

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет  
науки і технологій**

---

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

*В авторській редакції*

## **ЕЛЕКТРОНІКА І МІКРОСХЕМОТЕХНІКА**

Навчально-методичні рекомендації  
до лабораторних занять  
(частина 1)

*Електронне видання*

ДНІПРО  
2025

Упорядники:  
*К. В. Гончаров, В. І. Щека, К. І. Ящук, Р. В. Рибалка*

### Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми  
273.1.02.24 «Системи керування рухом поїздів»  
Протокол № 5 від 06.02.2025

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми  
174.1.02.24 «Автоматика та автоматизація на транспорті»  
Протокол № 3 від 06.02.2025

Е 50 Електроніка і мікросхемотехніка : навчально-методичні рекомендації до лабораторних занять / упоряд. К. В. Гончаров, В. І. Щека, К. І. Ящук, Р. В. Рибалка ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – Ч. 1. – 60 с.

Навчально-методичні рекомендації до лабораторних занять з дисципліни «Електроніка і мікросхемотехніка» призначені для використання студентами, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті» або «Системи керування рухом поїздів» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Навчально-методичні рекомендації містять основні теоретичні відомості для засвоєння матеріалу, порядок виконання лабораторних робіт, вимоги до оформлення звіту та питання для самоконтролю.

Іл. 52. Табл. 24. Бібліогр.: 9 назв.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
Лабораторна робота № 1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ .....	6
Лабораторна робота № 2 НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ СТАБІЛІТРОН .....	15
Лабораторна робота № 3 БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР .....	22
Лабораторна робота № 4 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ.....	32
Лабораторна робота № 5 ТИРИСТОРИ .....	43
Лабораторна робота № 6 ДІОДНИЙ ОПТРОН .....	50
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....	59

## ВСТУП

*Характеристика місця та значення навчальної дисципліни для підготовки фахівця.* Дисципліна «Електроніка і мікросхемотехніка» (далі – Дисципліна) входить до переліку обов'язкових освітніх компонент освітньо-професійних програм (ОПП) «Автоматика та автоматизація на транспорті» і «Системи керування рухом поїздів» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Відповідно до навчальних планів за даними ОПП для Дисципліни передбачаються лекційні, лабораторні та практичні заняття протягом третього та четвертого навчальних семестрів.

Опанування Дисципліни дозволяє здобувачу, який навчається за ОПП «Автоматика та автоматизація на транспорті», отримати знання та навички, необхідні для розв'язання типових задач і проблем автоматизації; знати принципи роботи технічних засобів залізничної автоматики; вміти виконувати роботи з проектування систем залізничної автоматики у тому числі із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення. Опанування Дисципліни дозволяє здобувачу, який навчається за ОПП «Системи керування рухом поїздів», отримати знання та навички, необхідні для розв'язання типових задач і проблем автоматизації; визначати параметри пристроїв залізничної автоматики та їх елементів шляхом проведення вимірювального експерименту; знати основні засоби автоматизації, що використовуються в експлуатації, ремонті та обслуговуванні систем керування рухом поїздів; вміти розробляти технічні завдання і технічні умови на проектування пристроїв залізничної автоматики.

Дане навчально-методичне видання містить рекомендації до перших шести лабораторних робіт, під час яких досліджуються базові електронні компоненти: напівпровідникові діоди і стабілітрони, біполярні і польові транзистори, тиристори та оптрони. В результаті виконання лабораторних робіт студенти зможуть засвоїти принцип дії та призначення базових напівпровідникових приладів; навчитись застосовувати програми схемотехнічного моделювання для дослідження електронних пристроїв; обґрунтовувати вибір напівпровідникових елементів та отримати навички налагоджувати електронні пристрої систем залізничної автоматики та зв'язку.

Навчально-методичні рекомендації до кожної лабораторної роботи містять назву та мету роботи, основні теоретичні відомості, порядок виконання (для очної та дистанційної форм навчання), вимоги до звіту та контрольні запитання. Під час очного навчання лабораторні роботи виконуються із застосуванням навчальних стендів у лабораторіях кафедри «Автоматика та телекомунікації». У разі дистанційного навчання лабораторні роботи виконуються з використанням комп'ютерної техніки та програми для автоматизованого проектування електронних схем Proteus Design. Безкоштовну демонстраційну версію програми можна завантажити з офіційного сайту розробника <https://www.labcenter.com/free-trial/>. Під час

дистанційного навчання лабораторні роботи виконуються за варіантами. Номер варіанту завдання відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи.

