових транзисторах може бути як n -, так і p -типу, що визначається типом основних носіїв заряду. Тому в залежності від типу каналу польові транзистори поділяють на транзистори з n - (рис.1.15, а) та p -провідністю

(рис.1.15, б). Відповідно до типу провідності польового транзистора полярності напруги на затворі, стоку та витоку і напрямки струмів будуть протилежними.

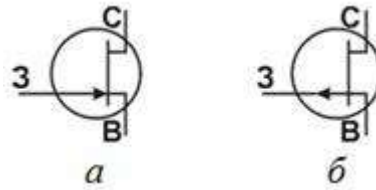


Рис. 1.15 Умовне позначення польового транзистора з керуючим p - n -переходом:

а) n -типу; б) p -типу.

На рис.1.16, а-б приведено основні характеристики польового транзистора n -типу з керуючим p - n -переходом. Для транзистора p -типу основні характеристики будуть симетричними до зображених на рис.1.16 відносно початку координат.

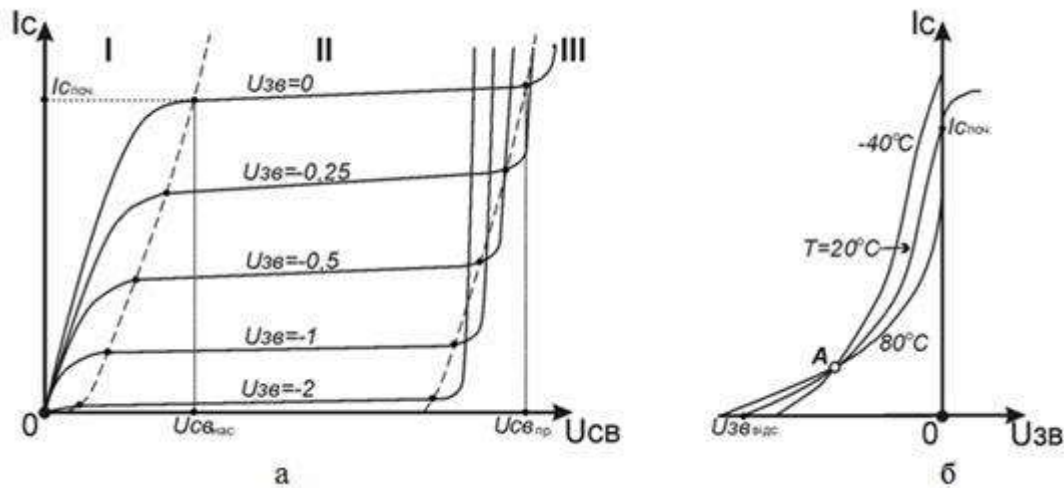


Рис. 1.16 Основні характеристики польового транзистора з керуючим p - n -переходом:

а) вихідна (стокова) характеристика; б) стоково-затворна характеристика.

Характерними особливостями польових транзисторів із керуючим p - n -переходом є наявність струму насичення або початкового струму стоку $I_{C_{\text{поч}}}$ (рис.1.16, б), за відсутності напруги $U_{зв} = 0 \text{ В}$ та при умові $U_{CB} \geq U_{CB_{\text{нас}}}$, а також наявність напруги відсічки $U_{зв_{\text{відс}}}$, за якої канал провідності майже повністю перекривається і $I_C \rightarrow 0 \text{ А}$. Це пояснюється тим, що величина провідності каналу в польовому транзисторі з керуючим p - n -переходом окрім напруги $U_{зв}$ також залежить від величини струму стоку I_C . Із зростанням I_C при $U_{зв} = \text{const}$ ширина ОПЗ по всій площині напівпровідника збільшується нерівномірно, тобто при деякому значенні $I_C = \text{const}$ буде більшою біля стоку аніж біля витоку (рис.1.14, б). І зрештою, за деякого значення $U_{зв_{\text{відс}}} > 0$ перетин каналу провідності біля стоку майже повністю замкнеться, тобто матиме найбільший опір. Таким чином найбільший струм $I_{C_{\text{поч}}}$ буде за найменшого опору $R_{\text{см}}$ каналу провідності та

відсутності керуючої напруги $U_{зв} = 0 \text{ В}$, а сам транзистор даного типу працює в режимі збіднення. Керуюча напруга $U_{зв}$ (рис.1.16, б) для польового транзистора n -типу не може мати великих позитивних значень внаслідок загрози пробією.

Вихідна характеристика польового транзистора з керуючим p - n -переходом (рис.1.16, а) характеризується наявністю трьох робочих областей:

- I. Лінійна (або омічна) область;
- II. Область насичення (або область підсилення);
- III. Область лавинного пробією.

В області I (рис.1.16, а), що починається від початку координат до точок $U_{зв \text{ нас.}} | U_{зв} = \text{const}$, польовий транзистор представляє собою майже лінійно залежний від напруги $U_{св}$ опір $R_{св}$, що також регулюється напругою $U_{зв}$, та може використовуватись в ключовому режимі роботи.

В області II (рис.1.16, а), що починається від точок $U_{зв \text{ нас.}} | U_{зв} = \text{const}$ до точок $U_{зв \text{ пр.}} | U_{зв} = \text{const}$, опір $R_{св}$ польового транзистора майже не залежить від значення напруги $U_{св}$, так як відповідає випадку максимального звуження перетину каналу провідності біля стоку. В даному режимі польовий транзистор може використовуватися як підсилювач сигналів.

Із подальшим збільшенням напруги $U_{св} > U_{св \text{ пр.}}$ відбувається збільшення падіння напруги біля горловини каналу провідності на фоні зростання електричного поля в каналі, що призводить до пробією (область III на рис.1.16, а).

Основні переваги польових транзисторів з керуючим p - n -переходом:

- менший рівень шуму ніж в біполярних транзисторах, особливо в області низьких частот, внаслідок уніполярності приладу, що дозволяє використовувати ПТ на частотах до сотень МГц;
- незначні зворотні струми через затвор ($10 \text{ пА} \div 10 \text{ нА}$), що рівні зворотнім струмам зворотнозміщеного p - n -переходу, що дозволяє здійснювати керування за допомогою напруги ($U_{зв \text{ відс}} = 0,5 \div 10 \text{ В}$) при досить незначній потужності;
- великий вхідний опір ($10^7 \div 10^9 \text{ Ом}$), що є опором зворотнозміщеного p - n -переходу;
- термостабільність, так як з ростом температури в польовому транзисторі збільшується опір $R_{св}$, що призводить до зниження струму стоку.

Основні недоліки польових транзисторів з керуючим p - n -переходом:

- у порівнянні із біполярними транзисторами мають меншу крутизну вихідної характеристики в лінійній області, що є недоліком при роботі в ключовому режимі;
- залежність від температури (рис.1.16, б), так як присутні зміни струму стоку I_c , крутизни вихідної характеристики та зворотного струму через затвор, і необхідність роботи близько до термостабільної точки (т. А на рис.1.16, б);
- наявність паразитних ємностей ($C_{зс} \approx C_{зв} \approx 1 \div 20 \text{ пФ}$), які треба враховувати, особливо при роботі в ключовому режимі.

На рис.1.17, а-в наведені основні схеми включення польових транзисторів.

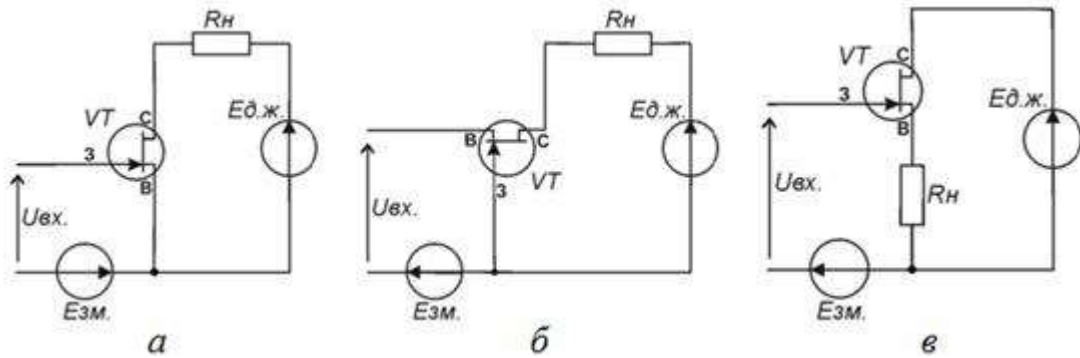


Рис. 1.17 Основні схеми включення польових транзисторів:

- а) із спільним витоком; б) із спільним затвором;
в) із спільним стоком (витоковий повторювач)

Найбільш типовою для польових транзисторів є схема із спільним витоком (рис.1.17, а). Для схем з'єднання польових транзисторів із спільним витоком та спільним затвором (рис.1.17, б) на низьких частотах вихідний опір $R_{\text{вих}} \approx SU_{\text{зи}}$, а в схемі із спільним стоком (рис.1.17, в) — $R_{\text{вих}} \approx 1/S$.

Вхідний опір в схемах із спільним витоком та стоком $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$, а в схемі із спільним затвором — $R_{\text{вх}} \approx 1/S$.

Крутизна на витоко-затворних характеристиках дорівнює

$$S = dI_C / dU_{\text{зи}} \Big|_{U_{\text{CB}} = \text{const}}$$

Максимальна крутизна будь-якого польового транзистора визначається згідно виразу $S_{\text{max}} = 2I_{C_{\text{поч}}} / U_{\text{ВДДС}}$.

Крутизну можна також обчислити використовуючи вираз

$$S = S_{\text{max}} \left(1 - U_{\text{зв}} / U_{\text{ВДДС}}\right)^2 = S_{\text{max}} \sqrt{I_C / I_{C_{\text{поч}}}}$$

де струм стоку рівний $I_C = I_{C_{\text{поч}}} \left(1 - U_{\text{зв}} / U_{\text{ВДДС}}\right)^2$.

До основних параметрів польового транзистора відносяться:

$I_{C_{\text{поч}}}$ — початковий струм стоку;

$U_{\text{зввдс}}$ — напруга відсічки;

$U_{\text{CB max}}$ — максимальна напруга сток-витік;

$U_{\text{зв max}}$ — максимальна напруга затвор-витік;

$U_{\text{зс max}}$ — максимальна напруга затвор-сток;

$I_{C_{\text{max}}}$ — максимальний стоковий струм;

P_{max} — максимальна розсіювана потужність;

$I_{\text{звор}}(U_{\text{зв}})$ — зворотній струм на затворі за даної напруги сток-витік;

S – крутизна характеристики;

$f_{pof\ max}$ – максимальна робоча частота;

C_{11} – вхідна (між затвором і стоком) ємність;

C_{22} – вихідна (між стоком та витоком) ємність;

C_{12} – прохідна (між затвором та витоком) ємність;

Як приклад, в табл. 1.5 приведено параметри двох польових транзисторів з керуючим p - n -переходом і каналом n -типу.

