

Міністерство освіти і науки України  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні  
Запорізького національного університету

Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Критська Т.В.

**АНАЛОГОВА ТА ОПТОСХЕМОТЕХНІКА**  
(Частина 1)

Методичні рекомендації до практичних занять  
для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня  
за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної  
програми «Мікро- та наносистемна техніка»

Міністерство освіти і науки України  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізького національного університету

Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Критська Т.В.

**АНАЛОГОВА ТА ОПТОСХЕМОТЕХНІКА**  
(Частина 1)

Методичні рекомендації до практичних занять  
для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня  
за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної  
програми «Мікро- та наносистемна техніка»

Затверджено  
Вченою  
радою ЗНУ  
Протокол №  
від

Запоріжжя  
2024

УДК 621.38

В

Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Критська Т.В. Аналогова та оптосхемотехніка (Частина 1). Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 68 с.

Методичні рекомендації до практичних занять з дисципліни «Аналогова та оптосхемотехніка» розроблено для студентів денної та заочної форм навчання інженерно-технічних спеціальностей та освітньо-професійних програм Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні. Викладена методика розрахунку і обробки результатів схем аналогової та оптосхемотехніки. Для практичного виконання робіт та самостійної проробки матеріалу студенти можуть використати приведені теоретичні відомості з курсу.

Рецензент

Коваленко В.Л., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем

Відповідальний за випуск

Критська Т.В., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

## Зміст

	Стор.
Вступ .....	5
Практичне заняття 1. Пасивні елементи електричного кола .....	7
Практичне заняття 2. Напівпровідникові діоди .....	15
Практичне заняття 3. Властивості та схемні рішення біполярних транзисторів .....	24
Практичне заняття 4. Властивості та схеми на польових транзисторах .....	29
Практичне заняття 5. Силові прилади аналогової схемотехніки .....	35
Практичне заняття 6. Ключі на польових транзисторах .....	44
Практичне заняття 7. Оптоелектронні схеми з фотоприймачами .....	50
Практичне заняття 8. Схеми відображення інформації .....	62

## Вступ

Дисципліна «Аналогова та оптосхемотехніка» є важливою для вирішення проблем проектування нових пристроїв електронної техніки.

Метою викладання дисципліни є засвоєння основ автоматичного проектування радіоелектронної апаратури (РЕА), щоб на основі набутих знань забезпечити необхідну інженерну підготовку майбутніх фахівців вказаної спеціальності.

Основними завданнями дисципліни «Аналогова та оптосхемотехніка»

є: ознайомлення з особливостями, конструкціями, застосуванням приладів аналогової електроніки в залежності від призначення, вимог до приладів електронної техніки та умов експлуатації.

- отримати знання із фізичних основ функціонування пристроїв аналогової електроніки,

- уміти використовувати фізичні та математичні моделі при проектуванні систем керування та обробки інформаційних сигналів аналогових та оптичних інформаційних систем;

- отримати навички із застосування приладів аналогової та оптичної електроніки в сучасних інформаційних системах.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен набути таких результатів навчання (знання, уміння тощо) та компетентностей:

- ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

- ЗК2. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

- ЗК3. Здатність до використання інформаційних і комунікаційних технологій.

- ЗК6. Здатність приймати обґрунтовані рішення.

- СК1. Здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.

- СК5. Здатність ідентифікувати, класифікувати, оцінювати і описувати процеси у мікро- та наносистемній техніці за допомогою побудови і аналізу їх фізичних і математичних моделей.

- СК8. Здатність визначати та оцінювати характеристики та параметри матеріалів мікро- та наносистемної техніки, аналогових та цифрових електронних пристроїв, мікропроцесорних систем.

- СК12. Здатність використовувати знання з оптичної аналогової та цифрової схемотехніки, оптоелектроніки, фотовольтаїки та геліоелектроніки.

- СК13. Здатність застосовувати знання з моделювання функціональних вузлів мікроелектроніки та конструювання приладів на їх основі.

Виконання кожної практичної роботи складається з двох етапів.

1. Підготовка до практичної роботи, вивчення теоретичного матеріалу, виконання усіх розрахунків, складання плану досліджень.

2. Рішення розрахункових завдань

У процесі підготовки до практичної роботи студент повинен чітко усвідомити собі кінцеву мету практичного заняття, і виконати необхідні розрахунки.

Звіт, підготовлений до практичної роботи, повинний містити назву і мету роботи, розрахунки, досліджувані схеми і часові діаграми, які пояснюють їхню роботу, план досліджень.

Студент допускається до виконання чергової роботи практикуму після підтвердження наявності необхідних знань теоретичного матеріалу і послідовності виконання роботи .

Для заліку виконаної практичної роботи студент повинен надати викладачу і захистити індивідуальний звіт з виконаної роботи.

Згідно з модульно-рейтинговою системою організації навчального процесу в робочій учбовій програмі приведено поділення максимальних балів рейтингу по всім видам учбової роботи приведеної дисципліни. Лектор конкретизує (в залежності від запланованої кількості практичних робіт, індивідуальних завдань і др.) поділ рейтингових балів поточного семестру про що студентів інформують на початку семестру.

Звіти до практичної роботи виконуються згідно з загальними правилами оформлення науково-технічних звітів і відповідно до вимог Держстандарту і міжнародної системи одиниць СІ. Для написання звітів використовуються аркуші паперу формату А4, діаграми і графіки розміщують на міліметровому або спеціально розлінованому папері. Або роботи розміщаються у електронному вигляді (формати doc, pdf) у системі MOODL

Зараховані роботи зберігаються на кафедрі протягом навчального року.

## Практичне заняття 1

### Пасивні елементи електричного кола

Метою вивчення теми є засвоєння вимог до параметрів та схемних рішень пасивних елементів електронних схем.

Ключові терміни та поняття: резистор, опір, конденсатор, ємність, індуктивність, добротність.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти розрахунки схем на резисторах.
2. Засвоїти розрахунки схем на конденсаторах.
3. Засвоїти розрахунки схем на котушках індуктивності.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

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

- резистори;
- конденсатори;
- котушки індуктивності.

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

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

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

При цьому потужність резистора визначається з виразу:

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

Постійні, діляться на дві групи: загального та спеціального призначення (рис. 1.1).

До резисторів загального призначення не ставляться високі вимоги щодо точності виготовлення і стабільності параметрів. Ці резистори використовуються, в основному, як елементи побутової техніки. До резисторів спеціального призначення відносяться елементи підвищеної стабільності, високочастотні, високоомні, а також резистори для мікромодулів та мікрозбірок.

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

Високочастотні (ВЧ) резистори мають малу власну ємність та індуктивність.

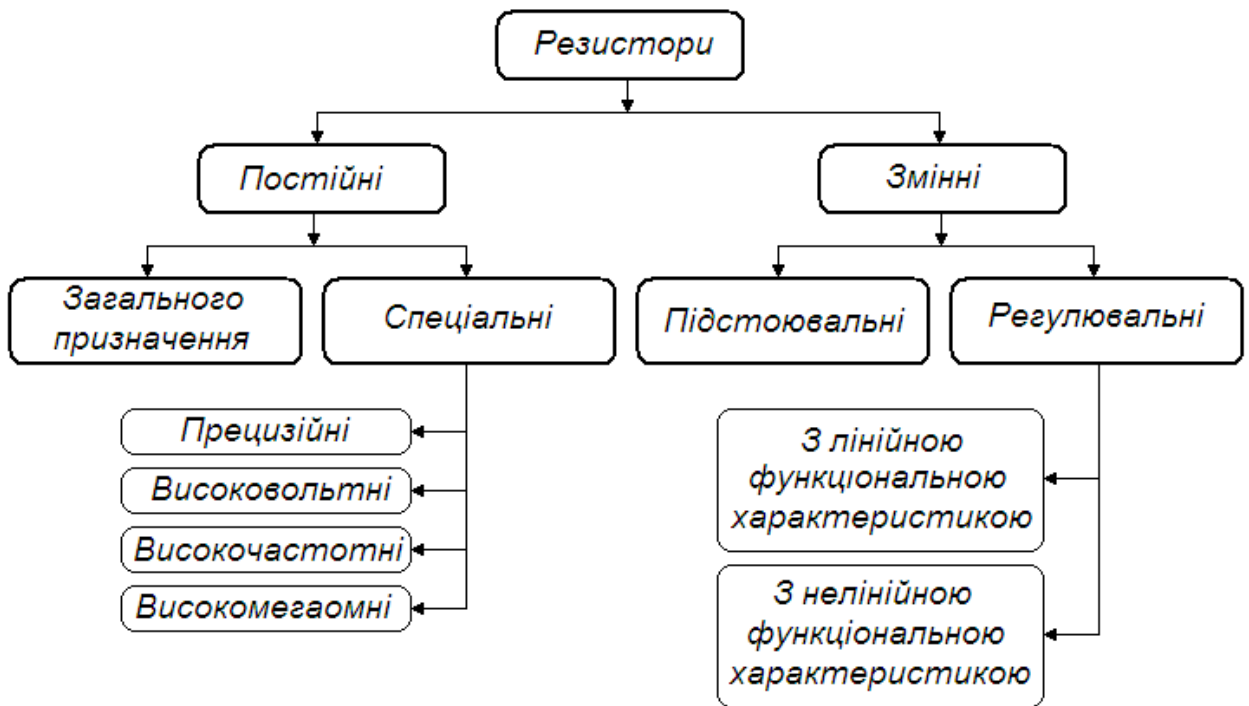


Рисунок 1.1 – Розподіл резисторів за призначенням

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

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

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

Змінні резистори діляться на підстроювальні та регулюючі.

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

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

До основних параметрів резисторів відносяться:

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

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



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

Допустиме відхилення  $\Delta R$  - це відхилення номінального опору резистора (%) в бік збільшення чи зменшення, задане у технічній документації.

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

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

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

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

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

$$U = \sqrt{R_{ном} \cdot P_{ном}}$$

Важливою характеристикою резистора є температурний коефіцієнт опору  $\alpha$  - відносна зміна опору при зміні його температури на 1 К:

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

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

В електронних схемах часто потрібно отримати частину від якоїсь величини напруги. Це завдання вирішує дільник напруги (рис. 1.2). При цьому вхідна напруга подається на два послідовно з'єднаних резистори, а вихідна знімається з одного з них.

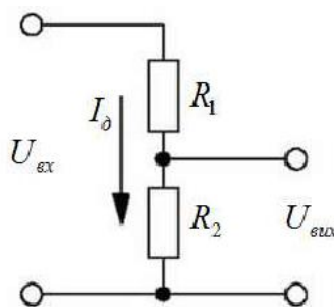


Рисунок 1.2 - Схема дільника напруги

Відповідно до закону Ома:

$$I_{\partial} = \frac{U_{\text{вх}}}{R1 + R2}, \quad U_{\text{вих}} = I_{\partial} \cdot R2$$

Звідси:  $\frac{R2}{R1 + R2}$  називається коефіцієнтом передачі подільника (який завжди менше одиниці). Тому вихідна напруга завжди менша вхідної.

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

Конденсатори класифікують за:

- робочою напругою: низьковольтні ( $U_{\text{роб}} < 1600 \text{ В}$ ), високовольтні ( $U_{\text{роб}} > 1600 \text{ В}$ );
- областю застосування - при малих струмах і малих напругах та при великих струмах і високих напругах;
- видом діелектрика - твердим, рідким, газоподібним, окисним, органічним;
- діапазоном робочих частот - для постійної або пульсуючої напруги; для напруги звукових частот (100 ÷ 10000 Гц); для напруги радіочастотного діапазону (вище 100 кГц);
- призначенням - широкого застосування і спеціальні.

Основними параметрами конденсаторів є:

- номінальна ємність,
- допустиме відхилення від номінального значення ємності,
- номінальна робоча напруга,
- частотні властивості,
- допустима амплітуда змінної напруги.

Номінальна ємність  $C$  - це відношення накопиченого заряду до прикладеної напруги.

$$C = \frac{Q}{U_c}$$

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

Допустиме відхилення від номінального значення ємності  $\Delta C$  (%) характеризує точність значення ємності конденсатора.

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

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

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

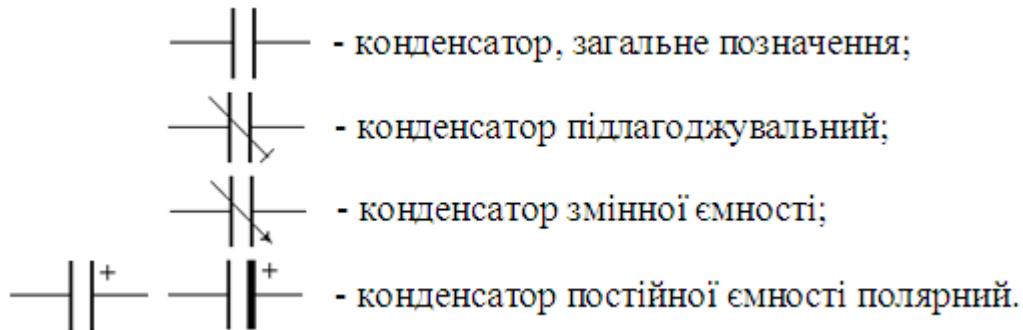
$$U_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{P_{\text{р.доп}}}{Cf\pi}},$$

де  $P_{\text{р доп}}$  - допустима реактивна потужність, ВА;  $f$ - частота змінної напруги на конденсаторі, Гц;  $C$  - ємність конденсатора, Ф.

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

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

Умовні графічні позначення конденсаторів на електричних принципових схемах наведені нижче:



Кодове маркування конденсаторів часто використовується на маленьких конденсаторах, на яких важко розмістити повне числове значення ємності конденсатора. Перша цифра означає першу цифру ємності Друга цифра - другу цифру ємності, третя цифра означає число нулів, які необхідно додати до перших двох цифр, щоб отримати значення ємності конденсатора в рF. Наступні знаки означають допуск і напругу. Наприклад: 152 означає 1500 рF (не 152 рF) Наприклад: 512j означає 5100 рF (1 означає 5% допуск).

На деяких типах значення ємності конденсатора надруковано безпосередньо на корпусі без всякого множника. Наприклад: 0.1 означає 0,1μF = 100 nF. Іноді множник використовують замість коми, наприклад: 5n6 означає 5.6 nF.

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

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

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

Основними параметрами дроселів та котушок індуктивності є:

- індуктивність;
- допустиме відхилення індуктивності;
- добротність;
- власна ємність.

Індуктивність  $L$  - це відношення потокозчеплення  $\psi$  самоіндукції котушки до струму  $I$ , який протікає через неї.

$$L = \frac{\psi}{I}$$

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

Індуктивність котушки в мкГн визначається співвідношенням:

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

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

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

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

Для багатшарових котушок величина  $D_0$  залежить не лише від відношення  $l / D$ , але і від відношення товщини намотування  $t$  до діаметру котушки  $D$ . У цьому випадку величину  $D_0$  визначають по графіках (рис. 1.3), а зовнішній діаметр котушки приймають рівним

$$D = D_0 + 2t.$$

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

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

де  $L$  вказується в мікрогенрі, а  $D$  - в сантиметрах.

Для намотування котушки зазвичай застосовують дріт оптимального діаметру, що дозволяє створити котушку індуктивності з найменшими втратами.

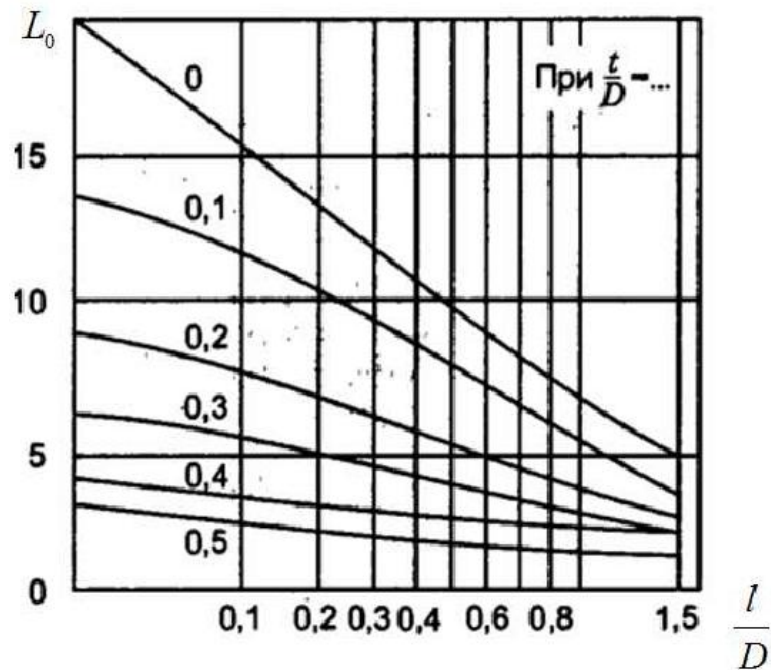


Рисунок 1.3 – Графіки для розрахунку котушок індуктивності

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

Добротність  $Q$  - це відношення реактивного опору котушки до її активного опору.

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

Добротність визначає ККД та резонансні властивості контурів.

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

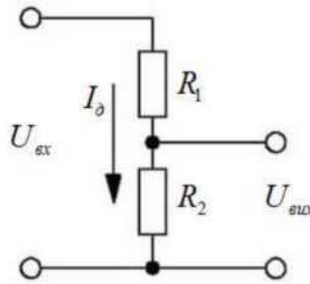
В основному, котушки індуктивності бувають двох типів - об'ємні (циліндричні, квадратного і інших перерізів) та площинні (спіральні).

Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

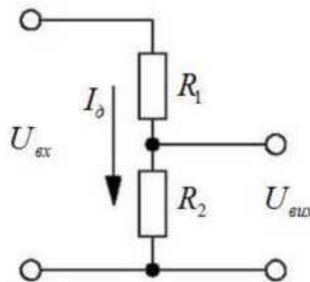
1. Назвіть пасивні компоненти та їхні основні властивості.
2. Назвіть призначення резисторів.
3. Назвіть основні параметри пасивних компонентів.
4. Поясніть вплив опору резистора на струм в його колі.
5. Поясніть, за яких умов в колі конденсатора може протікати постійний струм.
6. Поясніть механізм протікання змінного струму в колі конденсатора.
7. Поясніть виникнення опору котушки індуктивності.
8. Поясніть вплив опору навантаження на вихідну напругу резистивного подільника.

Практичні завдання.

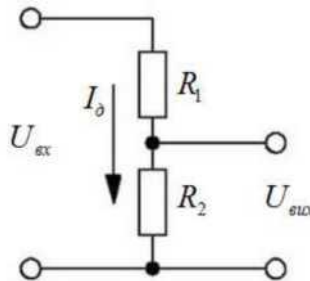
1. Визначити величину напруги на вході дільника напруги ( $U_{вх}$ ), зображеного на рисунку, якщо:  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $U_{вих} = 12 \text{ В}$ .



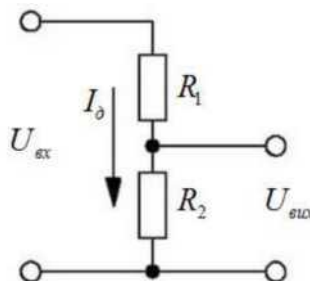
2. Розрахувати величину опору  $R$  у дільнику напруги, зображеного на рисунку, якщо:  $R_2 = 9 \text{ Ом}$ ,  $U_{вх} = 20 \text{ В}$ ,  $U_{вих} = 8 \text{ В}$ .



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



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



5. Визначити допустиму амплітуду змінної напруги частотою  $50 \text{ Гц}$  на плоскому слюдяному конденсаторі, якщо площа його пластин  $12 \text{ см}^2$ , відстань між пластинами  $2 \text{ мм}$ , а допустима реактивна потужність  $50 \text{ ВА}$ .

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

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

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

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

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

## Практичне заняття 2

### Напівпровідникові діоди

Метою вивчення теми є засвоєння вимог до властивостей та схемних рішень напівпровідникових діодів.

Ключові терміни та поняття: р-п перехід, дірки, електрони, діод, випрямляч.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти властивості і принцип функціонування р-п переходу.
2. Засвоїти властивості і принципи функціонування діодів.
3. Засвоїти схемні рішення і принципи функціонування випрямлячів.