*Вимоги до оформлення звіту з лабораторних робіт:*

- звіт можна оформляти у рукописному вигляді в зошиті або друкованому вигляді за допомогою комп'ютерної техніки на листах формату А4;

- звіт повинен містити інформацію, яка однозначно ідентифікує його виконавця: прізвище та ім'я студента, номер академічної групи, номер варіанту (якщо вимагається у завданні);

- наповнення звіту повинне відповідати вимогам розділу «Зміст звіту» відповідної лабораторної роботи;

- у разі використання засобів комп'ютерної техніки для оформлення звіту: гарнітура основного тексту – Times New Roman; розмір шрифту – 12 пт або 14 пт;

- для дистанційної форми навчання електронна версія звіту (фото рукописного звіту або файл звіту у форматах doc, docx, pdf) завантажується до дистанційного курсу «Електроніка і мікросхемотехніка» системи Лідер у розділ «Звіти з лабораторних робіт». У назві файлу необхідно вказати прізвище студента, номер групи та номер лабораторної роботи. Наприклад, *Petrenko\_AT2311\_LR1.pdf* – звіт до першої лабораторної роботи студента групи АТ2311 Петренко.

Розподіл роботи над виданням між співавторами:

Гончаров К. В. – вступ, розробка лабораторних робіт № 1, 2, 6 (сумісно з Рибалкою Р. В.);

Щека В. І. – розробка лабораторних робіт № 3, 4 (сумісно з Ящук К. І.);

Ящук К. І. – розробка лабораторних робіт № 3, 4 (сумісно з Щека В. І.);

Рибалка Р. В. – розробка лабораторних робіт № 5, 6 (сумісно з Гончаровим К. В.).

*Вимоги з охорони праці та правила поведінки під час проведення лабораторних занять*

Перед початком проведення першого лабораторного заняття студент повинен пройти інструктаж з правил техніки безпеки та правил поведінки у приміщенні, де відбуваються заняття, розписатися в журналі проведення інструктажів. Студент, який не пройшов інструктаж, не допускається до лабораторних занять.

Студент зобов'язаний виконувати вимоги правил техніки безпеки та правила поведінки у приміщенні, де проводяться заняття. Якщо студент порушує вимоги правил техніки безпеки, то викладач має право відсторонити студента від виконання лабораторних занять.

У разі проведення лабораторних занять в навчальних лабораторіях університету студент повинен виконувати наступні правила:

- електрична схема монтується за допомогою сполучних провідників, які повинні мати надійну ізоляцію;

- джерело живлення потрібно підключати в останню чергу, а відключати в першу чергу;
  - забороняється приступати до виконання роботи без перевірки схеми викладачем;
  - забороняється вмикати живлення без дозволу викладача;
  - забороняється виконувати монтаж схеми, яка знаходиться під напругою.
- Якщо лабораторні заняття проводяться у комп'ютерному класі в університеті, то студент повинен виконувати наступні правила:
- забороняється змінювати налаштування операційної системи та програмного забезпечення, яке використовується для виконання лабораторних занять, окрім випадків, визначених викладачем;
  - забороняється запускати стороннє програмне забезпечення, що не використовується для виконання лабораторних занять без дозволу викладача;
  - у разі виникнення питань чи непередбаченої роботи обладнання необхідно повідомити викладача;
  - забороняється підключати до комп'ютера власні FLASH-накопичувачі та копіювати з них на університетський комп'ютер файли без дозволу викладача.

## **Лабораторна робота № 1**

### **НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ**

**Мета роботи:** дослідити пряму та зворотну гілку вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода, навчитись визначати статичний та диференціальний опір діода, дослідити схеми випрямлення змінного струму.

#### **Теоретичні відомості**

**Напівпровідниковим діодом** називається напівпровідниковий прилад, що містить один електронно-дірковий перехід і два виводи (анод і катод).

**Електронно-дірковий перехід** (р-п перехід) – це граничний шар між напівпровідником з електронною провідністю (напівпровідником n-типу) і напівпровідником з дірковою провідністю (напівпровідником р-типу) [1, 2, 8].

В напівпровідниках n-типу концентрація вільних електронів набагато вища, ніж концентрація дірок. Це досягається додаванням у напівпровідник донорної домішки, валентність якої вище валентності напівпровідника. В результаті іонізації атомів домішки утворюються додаткові вільні електрони та позитивно заряджені іони донорної домішки. У таких напівпровідниках електрони є основними носіями заряду, а дірки – неосновними.

У напівпровідниках р-типу концентрація дірок набагато вища, ніж концентрація вільних електронів. При цьому дірки – основні носії заряду, а електрони – неосновні. Такі напівпровідники отримують додаванням

акцепторної домішки, валентність якої нижче валентності напівпровідника. Після іонізації атомів домішки з'являються додаткові дірки і негативно заряджені іони акцепторної домішки [8].