Таблиця 1.5

	КПЗ07Г	BFQ10
$I_{C\ nom}$, мА	8...24	—
$U_{зБ\ відс}$, В	1,5...6	3.5
$U_{сБ\ max}$, В	25	30
$U_{зс\ max}$, В	30	—
$U_{зв\ max}$, В	30	30
$I_{с\ max}$, мА	25	10
P_{max} , мВт	250	250
$I_{з\ зор}(U_{зв}, В)$, нА	1 (-10)	0,1 (-)
$S(U_{св}, В)$, мА/В	6...12 (10)	1 (-)
$f_{pof\ max}$, МГц	—	—
C_{11} , пФ	5	8
C_{12} , пФ	1,5	—
C_{22} , пФ	—	—

ТЕМА 3 СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ТИРИСТОРАМИ. СПОСОБИ КОМУТАЦІЇ ЗАПИРАННЯ ТИРИСТОРІВ. КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ В РЕЖИМІ „КЛЮЧА”

План

- 1.Способи керування тиристорами.
- 2.Способи комутації запирання тиристорів.
- 3.Керування силовими транзисторами в режимі „ключа”

1.Способи керування тиристорами

1.1.Повністю керовані тиристиори (GTO)

Двоопераційний тиристор – прилад, що не тільки вмикається, але і вимикається керуючим сигналом: вмикається як звичайний тиристор, а вимикається подачею в коло керування імпульсу негативної напруги, чим забезпечується переривання струму в структурі за рахунок відведення об'ємного заряду з бази. Умовне позначення двоопераційного тиристора наведено на рисунку 1.11.

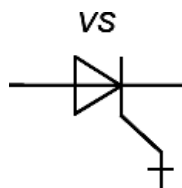


Рисунок 1.11 – Умовне позначення двоопераційного тиристора

Повністю керований тиристор – напівпровідниковий прилад в основі якого лежить класична чотирьохшарова структура. Скорочена його назва – GTO (Gate Turn-Off Thyristor). Такий тиристор не тільки вмикається, але і вимикається керуючим сигналом: вмикається і вимикається подачею на керуючий електрод імпульсів струму відповідно позитивної і негативної полярності.

Такі тиристиори масово випускаються на струми до 2,5 кА та напруги до 4,5 кВ з часом вимикання до 15 мкс. Їх застосування дає змогу спростити схему перетворення струму, бо не потрібні пристрої примусової комутації для створення зворотної напруги при вимиканні тиристорів. Компанія Mitsubishi Electric вже розробила та випускає GTO на струм 6 кА та напругу 6 кВ з часом вимикання до 5 мкс.

Розробникам силових запираємих тиристорів необхідно було вирішити дві задачі. Перша – забезпечити рівномірний розподіл струму за поперечним

перерізом кристалу при відпиранні тиристора, що дозволило б збільшити значення допустимої швидкості наростання анодного струму di_A/dt . Друга – прискорити процес виведення неосновних носіїв заряду з базових областей p_2 і n_1 , що дозволило б зменшити час, необхідний для відновлення запираючих властивостей тиристора.

Для вирішення першої задачі катодний шар (рисунок 1.12) розбитий на декілька сотень елементарних комірок, рівномірно розподілених по площі і з'єднаних паралельно. Для вирішення другої задачі базовий шар p_2 з'єднується з керуючим електродом через велику кількість виводів (приблизно рівну числу катодних комірок), які також з'єднані паралельно і рівномірно розподілені по перерізу. Це забезпечує покращення умов виведення зарядів з базової області p_2 . В анодному шарі формуються шунти з напівпровідника n -типу, які покращують вилучення зарядів з бази n_1 , що також зменшує час вимикання тиристора.

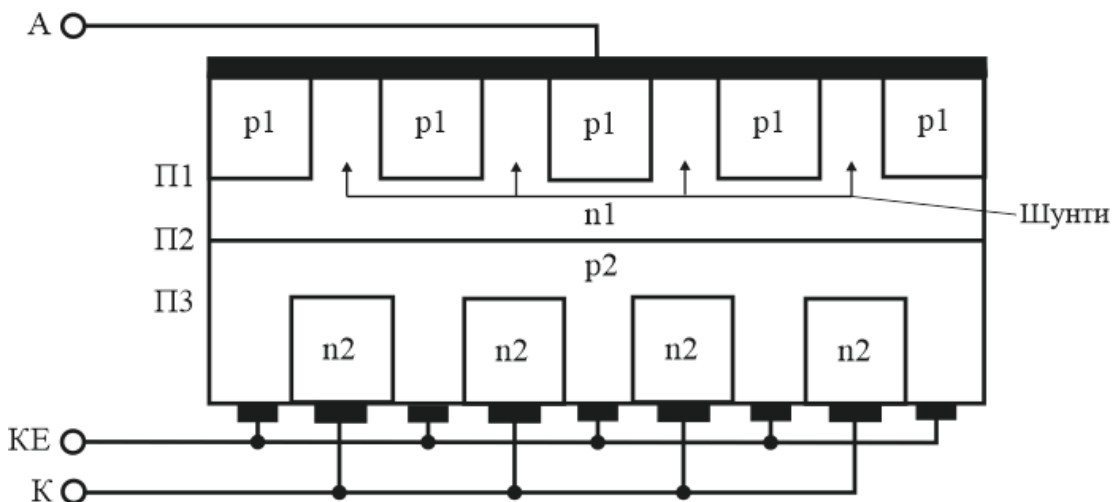


Рисунок 1.12 – Структура GTO тиристора

На схематичному розрізі тиристорної структури (рисунок 1.12) верхній вивід — анодний. Анод контактує із шаром p_1 балі розташовані: базовий шар n_1 , базовий шар p_2 (містить вивід керуючого електрода) і шар p_2 , що безпосередньо контактує з катодним виводом. Чотири шари утворюють відповідно три p - n -переходи: П1, П2, П3.

Вольт-амперна характеристика GTO тиристора повторює характеристику звичайного тиристора.

У циклі роботи GTO тиристора розрізняють чотири фази: вмикання, провідний стан, вимикання і блокуючий стан.

Наприкінці 90-х рр. XX ст. цією ж фірмою розроблені тиристорні структури, що запираються з комутацією струму в затвор керування, і мають назву (GCT (Gate Communicated Turn-Off Thyristor)). Однак, робота GCT можлива тільки за

спеціальної конструкції корпусу електрода керування, яка забезпечує зниження індуктивності виводів до (2...4) мкГн. Це легко вирішується поєднанням GCT і пристрою формування імпульсів керування (драйвера) в єдиній конструкції, що називається інтегрованим GCT або IGCT (Integrated GCT).

Наявність у тиристорів внутрішнього позитивного зворотного зв'язку (зона негативного опору на ВАХ) надає їм декілька важливих властивостей.

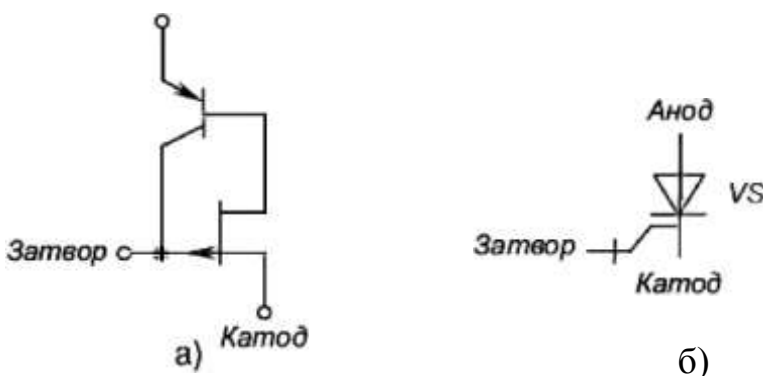
Головне: для вмикання тиристора достатньо в його коло керування подати короткий імпульс струму невеликої потужності. Далі відкритий стан підтримується за рахунок внутрішнього позитивного зворотного зв'язку. Тому тиристори мають дуже великий коефіцієнт підсилення за потужністю (десятки тисяч).

Порівняно з транзисторами, тиристори більш стійкі до перевантажень, але мають досить вузький діапазон робочих частот (до сотень герц).

1.1.1 Електростатичний тиристор

Окрім розглянутих вище, в останній час в енергетичній електроніці використовують і деякі новітні види тиристорів, що з'явилися завдяки досягненням напівпровідникової технології. Це, наприклад, електростатичні тиристори (або *SITH*- тиристори Static Induction Thyristor). Технологія їх виготовлення настільки складна, що опанована у світі лише декількома фірмами. Відповідно їхня вартість досить висока.

Еквівалентна схема і позначення такого тиристора наведені на рисунку 1.13. У нормальному стані він проводить струм. Вимкання здійснюється подачею на керуючий електрод позитивної відносно катода напруги.



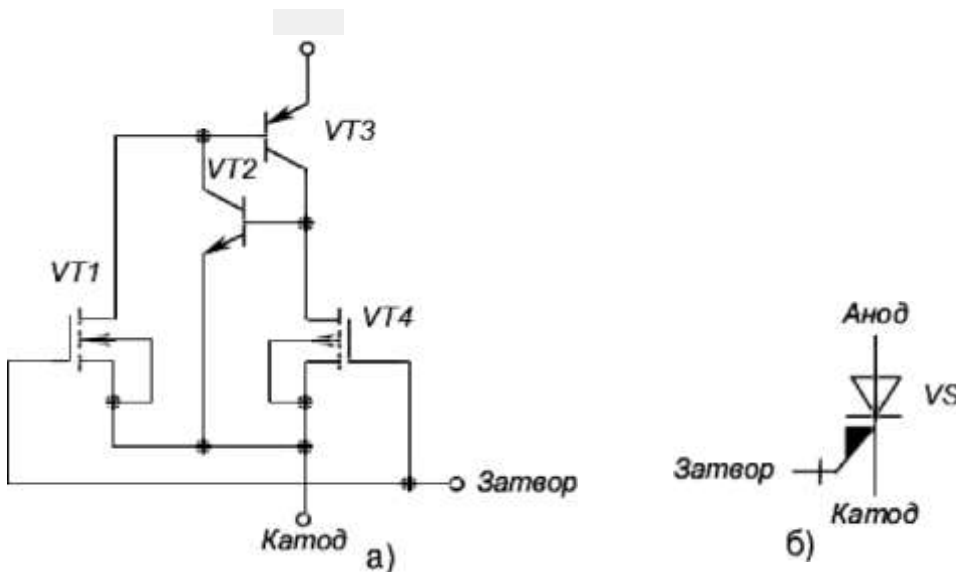
а — еквівалентна схема; б — умовне графічне позначення

Рисунок 1.14 — Запираємий тиристор з МОН- керуванням

2.Способи комутації запирання тиристорів.

Запираємий тиристор з МОН- керуванням

Найбільш перспективним із тиристорів для пристроїв енергетичної електроніки є тиристор, керований напругою запираємий тиристор з МОН-керуванням (MCT-MOS-Controlled Thyristor). Його еквівалентна схема і позначення наведені на рисунку 1.14. Він містить МОН- структури з n - (VT4) та p -каналами (VT1) і тиристорну чотиришарову структуру p - n - p - n (VT2, VT3).



а — еквівалентна схема; б — умовне графічне позначення

Рисунок 1.14 — Запираємий тиристор з МОН- керуванням

Вмикають його подачею імпульсу напруги позитивної відносно катода полярності на затвор n - канального МОН- транзистора VT1. Вимикання здійснюється подачею імпульсу напруги негативної полярності на затвор p - канального МОН- транзистора VT4, що на короткий час шунтує катодний перехід тиристорної структури: емітерний перехід транзистора VT2. Цим забезпечується мала потужність у колі керування приладу.

3.Керування силовими транзисторами в режимі „ключа” (самостійне вивчення)

Контрольні питання

1. Поясніть будову і принцип дії IGBT- транзисторів, наведіть їх умовне графічне позначення.
2. У чому полягає відмінність між МДН- та IGBT- транзисторами?