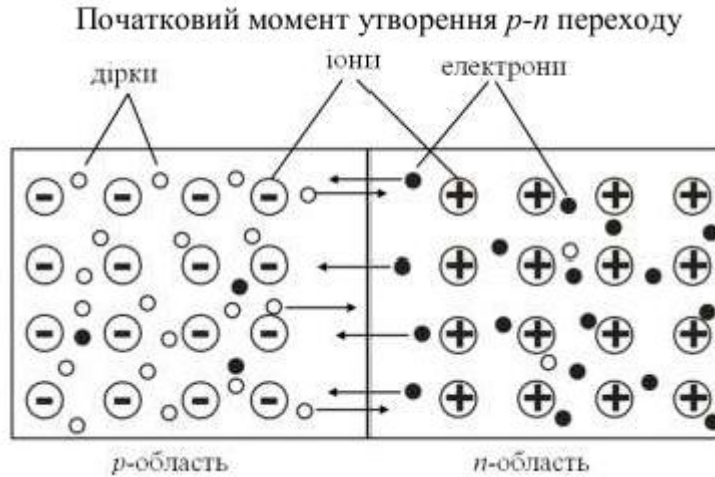
Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

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

Розглянемо процес, який утворюється у місці дотику напівпровідника, який має електронну n-провідність з напівпровідником, що має р-провідність. Кожному рухомому позитивному носію заряду в області р (дірці) відповідає негативно заряджений іон нерухомої акцепторної домішки, яка знаходиться у вузлі кристалічної решітки, а в області n кожному вільному електрону відпо-

відає позитивно заряджений іон донорної домішки, в результаті чого весь монокристал залишається електрично нейтральним.

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

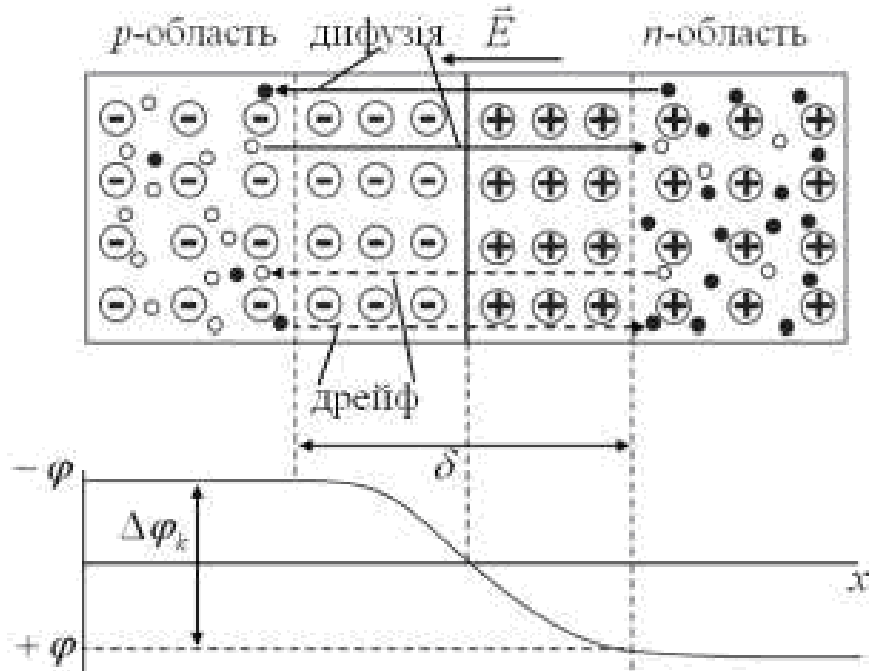


Це спрямоване назустріч один одному переміщення електричних зарядів утворює дифузійний струм *p-n* переходу. Але як тільки дірка з області *p* перейде в область *n*, вона виявляється в оточенні електронів, які є основними носіями електричних зарядів в області *n*. Тому є велика ймовірність того, що відбудеться явище рекомбінації, в результаті якої не буде ні дірки, ні електрона, а залишиться електрично нейтральний атом напівпровідника. Але якщо раніше позитивний електричний заряд кожної дірки компенсувався негативним зарядом іона акцепторної домішки в області *p*, а заряд електрона - позитивним зарядом іона донорної домішки в області *n*, то після рекомбінації дірки і електрона електричні заряди нерухомих іонів домішок, які створили цю дірку і електрон, залишаться не скомпенсовані. І не скомпенсовані заряди іонів домішок виявляють себе поблизу межі розділу, де утворюється шар просторових зарядів, розділених вузьким проміжком  $\delta$ . Між цими зарядами виникає електричне поле з напруженістю  $E$ , яке називають полем потенціального бар'єру, а різниця потенціалів на межі поділу двох зон, які обумовлюють це поле, називають контактною різницею потенціалів  $\Delta\phi_k$ .

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



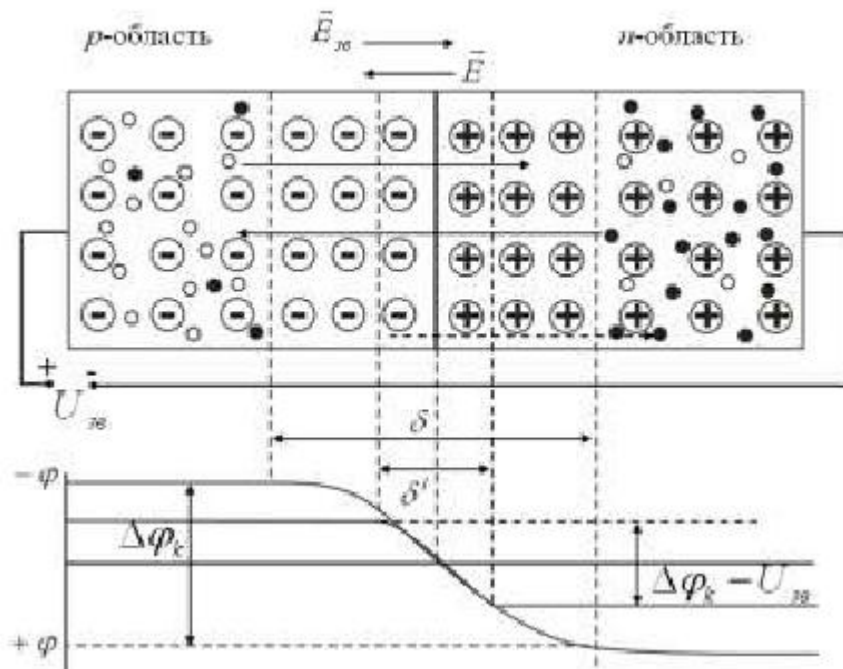
## Електронно-дірковий перехід при відсутності зовнішньої напруги



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

На потенціальній діаграмі р-п переходу за нульовий потенціал прийнятий потенціал на межі поділу областей. Контактна різниця потенціалів утворює на межі розділу потенціальний бар'єр з висотою  $\Delta\varphi_k$ . На діаграмі зображено потенціальний бар'єр для електронів, які прагнуть за рахунок дифузії переміщатися справа наліво (з області п в область р).

## Пряме зміщення р-п-переходу



Якщо відкласти вгору позитивний потенціал, то можна отримати зображення потенціального бар'єру для дірок, які дифундують зліва направо (з області р в область n).

Справа змінюється, якщо до переходу прикладена зовнішня напруга  $U_{np}$  так, що до області р-типу подається „+”, а до області n-типу - „-”.

Таке підключення називають прямим включенням р- n переходу (або прямим зміщенням р- n переходу). Напруженість електричного поля зовнішнього джерела  $E_{зв}$  буде спрямована назустріч напруженості поля потенціального бар'єру  $E_a$ , отже, призведе до зниження результуючої напруженості  $E_{рез}$ .

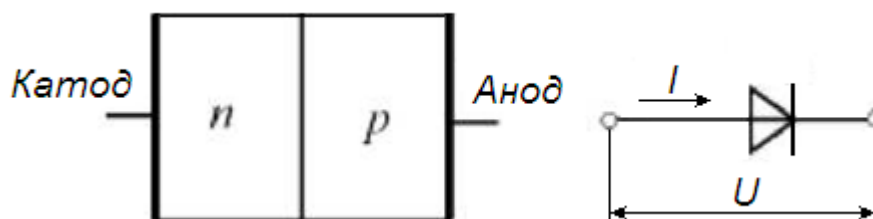
$$E_{рез} = E - E_{пр}$$

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

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

**Напівпровідниковий діод** - це двохполюсний електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, який має один р-п перехід і два електроди: катод та анод.

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



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

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

Напівпровідникові діоди класифікуються:

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

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

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

Опір  $R_0$  діода постійному струмові визначається виразом:

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

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

Диференційний опір діода

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

де  $\Delta U_a$  - зміна прямої анодної напруги;  $\Delta I_a$  - зміна прямого анодного струму.

**Основні параметри діодів**

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

**Задача (приклад).** Вибрати тип діода для електротехнічного пристрою, щоб забезпечити струм у навантаженні  $I = 0,27 \text{ А}$ . Напруга, яка прикладається до діода у закритому стані  $U = 40 \text{ В}$ .

Розв'язок. Основними параметрами, за якими вибирають діод є  $I_{\text{пр.доп}}$  та  $U_{\text{зв.доп}}$ , тому для вибору типу діода з таблиці необхідно, щоб допустимий прямий струм діода був більший за струм навантаження  $I_{\text{пр.доп}} > I$ , допустима зворотна напруга перевищувала напругу, прикладену до діода у закритому стані  $U_{\text{зв.доп}} > U$ .

Як видно, таким умовам задовольняє діод типу Д7А,  $I_{\text{пр.доп}} = 0,3 \text{ А}$ ;  $U_{\text{зв.доп}} = 50 \text{ В}$ .

Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Наведіть потенційну діаграму роботи діода під прямою напругою.
2. Наведіть потенційну діаграму роботи діода під зворотною напругою.
3. Наведіть ВАХ діода та поясніть її хід.
4. Поясніть вплив температури на струми діода.
5. Поясніть механізм теплового пробію.
6. Поясніть хід ВАХ діода при електричному пробію.
7. Наведіть схему однонапівперіодого випрямляча для одержання позитивної напруги.
8. Наведіть схему однонапівперіодого випрямляча для одержання негативної напруги.
9. Поясніть різницю між амплітудами вхідної та вихідної напруг.
10. Поясніть вплив прямої напруги діода на амплітуду випрямленої напруги.
11. Поясніть вплив прямої напруги діода на ККД випрямляча.
12. Поясніть особливості діода Шотткі.
13. Наведіть часову діаграму роботи двонапівперіодного випрямляча.
14. Наведіть амплітудну характеристику обмежувача зверху.
15. Наведіть амплітудну характеристику обмежувача знизу.

Практичні завдання.



Рисунок до задач 1-8

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

9. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм  $I_{пр} = 10\text{А}$ ; напруга, яка прикладається до діода  $U_{зв} = 160\text{В}$ .

10. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм  $I_{пр} = 12\text{А}$ ; напруга, яка прикладається до діода  $U_{зв} = 80\text{В}$ .

11. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм  $I_{пр} = 45\text{мА}$ ; напруга, яка прикладається до діода  $U_{зв} = 45\text{В}$ .

12. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм  $I_{пр} = 650\text{мА}$ ; напруга, яка прикладається до діода  $U_{зв} = 90\text{В}$ .

### Література

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527 с.

2. Гельжинський І. І., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Марусенкова Т. А. Мікросхемотехніка: підручник. Львів : Ліга - Прес, 2015. 492 с.

3. Бойко В. І., Зорі А. А. Основи електронних систем : вступ до фаху. Донецьк : ДНТУ, 2002. 207 с.

## Практичне заняття 3

**Властивості та схемні рішення біполярних транзисторів**

Метою вивчення теми є засвоєння вимог до властивостей та схемних рішень біполярних транзисторів.

Ключові терміни та поняття: р-п перехід, режим, потужність, посилення, характеристика.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти спосіб дії біполярних транзисторів.
2. Засвоїти режими транзисторів.
3. Засвоїти схеми включення і статичні характеристики транзистора.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

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

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

Розглядаючи транзистор як вузол, за законом Кірхгофа маємо струми:

$$I_E = I_K + I_B.$$

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

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

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



вуються два сімейства статичних вольт-амперних характеристик: вхідні та вихідні.

Вхідна статична характеристика - це залежність вхідного струму від вхідної напруги  $I_{вх} = f(U_{вх})$ , вихідна - залежність вихідного струму від вихідної напруги  $I_{вих} = f(U_{вих})$ .

Величини, які зв'язують малі прирости напруг та струмів, називаються диференціальними параметрами транзистора. Транзистор зображують у вигляді чотирьохполюсника.

Чотирьохполюсник описується системою характеристичних рівнянь у певних диференціальних параметрах. З численних диференціальних параметрів найбільшого поширення набули три їхні системи: h-параметри, Y-параметри та Z-параметри.

Для транзистора найбільш раціональною є система h-параметрів. Характеристичні рівняння чотирьохполюсника в h-параметрах мають вигляд:

$$\begin{aligned} dU_1 &= h_{11} dI_1 + h_{12} dU_2 \\ dI_2 &= h_{21} dI_1 + h_{22} dU_2 \end{aligned}$$

Кожний з h-параметрів можна знайти за цими формулами, лише обертаючи одну із складових у нуль, тому що кожне рівняння містить два невідомих.

Транзистор може працювати у наступних режимах: активному режимі; режимі насичення; режимі відсікання. Режими (насичення та відсікання) об'єднуються поняттям ключовий режим.

#### Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Структура, спосіб дії та властивості біполярного транзистора.
2. Взаємодія переходів.
3. Струми в транзисторі.
4. Управління струмом колектора.
5. Режими транзисторів (активний, відсіку, насичення).
6. Можливість підсилення потужності.
7. Схеми включення і статичні характеристики транзистора.
8. Коефіцієнти передавання струму.
9. Вплив температури на вхідні і вихідні характеристики.
10. Практичні схеми включення транзистора із СБ та СЕ.

#### Практичні завдання.

**Приклад 1.** Визначити струм бази біполярного транзистора КТ501Г, увімкненого за схемою із спільним емітером, якщо у відкритому стані струм колектора 240 мА.

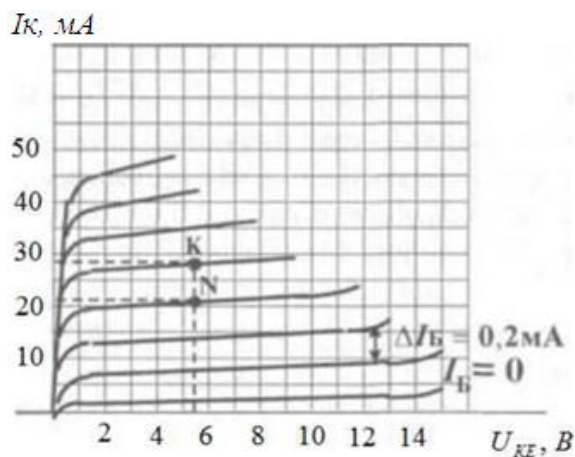
Розв'язок. В паспортних даних транзистора КТ501Г задано статичний передатний коефіцієнт за струмом транзистора, увімкненого із спільним емітером  $h_{21E} = 20 - 60$  (приймаємо  $h_{21E} = 40$ ). На підставі залежності струмів бази та колектора обчислюємо струм бази за виразом

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

### Параметри транзисторів

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

**Приклад 2.** За вихідними характеристиками біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером, визначити коефіцієнт підсилення за струмом для  $U_{KE} = 5,5 \text{ В}$ ,  $I_B = 0,7 \text{ мА}$ .



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

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

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

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

### Практичні завдання

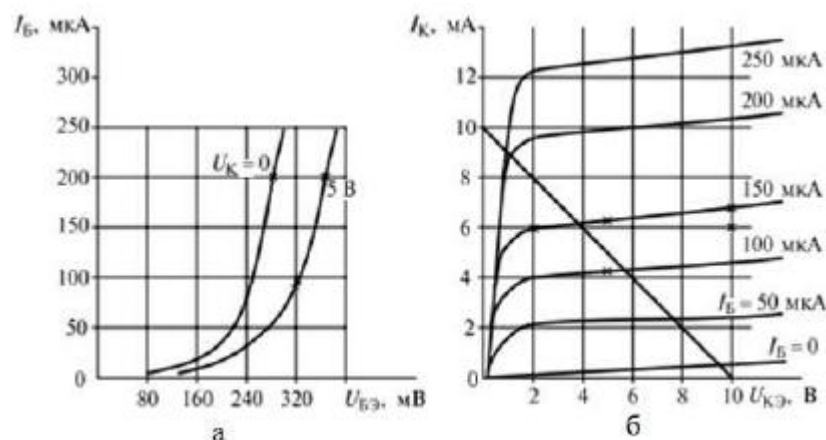
1. В схемі, транзистор КТ807А увімкнено із спільним емітером. Струм бази транзистора дорівнює  $10 \text{ мА}$ . Визначити вихідний струм транзистора, якщо  $h_{21E} = 30$ .

2. Вибрати тип тиристора для електротехнічного пристрою, якщо у відкритому стані через нього проходить струм  $I_{пр} = 15 \text{ А}$ , а зворотна напруга  $U_{зв} = 220 \text{ В}$ .

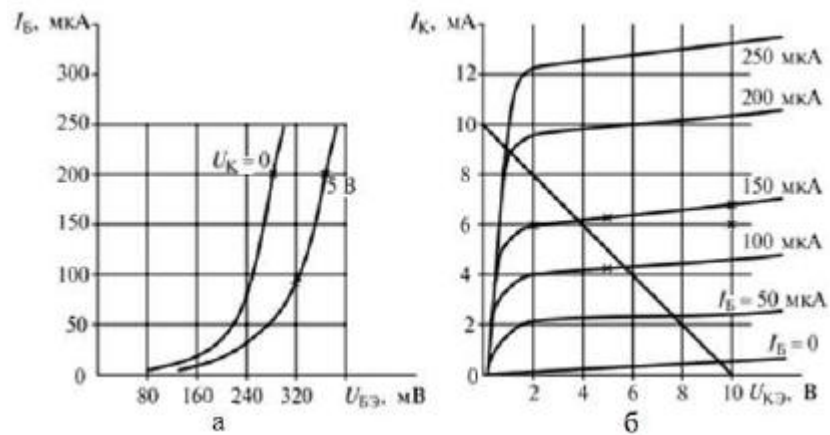
3. Визначити струм бази біполярного транзистора КТ815А, увімкненого за схемою зі спільним емітером, якщо у відкритому стані струм колектора  $1,2 \text{ А}$ , передатний коефіцієнт за струмом  $50$ .

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

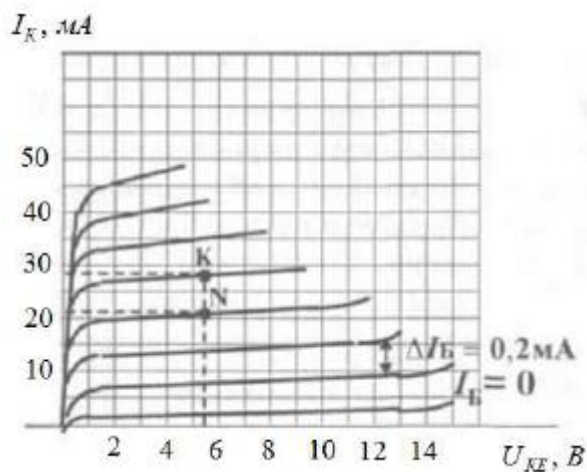
5. Визначити h-параметри транзистора ГТ322Б по його вхідній (а) і вихідній (б) характеристиках, які відповідають схемі із спільним емітером для  $U_K = 5 \text{ В}$ ,  $I_B = 150 \text{ мкА}$ .



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



6. За вихідними характеристиками біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером, визначити коефіцієнт підсилення за струмом для  $U_{КЕ} = 6 \text{ В}$ ,  $I_{Б} = 0,9 \text{ мА}$ .



### Література

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527 с.
2. Гельжинський І. І., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Марусенкова Т. А. Мікросхемотехніка: підручник. Львів : Ліга - Прес, 2015. 492 с.
3. Бойко В. І., Зорі А. А. Основи електронних систем : вступ до фаху. Донецьк : ДНТУ, 2002. 207 с.

## Практичне заняття 4

**Властивості та схеми на полевих транзисторах**

Метою вивчення теми є засвоєння вимог до властивостей та схемних рішень польових транзисторів.