Розглянемо процеси, що відбуваються при формуванні р-п переходу. Концентрація електронів в n-напівпровіднику значно вища, ніж в р-напівпровіднику, тому відразу після утворення контакту між напівпровідниками починається дифузійне переміщення електронів з n-напівпровідника в р-напівпровідник (рис. 1.1). З аналогічної причини дірки переміщуються у протилежному напрямку. Таким чином, відбувається дифузійне переміщення основних носіїв заряду через границю напівпровідників. В результаті цього в граничному шарі n-напівпровідника зменшується концентрація електронів, що викликає появу некомпенсованого позитивного заряду іонів донорної домішки. У свою чергу в граничному шарі р-напівпровідника зменшується концентрація дірок і з'являється некомпенсований негативний заряд іонів акцепторної домішки.

Таким чином, на границі напівпровідників виникають два різнойменно заряджені шари (об'ємний заряд), з'являється контактна різниця потенціалів. В результаті виникає електричне поле, яке перешкоджає подальшому проходженню основних носіїв заряду через р-п перехід, тобто з'являється потенційний бар'єр для основних носіїв. У той же час, дане електричне поле викликає переміщення (дрейф) неосновних носіїв заряду через границю напівпровідників (електронів з р-області в n-область і дірок у протилежному напрямку). Перехід неосновних носіїв призводить до зменшення об'ємного заряду і електричного поля в переході. Як наслідок, відбувається додатковий дифузійний перехід основних носіїв, в результаті чого електричне поле приймає початкове значення. При рівності потоків основних і неосновних носіїв заряду  $i$ , відповідно, струмів настає динамічна рівновага. При цьому результуючий струм через р-п перехід дорівнює нулю.

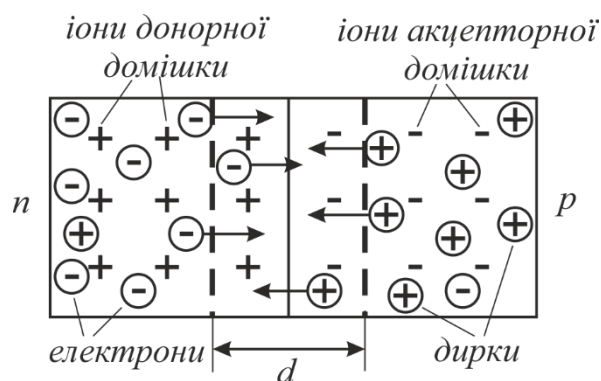


Рис. 1.1. Електронно-дірковий перехід

**р-п перехід включений прямо**, якщо до нього прикладена зовнішня напруга плюсом до р-області, а мінусом – до n-області. В результаті цього в електронно-дірковому переході з'являється зовнішнє електричне поле, що

зменшує його внутрішнє поле. Потенційний бар'єр на границі напівпровідників зменшується. Внаслідок цього збільшується потік основних носіїв заряду через р-п перехід, баланс струмів дифузії і дрейфу порушується, виникає електричний струм, що протікає через перехід. Причому, чим більша зовнішня напруга, тим більший струм. Таким чином, при прямому включенні р-п перехід відкривається.

Введення носіїв заряду через електронно-дірковий перехід в область напівпровідника, де вони є неосновними носіями, за рахунок зниження потенційного бар'єру називається інжекцією.

**р-п перехід включений у зворотному напрямку**, якщо до нього прикладена зовнішня напруга плюсом до n-напівпровідника, а мінусом – до р-напівпровідника. В результаті цього виникає зовнішнє електричне поле, що збільшує внутрішнє поле, потенційний бар'єр збільшується. Рух основних носіїв заряду через р-п перехід зменшується і при деякому значенні напруги зовсім припиниться. При цьому через електронно-дірковий перехід протікає незначний струм, зумовлений рухом неосновних носіїв заряду, р-п перехід практично закритий.

Процес виведення неосновних носіїв заряду через р-п перехід при зворотному включенні називається екстракцією.

Таким чином, р-п перехід має вентильні властивості і пропускає електричний струм тільки в одному напрямку. Тому напівпровідникові діоди дозволяють випрямляти змінний струм.

На практиці частіше застосовують несиметричні р-п переходи, у яких концентрація основних носіїв заряду в одній з напівпровідникових областей набагато більша, ніж в іншій. Низькоомну область з більшою концентрацією носіїв заряду називають емітером, а високоомну область з меншою концентрацією – базою.