3. У чому особливість IGBT- транзисторів?
4. Наведіть схему вмикання IGBT- транзисторів.
5. Наведіть вольт-амперні характеристики IGBT- транзисторів.
6. Поясніть будову і принцип дії SIT- транзисторів, наведіть їх умовне графічне позначення.
7. У чому полягає відмінність між SIT- транзисторами та польовими транзисторами з керованим р-п-переходом?
8. У чому особливість SIT- транзисторів?
9. Наведіть схему вмикання SIT- транзисторів.
10. Наведіть вольт-амперні характеристики SIT- транзисторів.
11. Поясніть, як ввімкнути і як вимкнути тиристор?
12. Наведіть структуру і поясніть принцип дії повністю керованих тиристорів.
Наведіть вольт-амперну характеристику та умовне графічне позначення повністю керованих тиристорів.
13. Поясніть призначення і будову силових напівпровідникових модулів.
14. Поясніть призначення і будову силових інтелектуальних модулів.
15. Наведіть порівняльну характеристику силових напівпровідникових приладів.

ТЕМА 4 ОДНОФАЗНІ КЕРОВАНІ ВИПРЯМЛЯЧІ ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ НАВАНТАЖЕННЯ

План

1. Загальні відомості

2. Однофазні керовані випрямлячі при різних видах навантаження

1. Загальні відомості

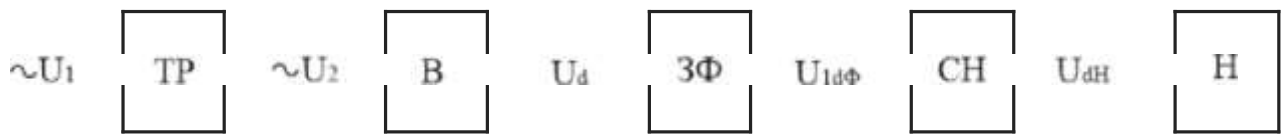
Функції, що виконуються перетворювачами, істотно розрізняються. Так, **випрямлячі** здійснюють перетворення змінного струму в постійний. **Ведені інвертори** (інвертори, ведені мережею) перетворюють енергію дже- рела постійного струму в змінний з віддачею її в мережу змінного струму, тобто здійснюють перетворення, зворотне випрямленню. **Автономні інвертори** перетворюють постійний струм в змінний з незмінною або регульованою частотою і які працюють на автономне (не пов'язану з мережею змінного струму) навантаження. У цьому головна відмінність автономних інверторів від ведених інверторів, що також перетворюють постійний струм в змін- ний, але які працюють на мережу змінного струму. **Безпосередні перетворювачі частоти** (перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком) перетворюють енергію мережі змінного струму в енергію змінного струму з частотою, що відрізняється від частоти живлячої мережі. **Перетворювачі змінної напруги** призначені для зміни напруги, що підводиться до навантаження, при живленні її на змінному струмі, а отже, зміни потужності, що передається в навантаження від мережі змінного струму. **Імпульсні перетворювачі постійної напруги (ІППН)** призначені для зміни значення постійної напруги. Вони служать для живлення навантаження постійною напругою, яка відрізняється за величиною від напруги джерела.

2. Однофазні керовані випрямлячі при різних видах навантаження

Однофазні випрямлячі змінного струму

При малій потужності навантаження задачу перетворення електричної

енергії змінного струму в постійний струм вирішують за допомогою однофазних випрямлячів, які живляться від однофазної мережі змінного струму. Структурна схема малопотужного джерела живлення з однофазним випрямлячем показана на рисунку 2.2.



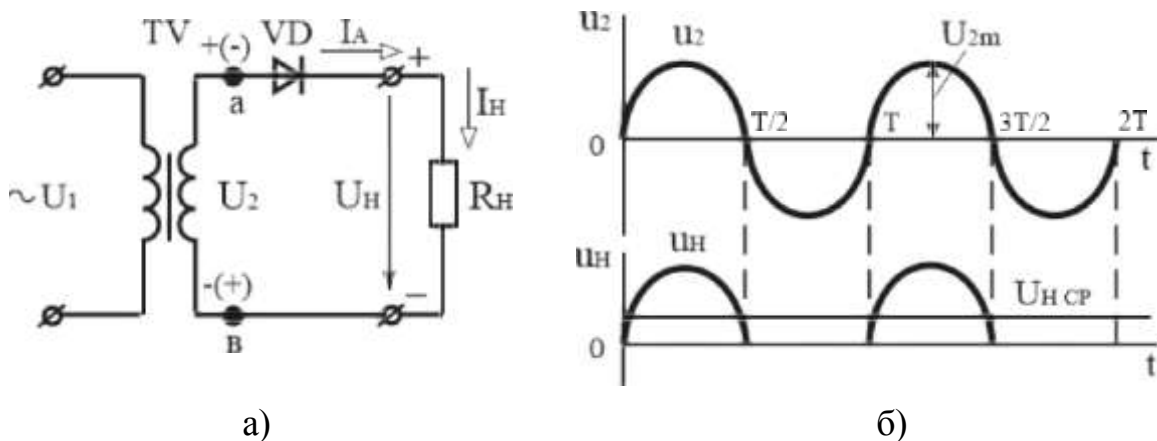
ТР — трансформатор; В — випрямляч; 3Ф згладжувальний фільтр;
СН — стабілізатор напруги; Н — навантаження

Рисунок 2.2 — Структурна схема малопотужного джерела живлення

Основою її є випрямляч (В) на одному або декількох діодах, які з'єднані за певною схемою. Функція трансформатора (ТР) зводиться до підвищення або зниження вторинної напруги U_2 при заданій первинній напрузі U_1 * метою отримання необхідної величини постійної напруги на виході. Для зменшення пульсації випрямленої напруги до виходу випрямляча підключають згладжувальний фільтр (3Ф). Між згладжувальним фільтром та навантаженням (Н) іноді приєднують стабілізатор напруги (СН), який забезпечує підтримання з заданою точністю необхідної величини постійної напруги на навантаженні в умовах зміни напруги мережі живлення і струму навантаження.

Однофазний однопівперіодний випрямляч

Однофазний однопівперіодний випрямляч (рисунки 2.3, а) складається з трансформатора TV, до вторинної обмотки якого послідовно приєднані випрямний діод VD та резистор навантаження R_H



а — схема; б — часові діаграми напруги

Рисунок 2.3 Однофазний однопівперіодний випрямляч

Принцип дії схеми розглянемо для випадку чисто активного навантаження R_u з використанням часових діаграм напруги (рисунок 2.3, 6). При прикладенні півхвилі напруги ці позитивної полярності на вторинній обмотці трансформатора діє напруга u_2 * полярністю вказаною без дужок (інтервал $0-T/2$ на рисунку 2.3, 6). До анода діода VD прикладається напруга позитивної полярності, відносно точки а. Отже, на інтервалі $0-T/2$ діод VD відкритий. Оскільки у відкритому стані падіння напруги на діоді мале, практично вся напруга u_2 прикладається до навантаження R_u , створюючи на ній напругу u_n . На даному інтервалі анодний струм діода рівний струму навантаження $I_A = I_n = U_2' / R_u$. В кінці інтервалу $0-T/2$ напруга і струм в схемі досягають нульових значень.

При прикладенні напруги ці негативної полярності полярність напруги u_2 (показана в дужках) на вторинній обмотці трансформатора стає зворотною (інтервал $T/2-T$). При вказаній полярності напруги u_2 , для діода вона виявляється зворотною і діод VD на інтервалі $T/2-T$ закритий. Через нього протікає лише незначний зворотний струм. У закритому стані практично вся напруга u_2 прикладається до діода VD, а напруга на навантаженні $u_n = 0$.

Таким чином, напруга і струм на резисторі R_u мають пульсуючий характер, тобто з'являються тільки в один з півперіодів напруги u_2 . Тому випрямляч (рисунок 2.3, а) називають однопівперіодним.

Основні параметри схем випрямлення:

- середнє значення випрямлених напруги $U_d(U_{HCEP})$ та струму $I_d(I_{HCEP})$;
- амплітуди першої гармоніки напруги U_{dr+} та струму I_{dlm} ;
- діючі значення напруги U_2 та струму I_2 у вторинній обмотці трансформатора;
- діючі значення напруги U_1 та струму I_1 в первинній обмотці трансформатора;
- максимальне значення зворотної напруги U_{zBmax} ;
- коефіцієнт пульсації $L_c = U_{d1} / U_d$;

Основні співвідношення для однопівперіодного випрямляча:

$$U_{HCEP} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,45 U_2 \quad (2.1)$$

або

$$U_2 = \frac{\pi U_{HCEP}}{\sqrt{2}} \approx 2,22 U_{HCEP} . \quad (2.2)$$

Струм

$$I_{HCEP} = 0,45 \frac{U_2}{R_H} ; \quad (2.3)$$

$$I_2 \approx 1,57 I_{HCEP} . \quad (2.4)$$

Коефіцієнт пульсації

$$K_{II} \approx 1,57. \quad (2.5)$$

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть, що таке випрямляч. Для чого призначені випрямлячі?
2. Наведіть структурну схему випрямляча і поясніть призначення його функціональних вузлів.
3. Назвіть ознаки, за якими класифікують випрямлячі.
4. Назвіть основні параметри, яш характеризують роботу випрямлячів?
5. Наведіть схему і поясніть принцип дії однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом.
6. Наведіть схему і поясніть принцип дії однофазного мостового випрямляча.
7. Наведіть основні розрахункові співвідношення для однофазних випрямлячів.
8. Наведіть схему і поясніть роботу подвоювача напруги.
9. Поясніть, у яких випадках застосовують трифазні випрямлячі.
10. Поясніть, що таке стабілізатор напруги (струму). Для чого призначені і в яких випадках застосовуються стабілізатори?
11. Назвіть дестабілізуючі чинники, що впливають на величину випрямленої напруги.
12. Наведіть признаи по яких класифікують стабілізатори.
13. Назвіть види компенсаційних стабілізаторів напруги. Поясніть специфіку їх роботи.
14. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора, поясніть призначення елементів і принцип дії.
15. Наведіть схему і поясніть принцип дії стабілізатора струму.

16. Вкажіть методи регулювання напруги постійного струму, поясніть їх особливості.
17. Поясніть специфіку побудови і роботи імпульсних регуляторів напруги постійного струму, а також їх переваги перед регуляторами безперервної дії.
18. Наведіть схему імпульсного регулятора напруги постійного струму, поясніть принцип її дії. Поясніть, на чому ґрунтується принцип дії тиристорних керованих випрямлячів?
19. Поясніть за допомогою часових діаграм роботу однофазного керованого випрямляча з нульовим виводом трансформатора.
20. Наведіть регулювальну характеристику керованого випрямляча і поясніть характер її залежності при лінійних змінах кута керування.
21. Поясніть за допомогою часових діаграм роботу трифазного керованого випрямляча з нульовим виводом трансформатора.
22. Поясніть за допомогою часових діаграм роботу трифазного мостового керованого випрямляча.

ТЕМА 5 ІНВЕРТОРИ ВЕДЕНІ ЖИВИЛЬНОЮ МЕРЕЖЕЮ. ІНВЕРТОРИ І СТАТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ. КЛАСИФІКАЦІЯ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ. ІНВЕРТОРИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

План

- 1.Інвертори ведені живильною мережею.
- 2.Інвертори і статичні перетворювачі частоти. Класифікація автономних інверторів.
- 3.Інвертори струму та напруги.