Ключові терміни та поняття: р-п перехід, поле, канал, затвор, сток, витік.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти принципи дії полевих транзисторів.
2. Засвоїти режими полевих транзисторів.
3. Засвоїти схеми включення і статичні характеристики полевих транзистора.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

Польовий транзистор (ПТ) – це транзистор, в якому струм створюють основні носії заряду під дією повздовжнього електричного поля, а управління струмом виконується поперечним полем і створюється напругою на керівному електроді, який називається затвором. ПТ– уніполярні напівпровідникові пристрої, оскільки їх робота базується на русі носіїв заряду одного знака в повздовжньому електричному полі через керований канал n або p-типу

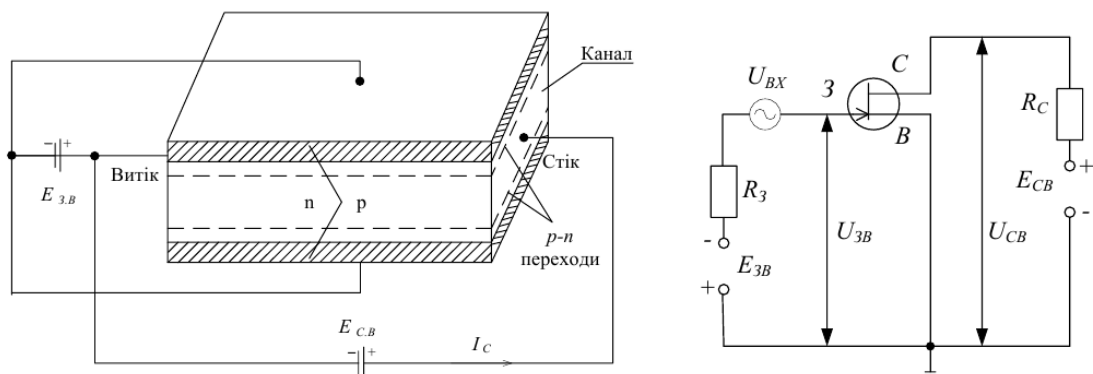
Електрод польового транзистора, через який з каналу виходять носії заряду, називають стоком, а через який входять – витіком. Додатково застосовується 4-й вивід, який має назву підкладка, яка в більшості випадків з'єднана з витіком.

В електронних приладах використовуються два різновиди ПТ: з затвором у вигляді р-п переходу, з ізольованим затвором (МДН або МОН – транзистори).

Залежно від провідності каналу польові транзистори поділяються на:

- ПТ з каналом р-типу,
- ПТ з каналом n-типу.

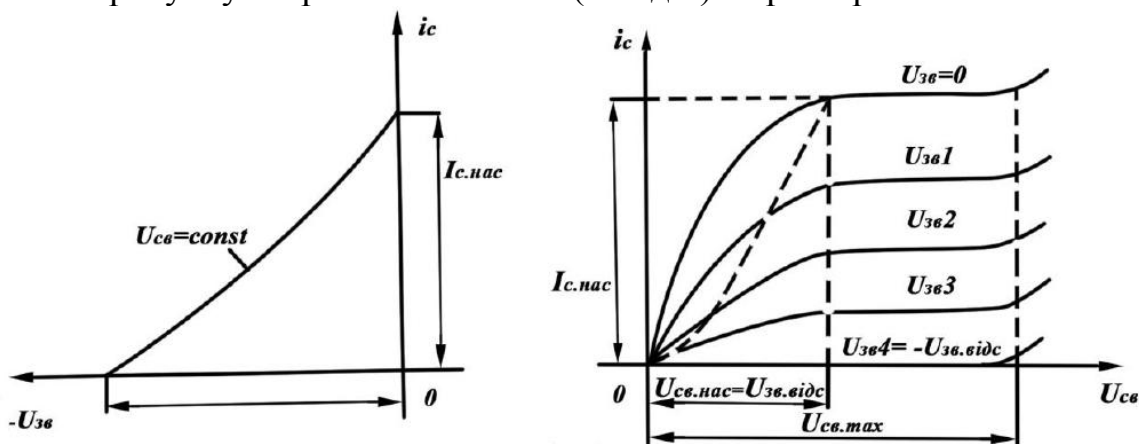
ПТ з затвором у вигляді р-п переходу. На рисунку зображено структуру та схему включення ПТ з затвором у вигляді р-п переходу та каналом n-типу.



На затвор подається напруга зворотної полярності відносно витіку. Ширина р-п переходів і відповідно ефективна площа перерізу каналу ви-

значає його опір та струм в каналі. Ці процеси характеризує стокотворна характеристика або характеристика передачі ПТ. За досягнення напруги відсічки між затвором та витоком  $U_{ЗВ}$ , значення напруги відсічки  $U_{ЗВ.ВІДС}$ , канал практично закривається, ефективна площа його поперечного перерізу прямує до нуля, опір каналу – до нескінченності, а струм стоку  $I_C$  – до нуля. Необхідно звернути увагу, що ПТ з затвором у вигляді р-n переходу працює за напруги управління на затворі лише одної полярності (для каналу типу n – від'ємної, а типу р – додатної).

На рисунку зображено стоківі (вихідні) характеристики ПТ.



Стоківі характеристики мають сильно виражену ділянку насичення. Це пояснюється тим, що під час протікання в каналі струму, який на початку зростає при збільшенні  $U_{СВ}$ , збільшується спад напруги в каналі. Цей спад в області стоку має знак «+» і зміщує р-n переходи в зворотному напрямку. Через це переріз каналу починає зменшуватись. Відбувається перекриття каналу, спочатку в області стоку, а потім поширюється у глибину до витоків. Це приводить до того, що величина струму стоку практично постійна при збільшенні  $U_{СВ}$ .

У робочому режимі використовуються плавні (лінійні) ділянки стокотворної характеристики ПТ. При великих напругах на стоці може виникнути пробій структури ПТ. Тому в робочому режимі перевищення максимальної напруги  $U_{СВ.ПРОБ.}$  недопустимо. Межами області насичення є  $U_{СВ.НАС}$  та  $U_{СВ.ПРОБ.}$ .

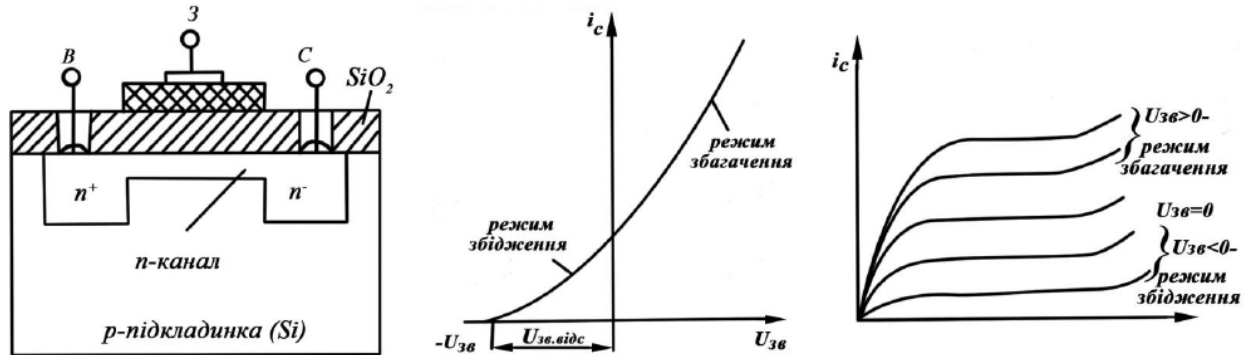
ПТ з ізольованим затвором. У польових транзисторах з ізольованим затвором, які називають також МДН (метал–діелектрик–напівпровідник) або МОН (метал–оксид–напівпровідник) між металевим затвором та областю напівпровідника знаходиться шар діелектрика, як такий часто використовують двооксид кремнію  $SiO_2$ . Існують два різновиди МДН (МОН) ПТ:

- з індукованим каналом;
- з вбудованим каналом.

На схемах транзистори з ізольованим затвором не мають з'єднань зі стоком і витоків. Наявність індуктивного каналу підкреслюється розривом виводу на підкладці, тип каналу можна запам'ятати за таким правилом: якщо канал n- типу, то стрілка спрямована на затвор.

Оскільки рухливість електронів більша за рухливість дірок, то більша частина сучасних МОП транзисторів мають канал n-типу. Канал з дірковою провідністю застосовуються в відносно нових КМОП транзисторах (комплементарні МОП).

#### МДН ПТ з вбудованим каналом n-типу



Наявність шару діелектрика дозволяє подавати на затвор напругу управління обох полярностей.

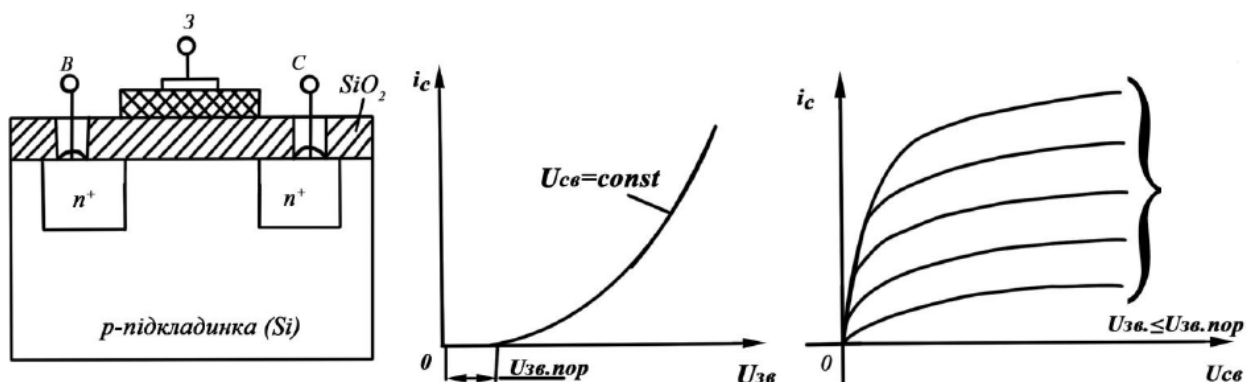
При подачі на затвор позитивної напруги електричним полем, яке при цьому створюється, дірки з каналу будуть виштовхуватись у підкладки, а електрони витягуватися з підкладки у канал. Канал збагачується основними носіями заряду – електронами, його провідність збільшується.

Цей режим називається режимом збагачення. При подачі на затвор негативної напруги електрони з каналу виштовхуються у підкладку, а дірки втягуються з підкладку в канал. Канал збіднюється основними носіями заряду і його провідність зменшується. Такий режим називається режимом збіднення.

ПТ з індукованим каналом. У польових транзисторах з індукованим каналом, на відмінність від ПТ з вбудованим каналом, канал між областями витоку та стоку; при виготовленні транзистора технологічно не створюється, а індукується в результаті явища інверсії, яке виникає у системі метал–діелектрик–напівпровідник або метал–оксид–напівпровідник. При нульовій напрузі на затворі струм ІС відсутній, оскільки витік і стік розділені двома зустрічно увімкненими р–п переходами. При зростанні позитивної напруги на затворі (відносно витоку) до затвора притягуються електрони, утворюється канал з підвищеною провідністю і ІС збільшується. Такі транзистори керуються напругою лише одного знака.

ПТ із затвором у вигляді р–п переходу використовуються для роботи у вхідних підсилювальних каскадах з великим вхідним опором, з ізольованим затвором (вбудований канал і індукований канал), в цифрових схемах

#### МОН ПТ з індукованим каналом n-типу



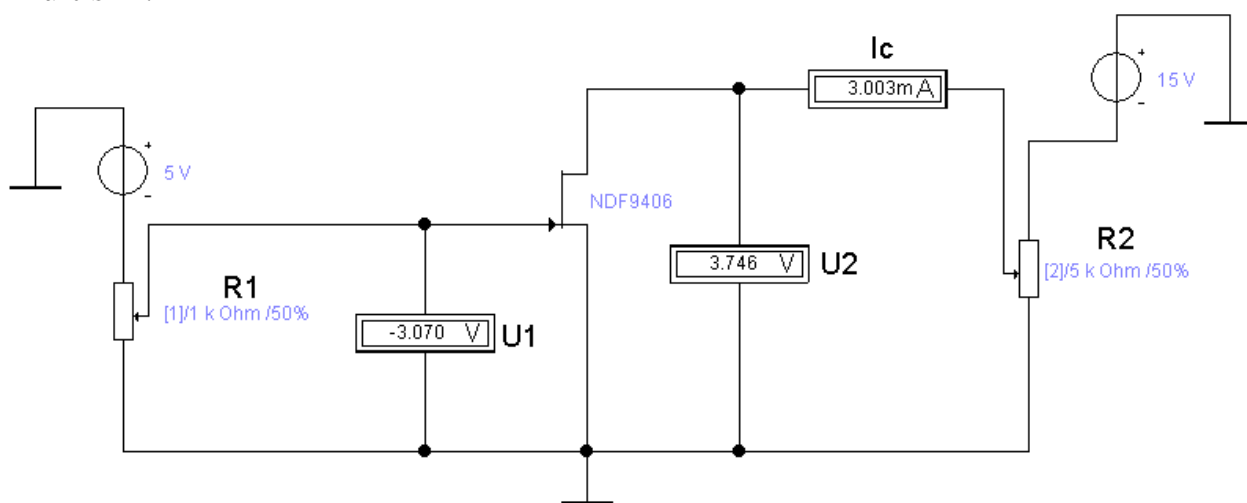
Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Структура, спосіб дії та властивості польового транзистора з р-п переходом.
2. Вольтамперні характеристики польового транзистора з р-п переходом.
- 3 Структура, спосіб дії та властивості МДН польового транзистора з індукованим каналом
4. Вольтамперні характеристики МДН польового транзистора з індукованим каналом
5. Структура, спосіб дії та властивості МДН польового транзистора з вбудованим каналом
6. Вольтамперні характеристики МДН польового транзистора з вбудованим каналом
7. Основні параметри польових транзисторів.
8. Схеми включення польових транзисторів з спільним витоком (СВ), спільним затвором (СЗ), спільним стоком (СС).

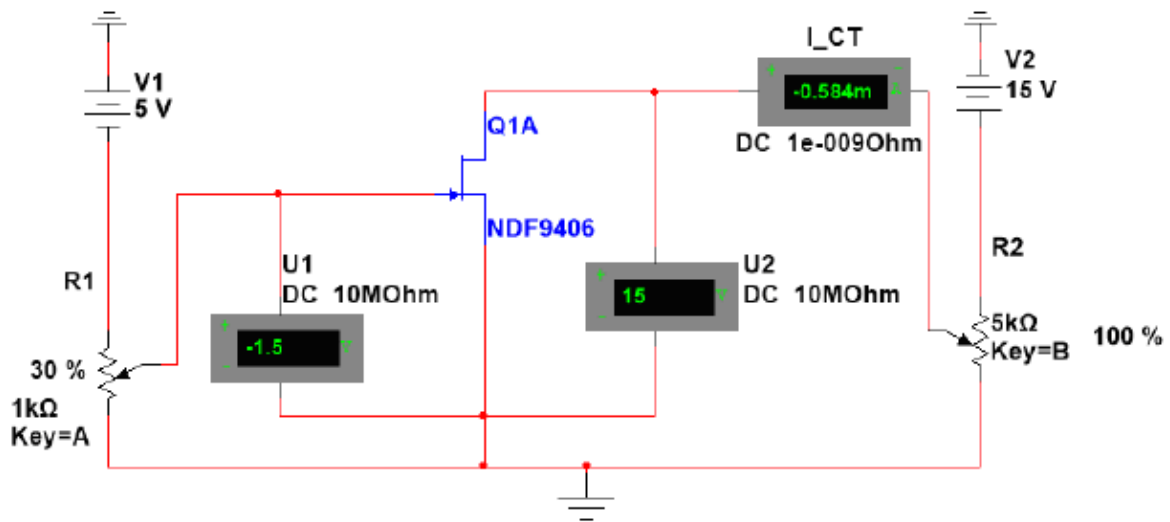
Практичні завдання.

Комп'ютерне моделювання схем визначення параметрів ПТ

1. Скласти схеми для визначення характеристик ПТ в пакетах EWB та Multisim.







2. Побудувати стокозатворну характеристику ПТ  $I_{CT} = f(U_{ЗВ})$ , для чого:

- встановити опір змінного  $R1$  на 0% від номінального значення, а опір резистора  $R2$  на 100%. Якщо все зроблено вірно то на вольтметрі  $U2$  можна буде спостерігати максимальне значення напруги  $U_{СВ}$  (приблизно 14 – 15В);
- збільшуючи опір змінного резистора  $R1$  до 100%, зняти показання амперметра ( $I_{CT}$ ) та вольтметра ( $U_{ЗВ}$ ). Для побудови характеристики рекомендується зняти як мінімум 10 точок з моменту, коли значення струму почне відрізнятись від нульового.

3. Зняти сімейство вихідних (стоківих) характеристик ПТ  $I_{CT} = f(U_{СВ})$  за  $U_{ЗВ} \div (0; 0,25U_{ВІДС}; 0,5U_{ВІДС}; 0,75U_{ВІДС}; U_{ВІДС})$ .  $U_{ВІДС}$  – напруга відсічки, значення напруги, за якого струм  $I_{CT}$  набуває значення нуль.

Для цього необхідно:

- встановити опір змінного резистора  $R2$  на 0% від номінального значення;
- за допомогою вольтметра і змінного резистора  $R1$  встановити  $U_{ЗВ} = 0$ ;
- Збільшуючи опір змінного резистора  $R1$  до 100%, виміряти струм  $I_{CT}$  та напругу  $U_{СВ}$  в 10 точках;
- повторно виконати пункти (а, б, в) за відповідних значень  $U_{ЗВ} \div (0; 0,25U_{ВІДС}; 0,5U_{ВІДС}; 0,75U_{ВІДС}; U_{ВІДС})$ ;