На рис. 1.2 представлена вольт-амперна характеристика (ВАХ) електронно-діркового переходу, тобто залежність струму через перехід від прикладеної до нього напруги. Така залежність описується виразом [3]:

$$I = I_0(e^{U/\phi_T} - 1), \quad (1.1)$$

де  $I_0$  – тепловий або зворотній струм насичення;

$\phi_T = kT/q$  – температурний потенціал;

$k$  – постійна Больцмана;

$T$  – абсолютна температура;

$q$  – заряд електрона.

У реальних діодах пряма і зворотна гілки вольт-амперної характеристики відрізняються від ідеалізованої характеристики (див. рис. 1.2). При прямому включенні істотний вплив на ВАХ здійснює падіння напруги на опорі бази діода. При зворотному включенні струм через діод протікає більше теплового струму.

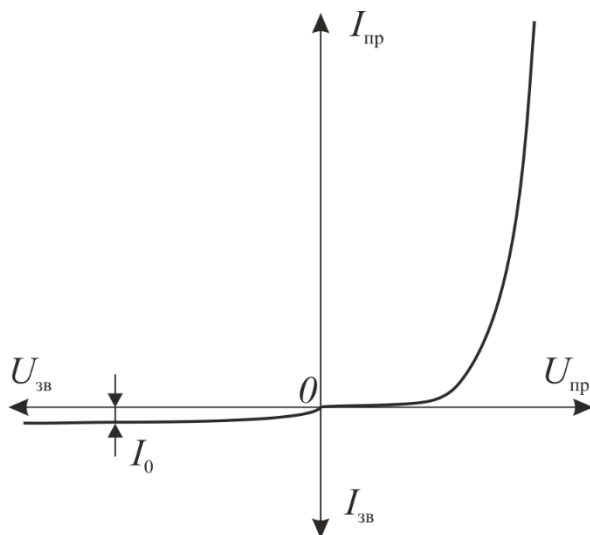


Рис. 1.2. Вольт-амперна характеристика електронно-діркового переходу

В залежності від технологічних процесів виготовлення розрізняють точкові діоди, сплавні і мікросплавні, з дифузійною базою, епітаксціальні та ін.

За функціональним призначенням діоди ділять на випрямні, універсальні, імпульсні, стабілітрони, варикапи, світлодіоди, фотодіоди та ін. [4, 5].

**Випрямні діоди** призначені для перетворення змінного струму в постійний. До швидкодії, ємності р-п переходу і стабільності параметрів таких діодів не висувають спеціальних вимог. Для випрямних діодів характерними є малі опори в провідному стані, що дозволяє діодам пропускати великі струми. Їх ємність через великі площі р-п переходу велика і досягає значень десятків пікофарад.

**Імпульсні діоди** мають малу тривалість перехідних процесів і призначені для роботи в імпульсних колах. Від випрямних діодів вони відрізняються малими ємностями р-п переходу (десяткові частки пікофарад) і рядом параметрів, що визначають перехідні характеристики діода. Зменшення ємностей досягається за рахунок зменшення площі р-п переходу, тому допустимі потужності розсіювання у них невеликі (30-40 мВт).

**Варикапи** – це напівпровідникові прилади, що використовуються в якості керованої електричною напругою ємності. Такі прилади використовують для електронного налаштування коливальних контурів.

При протіканні електричного струму через **світлодіод** виникає випромінювання світла. Світлодіоди застосовують для індикації різних процесів.

**Фотодіоди** призначені для перетворення світлового потоку в електричні сигнали. Такі прилади можуть використовуватися в якості фотодатчиків. Крім цього, світлодіоди і фотодіоди застосовують для побудови різних оптоелектронних приладів.

## Порядок виконання роботи (для очної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.
2. Виміряти пряму гілку вольт-амперної характеристики діода.  
Зібрати схему (рис. 1.3). Підключити джерело живлення.

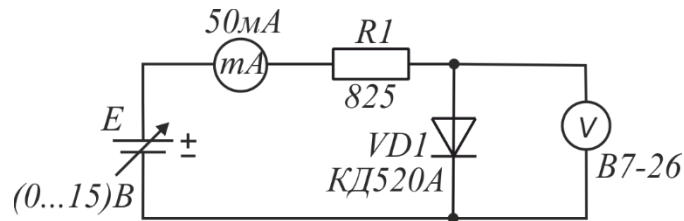


Рис. 1.3. Схема для вимірювання прямої гілки ВАХ діода

Підвищуючи напругу джерела живлення  $E$ , встановлювати певні значення прямого струму через діод  $I_{пр}$  (наприклад: 0, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50 мА), вимірюючи при цьому відповідні значення напруги  $U_{пр}$ . Виміряти 8-10 значень. Заповнити табл. 1.1.