1. Інвертори ведені живильною мережею. (самостійне вивчення)

2.Інвертори і статичні перетворювачі частоти. Класифікація автономних інверторів.

Інвертори. Призначення і класифікація

Автономні інвертори — це пристрої, що працюють на автономне навантаження і призначені для перетворення напруги постійного струму в напругу змінного струму заданої або регульованої частоти.

Застосовують автономні інвертори:

- у системах електропостачання споживачів змінного струму, коли єдиним джерелом живлення є джерело напруги постійного струму (наприклад, акумуляторна або сонячна батареї);
- у системах гарантованого електропостачання при зникненні напруги мережі живлення (наприклад, для особистих потреб електростанцій — для живлення пристроїв контролю, вимірювання, захисту, ЕОМ);
- для живлення технологічного устаткування, частота напруги якого відрізняється від промислової частоти 50 Гц;
- для частотного регулювання швидкості асинхронних двигунів;
- для живлення споживачів змінного струму від лінії електропостачання постійного струму;
- для перетворення постійної напруги одного рівня у постійну напругу іншого рівня (конвертування напруг).

Комутаційними елементами в інверторах є тиристори або силові транзистори.

Залежно від специфіки електромагнітних процесів розрізняють інвертори струму та інвертори напруги. На рисунку 4.1 зображені приклади їх схем.

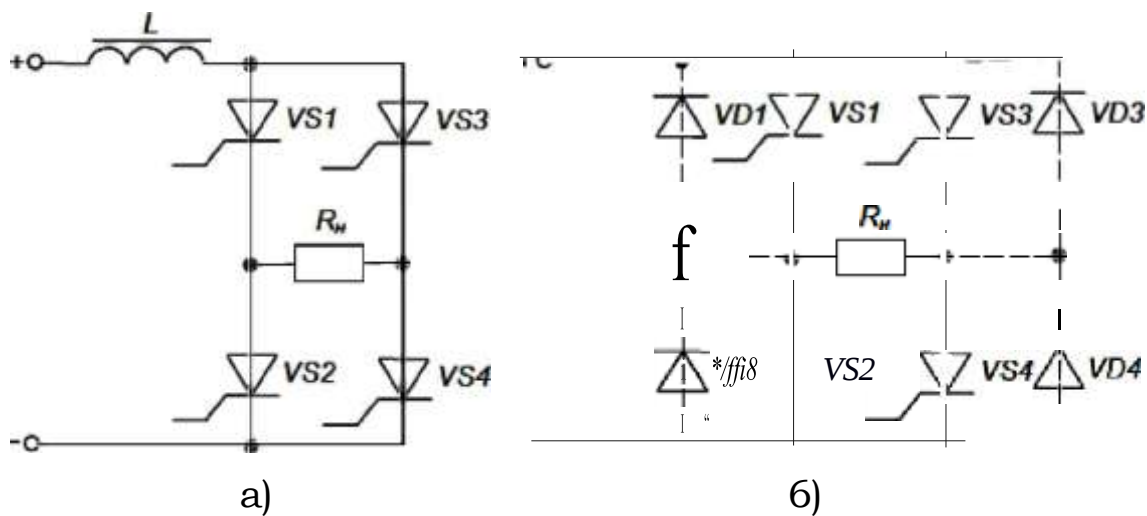
В інверторах струму силове коло схеми підмикається до джерела постій-

ної напруги через дросель L з великим індуктивним опором (як відомо, джерело струму повинно мати великий опір).

В інверторах напруги паралельно джерелу живлення вмикається конденсатор C великої ємності, чим виключається вплив на роботу пристрою внутрішнього опору джерела (отримуємо джерело напруги за змінним струмом).

Таким чином, комутація тиристорів в інверторах струму проводиться за сталого струму, а в інверторах напруги — за сталої напруги.

При роботі інвертора схема керування по чергово вмикає пари тиристорів $VS1, VS4$ або $VS2, VS3$, завдяки чому на навантаженні R_n виникає змінна напруга (за допомогою ключової схеми навантаження підключається таким чином, щоб в ньому протікав струм різних напрямків).



а — інвертор струму; б — інвертор напруги

Рисунок 4.1 Автономні інвертори

Якщо навантаження інвертора напруги має індуктивний або активно-індуктивний характер, то паралельно тиристорам вмикають зворотні діоди ($VD1-VD4$ на рисунку 4.1, б). Цим забезпечується передача накопичуваної в індуктивності енергії назад у джерело живлення.

Основною проблемою при проектуванні інверторів є забезпечення надійного вимикання тиристорів, що знаходяться у провідному стані, перед вмиканням тиристорів, що не проводили струм. Це реалізується використанням схем примусової комутації, що забезпечують запирання тиристорів у колах постійного струму.

Вентильна схема в наведених інверторах є мостовою, як і у випрямлячі (що є перетворювачем напруги змінного струму в напругу постійного струму). Звідси можна зробити висновок, що керовані вентильні схеми є зворотними. Вони можуть передавати енергію як в одному, так і в іншому напрямку, залежно від

місця вмикання джерела і навантаження і від алгоритму керування.

3.Інвертори струму та напруги

Однофазний інвертор струму

Схема однофазного інвертора струму з трансформаторним виходом зображена на рисунку 4.2. Почергове вмикання тиристорів VS1 або VS2 забезпечує виникнення на навантаженні R_H змінної напруги.

Дросель L забезпечує незмінність величини струму у силовому колі. Кому-туючий конденсатор C_K забезпечує примусове вимикання тиристорів.

Первинні напівобмотки трансформатора TV $w'_1 = w''_1 = w_1$ підключені до тиристорів VS1 і VS2 відповідно, а його вторинна обмотка w_2 — до навантаження R_H .

Схема керування тиристорами СК забезпечує подачу керуючих імпульсів на тиристори (у найпростішому випадку це може бути симетричний мультивібратор, що працює в автоколивальному режимі).

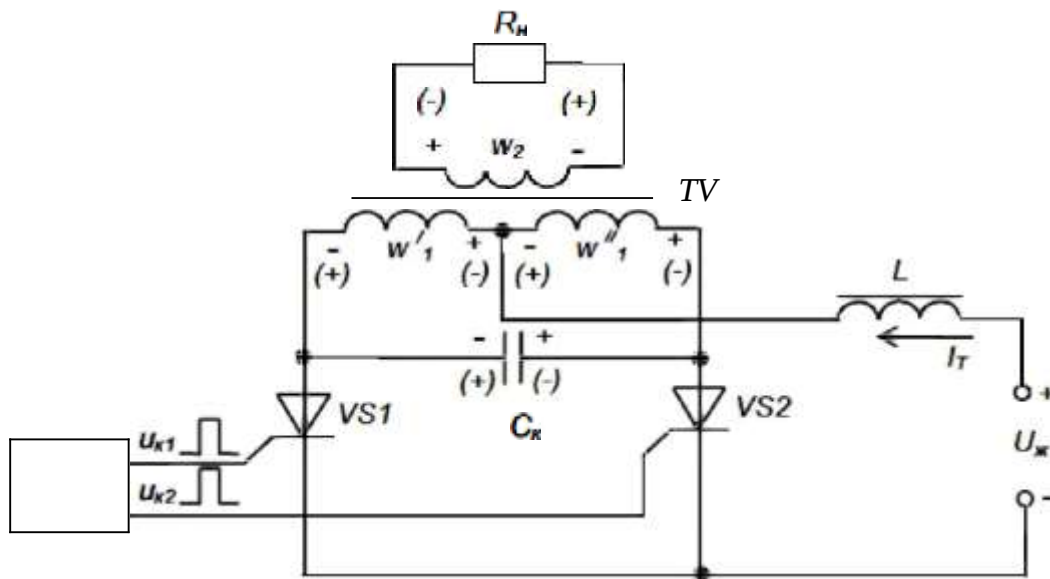


Рисунок 4.2 — Однофазний інвертор струму
з трансформаторним виходом

Працює інвертор наступним чином. При надходженні від СК керуючого імпульсу до VS1 він вмикається і напруга джерела живлення подається на півобмотку w' . Потік у магнітопроводі трансформатора змінюється і наводить у обмотках w_2 і w''_1 ЕРС із полярністю, яка на схемі вказана без дужок. При цьому комутуючий конденсатор C_K , підключено паралельно до первинної обмотки трансформатора, заряджається до напруги $2U$, а на навантаженні R_H з'являється позитивний сплеск напруги.

Після закінчення проміжку часу, що відповідає додатній півхвилі змінної напруги навантаження, СК вмикає тиристор VS2 і напруга джерела живлення подається на півобмотку $w''i$. Конденсатор Ск через VS2 підключається паралельно до VS1, причому полярність напруги на ньому є такою, що вимикає останній.

Полярність ЕРС, наведеної в обмотках трансформатора після вмикання VS2, на схемі показана у дужках. Конденсатор Ск починає перезаряджатись до напруги $2U$ із зворотною полярністю (вказана на схемі також у дужках). На навантаженні виникає негативний сплеск напруги.

По закінченні проміжку часу, що відповідає негативній півхвилі змінної напруги, СК знову вмикає тиристор VS1 і процеси повторюються.

Роботу однофазного інвертора струму ілюструють часові діаграми, наведені на рисунку 4.3.

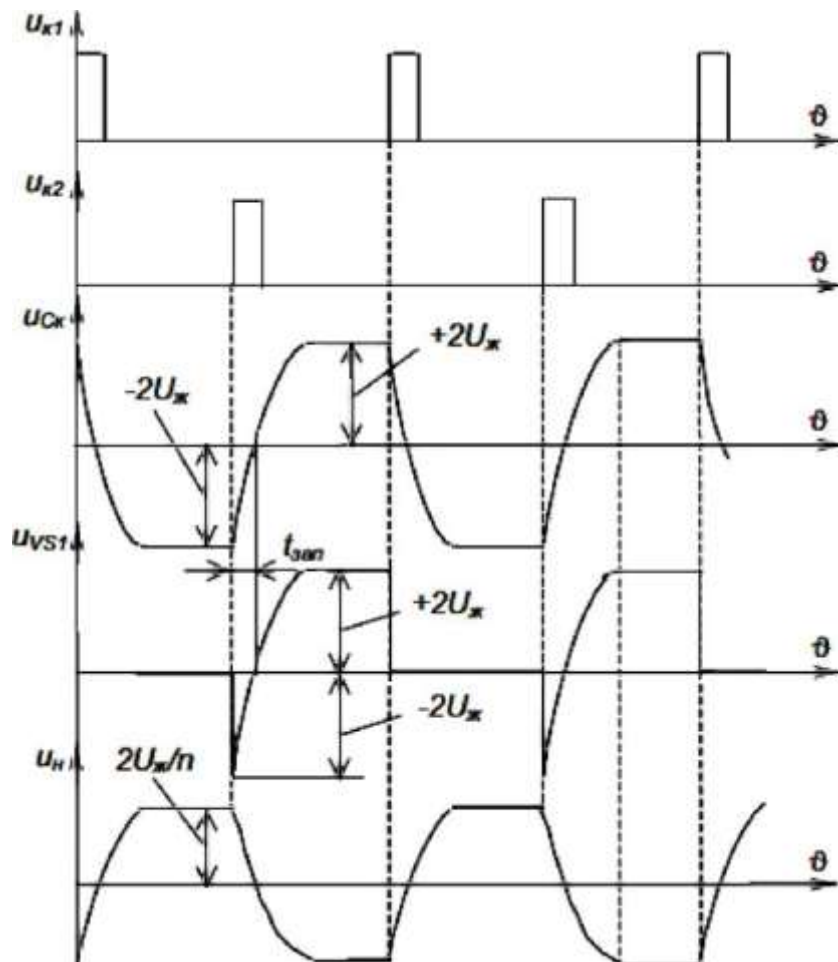


Рисунок 4.3 Часові діаграми роботи однофазного інвертора струму

Час, протягом якого напруга між анодом та катодом тиристора, наприклад, VS1 негативна, називається часом запирання

$$t_{\text{зап}} \geq t_{\text{вим}},$$

де $t_{\text{вим}}$ — час вимикання тиристора.