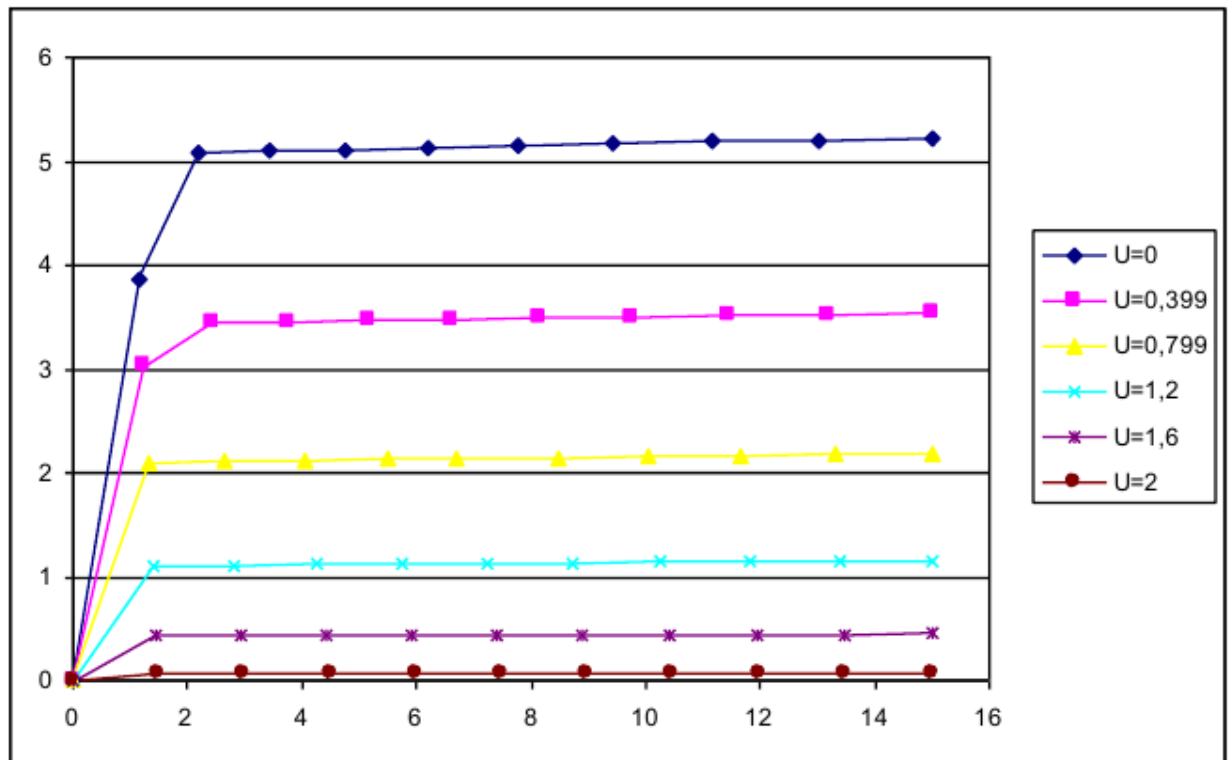
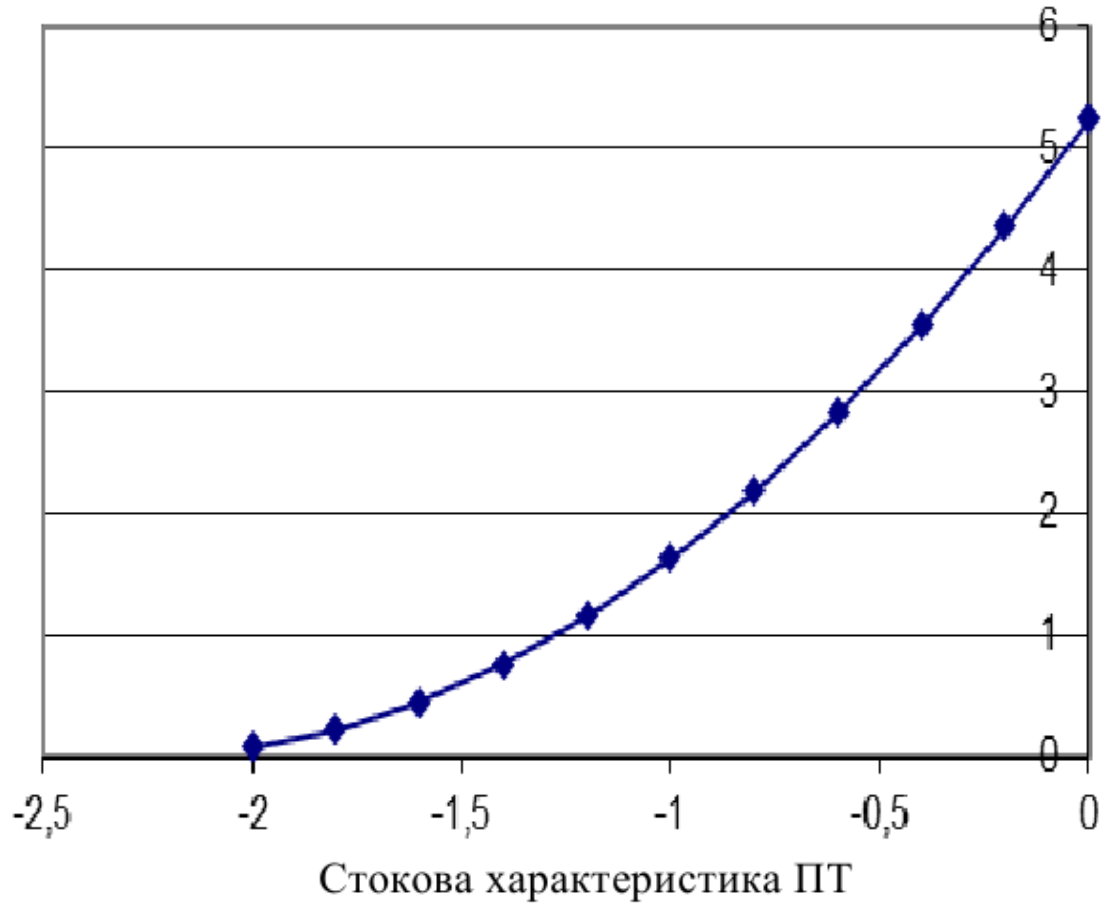
Для побудови стокозатворної та стокової характеристик, залежно від типу транзистора, напруга 5 В може буди змінена на 2 В або 1 В, опір 1 кОм – на 2 кОм, а змінний опір 5 кОм – на 10 кОм.

Контрольні питання

- Назвіть типи польових транзисторів, графічне позначення і опишіть особливості їх структури.
- Перелічіть основні параметри ПТ і особливості їх використання.
- Обґрунтуйте переваги та недоліки ПТ.
- Поясніть наявність ділянки насичення струму стоку  $I_{CT}$  на вихідних ВАХ польових транзисторів.
- Нарисуйте ВАХ ПТ з p-n переходами.

Приклад результату побудови стокозатворної та сімейства стокових характеристик  $I_{CT} = f(U_{CB})$  за  $U_{ЗВ} = \text{const}$

Стокозатворна характеристика ПТ



## Література

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527 с.
2. Гельжинський І. І., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Марусенкова Т. А. Мікросхемотехніка: підручник. Львів : Ліга - Прес, 2015. 492 с.
3. Бойко В. І., Зорі А. А. Основи електронних систем : вступ до фаху. Донецьк : ДНТУ, 2002. 207 с.

### Практичне заняття 5

#### Силові прилади аналогової схемотехніки

Метою вивчення теми: вивчення принципів дії та основних властивостей тиристорів; дослідження їх вольт-амперних характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням.

Ключові терміни та поняття: р-п перехід, катод, анод, диністор, симістор, електрод.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти принципи дії тиристорів.
2. Засвоїти режими тиристорів.
3. Засвоїти схеми включення і статичні характеристики тиристорів.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

Тиристор – електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з трьома і більш р-п переходами, який володіє здатністю примусового перемикавання з одного стійкого стану (відсічення) в інше (насичення).

Тиристори підрозділяються на діодні (диністори), які мають два виводи (анод А і катод К) і триодні (триністори), які мають три виводи, (анод А, катод К і управляючий електрод У (рис. 5.1 а).

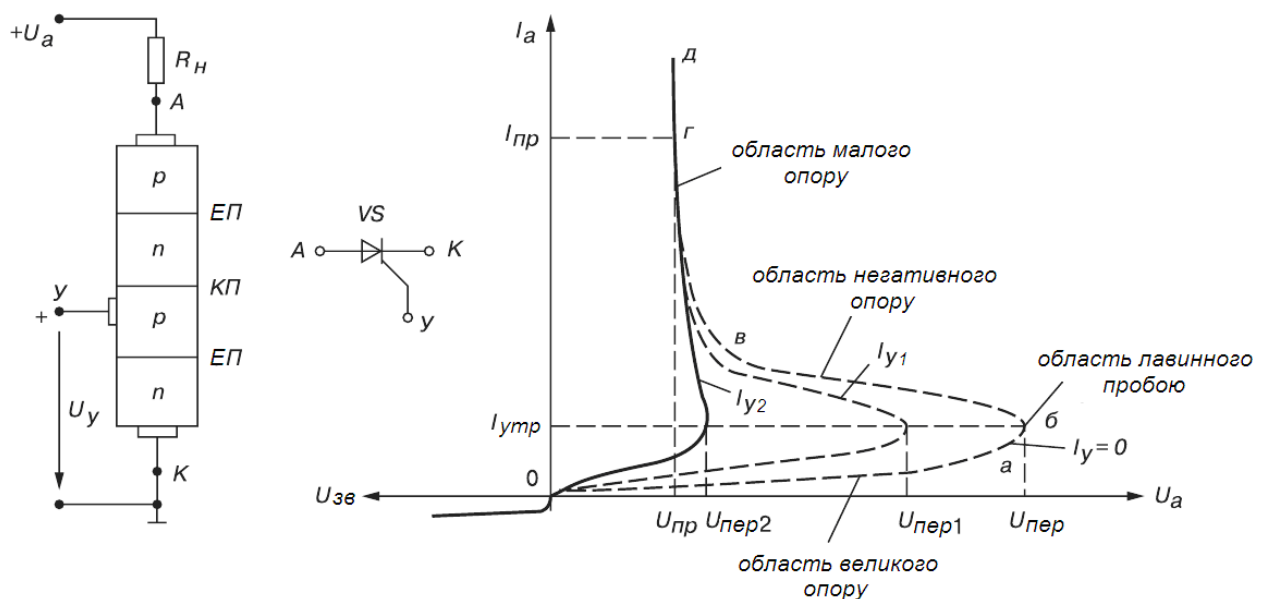


Рисунок 5.1 – УГП (а) та вольтамперна характеристика тиристора

За відсутності напруги  $U_y$  на управляючому електроді (диністор) і при додаванні напруги  $U_a$  до анода обидва емітерні переходи ЕП (рис. 5.1 а) відкрито, а колекторний перехід КП зачинений, і майже вся анодна напруга  $U_a$  прикладена до переходу КП.

При збільшенні напруги  $U_a$  до значення напруги перемикання  $U_{\text{пер}}$  струм анода малий, а опір приладу великий.

При напрузі анода  $U_a = U_{\text{пер}}$  відбувається лавиноподібний пробій КП-переходу, опір диністора зменшується, і струм анода практично обмежується опором резистора  $R_n$ , тобто  $I_a = U_a / R_n$ . Як видно з рисунка 5.1 б, диністор має два стійкі стани: ділянки 0-а і г-д, наявність яких дозволяє використовувати прилад як потужний перемикальний елемент в різних схемах автоматики.

Наявність же ділянки б-в з негативним диференціальним опором дозволяє використовувати прилад в різних схемах генераторів і модуляторів.

Аби вимкнути диністор, потрібно зменшити анодну напругу  $U_a$  до значення, при якому струм анода стане менше струму утримання  $I_a < I_{\text{утр}}$ . На практиці зменшують напругу  $U_a$  до нуля або прикладають до анода напругу негативної полярності.

Триністор забезпечений третім управляючим електродом У, приєднаним до середнього р-слою кристала. При подачі на нього напруги  $+U_y$ , відбувається зсув колекторного переходу КП, з'являється струм  $I_y$ , причому з його збільшенням зменшується напруга перемикання  $U_{\text{пер}}$  тиристора (рис. 5.1 б). При  $I_y > I_{y2}$  вольт-амперна характеристика тиристора випрямляється.

Після відкриття тиристора струм управляючого  $I_y$  електроду перестає надавати вплив на роботу тиристора. При подачі на анод синусоїдальної напруги тиристор закривається під час негативної півхвилі напруги. На рисунку 5.2 показані часові діаграми напруги  $U_a$  і струму  $I_a$  анода, а також імпульси управляючого струму  $I_y$ . Характеристика управління по струму тиристора від кута перемикання  $\alpha$  представлена на рисунку 5.2.

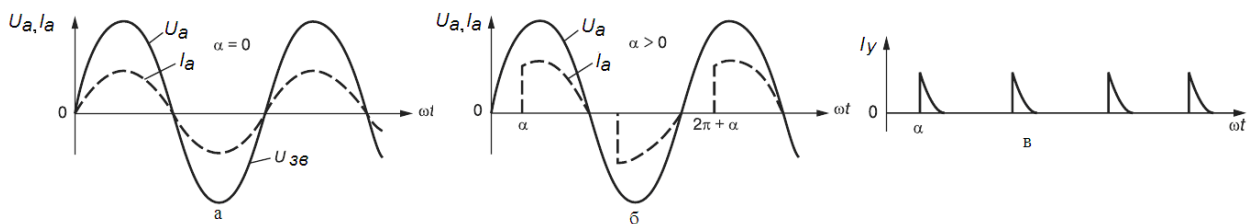


Рисунок 5.2 - Часові діаграми напруги  $U_a$  і струму  $I_a$  анода, а також імпульси управляючого струму  $I_y$

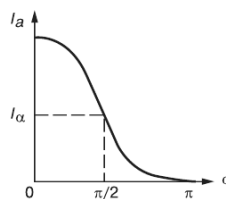


Рисунок 5.3 – Залежність струму управління тиристора  $I_y$  від кута перемикання  $\alpha$

Тиристри виготовляють на різні комутовані струми  $I_a$  (до тисяч ампер) і напруги  $U_a$  (тисячі вольт) при струмах, які управляють, в десятки і сотні міліампер.

Час перемикання струму (порядку 50...100 мА) малопотужних тиристорів складає доли мікросекунд, а час відновлення опору тиристора при струмі  $I_a = 10$  А складає 200...250 мкс.

Коефіцієнт посилення по потужності тиристора

$$K_p = U_a I_a / U_y I_y = 250000.$$

Основні параметри тиристорів:

- напруга на відкритому тиристорі  $U_{відм} = 1 \dots 1,5$  В;
- максимальний допустимий струм анода  $I_{a \max}$ ;
- напруга, яка управляє  $U_y$  і струм, який управляє  $I_y$ ;
- час включення і виключення  $t_{вкл}$  і  $t_{викл}$ ;
- допустима зворотна напруга тиристора  $U_{зв \max}$ .

Наприклад, тиристор типа КУ201А має наступні параметри:  $I_{a \max} = 2$  А;  $t_{вкл} = 10$  мкс;  $I_{y \max} = 2 \dots 100$  мА.

#### Схеми включення тиристорів.

У різних електронних пристроях в колах змінного струму в якості силових ключів широко застосовують триністри та симістри.

Самий простий спосіб керування тиристорами – це подача на управляючий електрод приладу постійного струму величиною, необхідною для його включення (рис. 5.4).

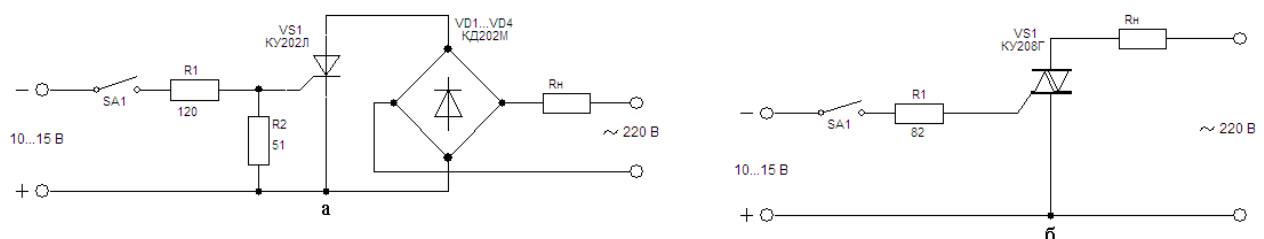


Рисунок 5.4 – Способи управління тиристорними структурами

Ключ SA1 – будь-який елемент, який забезпечує замикання кола: транзистор, вихідний каскад мікросхеми, оптрон та інші. Цей спосіб простий та зручний, але він має суттєвий недолік – необхідна доволі велика потужність керуючого сигналу. В таблиці 5.1 наведені найбільш важливі параметри для забезпечення надійного управління деякими самими розповсюдженими тиристорами (три перших позиції займають триністри, інші – симістри).

При кімнатній температурі для гарантованого включення перелічених тиристорів потрібний струм управляючого електрода  $I_y$  вкл рівний 70 – 160 мА. Отже, при напрузі живлення, типовій для зібраних на мікросхемах вузлів управління (10 – 15 В), потрібна постійна потужність 0,7 – 2,4 Вт.

Звернемо увагу на те, що полярність управляючої напруги для триністорів додатна відносно катода, а для симісторів – або від'ємна для обох нвпівперіодів, або співпадаюча з полярністю напруги на аноді. Також можна додати, що часто у згідно з вказівками по застосуванню потрібне шунтування

керуючого переходу триністорів опором 51 Ом (R2 на рис. 5.1) та не потрібно ніякого шунтування для симісторів.

Таблиця 5.1 – Параметри тиристорів

Тиристор	$I_{у\text{вкл}}$	$I_{у\text{вкл}}^{\text{макс.}}$	$I_{у\text{вкл}}^{\text{макс. імп.}}$	$I_{у\text{д}}$	$t_{\text{вкл}}$
KY201	70	200	350	100	10
KY202	100	300	500	200	
KY221		150	2000	100	2
KY208	160	—	1000	150	10
ТС106-10	100	400	—	45	—
ТС112-10		—	4000		12
ТС112-16					

Реальні величини струму керуючого електрода, достатнього для увімкнення тиристора, зазвичай менше цифр, наведених у таблиці 5.1, тому нерідко ідуть на його зниження відносно гарантованих значень: для триністорів – до 7 – 40 мА, для симісторів – до 50 – 60 мА. Таке зниження часто призводить до ненадійної роботи пристроїв, та необхідності попередньої перевірки або підбору тиристорів. Зменшення керуючого струму також може призводити до виникнення завад радіоприйманню, оскільки увімкнення тиристорів за малих струмів управляючого електрода відбувається за відносно великої напруги на аноді – декілька десятків вольт, що призводить до пульсацій струму через навантаження та, отже, до потужних завад.

Недоліком управління тиристорами постійним струмом є гальванічний зв'язок джерела керуючого сигналу та мережі. Якщо у схемі з симістором (рис. 5.1 б) за відповідного увімкнення мережевих дротів джерело керуючого сигналу можна з'єднати з нульовим дротом, то в разі використання триністора (рис 5.1 а) така можливість виникає лише за виключення випрямляючого моста VD1–VD4. Останнє призводить до однонапівперіодної подачі напруги на навантаження та подвійного зменшення подачі потужності.

В останній час в зв'язку з великою потужністю споживання запуск тиристорів постійним струмом при безтрансформаторному живленні пускових вузлів (з гасячим резистором або конденсатором) практично не використовується.

Одним з варіантів зниження споживаної вузлом управління потужності є використання замість постійного струму неперервної послідовності імпульсів з відносно великою скважністю. Оскільки час увімкнення типових триністорів складає 10 мкс та менше, можна подавати на їх управляючий електрод імпульси такої ж тривалості зі скважністю, наприклад, 5 – 10 – 20, що відповідає частоті 20 – 10 – 5 кГц. В цьому випадку споживана потужність також зменшується в 5 – 10 – 20 разів відповідно.

Однак при такому способі управління виявляються деякі нові недоліки. По-перше, тепер тиристор вмикається не на самому початку напівперіода мережевої напруги, а у довільні миті часу, які відрізняються від початку напів-

періода на час, що не перевищує періоду запускаючих імпульсів, тобто 50 – 100 – 200 мкс.

За цей час напруга мережі може підвищитись приблизно до 5 – 10 – 20 В. Це призведе до виникнення завад радіоприйманню та до деякого зменшення вихідної напруги, хоча малопомітному.

Існує ще одна проблема. Якщо при увімкненні на початку півперіоду під час дії запускаючого імпульсу струм через тиристор не досягає струму утримування  $I_{utr}$ , (табл. 5.1), тиристор після завершення імпульсу вимкнеться. Наступний імпульс знову включить тиристор, та він не вимкнеться лише у тому випадку, якщо до моменту завершення імпульсу струм через нього буде більше струму утримування. Таким чином, струм через навантаження спочатку буде мати вигляд декількох коротких імпульсів та лише потім – синусоїдальну форму.

Якщо ж навантаження має активно-індуктивний характер (наприклад, електродвигун), струм через неї за час дії короткого вмикаючого імпульсу може не встигнути досягнути величини струму утримування, навіть коли миттєва напруга мережі максимальна. Тиристор після закінчення кожного імпульсу буде вимикатися. Цей недолік обмежує знизу тривалість запускаючих імпульсів та може звести на нівець зменшення споживаної потужності.

#### Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Структура, спосіб дії та властивості диністора.
2. Вольтамперні характеристики диністора.
- 3 Структура, спосіб дії та властивості тиристора.
4. Вольтамперні характеристики тиристора.
5. Структура, спосіб дії та властивості симістора.
6. Вольтамперні характеристики симістора.
7. Основні параметри тиристорів.
8. Схеми включення силових приладів аналогової схемотехніки.

#### Практичні завдання.

Для дослідження режимів роботи електричних схем систем управління з напівпровідниковими діодами Electronics Workbench використовують розділ «Diodes» (рис. 5.5), до складу якого входять напівпровідникові діоди, стабілітрони, світлодіоди, тиристори або диністори, симетричний диністор або діак, симетричний триністор або тріак, випрямний міст (рис. 5.6).

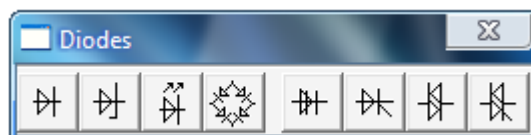


Рисунок 5.5 – Меню «Diodes» панелі інструментів EWB

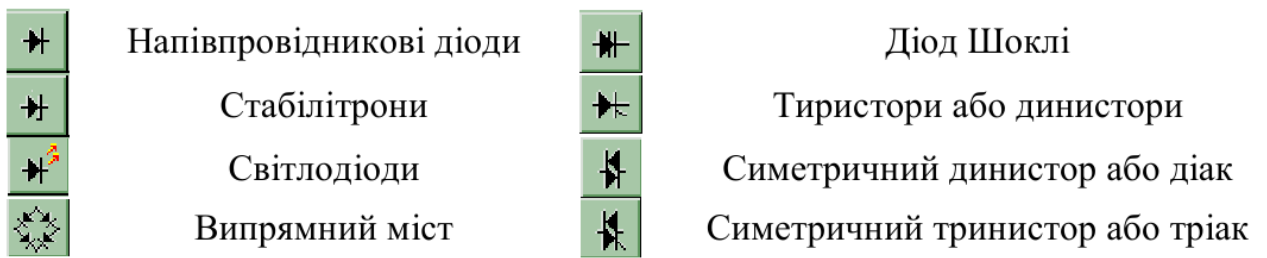


Рисунок 5.6 – Склад Меню «Diodes»

До перемикальних діодів належать: діод Шоклі, формованих унаслідок легування; симетричний динистор (діак); тринистор; симетричний тринистор (триак).