Якщо навантаження активне, то

$$t_{\text{зап}} = 0,7 R'_H C_K, \quad (4.1)$$

де $R'_H = R_H n^2$ — опір навантаження, зведений до первинного кола трансформатора ($n = 2 \dots 1/w_2$)

Якщо навантаження індуктивне, то

$$t_{\text{зап}} = \frac{4U_{\text{ДК}} C_K}{I_T}, \quad (4.2)$$

$$Q = UC = it, \text{ звідки } t = UC / \quad (4.3)$$

Таким чином, інвертор формує на навантаженні змінну напругу, форма якої визначається формою напруги на конденсаторі C_K і залежить від величини опору навантаження. Зі збільшенням останнього постійна часу заряду конденсатора

$$\tau = C_K R_H n^2 \quad (\text{де } n \text{ — коефіцієнт трансформації трансформатора})$$

збільшується і форма напруги на ньому наближається до трикутної. Її амплітуда при цьому збільшується (при збереженні середнього за півперіоду значення напруги). У результаті, при холостому ході за відсутності втрат в елементах пристрою напруга на навантаженні і конденсаторі безмежно зростає (реально виникають значні перенапруги) — джерело струму намагається підтримувати величину струму незмінною. Це може призвести до виходу інвертора з ладу.

Півмостовий однофазний інвертор напруги

Схема півмостового однофазного інвертора напруги зображена на рисунку 4.4. Силові кола виділені на ній більш товстими лініями.

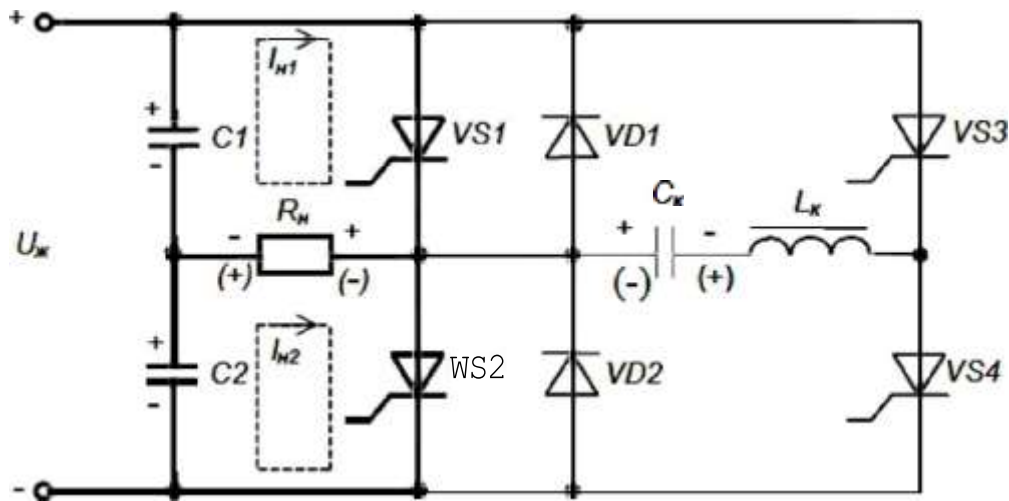


Рисунок 4.4 — Півмостовий однофазний інвертор напруги

Такого типу схеми називають півмостовими, бо половину мосту в них складають вентиля (тиристри VS1 і VS2), а другу — інші елементи (конденсатори C1 і C2).

Решта елементів є елементами схеми примусової комутації. Так тиристор VS3, діод VD1 разом з комутуючими конденсатором C_k і дроселем L_k утворюють контур примусового вимикання тиристора VS1, а VS4 і VD2 разом з C_k і L_k — контур примусового вимикання тиристора VS2.

Почергове вмикання тиристорів VS1 і VS2 призводить до підключення до навантаження напруги конденсатора C1: $U_{C1} = U_p/2$ (протікає струм фазний i_g), або конденсатора C2 з такою ж напругою $U_{C2} = U_p/2$ (протікає струм I_{H2}).

Робота схеми полягає у наступному. Після підключення джерела живлення і заряду конденсаторів C1 і C2 схема керування (на рисунку не показана) вмикає спочатку, наприклад, тиристор VS4.

Конденсатор C_k заряджається до напруги $U_p/2$ з полярністю, вказаною на рисунку без дужок по контуру (+C2, R_u , C_k , L_k , VS4, —C2). Після закінчення заряду конденсатора C_k тиристор VS4 сам вимикається, бо струм через нього знижується до нуля.

Це є підготовчим етапом роботи пристрою.

Далі схема керування вмикає тиристор VS1 і на навантаженні з'являється позитивна напруга (полярність вказана без дужок).

По закінченні тривалості півперіоду схема керування вмикає тиристор VS3. Відкритий тиристор VS3 і зустрічно-паралельно увімкнені тиристор VS1 та діод VD1 утворюють контур коливального перезаряду конденсатора C_k . Струм роз-

ряду C_k змінюється за синусоїдним законом, бо L_k з C_k являють собою послідовний резонансний коливальний контур

$$i_k = I_{km} \sin \omega_0 t, \quad (4.4)$$

де I_{km} — амплітуда струму контуру;

$$U_{dk} = \frac{U_{dk}}{2\sqrt{L_k/C_k}}, \quad (4.5)$$

Хвильовий опір контуру

$$\rho_k = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}, \quad (4.6)$$

Власна частота контуру

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} \quad (4.7)$$

Доки $i_k > I_{H1}$, розрядний струм i_k тече через тиристор VS1 назустріч струмові I_{H1}

$$i_{H1} = I_{H1} - i_k. \quad (4.8)$$

Як тільки виявиться, що $i_k \leq I_{H1}$, струм тиристора VS1 потече через діод VD1. До тиристора VS1 тепер прикладається зворотна напруга, яка дорівнює падінню напруги на діоді VD1 (до одного вольту) і тиристор VS1 закривається. Час протікання струму через діод VD1 називається часом запирання t_{zap} тиристора VS1. Він повинен перевищувати час вимикання тиристора

$$t_{zap} > t_{вим}, \quad (4.9)$$

По закінченні коливального перезаряду конденсатора C_k струм $i_k' = 0$, а C_k виявляється зарядженим до напруги $U_p/2$ зі зворотною полярністю (на схемі у дужках), а тиристор VS3 сам вимикається.

Тепер схема готова до наступного циклу роботи, коли на навантаженні буде формуватись негативна півхвиля напруги (полярність вказана у дужках), для чого схема керування спочатку вмикає тиристор VS2, а по закінченні тривалості півхвилі — тиристор VS4 і т. д.

Тиристори VS3 і VS4 мають потужність значно меншу за VS1 і VS2, бо працюють короткочасно (тільки на час запирання силових тиристорів).

Інвертор напруги формує на навантаженні напругу, а форма струму залежить від характеру навантаження.

ТЕМА 6 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, КОНТРОЛЮ І ЗАХИСТУ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ І КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ. ЛІНІЙНІ І НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

План

1. Системи керування, контролю і захисту силових напівпровідникових пристроїв.
2. Принципи побудови і класифікація систем керування. Лінійні і нелінійні елементи систем керування.

1. Системи керування, контролю і захисту силових напівпровідникових пристроїв.

1. Призначення систем керування

Системи керування, контролю і захисту є невід'ємною частиною силових напівпровідникових пристроїв (тиристорів, транзисторів, IGBT, MOSFET). Вони забезпечують:

- подачу керуючих сигналів для вмикання/вимикання елементів;
- захист пристроїв від перевантажень по струму, перенапруг, перегріву;
- стабільну та безпечну роботу перетворювачів електроенергії.

2. Принципи побудови систем керування

Системи керування будуються на основі принципів:

- **Функціональної модульності** — розділення на окремі модулі: задавальний, регулюючий, виконавчий.
- **Зворотного зв'язку** — контроль вихідних параметрів для корекції керуючого сигналу.
- **Адаптивності** — здатність системи підлаштовуватись до змін умов.
- **Ізоляції** — електричне розділення силової і керуючої частин (наприклад, оптронна розв'язка).

3. Класифікація систем керування

Системи керування можна класифікувати за кількома ознаками:

- **За типом керування:**
 - Ручні (механічні або кнопочові).
 - Автоматичні (на базі мікроконтролерів, ПЛК, цифрових процесорів).
- **За принципом дії:**
 - Відкриті системи (без зворотного зв'язку).
 - Замкнені системи (із зворотним зв'язком).
- **За типом керованого пристрою:**
 - Тиристорні системи керування.
 - Транзисторні (IGBT, MOSFET).
 - Гібридні (поєднання різних типів напівпровідників).

4. Лінійні і нелінійні елементи в системах керування

- **Лінійні елементи:**
 - Підсилювачі.
 - Фільтри (RC, RL, RLC).
 - Задавачі напруги/струму.
 - Пропорційні регулятори (Р-регулятори).
- **Нелінійні елементи:**
 - Напівпровідникові ключі (тиристори, діоди, транзистори).
 - Обмежувачі перенапруг.
 - Імпульсні модулятори.
 - Регулятори типу PID, які мають нелінійні характеристики через інтегральну та диференціальну складову.

5. Системи захисту

Основні функції захисту:

- Вимикання при короткому замиканні.

- Захист по температурі (з використанням термодатчиків).
- Захист по перенапрузі (варистори, супресори).
- Механізми самодіагностики та сигналізації аварій.

6. Сучасні тенденції

- Використання цифрових контролерів (DSP, FPGA).
- Побудова систем з програмованою логікою.
- Інтеграція з інтелектуальними системами моніторингу (IoT).
- Висока енергоефективність та швидкодія.

2. Принципи побудови і класифікація систем керування. Лінійні і нелінійні елементи систем керування. (самостійне вивчення)

ТЕМА 7 ВТОРИННІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ. СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ. СТАБІЛІЗАТОРИ СТРУМУ

План

1. Вторинні джерела електроживлення.
2. Стабілізатори напруги.
3. Стабілізатори струму

1. Вторинні джерела електроживлення (ВДЕ).

Визначення Вторинні джерела електроживлення — це електронні пристрої, які перетворюють вхідну (первинну) електричну енергію з одних параметрів у вихідну з іншими, стабілізованими параметрами, що відповідають вимогам навантаження.

Основні функції ВДЕ:

- Перетворення змінної напруги в постійну (випрямлення).
- Стабілізація вихідної напруги.
- Фільтрація пульсацій.

- Забезпечення захисту від перевантажень, короткого замикання, перенапруги тощо.

Класифікація вторинних джерел живлення

1. За типом перетворення:

- **Лінійні стабілізатори** (аналогові):
 - Плавне регулювання.
 - Проста схема, але низький ККД.
- **Імпульсні джерела живлення (ІДЖ):**
 - Висока ефективність.
 - Компактність.
 - Засновані на високочастотному перемиканні силових напівпровідникових приладів.

2. За способом стабілізації:

- Стабілізація **напруги** (найпоширеніша).
- Стабілізація **струму**.
- Комбінована стабілізація.

3. За числом виходів:

- Одновихідні.
- Багатовихідні (наприклад: ± 12 В, 5 В тощо).

Структурна схема імпульсного вторинного джерела живлення:

1. **Випрямляч** — перетворює змінну напругу на постійну.
2. **Фільтр** — згладжує пульсації після випрямлення.
3. **Перетворювач (DC/DC)** — працює за принципом високочастотної комутації.
4. **Стабілізатор** — керує шириною імпульсів для підтримки стабільної вихідної напруги.
5. **Зворотний зв'язок** — контролює параметри виходу й керує регулюванням.

Переваги ІДЖ: Високий ККД (до 90–95%). Компактність завдяки високочастотним трансформаторам. Можливість гнучкого керування. Наявність повного захисту.

Недоліки: Електромагнітні завади. Складність в ремонті. Високі вимоги до елементної бази та технічного проєктування.

Типові характеристики вторинних джерел живлення:

- Вхідна напруга: 85–265 В змінного струму або 12/24/48 В постійного.
- Вихідна напруга: 3.3 В, 5 В, 12 В, ± 15 В, 24 В.
- Струм навантаження: від кількох мА до десятків ампер.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ ЗДОБУВАЧІВ:

1. Пояснити різницю між лінійним та імпульсним джерелом живлення.
2. Накресліть структурну схему ІДЖ та вкажіть призначення її складових.
3. Проаналізуйте, які режими роботи транзистора застосовуються в перетворювачі ІДЖ.
4. Розрахуйте вихідну потужність джерела живлення, якщо:
 - $U_{\text{вих}} = 5 \text{ В}$, $I_{\text{вих}} = 2 \text{ А}$, ККД = 85%.
 - *Знайдіть також споживану потужність та втрати.*

2. Стабілізатори напруги.

2.1 Стабілізатори

Стабілізатори це електронні пристрої, призначені для автоматичного підтримування незмінного (заданого) значення напруги (струму) на виході вторинного джерела живлення із заданим ступенем точності при дії різних дестабілізуючих чинників. Основними дестабілізуючими чинниками є: коливання напруги мережі живлення, зміна опору (струму) навантаження, зміна температури.

2.1.1 Класифікація стабілізаторів

Класифікація стабілізаторів:

- за способом стабілізації: параметричні та компенсаційні;

- за способом регулювання: неперервної дії та імпульсні стабілізатори;
- за родом стабілізованої величини: стабілізатори напруги і стабілізатори струму;
- за видом напруги: стабілізатори постійної напруги, стабілізатори змінної напруги.

Параметричний метод стабілізації базується на зміні параметрів нелінійного елементу стабілізатора в залежності від зміни дестабілізуючого чинника, а стабілізатор називають параметричним.

У компенсаційному методі стабілізації у вимірювальному елементі порівнюється величина, що стабілізується, і виробляється сигнал розузгодження. Цей сигнал перетворюється, підсилюється і подається на регулюючий елемент. Такий стабілізатор називають компенсаційним.

2.1.2 Параметричні стабілізатори

Схема параметричного стабілізатора напруги наведена на рисунку 2.12. Вона складається з баластного резистора R_B і стабілітрона VD . Стабілізатор підмикається до виходу випрямляча з фільтром. Навантаження R_H увімкнене паралельно стабілітрону.

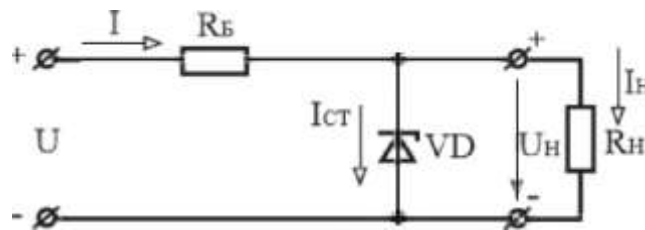


Рисунок 2.12 — Схема параметричного стабілізатора напруги

Особливості роботи такого стабілізатора напруги засновані на тому, що напруга стабілітрона на зворотній гілці його вольт-амперної характеристики змінюється незначно в широкому діапазоні зміни зворотного струму стабілітрона. Зміна напруги на вході стабілізатора зумовлює значну зміну струму стабілітрона при незначній зміні напруги на ньому.

Стабілізатори характеризуються коефіцієнтом стабілізації напруги, який для параметричних стабілізаторів складає $K_{ет} = 20 \dots 50$.

Рівняння електричної рівноваги для такого стабілізатора має вигляд

$$U = U_H + IR_B, \quad (2.27)$$

де R_r — баластний резистор, необхідний для зменшення впливу дестабілізуючих чинників на напругу на навантаженні.

Опір баластного резистора R_b вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела U , напруга і струм стабілітрона також відповідали номінальним значенням $I_{ст.н}$. Величину $E_{ст.н}$ визначають за паспортними даними стабілітрона за виразом

$$I_{ст.н} = \frac{I_{ст.мин} + I_{ст.макс}}{2}. \quad (2.28)$$

Тоді з рівняння (2.27), визначаємо опір баластного резистора

$$R_b = \frac{U - U_{ст.н}}{I_{ст.н} + I_H}, \quad (2.29)$$

де $I_H = P_H / U_H$; $U \approx U_d$; $I = I_{ст.н} + I_H$.

Роботу параметричного стабілізатора розглянемо за допомогою вольт-амперної характеристики стабілітрона і прямої навантаження (рисунок 2.13).

Характеристика навантаження будується (при номінальній напрузі джерела) по двох точках, а саме: точка А з координатами $U_{ст.н}$, і точка Б на осі ординат, яка визначається за виразом $I = U/R_b$. Через ці точки будують пряму навантаження. Якщо напруга U , що подається на вхід стабілізатора, збільшиться на ΔU із-за підвищення, наприклад, напруги мережі, тоді характеристика навантаження баластного резистора R_b переміститься паралельно самій собі і займе положення, що відповідає струму $I_{ст.макс}$ і напрузі $U_{ст.н}$. Напруга $U_{ст.н}$ залишиться практично незмінною. Напруга на стабілітроні залишиться незмінною також при зниженні вхідної напруги стабілізатора та при змінах струму навантаження.

Переваги параметричних стабілізаторів простота конструкції і надійність роботи, недолік — низькі коефіцієнт стабілізації та ккд, а також вузький і нерегульований діапазон напруги, що стабілізується.

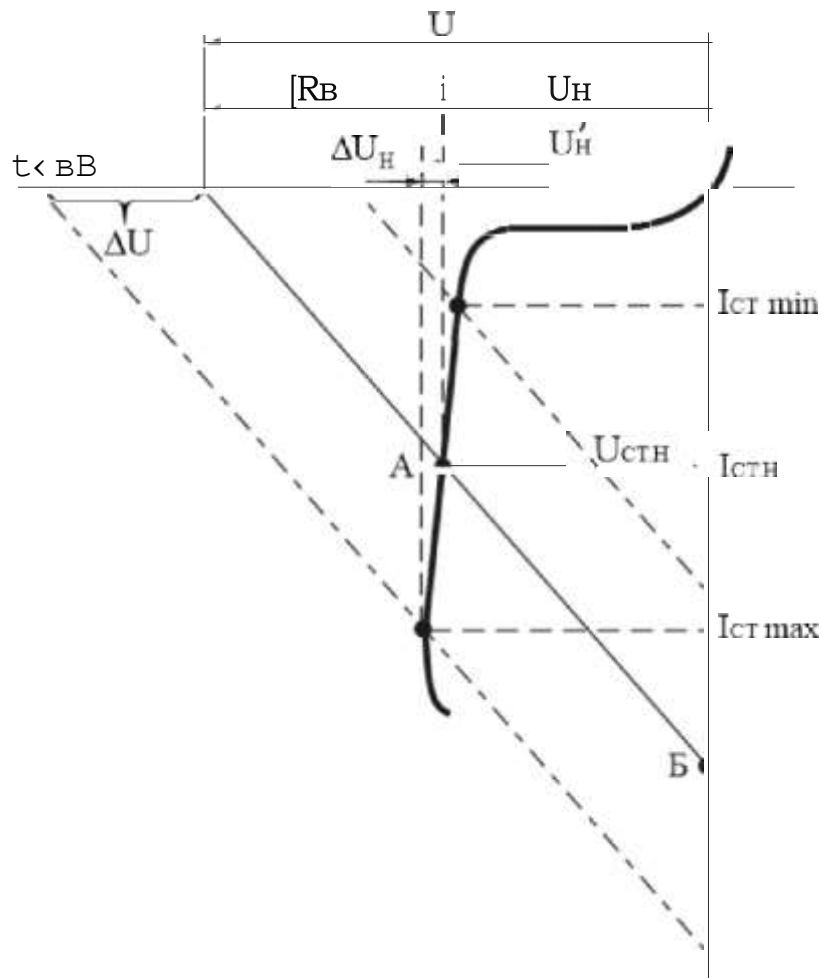
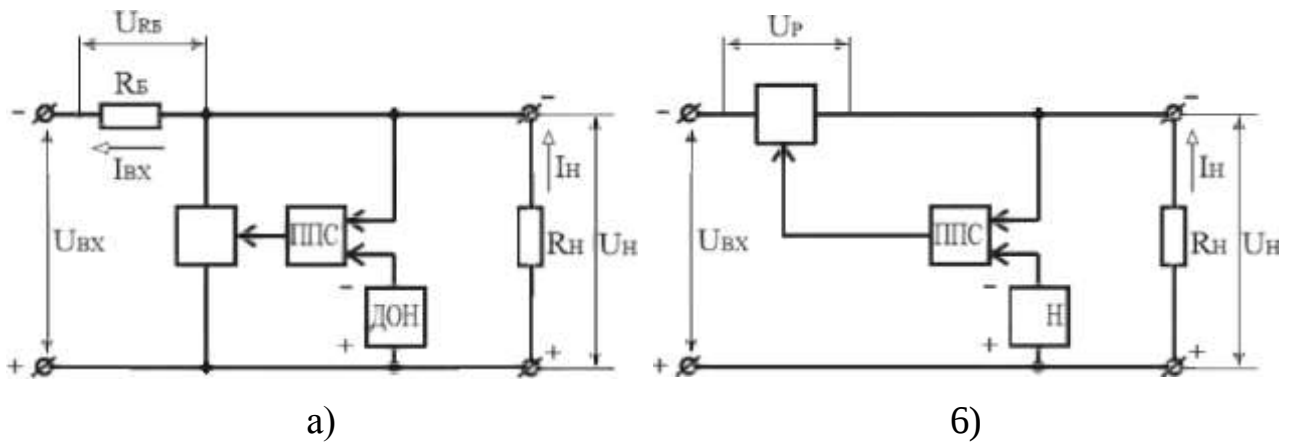


Рисунок 2.13 Графічна інтерпретація принципу роботи параметричного стабілізатора напруги

2.1.3 Компенсаційні стабілізатори

Компенсаційні стабілізатори напруги мають вищий коефіцієнт стабілізації ($K_{ст}$ більше або дорівнює 50) і менший вихідний опір в порівнянні з параметричними. Їх принцип роботи заснований на тому, що зміна напруги на навантаженні (під дією зміни $U_{вх}$ або I_n) передається на регулюючий елемент, що спеціально вводиться в схему і перешкоджає зміні напруги U_n .