Розглянемо властивості тиристора, які задаються користувачем. Для цього потрібно натиснути два рази лівою кнопкою мишки на тиристорі та в діалоговому вікні «Diode Properties» вибрати потрібний тиристор на закладці «Models». Якщо потрібно змінити параметри, то натисніть кнопку «Edit». У діалоговому вікні (рис. 5.7) можливо задати такі параметри:

- Saturation current  $I_s$  [IS], А – зворотний струм диністора;
- Peak Off-state Current  $I_{drm}$  [IDRM], А – зворотний струм триністора;
- Switching voltage  $V_s$  [VS], В – напруга, при якій динистор перемикається у відкритий стан;
- Forward Breakover voltage  $V_{drm}$  [VDRM], В – те ж саме, але для триністора при нульовій напрузі на управляючому електроді;
- Peak On-State Voltage  $V_{tm}$  [VTM], В – падіння напруги у відкритому стані;
- Forward Current at which  $V_{tm}$  is measured  $I_{trn}$  [ITM], А – струм у відкритому стані;
- Turn-off time  $T_g$  [TG], с – час перемикавання в закритий стан;
- Holding current  $I_h$  [IH], А – мінімальний струм у відкритому стані (якщо він менше встановленого, то прилад переходить в закритий стан);
- Critical rate off-state voltage rise  $dv/dt$  [DV/DT], В/мкс – допустима швидкість зміни напруги на аноді триністора, при якому він продовжує залишатися в закритому стані (при більшій швидкості тринистор відкривається);
- Zero-bias junction capacitance  $C_j$  [CJO], Ф – бар'єрна ємність диністора при нульовій напрузі на переході;
- Gate Trigger voltage  $V_{gt}$  [VGT], В – напруга на управляючому електроді відкритого триністора;
- Gate Trigger current  $I_{gt}$  [IGT], А – струм управляючого електрода;
- Voltage at which  $I_{gt}$  is measured  $V_d$  [VD], В – відмикаюча напруга на управляючому електроді.

#### 1. Визначення характеристик тиристорів.

1.1 Зберіть схему для отримання вольт-амперних характеристик тиристорів (рис. 5.8). Для дослідження виберіть тиристор відповідно до варіанта завдання. Експериментальні дані занести до таблиці 5.2.



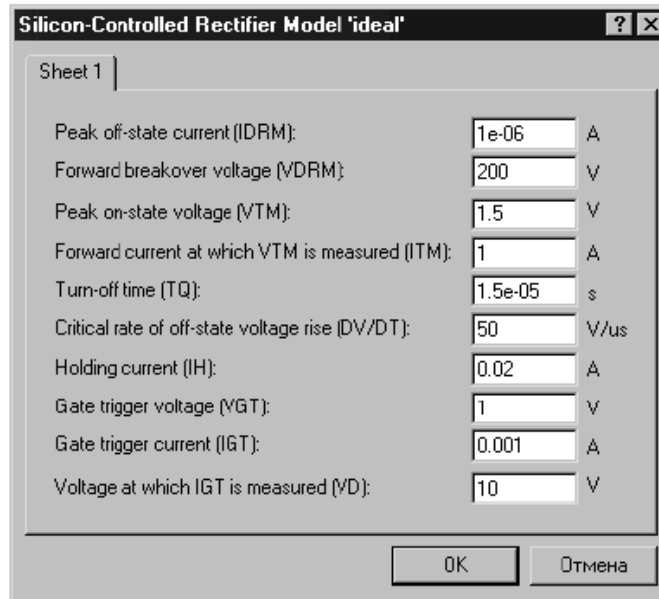


Рисунок 5.7 – Діалогове вікно установки параметрів триністора

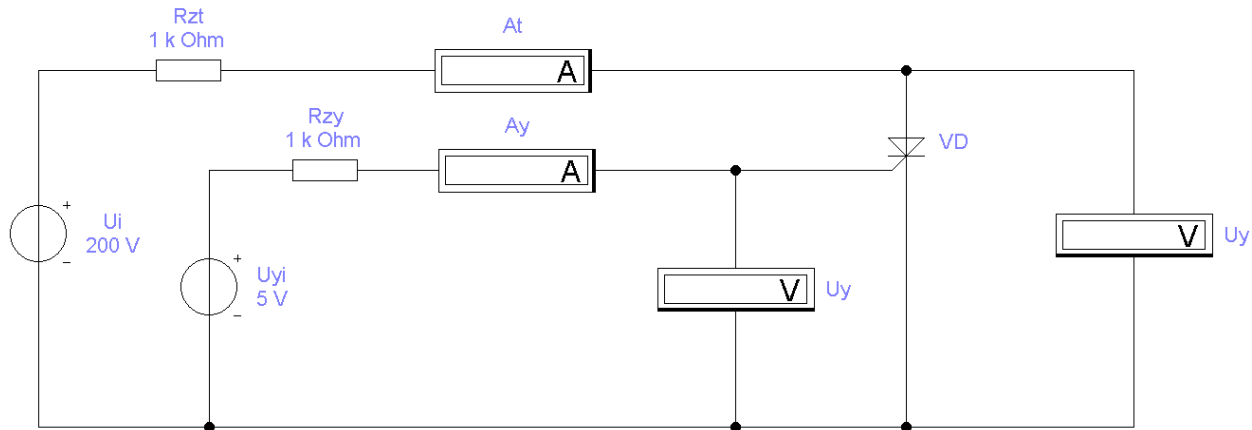


Рисунок 5.8 – Схема дослідження тиристорів

Дослідження прямої гілки ВАХ триністора. На схемі показані джерела вхідної напруги  $U_i$  і напруги управління  $U_y$  із захисними резисторами  $R_{zt}$ ,  $R_{zy}$ . Вимір ВАХ здійснюється з вимірюванням  $U_i$  від нуля до  $(U_i + 150)$  за фіксованого значення  $U_y$ , наприклад, у трьох точках  $0,5V_i$ ,  $V_i$  і  $1,5 V_i$ .

Таблиця 5.2 – Експериментальні дані

$U_i, B$	$0.25 \cdot U_d$	$0.5 \cdot U_d$	$0.75 \cdot U_d$	$U_d$	$1.25 \cdot U_d$	$1.5 \cdot U_d$	$1.5 \cdot U_d$
$U_{vt}, B$							
$I_{vt}, B$							

Під час досліджень зворотної гілки ВАХ змінюється тільки полярність  $U_i$ .

1.2 Зняття ВАХ перемикальних діодів може бути здійснене також і в режимі заданих струмів у силовому колі і колі керування, тобто за допомогою схеми на рисунку 5.9.

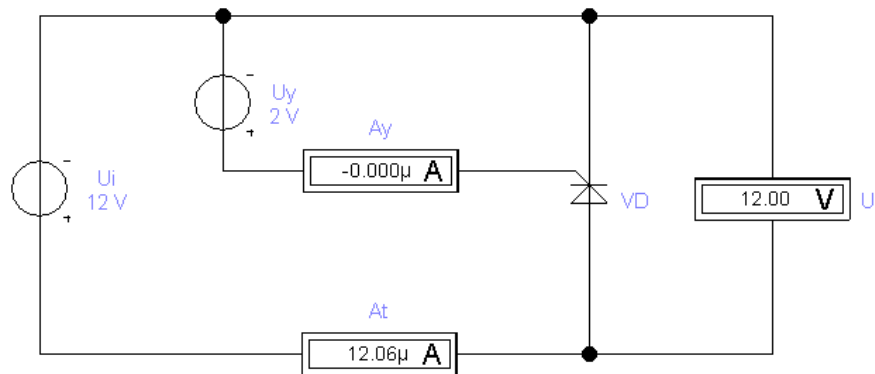


Рисунок 5.9 – Схема зняття ВАХ перемикальних діодів в режимі заданих струмів у силовому колі і колі керування

2. Зняти статичну вольт-амперну характеристику (ВАХ) тиристора, використовуючи осцилограф.

3. Дослідити роботу тиристора як регулятора потужності. Зберіть схему, наведену на рисунку 5.10.

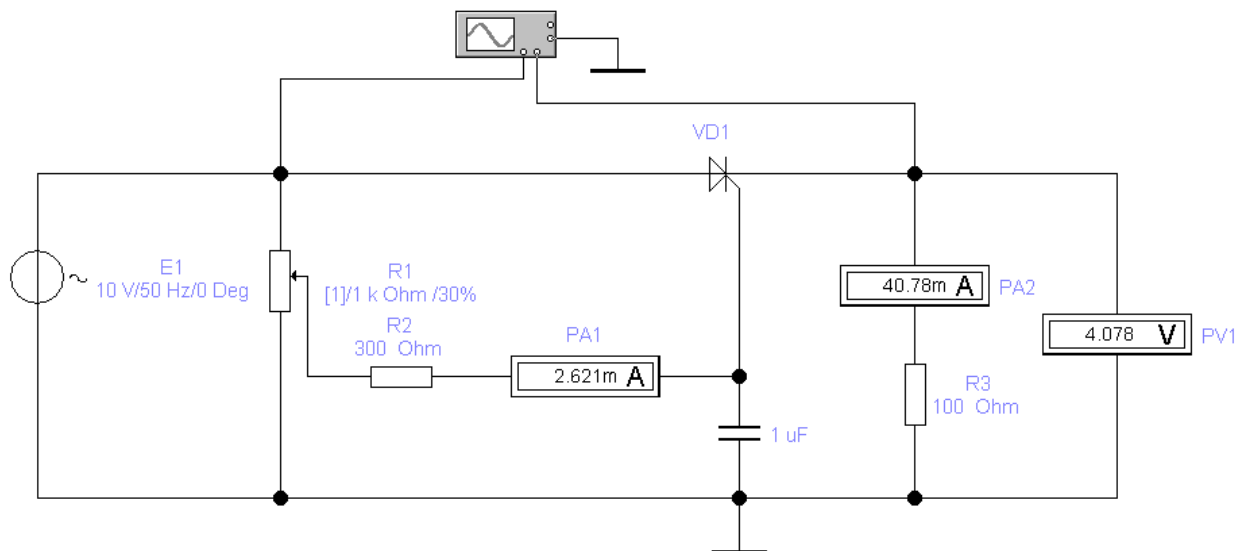


Рисунок 5.10 – Робота тиристора у якості регулятора потужності

3.1 Включити живлення схеми дослідження з положенням движка змінного резистора  $R1$  – 100 %.

3.2 Зменшувати опір резистора  $R1$  до стану ввімкнення тиристора – появи напруги на виході тиристора.

3.3 За епюрою вихідної напруги визначити величину напруги ввімкнення тиристора  $U_{m1}$  і час затримки включення тиристора  $T_z$ , а за показниками приладів: струм управління на момент увімкнення  $I_{y1}$  (PA1), струм навантаження  $I_{n1}$  (PA2) і напругу на навантаженні  $U_{n1}$  (PV1).

3.4 Зменшити опір  $R1$  до 85 % і повторити вимірювання згідно з п. 3.3.

3.5 Зменшити опір  $R1$  до 80 % і повторити вимірювання згідно з п. 3.3.

3.6 Зменшити опір резистора  $R1$  до стану, коли  $T_z = 0$  – струм у навантаженні ( $R3$ ) не змінюється:  $I_n = \text{const}$ , і за показниками приладів визначити максимальний струм управління, який забезпечує постійно відкритий стан

тиристора  $I_y \text{ max}$  (PA1) та максимальний діючий струм у навантаженні  $I_n \text{ max}$  (PA2) і максимальну напругу на навантаженні  $U_n \text{ max}$  (PV1).

3.7 Розрахувати потужність, яка віддається тиристором у навантаження для виконаних вимірювань.

3.8 Результати вимірювань занести до таблиці 5.3.

3.9 Побудувати графік залежності переданої в навантаження потужності від струму керування тиристора.

Таблиця 5.3 – Експериментальні дані

Вимірювання	$R_I, \%$	$U_m, \text{В}$	$T_z, \text{ms}$	$I_y$	$I_n, \text{мА}$	$U_n, \text{В}$	$P_n, \text{ВА}$
1							
...							
n							

### Варіанти завдань

№	Тиристор	№	Тиристор	№	Тиристор
1	2n1599	11	2n1599	21	2n1599
2	2n2573	12	2n2573	22	2n2573
3	2n2574	13	2n2574	23	2n2574
4	2n2575	14	2n2575	24	2n2575
5	2n6394	15	2n6394	25	2n6394
6	2n6395	16	2n6395	26	2n6395
7	2n6396	17	2n6396	27	2n6396
8	2n6397	18	2n6397	28	2n6397
9	2n6398	19	2n6398	29	2n6398
10	2n6399	20	2n6399	30	2n6399

### Контрольні питання

1. Поясніть будову та принцип дії тиристора. За якими ознаками класифікуються тиристори?

2. Зобразіть вольт-амперну характеристику тиристора.

3. Чому за анодної напруги від 0 до  $U_{пер}$  тиристор замкнений? Якої величини струм протікає при цьому через прилад?

5. Надайте характеристику диністора. Наведіть його ВАХ. Яка відмінність диністора від діода?

6. Надайте характеристику симістора. Наведіть його ВАХ.

## Література

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527 с.
2. Гельжинський І. І., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Марусенкова Т. А. Мікросхемотехніка: підручник. Львів : Ліга - Прес, 2015. 492 с.
3. Бойко В. І., Зорі А. А. Основи електронних систем : вступ до фаху. Донецьк : ДНТУ, 2002. 207 с.

## Практичне заняття 6

**Ключі на польових транзисторах**

Метою вивчення теми: дослідити роботу ключа на польовому транзисторі, а також особливості роботи двотактного ключового каскаду.

Ключові терміни та поняття: ключ, залишкова напруга, навантаження, канал, стік, витік, затвор.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти принципи дії польового транзистора з індукованим каналом.
2. Засвоїти характеристики МОН-транзистора з індукованим каналом.
3. Засвоїти схеми ключів на МОН-транзисторах з індукованим каналом.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

В польовому транзисторі провідністю каналу керує електричне поле, створене прикладеною до затвору напругою. В даному випадку незміщених р-п переходів, тому найбільш важливою характеристик польових транзисторів є відсутність струму затвора, як наслідок маємо високий вхідний опір (до  $10^{14}$  Ом і більше). Це суттєво спрощує проектування схем. Дуже вдале використання ПТ в схемах аналогових перемикачів та підсилювачів з великим вхідним опором. Самі по собі або в комбінаціях з біполярним транзистором ПТ чудово реалізується в інтегральних схемах. Транзисторні ключі на ПТ широко використовуються у цифровій техніці. Їх суттєвими перевагами перед ключами на біполярних транзисторах є:

- мала залишкова напруга на відкритому ключі;
- мала потужність, споживана від джерела керуючої напруги (сигналу);
- високий ККД при використанні в одному ключі комплементарної пари;
- хороша електрична розв'язка між вхідними і вихідними колами;
- висока технологічність при виконанні мікросхем.

У ключах використовують МОН ПТ з індукованим каналом. Як правило, використовують три різновиди МОН-транзисторних ключів: ключі з резистивним навантаженням; ключі з динамічним навантаженням; ключі на комплементарних транзисторах.

### МОП-транзисторні ключі з резистивним навантаженням

На рисунку 6.1 наведені схеми найпростіших ключів з резистивним навантаженням на n-канальному МОП-транзисторі та на р-канальному МОП-транзисторі, увімкнених за схемами зі спільним витоком і лінійним стоковим навантаженням. Схеми подібні і різняться лише полярністю керуючих сигналів і полярністю джерела живлення.

Проаналізуємо статичні режими роботи ключа на n-канальному МОП-транзисторі (рис. 6.1 а), скориставшись стоковими характеристиками транзистора і побудованою лінією навантаження за постійним струмом згідно до контурного рівняння для стокового кола (рис. 6.2 а):

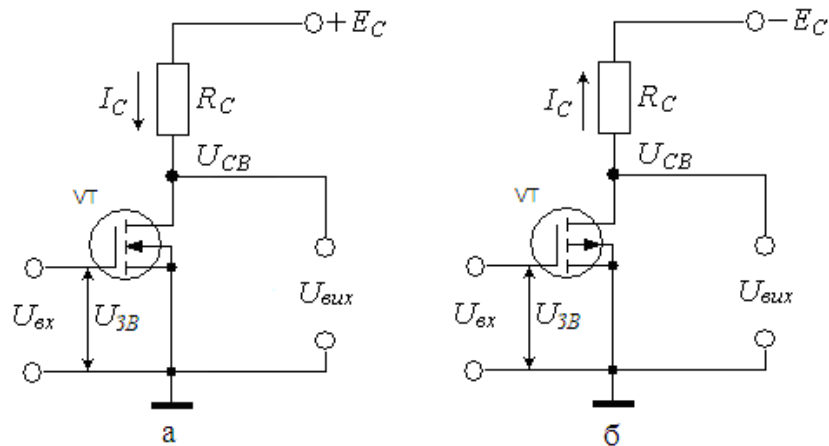


Рисунок 6.1 - Ключі з резистивним навантаженням на МОП-транзисторах з індукованим каналом: на n-канальному транзисторі (а) і на р-канальному транзисторі (б)

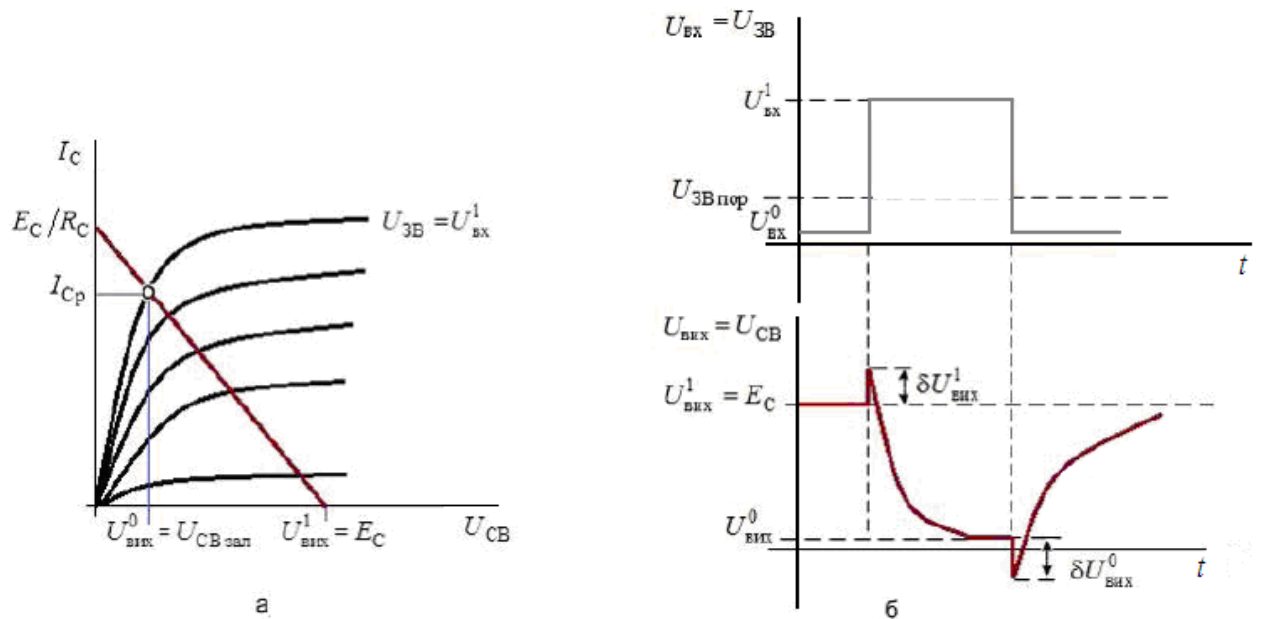


Рисунок 6.2 - Вихідна динамічна характеристика ключа (а), часові діаграми вхідного керуючого сигналу і вихідного сигналу (б)

$$U_{CB} = E_C - I_C R_C. \quad (6.1)$$

Якщо на затворі діє сигнал низького рівня

$$U_{вх}^0 = U_{ЗВ} < U_{ЗВпор},$$

то МОН-транзистор знаходиться у режимі відсічки, провідного каналу немає і струм у колі навантаження визначається дуже малими струмами витоку порядку  $10^{-9} \dots 10^{-12}$  А. Згідно з рівнянням (6.1) вихідний сигнал має високий рівень:

$$U_{вих}^1 = U_{CB} = E_C - I_{вит} R_C \cong E_C.$$

Енергоспоживання від джерела  $E_C$  у розімкненого ключа відсутнє:

$$P_{спож}^1 = 0.$$

Якщо на затворі діє сигнал високого рівня

$$U_{вх}^1 = U_{ЗВ} > U_{ЗВпор},$$

то в структурі МОН-транзистора індукується провідний канал і через канал протікає струм стоку  $I_C = I_{Cp}$ , де  $I_{Cp}$  - сила струму в робочій точці відкритого транзистора і визначається точкою перетину лінії навантаження зі стоковою характеристикою транзистора (рис. 6.2 а). Залежно від значень керуючого сигналу на затворі, напруги джерела живлення і опору робоча точка схеми потрапляє або в лінійну область, або в область насичення. На виході ключа встановлюється низький потенціал:

$$U_{вих}^0 = U_{CBзал} = E_C - I_{Cp} \cdot R_C,$$

Відкритий транзистор тим ближчий до ідеального замкненого ключа, чим менший спад залишкової напруги  $U_{CBзал}$ . У реальних МОН-ключів залишкова напруга має значення 100 (мВ) і менше. Для зменшення  $U_{CBзал}$  потрібно збільшувати значення стокового резистора, тоді лінія навантаження опускається вниз і залишкова напруга зменшується.