Регулюючий елемент (транзистор) може бути увімкнений або паралельно навантаженню, або послідовно з ним. Залежно від цього розрізняють два типи компенсаційних стабілізаторів напруги: паралельні (рисунок 2.14, а) і послідовні (рисунок 2.14, б).



а — паралельного типу; б — послідовного типу

Рисунок 2.14 — Структурні схеми компенсаційних стабілізаторів напруги

Дія на регулюючий елемент (РЕ) в обох типах стабілізаторів здійснюється керуючою схемою в яку входять підсилювач постійного струму (ППС) і джерело опорної напруги (ДОН). За допомогою ДОН проводять порівняння напруги на навантаженні з опорною напругою. Функція ППС зводиться до підсилення різниці порівнюваної напруги і подачі підсиленого сигналу безпосередньо на регулюючий елемент.

У схемі (рисунок 2.14, а) стабілізація напруги на навантаженні досягається, як і в параметричному стабілізаторі, зміною напруги на баластному резисторі R_b шляхом зміни струму регулюючого елементу.

У схемі (рисунок 2.14, б) регулюючий елемент увімкнений послідовно з навантаженням. Стабілізація напруги на навантаженні здійснюється шляхом зміни напруги на регулюючому елементі. Струм регулюючого елементу тут рівний струму навантаження.

Відповідно до розглянутого, принцип дії компенсаційних стабілізаторів напруги заснований на зміні опору регулюючого елементу.

Енергетичні показники (зокрема ккд) послідовних стабілізаторів напруги вищі, ніж паралельних. Це є головною причиною того, що послідовні стабілізатори знайшли найбільше застосування на практиці. З переваг паралельних стабілізаторів слід зазначити їх нечутливість до перевантажень за струмом, зокрема коротким замиканням вихідного кола. Послідовні стабілізатори вимагають пристроїв захисту регулюючого елементу при перевантаженнях за струмом.

Принципова схема компенсаційного стабілізатора напруги послідовного типу наведена на рисунку 2.15.

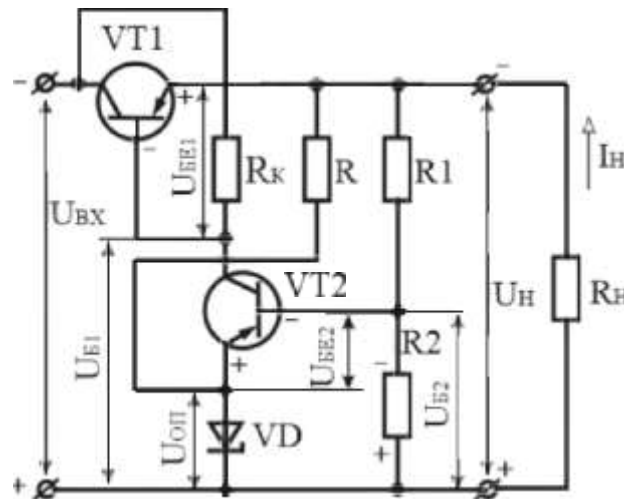


Рисунок 2.15 Схема компенсаційного стабілізатора напруги послідовного типу

Транзистор VT1 служить регулюючим елементом, а ППС виконаний на транзисторі VT2. Джерелом опорної напруги є стабілітрон VD, який увімкнений в коло емітера транзистора VT2. Резистори R1, R2 є елементами вхідного дільника напруги. Напруга між базою і емітером транзистора VT2

$$U_{BE2} = \frac{R2}{R1 + R2} U_H - U_{оп}. \quad (2.30)$$

Резистор R використовують для виведення стабілітрона VD на робочу ділянку характеристики, якщо струм I_{E2} транзистора VT2 малий.

Припустимо, що під дією зменшення вхідної напруги $U_{ВХ}$ напруга U_H стала менше номінальної. Зниження напруги U_H викликає зменшення напруги на базі U_2 та напруги U_{E2} транзистора VT2, а отже і його струмів I_{B2} та I_{K2} . Зменшення струму I_{K2} приводить до меншого падіння напруги на резисторі R_K та збільшенню напруг U_{B1} та U_{BE1} транзистора VT1. Внаслідок збільшення напруги U_{BE1} напруга U_H транзистора VT1 зменшується та підвищується тим самим майже до попередньої величини напруга U_H . Подібно до розглянутого, здійснюється компенсація зміни напруги U_H при збільшенні $U_{ВХ}$, а також при змінах струму навантаження.

Іншими словами, опорна напруга (задається за допомогою стабілітрона VD) порівнюється з напругою на резисторі R2, яка пропорційна вихідній напрузі стабілізатора, оскільки цей резистор є плечем дільника напруги R1, R2. Різниця цієї напруги підсилюється транзистором VT2 і виділяється на резисторі

R_k - Напруга на цьому резисторі є вхідною напругою регулюючого елементу VT1 і, тому, обумовлює зміну напруги колектор-емітер $U_{к-е}$ транзистора VT1, завдяки чому забезпечується стабілізація вихідної напруги.

На рисунку 2.16 наведено схему компенсаційного стабілізатора напруги на операційному підсилювачі з параметричним стабілізатором на вході.

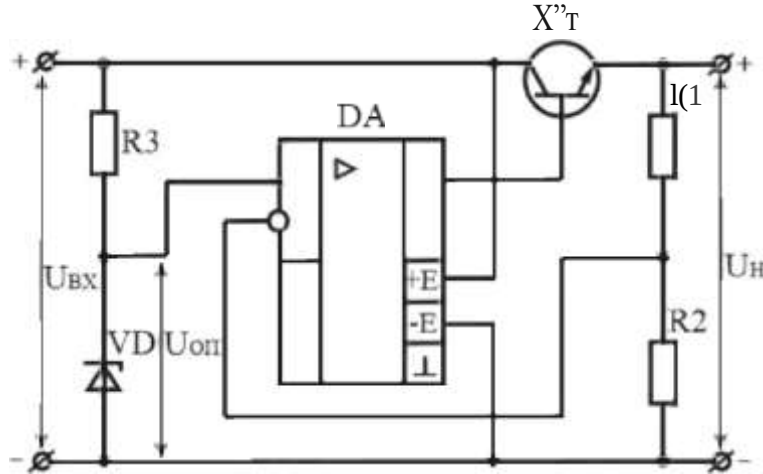


Рисунок 2.16 — Схема компенсаційного стабілізатора напруги на операційному підсилювачі з параметричним стабілізатором на вході

Операційний підсилювач увімкнений за схемою неінвертуючого підсилювача, на вхід якого подається опорна напруга $U_{пр}$ від стабілітрона VD. Для збільшення вихідного струму стабілізатора використовується повторювач напруги на транзисторі VT. Вихідна напруга визначається за формулою

$$U_n = U_{2g} (31/L_2 + 1). \quad (2.31)$$

Для збільшення стабільності опорної напруги можна ввімкнути параметричний стабілізатор напруги (R_3 , VD) на вихід компенсаційного стабілізатора напруги (рисунки 2.17).

Струм через стабілітрон VD можна розрахувати за формулою

$$I_{cr} = U_{оп} \cdot R_1 / (R_2 \cdot R_3), \quad (2.32)$$

і він не залежить від зміни вхідної напруги. Для даної схеми операційний підсилювач має два зворотні зв'язки: додатний і від'ємний. Наявність додатного зворотного зв'язку приводить до того, що на виході операційного підсилювача при вмиканні живлення може встановитись як позитивний, так і негативний по-

тенціал напруги. Для того щоб встановилась напруга потрібного знака, необхідна деяка початкова несиметрія. Ця несиметрія створюється за рахунок вихідного транзисторного повторювача напруги.

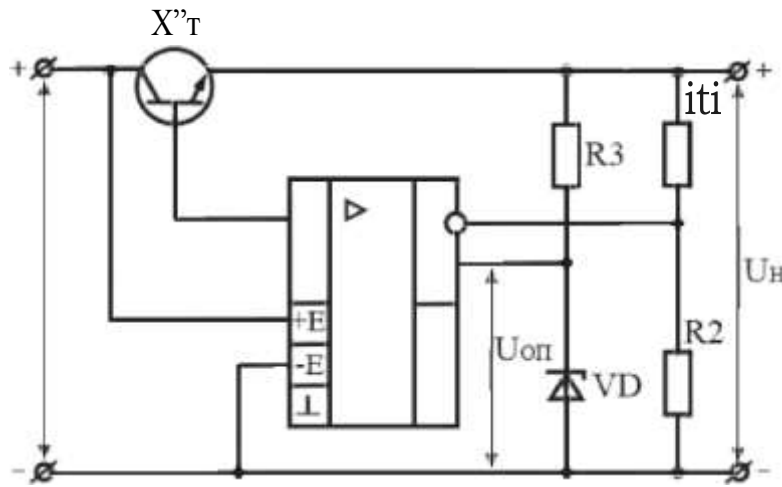


Рисунок 2.17 Схема компенсаційного стабілізатора напруги на операційному підсилювачі з параметричним стабілізатором на виході

Важливо забезпечити захист стабілізаторів напруги від перевантажень. Захист необхідний як від перевантажень за струмом, так і за напругою. Захист від перевантажень за напругою можна забезпечити увімкненням стабілітрона в коло колектор-емітер транзистора. Використовують при цьому стабілітрони середньої потужності і, в разі необхідності, шунтують їх резистором. Можна також, використовувати малопотужні стабілітрони, вмикаючи їх у коло бази транзистора регульованого елементу.

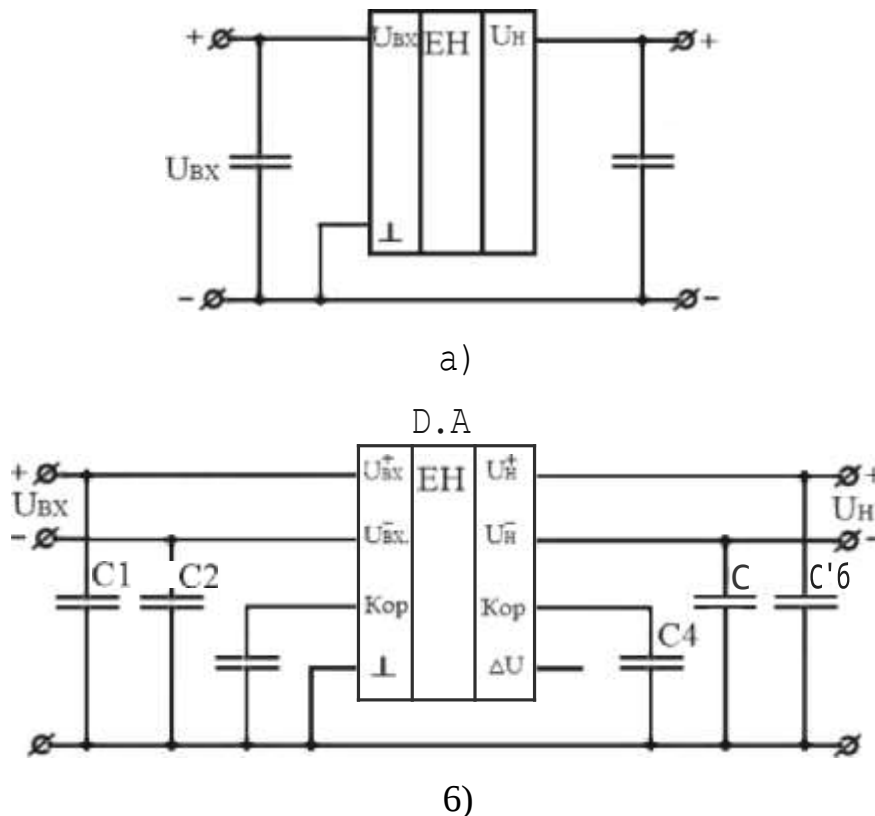
2.1.4 Інтегральні стабілізатори напруги

Значна потреба у стабілізаторах постійної напруги, які б були прості у використанні, зумовила розробку і впровадження у виробництво інтегральних мікросхем стабілізаторів напруги з безперервним регулюванням (серія К142ЕН). У цю серію увійшли стабілізатори наступних типів: з регулюванням вихідної напруги (К142ЕН1-К142ЕН4); з фіксованою вихідною напругою (К142ЕН5; К142ЕН8; К142ЕН9; КРЕН5; КРЕН8; КРЕН9); з двополярними вхідними і вихідними напругами (К142ЕН6), що використовується для живлення операційних підсилювачів.