### Ключі на МОН транзисторах з динамічним навантаженням

Схему МОН-ключа з динамічним навантаженням показано на рисунку 6.3. Транзистор VT2 служить основним (активним) транзистором. Роль динамічного навантаження виконує транзистор VT1, у якого затвор з'єднаний з стоком, тим самим, є двополосником - резистором. Динамічне навантаження активного транзистора VT2 дорівнює диференціальному опору (вихідному опору

$$R_d = \Delta U_{CB} / I_C$$

транзистора VT1, значення якого на прямолінійній ділянці вихідних ВАХ дорівнює десяткам кОм. Ключ з динамічним навантаженням дозволяє отримати більш низький рівень логічного нуля  $U^0$ , ніж схема (рис. 6.1). Схема також реалізує операцію інверсії.

При подачі на вхід ключа низького позитивного рівня логічного нуля ( $U_{вх} = U^0 = U_{зв2}$ ) основний транзистор VT1 закритий, тому що  $U_{зв2} = U^0 < U_{пор}$ .

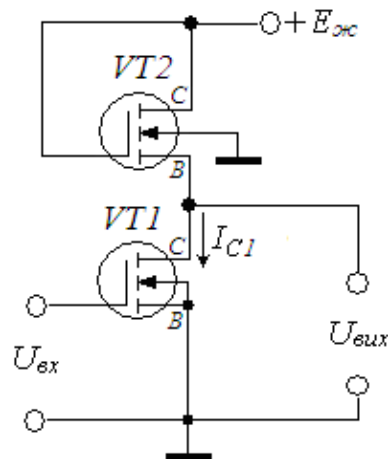


Рисунок 6.3 - Ключ на МОН-транзисторах з динамічним навантаженням

У цей час між затвором і витоком транзистора VT2 діє велика негативна напруга, яка дорівнює  $U_{зв1} = U_{вх} - E_{жс} = U^0 - E_{жс}$ . Оскільки напруга  $E_{жс} \gg U^0$ , напруга  $U_{зв2}$  має негативний знак, тому транзистор VT2 з каналом р-типу відкритий. Основний транзистор VT1 закритий і вихідна напруга дорівнює високому рівню логічної одиниці  $U_{вих} = E_{жс} = U^1$ , при цьому струм стоку у спільному колі дорівнює нулю  $I_C=0$ .

При подачі на вхід ключа високого позитивного рівня логічної одиниці ( $U_{вх} = U^1 = U_{зв2}$ ) основний транзистор VT1 відкритий. При цьому напруга затвор-витік транзистора VT2, дорівнює  $U_{зв2} = U^1 - E_{жс}$  близька до нуля ( $U_{зв1} < U_{пор}$ ) тому що  $E_{жс} \approx U^1$ . Тому транзистор VT2 закритий.

Оскільки основний транзистор VT1 відкритий, то вихідна напруга дорівнює низькому рівню логічного нуля  $U_{вих} = U_{зал} = U^0$ . Тому що транзистор VT2 закритий, то струм стоку у спільному колі дорівнює нулю  $I_C=0$ .

#### Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Статичні та динамічні параметри електронного ключа.
2. Зменшення часу перемикання ключових схем на біполярних транзисторах.
3. Призначення паузи між керуючими напругами двотактного перетворювача.
4. Різновиди електронних ключових схем.
5. Напруга на виході ключової схеми на рольовому транзисторі, якщо транзистор перебуває в режимі відсічки.

#### Практичне завдання.

1. Створити в програмі Electronics Workbench схему ключа на польовому транзисторі (рис. 6.4).

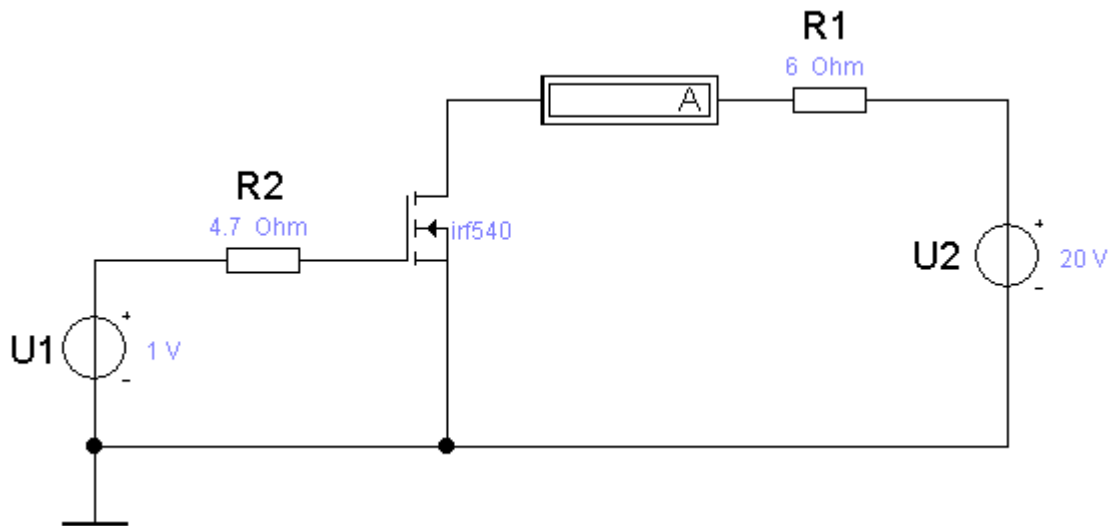


Рисунок 6.4 – Ключ на польовому транзисторі з індукованим n-каналом

2. Вибрати з таблиці 6.1 напругу живлення каскаду та опір резистора R1. Змінюючи напругу джерела U1 від 0 до 10 В побудувати залежність струму стоку транзистора (резистора R1) від напруги управління. Визначити по побудованій кривій значення напруги управління, після якого струм практично не росте. Зафіксувати це значення.

Таблиця 6.1 – Параметри для розрахунку каскаду за варіантами

Варіант	Транзистор	R1, Ом	U2, В	U3, В
1	IRFP140	12	32	1...10
2	irf540	6	20	1...10
3	MTH30N20	12	30	1...10
4	M2SK1078	4	20	1...10
5	IRFP342R	8	15	1...10

3. Створити в програмі Electronics Workbench схему двохтактного ключового каскаду на польових транзисторах (рис. 6.5).

Для перетворення енергії у ключовому режимі на активно-індуктивне навантаження використовується двотактний каскад на польових транзисторах, який називається понижуючий перетворювач. У цьому каскаді транзистори працюють по черзі: спочатку відкривається, наприклад, транзистор VT1, а потім він закривається. Після цього відкривається і закривається другий VT2. Одночасне відкривання транзисторів не припустиме, оскільки через них буде протікати нічим не обмежений струм, який призведе до виходу з ладу обох транзисторів. Для вимірювання наскрізного струму через транзистори у схему введено шунт R4, на якому виділяється напруга, пропорційна цьому струму.

4. Вибрати з таблиці 6.1 напругу живлення каскаду U2, опір резистора R1 та частоту повторення імпульсів джерела U1. Частоту імпульсів U1 встановити рівною 1 Гц і напругу 5 В. Змінюючи напругу джерела V3 від 0 до 10 В отримати діаграми сигналів на виході ключа і на шунті R4 (рис. 6.6).



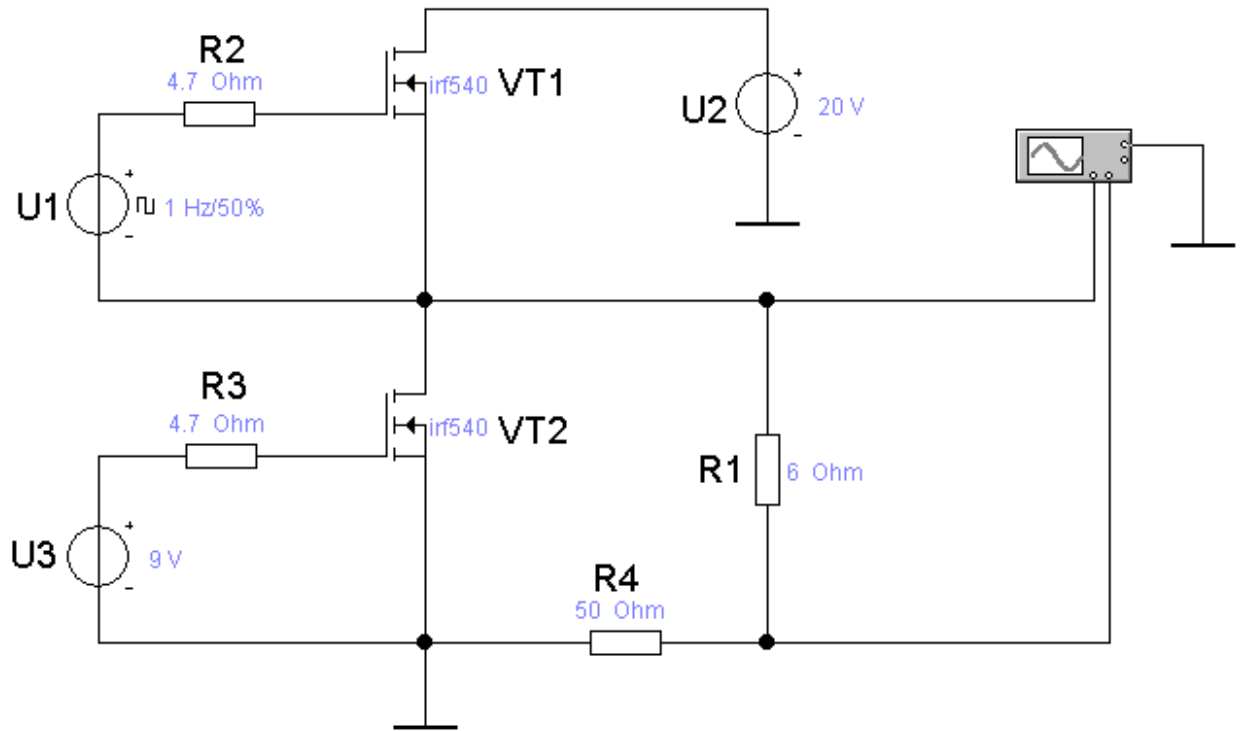


Рисунок 6.5 – Схема двотактного ключового каскаду на польових транзисторах з індукованим n-каналом

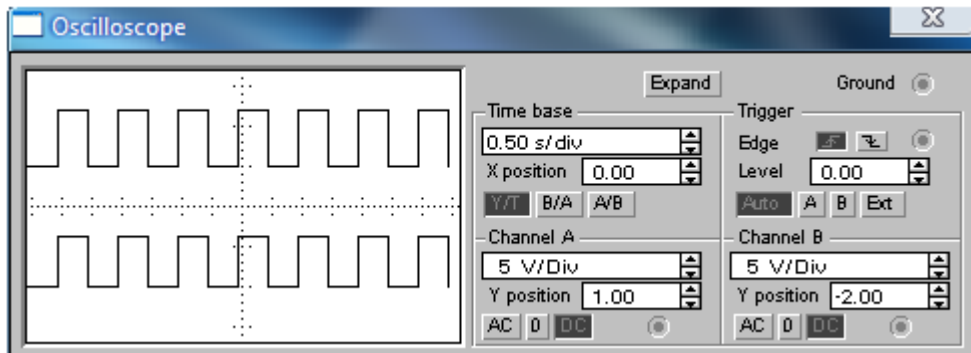


Рисунок 6.6 - Діаграми сигналів на виході ключа і на шунті R4

5. Змінюючи амплітуду імпульсів U1 від 1В до 10В, отримати діаграми сигналів при фіксованих значеннях U3 (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Параметри практичного експерименту

U1 U3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2										
4										
6										
8										

6. Пояснити отримані результати та зробити висновки.

### Контрольні питання

1. Яке призначення транзисторних ключів?
2. Якими є умови для того, щоб ключ на польовому транзисторі відкривався та закривався з максимальною швидкістю?
3. Для чого між керуючими напругами двотактного перетворювача вводиться пауза?
4. Що таке «наскрізні струми» і чому вони виникають?
5. У чому перевага двотактного ключового каскаду перед одинарним ключем?

### Література

1. Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.
2. Бойко В.І., Жуйков В.Я., Співак В.М. та ін. Основи технічної електроніки: Підручник. Київ : Вища школа., 2007. 510 с.

### Практичне заняття 7

#### **Оптоелектронні схеми з фотоприймачами**

Метою вивчення теми є засвоєння методів реєстрації та попередньої обробки оптичних сигналів, оснований на використанні напівпровідникових дискретних фотоприймачів: фоторезисторів, фотодіодів та фототранзисторів.

Ключові терміни та поняття: фотодетектор, фоторезистор, фотодіод, фототранзистор, фототиристор, фотореле.

План самостійного опрацювання теми.

1. Схемотехнічне використання фоторезисторів.
2. Схемотехнічне використання фотодіодів.
3. Схемотехнічне використання фототранзисторів.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

Фоторезистор – оптоелектронний напівпровідниковий приймач випромінювання, принцип дії якого оснований на використанні ефекту фотопровідності. Іншими словами, фоторезистор являє собою опір, значення якого змінюється під впливом оптичного випромінювання. Для виготовлення фоторезисторів використовують напівпровідники з одним типом провідності, зазвичай електронним.

Перевагами фоторезисторів є лінійність вольт-амперної характеристики та двостороння провідність, основним недоліком – мала швидкодія.

Зовнішній вигляд і умовне позначення фоторезисторів приведені на рисунку 7.1.

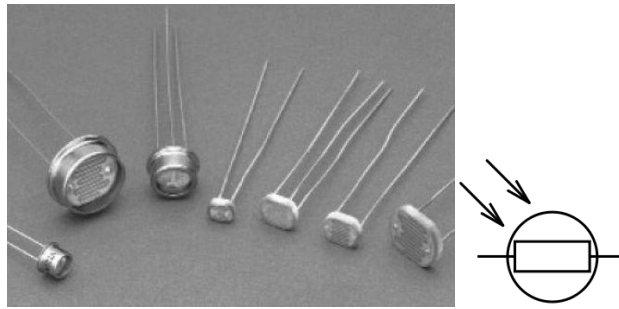


Рисунок 7.1 – Фоторезистор

Фотодіод – напівпровідниковий прилад з внутрішнім фотоефектом який має один р-п перехід і два виводи. Може працювати в двох режимах: генераторному (без зовнішнього джерела живлення) і режимі фотоперетворювача (із зовнішнім джерелом енергії). Зовнішній вигляд і умовне графічне позначення фотодіода представлені на рисунку 7.2.

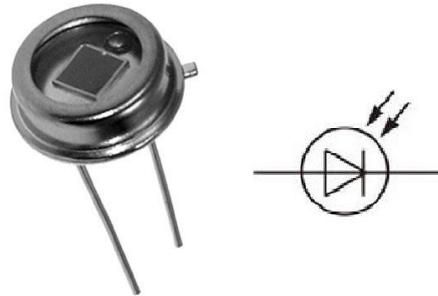


Рисунок 7.2 - Фотодіод

Фотодіоди, які працюють в режимі фото генератора (без зовнішнього джерела), часто застосовують як джерела живлення, що перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричну. Вони називаються сонячними елементами і входять до складу сонячних батарей.

При роботі фотодіода у режимі фотоперетворювача джерело живлення включається в коло в замикаючому напрямі.

Фотодіоди є більш швидкодіючими приладами в порівнянні з фоторезисторами. Вони працюють на частотах  $10^7$ – $10^{10}$  Гц. Фотодіод часто використовують в оптопарах світлодіод-фотодіод. В цьому випадку різні характеристики фотодіода відповідають різним струмам світлодіода (який при цьому створює різні світлові потоки).

Дифузійні фотодіоди являють собою структуру з однорідним розподіленням домішки в р- та n-областях. Тому в такому фотодіоді рух згенерованих світлом носіїв заряду до р-п переходу відбувається за рахунок дифузії.

У дрейфовому фотодіоді застосовують неоднорідний розподіл домішки, внаслідок чого виникає внутрішнє електричне поле, яке прискорює рух носіїв до р-п переходу.

Фотодіод зі структурою р-і-п являє собою тонкі низькоомні р- та n- області, між якими розташований протяжний збіднений і-шар. Розміри збідненого шару вибираються так, щоб у ньому поглинулося усе оптичне випромінювання, що досягнуло його. Питомий опір і-області у  $10^6$ - $10^7$  разів більший,

ніж опір областей р- та n-типів. Тому практично вся прикладена зворотна напруга падає на і-шарі, створюючи область сильного поля, яке прискорює утворені під дією оптичного випромінювання носії. Така структура створює основу для отримання швидкодіючого та чутливого фотоприймача, оскільки процес дифузії фотоносіїв до р-n переходу, який є характерним для звичайної діодної структури, замінюється дрейфом носіїв через і-область у сильному електричному полі. Завдяки цьому р-і-n фотодіоди найбільш поширені фотоприймачі, які знаходять широке застосування.

Фотодіоди з бар'єром Шотткі (контакт метал-напівпровідник) є ще одним типом фотоприймачів з високою швидкодією та чутливістю. Подібні бар'єри можуть бути отримані на різних напівпровідникових матеріалах, у тому числі і тих, для яких неможливо створити р-n переходи.

Як напівпровідникові матеріали для реалізації фотодіодів з бар'єром Шотткі найбільше практичне використання отримали кремній та арсенід галію. Як метал найчастіше використовується плівка золота товщиною до 0,01 мкм.

Якщо електронний напівпровідник контактує з металом, у якого робота виходу електронів менша за роботу виходу для напівпровідника, то певна кількість електронів переходить з напівпровідника в метал. Іонізована донорна домішка у напівпровіднику утворює шар позитивного просторового заряду, який має високий опір. При вмиканні діода у зворотному напрямку (мінус на металі) ширина області просторового заряду збільшується.

Світло на прилад спрямовують з боку металевої плівки. При достатньо малій товщині плівки, вона виявляється практично прозорою, і основна частина випромінювання поглинається в області просторового заряду, в якій існує сильне електричне поле. Електронно-діркові пари, які виникають у результаті поглинання випромінювання, швидко розділяються полем.

Особливістю бар'єрів Шотткі є можливість реєстрації випромінювання з енергією фотонів, меншою за ширину забороненої зони напівпровідника. Таке випромінювання не утворює у напівпровіднику додаткові електронно-діркові пари, але збуджує електрони металу. При енергії фотонів, більшій за висоту потенціального бар'єра контакту метал-напівпровідник, електрони металу набувають енергію, достатню для подолання бар'єра і переходу у напівпровідник. Відповідно довгохвильова межа спектральної чутливості фотодіода з бар'єром Шотткі зсувається у бік більш довгих хвиль.

З іншого боку, мала товщина металевої плівки створює умови для генерації фотоносіїв заряду в області об'ємного заряду короткохвильовим випромінюванням, для якого характерна мала глибина поглинання. Тому короткохвильова межа спектральної характеристики для фотодіодів з бар'єром Шотткі знаходиться на менших довжинах хвиль.

Таким чином, за порівнянням з фотодіодом на основі р-n переходу, фотодіоди з контактом метал-напівпровідник характеризуються значно більшою шириною спектральної характеристики.

Фотодіоди з гетероструктурою (гетерофотодіоди) є одним з найперспективніших типів напівпровідникових фотоприймачів. Типова конструкція гетерофотодіода зображена на рисунку 7.3

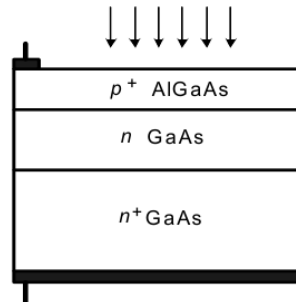


Рисунок 7.3 - Зонна діаграма фотодіода з гетеропереходом

З боку освітлюваної поверхні знаходиться шар з напівпровідникового матеріалу з широкою забороненою зоною та високою концентрацією домішки. За широкозонним шаром знаходиться активний фоточутливий шар з матеріалу з вузькою забороненою зоною. Далі іде контактний шар з такою ж шириною забороненої зони, як і в активному шарі, але з більшою концентрацією домішки.

Така структура нагадує структуру р-і-n фотодіода з тією різницею, що для її реалізації використані напівпровідникові матеріали з різною шириною забороненої зони.

При освітленні гетерофотодіода оптичним випромінюванням з енергією фотонів, меншою за ширину забороненої зони першого широкозонного шару, воно з мінімальними втратами досягає активного шару. Товщина активного шару вибирається так, щоб забезпечити поглинання у ньому усього випромінювання.

Фотодіоди з гетеропереходом зберігають основні переваги розглянутих вище структур - поєднання високої швидкодії та високої чутливості, малі робочі напруги.

Лавинний фотодіод відноситься до фотоприймачів з внутрішнім підсиленням. Він працює при зворотній напрузі, близькій до пробивної. Внаслідок цього утворені під дією оптичного випромінювання носії заряду прискорюються сильним електричним полем, набуваючи достатньої енергії для ударної іонізації атомів. Електрони та дірки, утворені при зіткненні, у свою чергу продовжують процес іонізації. Процес збільшення концентрації носіїв заряду, а значить і струму, має лавиноподібний характер. Лавинне множення концентрації нерівноважних електронів та дірок у сильному електричному полі шару просторового заряду р-n переходу буде мати місце тоді, коли ширина області просторового заряду перевищує довжину вільного пробігу носіїв заряду.

Перевагами лавинних фотодіодів є: наявність внутрішнього великого підсилення та висока швидкодія.

Інжекційні фотодіоди відносяться до фотоприймачів з внутрішнім підсиленням. Структуру діода характеризує наявність довгої базової області.

Довжина бази з високоомного напівпровідника в кілька разів перевищує довжину дифузії неосновних носіїв струму. Фотодіод працює при прямому зміщенні.

У темновому режимі більша частина прикладеної до діода напруги спадає на базі. При дії оптичного випромінювання фотони, поглинаючись у базі, утворюють нові додаткові носії заряду. Опір бази зменшується, що приводить до перерозподілу напруги між базою та р-n переходом. З підвищенням напруги р-n перехід інjektує більший струм, який, у свою чергу, ще більше зменшує опір бази і т.д. В результаті цього процесу відбувається підсилення первинного фотоструму.

В інжекційних фотодіодах з високоомного матеріалу (Ge, Si, GaAs) чутливість на 5 - 6 порядків вища, ніж у звичайних фотодіодів, а пороговий струм та інерційність приблизно такі, як і у фоторезисторів. Крім того, порівняно з лавинними фотодіодами для інжекційних фотодіодів знижуються вимоги до стабільності напруги живлення та струму.

Структура та принцип дії S-фотодіодів аналогічні інжекційному фотодіоду. Фотони світла створюють носії струму в довгій базовій області, що стимулює ріст інжекційного струму та приводить до підсилення фотоструму.

На S-фотодіоді зручно створювати фотореле. Для цього на фотоприймач подають напругу зміщення, яка відповідає вибраному порогу освітленості, при перевищенні якого різко зростає струм через S-фотодіод. Фотоприймач переходить у другий стійкий стан, який зберігається після затемнення приладу.

Фототранзистор - напівпровідниковий приймач випромінювання, що за структурою подібний до транзистора та забезпечує внутрішнє підсилення сигналу. Зовнішній вигляд і умовні позначення фототранзистора представлені на рисунку 7.4.

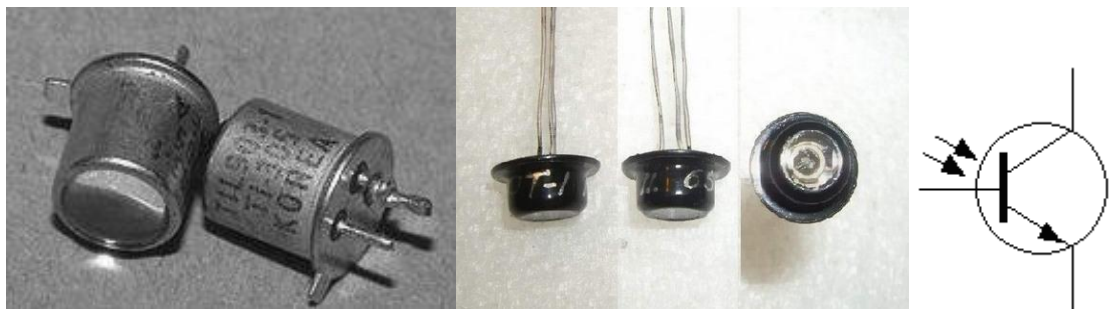


Рисунок 7.4 - Фототранзистор

Фототранзистор можна представити таким, що складається з фотодіода і транзистора (рис. 7.5). Фотодіодом є освітлювана частина переходу база-колектор, транзистором - частина структури, розташована безпосередньо під емітером. Оскільки фотодіод і колекторний перехід транзистора конструктивно об'єднані, то фотострум підсумовується з колекторним струмом. Базовий електрод може бути вимкненим

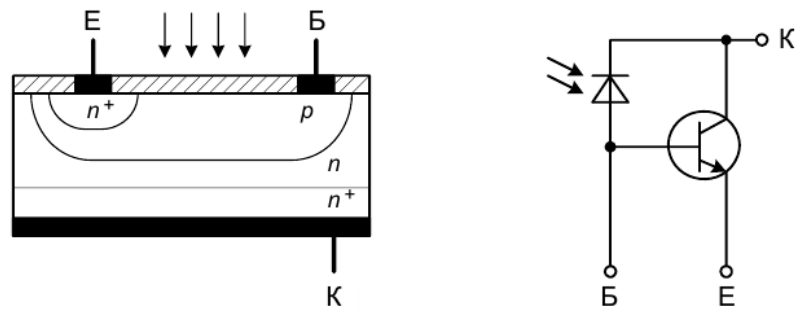


Рисунок 7.5 – Будова фототранзистора

При освітленні бази в ній виникають електронно-діркові пари. Так само як і у фотодіоді, пари, які досягли в результаті дифузії колекторного переходу, розділяються полем переходу, неосновні носії з бази рухаються в колектор, при цьому його струм збільшується. Основні носії залишаються в базі, знижуючи її потенціал відносно емітера. При цьому на емітерному переході створюється додаткова пряма напруга, що викликає додаткову інжекцію з емітера в базу і відповідне збільшення струму колектора

Ще більше підсилення і, як наслідок, ще більше збільшення чутливості, може бути досягнуто у складеному фототранзисторі (рис. 7.6).

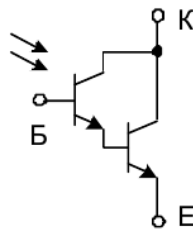


Рисунок 7.6 – Складений фототранзистор

Перевагами фототранзисторів є: наявність внутрішнього підсилення (висока фоточутливість), схемотехнічна гнучкість, яка обумовлена наявністю третього електрода.

Фототиристор - напівпровідниковий приймач випромінювання з двома стійкими станами (високоомним та низькоомним), перемикання якого у стан низького опору відбувається під дією оптичного сигналу. Зовнішній вигляд і умовні позначення фототиристора представлені на рисунку 7.7.



Рисунок 7.7 - Фототиристор

Структура фототиристора є подібною до структури звичайного тиристора (рис. 7.8), яка містить три р-п переходи, з яких середній називають коле-

кторним, а два крайніх - емітерними. Зовнішні області називаються емітерами, а внутрішні - базами.

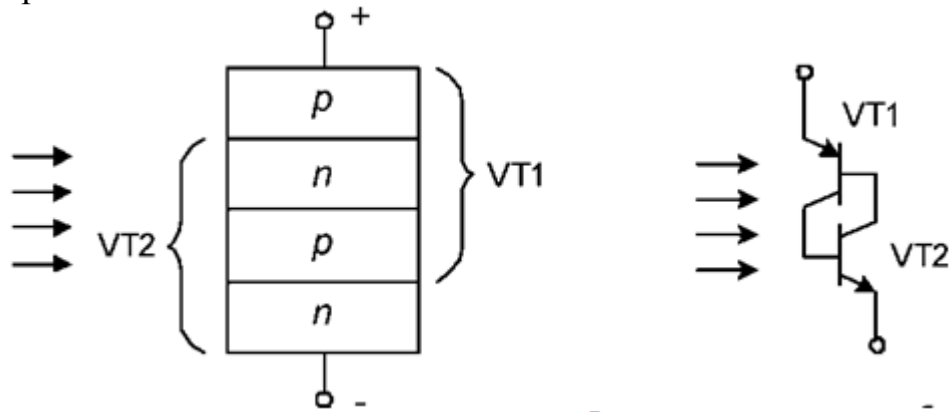


Рисунок 7.8 – Структура фототиристора та двохтранзисторна модель

Тиристор вмикається так, щоб колекторний перехід був ввімкнений у зворотному напрямку, а обидва емітерних - у прямому. При такому вмиканні переходів тиристор можна зобразити у вигляді двох послідовно ввімкнених транзисторів p-n-p і n-p-n з позитивним зворотним зв'язком через загальні бази і колектори (рис. 7.8).

При збільшенні напруги на тиристорі зворотний струм колекторного переходу, який є струмом фототиристора, зростає. Зростання струму веде до накопичування об'ємних зарядів в базових областях тиристора. Дірки, які інжектуються емітерним переходом транзистора VT1, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора VT2 і створюють там позитивний заряд. Аналогічно, електрони, які інжектуються емітерним переходом транзистора VT2, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора VT1 і створюють там негативний заряд. Накопичення основних носіїв заряду в базах транзисторів розпочинає процес їх відкривання. При деякому значенні напруги на тиристорі накопичені у базах заряди стають достатніми для того, щоб транзистори почали працювати в активному режимі. У результаті коефіцієнт підсилення у колі зворотного зв'язку стає більшим за одиницю. Базові струми транзисторів лавиноподібно зростають (незначне збільшення базового струму кожного транзистора через коло зворотного зв'язку повертається ще більшим збільшенням) і обидва транзистори швидко відкриваються. Лавиноподібне зростання струму через структуру призводить до відкривання тиристора, у результаті чого усі три переходи виявляються зміщеними у прямому напрямку, і загальний опір фототиристора стає малим.

Для переведення фототиристора у високоомний стан, необхідно зменшити його струм до деякого значення. При цьому розпочнеться зворотний процес лавиноподібного перемикавання, який завершиться тим, що обидва транзистори виявляться закритими, а колекторний перехід буде зміщений у зворотному напрямку.

Багатоелементні фотоприймачі. В ряді випадків необхідно не тільки відмітити наявність пучка світла або його інтенсивність, але й зафіксувати фотоелектричним способом оптичне зображення, яке має певний розподіл інте-



нсивності світла по площині. Це можна досягнути, виготовивши екран, який містить багато мініатюрних фотоприймачів, які перетворюють світлові потоки у відповідні електричні сигнали. Записана таким чином оптична інформація деякий час зберігається, а потім "зчитується" тим або іншим способом. Електричні сигнали від різних комірок екрана можуть бути послідовно передані в інше місце і використані для відтворення зображення об'єкта.

Для введення зображень використовуються багатоелементні фотоприймачі на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). З фізичної точки зору ПЗЗ цікаві тим, що електричний сигнал у них поданий не струмом або напругою, як у більшості інших твердотільних приладів, а зарядом.

Спрощено прилад із зарядовим зв'язком можна розглядати як матрицю близько розташованих конденсаторів, утворених структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) (рис. 7.9).

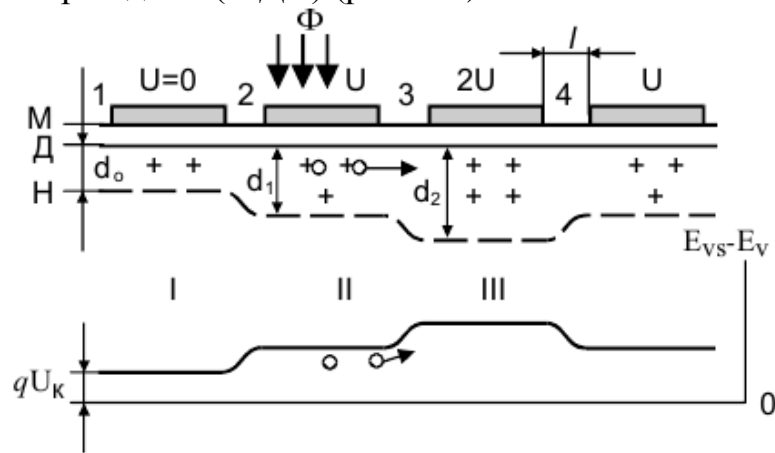


Рисунок 7.9 – Серія взаємодіючих фотоелементів, до яких прикладені різні напруги

Штрихова лінія - границя області просторового заряду,  $E_{vs}-E_v$  - глибини потенціальних ям для дірок

При відповідній послідовності тактових імпульсів напруги на електродах МДН конденсаторів зарядові пакети можна переносити між сусідніми елементами приладу. Структура складається із шару кремнію n-типу (підкладка), шару двоокису ізолювального кремнію і набору пластин електродів.

Якщо в структурі прикладають напругу  $U$  (мінус на металі), то частина домішкових електронів виводиться з напівпровідника n-типу, що призводить до появи шару позитивного об'ємного заряду товщиною  $d$ . Товщина цього шару збільшується з ростом  $U$ .

Електрони, які виникають при освітленні МДН-структури, відводяться в об'єм напівпровідника, а дірки накопичуються біля межі з діелектриком. Кількість цих дірок (тобто загальний позитивний заряд) залежить від інтенсивності світла і часу його дії. Якщо теплова генерація пар незначна, накопичений заряд (тобто інформація, задана світлом) може зберігатись тривалий час, оскільки електронів у збідненій області немає. Носії, які генеруються за межами збідненої області, повільно рухаються – дифундують і рекомбінують перш, ніж потрапляють під дію поля збідненої області. Носії, які генеруються

поблизу збідненої області, можуть дифундувати в сторони і можуть потрапити під сусідній електрод. У червоному та інфрачервоному діапазонах довжин хвиль ПЗЗ мають роздільну здатність гіршу, ніж у видимому діапазоні. Це обумовлено тим, що фотони інфрачервоного та червоного випромінювання проникають глибше в кристал кремнію і зарядовий пакет розмивається.

На рисунку 7.9 зображене коло МДН-структур, яке являється частиною рядка багатоелементного фоточутливого екрана. У випадку I на структуру не подана зовнішня напруга і наявність збідненого електронами шару товщиною  $d_0$  пов'язана з контактною різницею потенціалів  $U_k$ . Випадок II відповідає присутності зовнішньої напруги і освітлення структури крізь напівпровідниковий металевий електрод (затвор). Накопичений за час освітлення заряд дірок може бути зсунутий вздовж кола структур, якщо на сусідній елемент подано більш високу напругу (випадок III). У цьому випадку глибина потенціальної ями для дірок більша, і вони внаслідок дифузії перейдуть від другого елемента до третього. У проміжку між затворами 2 і 3 присутнє прискорювальне поле дірки, яке проникає і в область накопичення дірок, тому перетікання дірок до елемента 3 може бути достатньо швидким.

Таким чином, електричний сигнал від елемента 2, пропорційний інтенсивності  $\Phi$  і часу дії світла, яке падає на цей елемент, може бути проведений по колу елементів і виведений у зовнішнє коло. Аналогічним чином можуть бути отримані відеосигнали від інших елементів рядка і елементів інших рядків.

Мікроскопічні фоточутливі елементи розміщені в рядку так близько ( $l \approx 3$  мкм), що вони можуть взаємодіяти, передаючи один одному заряди.

Звідси назва подібних пристроїв - прилади із зарядовим (або об'ємним) зв'язком. Цей зв'язок між МДН-структурами здійснюється через загальну для всіх структур товщину напівпровідників.

Двовимірний масив (матрицю) пікселів одержують за допомогою стоп-каналів, які розділяють електродну структуру ПЗС на стовпці. Стоп-канали - це вузькі області, сформовані спеціальними технологічними прийомами в приповерхневій області, які перешкоджають розтіканню заряду під сусідні стовпці.

Якість усіх фотоприймальних матриць ПЗЗ залежить від ефективності переносу зарядів від комірок до кінцевого підсилювача. Оскільки заряди з пікселів, які розташовані далеко від кінцевого підсилювача, повинні перенестися на сотні і тисячі кроків, то ефективність передачі зарядів повинна бути максимально наближеною до одиниці. Ця вимога набуває особливого значення при низьких рівнях зарядів (наприклад, при слабкому освітленні), коли мала втрата зарядів може призвести до суттєвого спотворення зображення.

Основними типами приладів із зарядовим зв'язком є ПЗЗ із поверхневим каналом і ПЗЗ з прихованим каналом. У ПЗЗ із поверхневим каналом заряди зберігаються і переносяться біля межі розділу напівпровідник-діелектрик. Для поверхневого шару характерна велика кількість дефектів, що негативно впливає на ефективність переносу зарядів. Оскільки повністю усунути поверхневі дефекти неможливо, характеристики приладів покращують

за рахунок того, що зарядові пакети зберігаються і передаються на деякій відстані від поверхні. Це реалізується у ПЗЗ з прихованим каналом. Завдяки спеціальному легуванню підкладки в ній формується канал з протилежним типом провідності.

Більшість типів ПЗЗ матриць, які виготовляються на промисловій основі, орієнтовані на застосування в телебаченні. Як правило, такі матриці складаються з двох ідентичних областей - області накопичення та області збереження. Область збереження захищена від впливу світла світлонепроникним покриттям. Під час зворотного ходу променя кадрової розгортки зображення, сформоване в області накопичення, швидко переноситься в область збереження і, потім, поки експонується наступний кадр, зчитується по рядково з частотою рядкової розгортки. Такі прилади називаються ПЗЗ із кадровим переносом. Завдяки низькій ціні вони знаходять широке використання в побутовій відеотехніці. Проте прилади з кадровим переносом можна використовувати для зйомок у добре освітлених умовах.

#### Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. В чому полягає принцип дії фоторезистора?
2. Які матеріали використовуються для виготовлення фоторезисторів?
3. Перелічіть основні характеристики фоторезисторів.
4. Чим обумовлений максимум на спектральній характеристиці фоточутливості фотоприймачів резистивного типу?
5. В чому полягає принцип дії фотодіода?
6. Які матеріали використовуються для виготовлення фотодіодів?
7. Перелічіть основні характеристики фотодіодів.
8. Чим обумовлений максимум на спектральній характеристиці фоточутливості фотоприймачів діодного типу?
9. Які режими роботи фотодіодів Ви знаєте?
10. Перелічіть переваги р-і-n структури фотодіода.
11. В чому полягає принцип дії фототранзистора?
12. Які матеріали використовуються для виготовлення фототранзисторів?
13. Перелічіть основні характеристики фототранзисторів.
14. Які режими роботи фототранзисторів Ви знаєте?
15. Вкажіть переваги та недоліки фотоприймачів – фоторезисторів, фотодіодів та фототранзисторів

#### Практичне завдання.

1.1 Зібрати експериментальний стенд 1. Розташувати на креслярському полі Proteus: джерело живлення (Компоненти: P → Miscellaneous (Різне) → BATTERY (12В)), земляну клему (ліва панель: Terminal → GROUND), змінний резистор (Компоненти: P → Resistors → Variable → POT HG), фоторезистор (P → Miscellaneous → TORCH LDR), резистори (Компоненти: P → Resistors → 0,6w Metal Film → MINRES 4.7к, 3.3к), вимірювальні прилади

(ліва панель: Віртуальні інструменти → DC VOLTMETER, DC AMMETER), реле (Компоненти: P → Switches & Relays → Relays (Generis) → RALAY), транзистори (Компоненти: P → Transistors → Bipolar → BC549), конденсатори (Компоненти: P → Capacitors → Electrolytic Aluminum → A700V826M2R5ANE028) з'єднати компоненти у схему віртуального лабораторного стенда (рис. 7.10).