Типова схема вмикання інтегрального стабілізатора напруги з фіксованою вихідною напругою наведена на рисунку 2.18, а. Вихідний конденсатор С6

вибирають електролітичного типу ємністю близько 10 мкФ. Вхідний конденсатор $C1$ ($= 0,1$ мкФ) усуває генерації при стрибкоподібній зміні вхідної напруги.

Двополярні інтегральні стабілізатори напруги типу К142ЕН6 (рисунок 2.18, б) в основному використовуються для живлення операційних підсилювачів.



а — К142ЕН5 (КРЕН5), К142ЕН8 (КРЕН8), К142ЕН9 (КРЕН9);
б — К142ЕН6

Рисунок 2.18 — Схеми вмикання інтегральних стабілізаторів напруги

Вхідні конденсатори $C1$ і $C2$ вибирають ємністю близько 0,1 мкФ, вихідні конденсатори $C5$ і $C6$ вибирають електролітичного типу, ємністю близько 10 мкФ. Також до входів корекції підмикають конденсатори корекції $C3$ і $C4$ ($= 0,1$ мкФ), яш забезпечують стійку роботу мікросхеми.

Крім основного призначення — стабілізації напруги, інтегральні стабілізатори напруги можуть виконувати функцію згладжувального фільтра, захисту від електричних і теплових перевантажень, стабілізації струму, порогових пристроїв тощо.

Інтегральні стабілізатори напруги з фіксованою вихідною напругою можуть використовуватись без зовнішніх елементів. Вони мають вмонтований захист від перевантаження за струмом і тепловий захист від максимально допустимої температури кристала (175 °C), що значно підвищує їх надійність.

Інтегральні стабілізатори серії K142 розраховані на струми 0,15... 3 А і напругу 3... 30 В при потужності до 30 Вт (з зовнішнім радіатором, який дозволяє розсіяти потужність до 10 Вт). Вихідний опір перебуває в межах $R_{вих}$ 0,1... 0,2 Ом. Основні параметри інтегральних стабілізаторів напруги: U_n номінальна вихідна напруга; $I_{n\max}$ максимальний струм навантаження; $K_{нУ}$ коефіцієнт нестабільності за напругою; $K_{нІ}$ коефіцієнт нестабільності за струмом; $(U_{вх} - U_n)_{\min}$ допустима мінімальна різниця між вхідною і вихідною напругою.

2.1.5 Імпульсні стабілізатори напруги

При роботі регулюючого транзистора компенсаційного стабілізатора в безперервному режимі на ньому виділяється значна потужність, що приводить до необхідності застосовувати громіздкі радіатори. ККД таких стабілізаторів виходить низьким.

Потужність, яка виділяється на регулюючому транзисторі, зменшується, якщо він працює в ключовому режимі. Стабілізатори такого типу одержали назву імпульсних. Регулюючі транзистори в імпульсних стабілізаторах працюють як перемикаючі елементи.

Найбільш поширеними є імпульсні стабілізатори із широтно-імпульсною модуляцією. Структурна схема такого стабілізатора наведена на рисунку 2.19.

Принцип роботи схеми полягає в наступному. Випрямлена напруга через фільтр або безпосередньо з випрямляча подається на регулюючий елемент РЕ, а потім через фільтр Ф на вихід стабілізатора. Вихідна напруга стабілізатора $U_{вих}$ порівнюється компаратором К з опорною напругою $U_{оп}$, а потім сигнал різниці ΔU подається на вхід підсилювача постійного струму ΠFIC . Підсилений сигнал надходить до модулюючого пристрою МП, який перетворює сигнал постійного струму в імпульси визначеної тривалості. Тривалість імпульсів змінюється пропорційно сигналу різниці між опорною і вимірюваною напругою. З модулюючого пристрою імпульси надходять до регулюючого елемента РЕ, який періодично переключається. Середнє значення напруги на виході РЕ залежить від співвідношення між часом t_1 , коли він знаходиться у відкритому стані, і тривалістю періоду T : $U_{вих} = \gamma U_{вх}$, де $\gamma = t_1/T$ — коефіцієнт заповнення імпульсів.

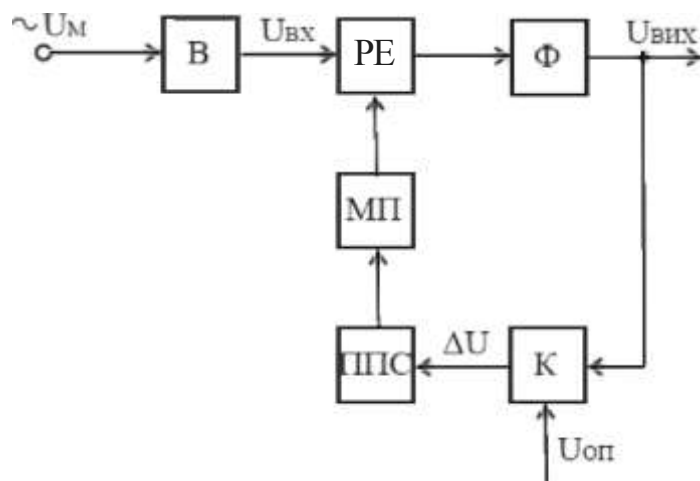


Рисунок 2.19 — Структурна схема імпульсного стабілізатора напруги

При зміні напруги на виході стабілізатора змінюється сигнал постійного струму, а отже, і співвідношення між тривалістю паузи та імпульсу. У результаті середнє значення вихідної напруги повертається до первісного значення.

3.Стабілізатори струму (самостійне вивчення)

ТЕМА 8. ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З БЕЗТРАНСФОРМАТОРНИМ ВХОДОМ. ПРИНЦИП ДІЇ І ОСНОВНІ СТРУКТУРНІ СХЕМИ

План

1. Джерела електроживлення з безтрансформаторним входом.
2. Принцип дії і основні структурні схеми.

1. Джерела електроживлення з безтрансформаторним входом.

Визначення Безтрансформаторне джерело живлення — це пристрій, який забезпечує перетворення змінної напруги з мережі без використання трансформатора, що дозволяє зменшити габарити та вартість обладнання.

Принцип роботи Вхідна змінна напруга подається через послідовно включений конденсатор, який обмежує струм та знижує пульсації. Випрямляч (зазвичай діодний) перетворює змінний струм на постійний. Фільтруючий конденсатор згладжує пульсації вихідної напруги. Стабілітрон або стабілізатор напруги забезпечує стабільність вихідної напруги.

Переваги: **Компактність:** відсутність трансформатора зменшує розміри та вагу пристрою. **Економічність:** знижуються витрати на матеріали та виробництво. **Простота конструкції:** менша кількість компонентів спрощує проєктування та виробництво.

Недоліки: **Відсутність електричної ізоляції** між мережею та навантаженням. **Обмеження по потужності:** зазвичай використовуються для малопотужних навантажень. **Залежність від вхідної напруги:** зміни вхідної напруги можуть впливати на стабільність вихідної.

Приклад застосування Безтрансформаторні джерела живлення часто використовуються в: **Побутовій електроніці:** адаптери для живлення малопотужних пристроїв. **Системах керування:** живлення датчиків,

малопотужних контролерів. **Інтегральних схемах:** вбудовані стабілізатори напруги.

Завдання для студентів:

- 1. Поясніть принцип роботи безтрансформаторного джерела живлення.**
- 2. Накресліть схему безтрансформаторного джерела живлення та позначте основні елементи.**
- 3. Порівняйте переваги та недоліки безтрансформаторних джерел живлення з трансформаторними.**
- 4. Розрахуйте вихідну напругу безтрансформаторного джерела живлення при вхідній напрузі 220 В та ємності конденсатора 47 мкФ.**

2. Принцип дії і основні структурні схеми (самостійне вивчення)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основна

1. Квітка С.О., Яковлев В.Ф., Нікітіна О.В. Електроніка та мікросхемотехніка. - Суми: Сумський національний аграрний університет, 2012.
2. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є., Чернівчан В.Я., Мусихіна Н.П. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки: Навчальний посібник. – 2-ге вид., стереотип. – Львів: "Магнолія плюс", видавець СПД ФО В.М. Піча, 2006. – 225с.
3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник/ за ред. А. Г. Соскова.- К.: Каравела, 2006.- 384 с.
4. Левитський С.М. Напівпровідникові прилади. Київ, ВПЦ "Київський університет", 2000 р.
5. Сосков, А. Г. Промислова електроніка : підручник / А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський. – Київ : Каравела, 2017. – 536 с.
6. Васильєва, Л. Д. Напівпровідникові прилади : підручник для вузів / Л. Д. Васильєва, Б. І. Медведенко, Ю. І. Якименко. - К. : ІВЦ «Вид-во «Політехніка», 2012. – 554 с.
7. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студ. вищ. навч. закладів : у 4-х т. – Київ : Каравела. Т. 3 Цифрові пристрої / В. І. Сенько [та ін.]. – 2017. – 399 с.
8. Електроніка і мікросхемотехніка / В. І. Сенько [та ін.]. – К.: Каравела. Т. 4, Кн. 1: Силова електроніка / за ред. В. І. Сенька. – 2013. – 640 с.
9. Електроніка і мікросхемотехніка / В. І. Сенько [та ін.]. – К.: Каравела. Т. 4, Кн. 2 / за ред. В. І. Сенька. – 2013. – 316 с.
10. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за напрямками «Електромеханіка та Електротехніка»: У 4-х т. /Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. та ін. Т2. Аналогові та імпульсні пристрої. -Харків: Фоліо, 2002.

Інформаційні ресурси

11. <http://www.kmu.gov.ua> - Кабінет Міністрів України.
12. <http://nubip.edu.ua/node/1376> - кафедра автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І.Мартиненка.
13. <http://elibrary.nubip.edu.ua> - електронна наукова бібліотека НУБіП України.
14. <http://energ.nauu.kiev.ua/> - навчально-інформаційний портал ННІ енергетики і автоматики
15. <http://www.nbuv.gov.ua/> - національна бібліотека України імені В.І. Вернадського, Київ.

Рясна Ольга Василівна

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г. Кондратьєва, 160

Підписано до друку: січень 2025 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman

Тираж: ____ примірників Замовлення _____ Ум. друк. арк. 3,3