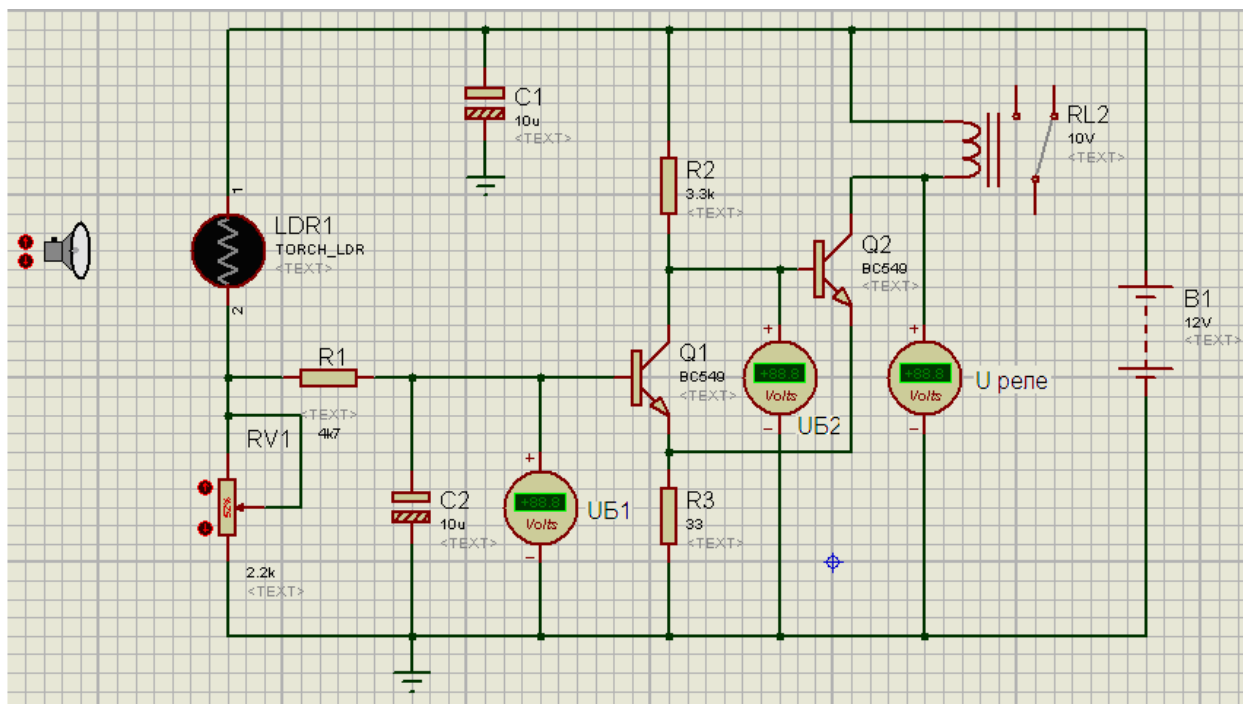


Рисунок 7.10 – Експериментальний стенд 1

1.3 Збільшуючи освітленість фоторезистора (покроково), зняти показання вимірювальних приладів і занести їх у експериментальну таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 – Результати проведених вимірів на лабораторному стенді

Крок освітленості	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{Б1}$										
$U_{Б2}$										
$U_{\text{реле}}$										

1.4 Змінюючи опір змінного резистора (чутливість) та резистора R2 експериментально досягти оптимального результату чутливості схеми реєстрації світлових сигналів.

1.5 Зробити розгорнутий висновок.

2.1 Зібрати експериментальний стенд 2. Розташувати на креслярському полі Proteus замість TORCH LDR, фоторезистор (Компоненти: P → Transducers → LDR), індикаторну лампу (Компоненти: P → LAMP) (рис. 7.11)



1. Фоторезистор. Явища внутрішнього фотоефекту.
2. Основні параметри фоторезисторів. Темновий струм.
3. Вольт-амперні характеристики фоторезисторів.

### Література

1. Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.
2. Бойко В.І., Жуйков В.Я., Співак В.М. та ін. Основи технічної електроніки: Підручник. Київ : Вища школа., 2007. 510 с.

## Практичне заняття 8

### Схеми відображення інформації

Метою вивчення теми є засвоєння принципів побудови індикаторних схем з статичним управлінням.

Ключові терміни та поняття: індикатор, світлодіод, сегмент, символ, матриця, перетворювач.

План самостійного опрацювання теми.

1. Газорозрядні індикатори.
2. Люмінесцентні індикатори.
3. Напівпровідникові індикатори.
4. Рідкокристалічні індикатори.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

Оптичні індикатори для відображення цифрової інформації реалізуються в різних варіантах: на лампах розжарювання, лампах тліючого розряду, світлодіодах, рідких кристалах. Найбільшого поширення набули світлодіодні і рідкокристалічні індикатори завдяки низькій напрузі і слабким струмам в робочому режимі. Вживання подібних індикаторних елементів полегшується завдяки наявності безлічі інтегральних драйверів.

Буквено-цифрові індикатори призначені для відображення інформації у вигляді цифр, букв і різних символів. Розрізняють наступні види буквено-цифрових індикаторів:

- накальні;
- газорозрядні;
- світлодіодні;
- вакуумні електролюмінесцентні;
- рідкокристалічні.

Накальні і газорозрядні індикатори в даний час практично не застосовуються. Світлодіодні індикатори бувають двох видів: семисегментні і матричні. Семисегментні світлодіодні індикатори призначені для відображення інформації у вигляді цифр і включають в свій склад вісім світлодіодів, сім з яких мають форму сегментів, а один, восьмий - крапка (рис. 8.1).

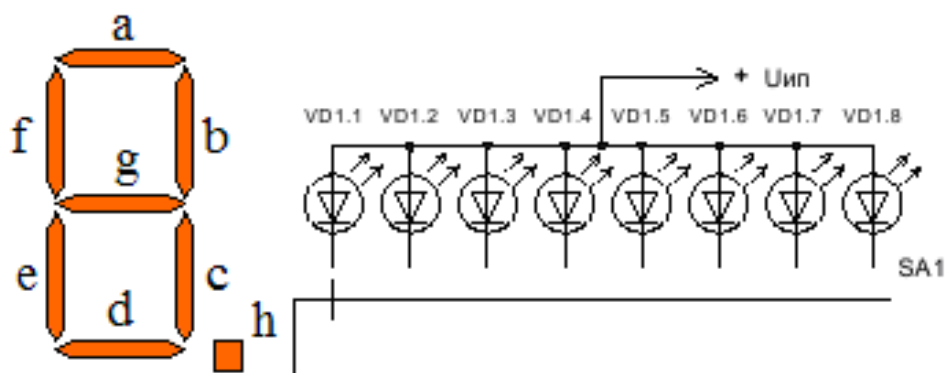


Рисунок 8.1 - Семисегментний світлодіодний індикатор

Семисегментні індикатори випускаються двох видів – з об'єднаним анодом або з об'єднаним катодом.

Світлодіодні матричні індикатори мають в своєму складі велику кількість світлодіодів (рис. 8.2).

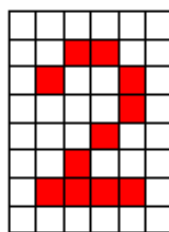


Рисунок 8.2 – Матричний індикатор

Шляхом підключення тих або інших світлодіодів в матрицю можна сформувати будь-яку цифру, букву, знак або символ. Достоїнства світлодіодних індикаторів:

- мала напруга живлення;
- порівняно малий споживаний струм;
- чітка конфігурація цифр.

Недолік – недостатня яскравість свічення.

Для відображення необхідної інформації використовують перетворювачі кодів. Перетворювачі кодів можуть бути ваговими і не ваговими. Вагові ПК перетворюють інформацію з однієї системи числення в іншу. Основне призначення не вагових – перетворення інформації для її подальшого відображення. Інтегральні мікросхеми перетворювачів кодів випускаються лише для найбільш поширених операцій, серед яких перетворювачі двійкового коду в код управління сегментними індикаторами;

Перетворювач двійкового коду в код управління семисегментними світлодіодними індикаторами повинен мати чотири входи, оскільки для кодування десяткових цифр від 0 до 9 вистачає чотири двійкових розряди, і сім виходів, поодиночі на кожен сегмент (рис. 8.3).

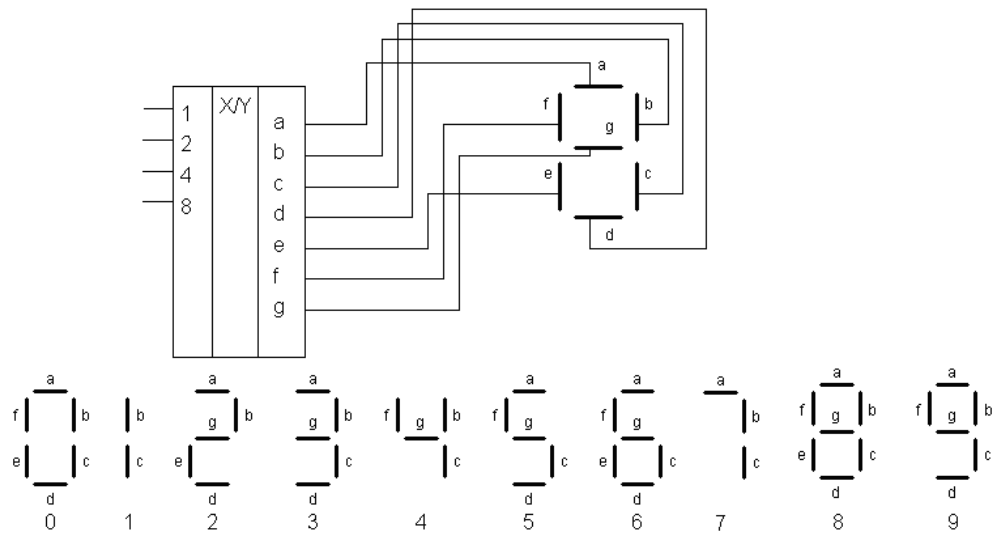


Рисунок 8.3 – Перетворювач двійкового коду в код управління семисегментними світлодіодними індикаторами

З таблиці істинності перетворювача коду (табл. 8.1) видно, що, наприклад, в цифрі 0 повинні світитися всі сегменти за винятком сегменту *g*, в цифрі 1 світяться лише два сегменти *b* і *c* і т. д. Вагові коефіцієнти двійкових розрядів дорівнюють  $(8421)_2$ . Нулі проставлені для тих цифр, в яких сегмент не світиться.

Таблиця 8.1 - Таблиця істинності перетворювача двійкового коду в код управління семисегментними світлодіодними індикаторами

DEC цифра	Входи				Виходи						
	A	B	C	D	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1

Мікросхема 7447РС являє собою перетворювач логічних сигналів з двійкового коду 8-4-2-1 в семисегментний (рис. 8.4). Мікросхема має виходи з відкритим колектором і підвищеною навантаженою здатністю. Призначення виводів представлено в таблиці 8.2. Схема знаходиться в працездатному стані, коли на виводі управління VI/RBO присутній високий рівень.



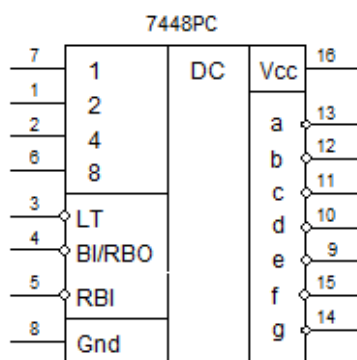


Рисунок 8.4 – Мікросхема 7447PC

Схема електрична принципова перетворювача двійкового коду чисел в коди семисегментного індикатора на мікросхемі 7447PC являє собою перетворювач логічних сигналів з двійкового коду 8-4-2-1 в код семисегментного індикатора з загальним анодом (рис. 8.5).

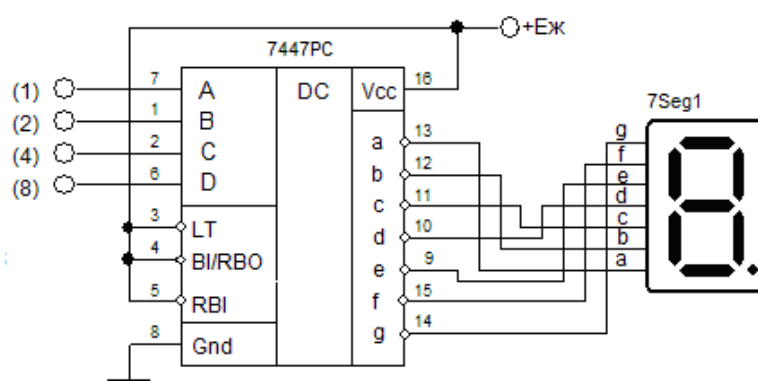


Рисунок 8.5 – Схема перетворення двійкового коду 8-4-2-1 в код семи-сегментного індикатора на мікросхемі 7447PC

Таблиця 8.2 – Призначення виводів мікросхеми 7447PC

№ вивода	Призначення
1	Вхід з ваговим значенням розряду (2)
2	Вхід з ваговим значенням розряду (4)
3	Вхід контролю індикатора (LT)
4	Вихід сигналу схеми послідовного погашення (BI/RBO)
5	Вхід сигналу схеми послідовного погашення (RBI)
6	Вхід з ваговим значенням розряду (8)
7	Вхід з ваговим значенням розряду (1)
8	Загальний (Gnd)
9	Вихід сегменту (e)
10	Вихід сегменту (d)
11	Вихід сегменту (c)
12	Вихід сегменту (b)
13	Вихід сегменту (a)
14	Вихід сегменту (g)
15	Вихід сегменту (f)
16	Напруга живлення (+Vcc)

Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. В чому полягає принцип функціонування світлодіодного індикатора?
2. Схеми включення світлодіодних індикаторів.
3. Відображення інформації у кодах чисел.

Практичне завдання.

Побудувати схему відображення інформації на семисегментних індикаторах чисел від 0 до 15 в програмному забезпеченні Electronics Workbench.

1. Необхідно побудувати перетворювач десяткового коду чисел від 0 до 15 в двійковий код. Імітуємо перетворювач Генератором слів (Word Generator). Запрограмував пристрій у 16-річному коді, отримуємо на виході двохрозрядний код (рис. 8.6).

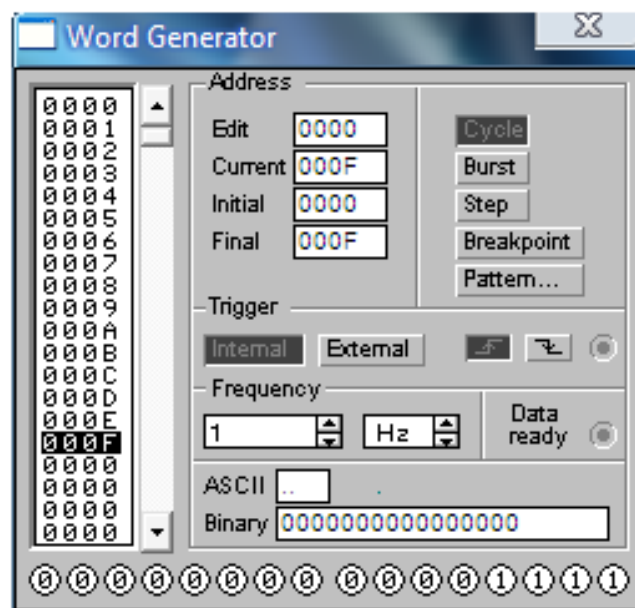


Рисунок 8.6 – Програмування Word Generator

2. Для відображення інформації двійково-десятькового коду необхідно включити в схему два світлодіодних індикатора. Проведемо моделювання перетворювача двійкового коду ABCD (8-4-2-1) у двійково-десятьковий F8F7F6F5 F4F3F2F1 (0-0-0-0-10 8-4-2-1) з подальшим перетворенням в коди семисегментних індикаторів. Складемо таблицю функціонування перетворювача (табл. 8.2).

$F1 = D; \quad F2 = AC + ABC; \quad F3 = AB + BC; \quad F4 = ABC; \quad F5 = AB + AC;$ $F6 = F7 = F8 = 0$
---

3. Оберемо 16-річні семисегментні індикатори (BCD/DPY) и побудуємо схему (рис. 8.7)

4. Провести аналіз функціонування схеми і зробити розгорнутий аналітичний висновок.

Таблиця 8.2 – Алгоритм функціонування перетворювача двійкового коду в двійково-десятковий

№	A	B	C	D	F8	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
8	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
10	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
12	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
13	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
14	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
15	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1

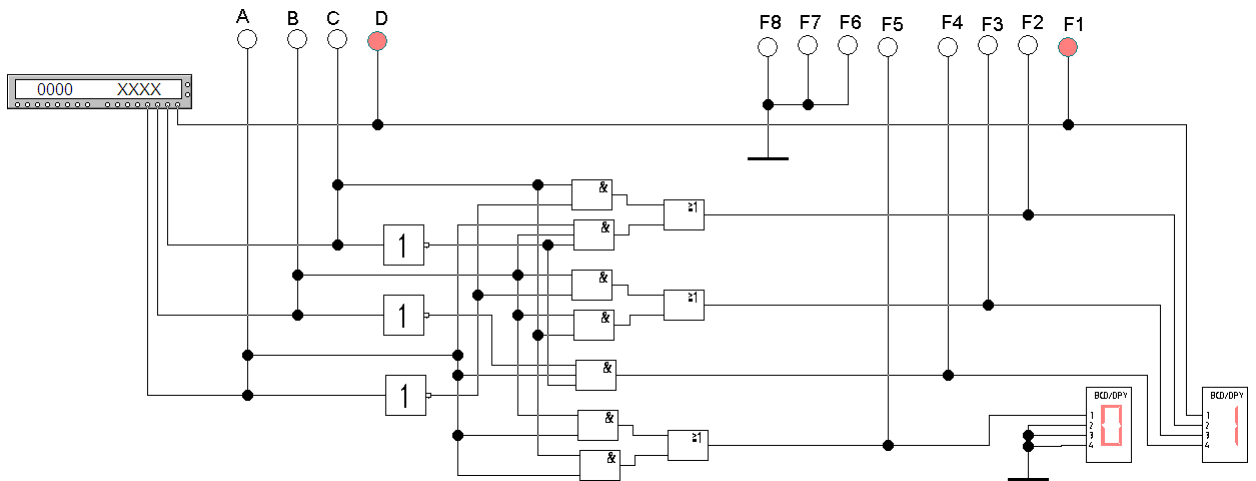


Рисунок 8.7 - Схема відображення на семисегментних індикаторах чисел від 0 до 15

### Контрольні питання

1. Перетворювач логічних сигналів з двійкового коду 8-4-2-1 в семисегментний
2. Відображення інформації двійково-десятькового коду.
3. Перетворювача двійкового коду у двійково-десятьковий.

### Література

1. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Кісельов Є.М., Хрипко С.Л. Цифрова схемотехніка : підручник. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 214 с. ISBN 978-617-685-023-6
2. Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.

Начально-методичне видання  
(українською мовою)

Верьовкін Леонід Леонідович  
Світанько Микола Вікторович,  
Критська Тетяна Володимирівна

## **АНАЛОГОВА та ОПТОСХЕМОТЕХНІКА**

Методичні рекомендації до практичних занять  
для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня  
за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної  
програми «Мікро- та наносистемна техніка»

Рецензент *В.Л. Коваленко*  
Відповідальний за випуск *Т.В. Критська*  
Коректор *Л.Л. Верьовкін*

Підп. до друку \_\_.\_\_.2024. Формат 60Ч90Ч16.  
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Times.  
Умовн. друк. арк. 1,3. Тираж 6 прим.. Зам №  
Запорізький національний університет  
69600, м. Запоріжжя, МСП – 41  
вул. Жуковського, 66.  
Свідотство про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників  
і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 5229 від 11.10.2016.