Таблиця 1.1

### Результати вимірювання прямої гілки ВАХ діода

$I_{пр}, \text{мА}$										
$U_{пр}, \text{В}$										

3. Виміряти зворотну гілку ВАХ діода.

Зібрати схему (рис. 1.4). Підключити джерело живлення.

Підвищуючи напругу джерела живлення  $E$ , встановлювати певні значення зворотної напруги на діоді  $U_{зв}$  (наприклад: 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30 В), вимірюючи при цьому відповідні значення зворотного струму  $I_{зв}$ . Виміряти 8-10 значень. Заповнити табл. 1.2.

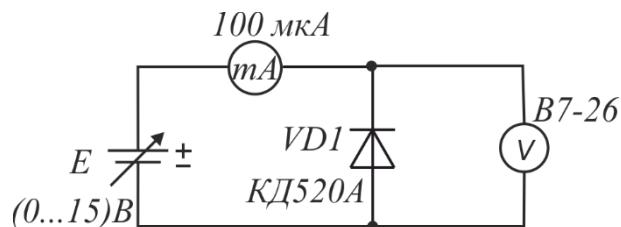


Рис. 1.4. Схема для вимірювання зворотної гілки ВАХ діода

Таблиця 1.2

### Результати вимірювання зворотної гілки ВАХ діода

$I_{зв}, \text{мА}$									
$U_{зв}, \text{В}$									

За результатами вимірювань побудувати ВАХ діода.

4. Визначити прямий і зворотній опір діода.

Використовуючи ВАХ діода, визначити прямий статичний ( $R_{пр}$ ) і диференціальний ( $r_{пр}$ ) опір діода:

$$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}, \quad r_{пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}}, \quad (1.2)$$

де  $U_{пр}$  – напруга на діоді при струмі  $I_{пр} = 10 \text{ мА}$ ;

$\Delta U_{пр}, \Delta I_{пр}$  – приріст напруги та відповідний приріст струму при прямому включенні діода.

Визначити зворотній статичний ( $R_{зв}$ ) опір діода при напрузі  $U_{зв} = 10 \text{ В}$ :

$$R_{зв} = \frac{U_{зв}}{I_{зв}}, \quad (1.3)$$

де  $I_{зв}$  – струм через діод при напрузі  $U_{зв} = 10 \text{ В}$ .

5. Дослідити однопівперіодний випрямляч.

Зібрати схему (рис. 1.5). Подати на вхід змінну напругу  $U_{вх} = 12 \text{ В}$ .

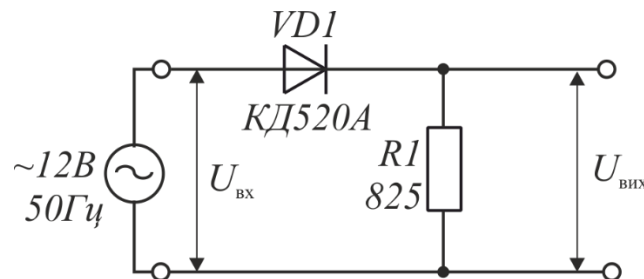


Рис. 1.5. Схема для дослідження однопівперіодного випрямляча

Підключити осцилограф спочатку до входу, а потім до виходу випрямляча. Зарисувати осцилограми напруги  $U_{вх}(t)$  і  $U_{вих}(t)$ .

6. Оформити звіт з лабораторної роботи.

7. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

### **Порядок виконання роботи** (для дистанційної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.

2. За допомогою програми Proteus дослідити напівпровідниковий діод (рис. 1.6). Тип діоду вибрати відповідно до табл. 1.3. Номер варіанту відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи.

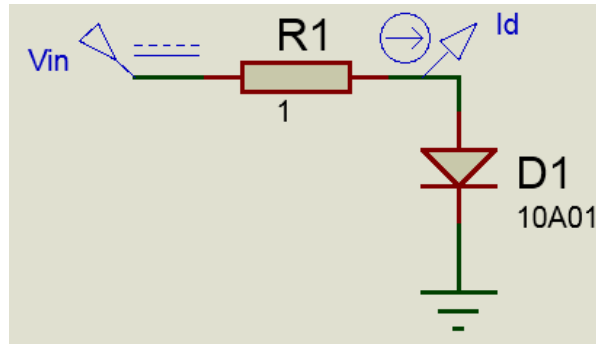


Рис. 1.6. Схема для дослідження діода

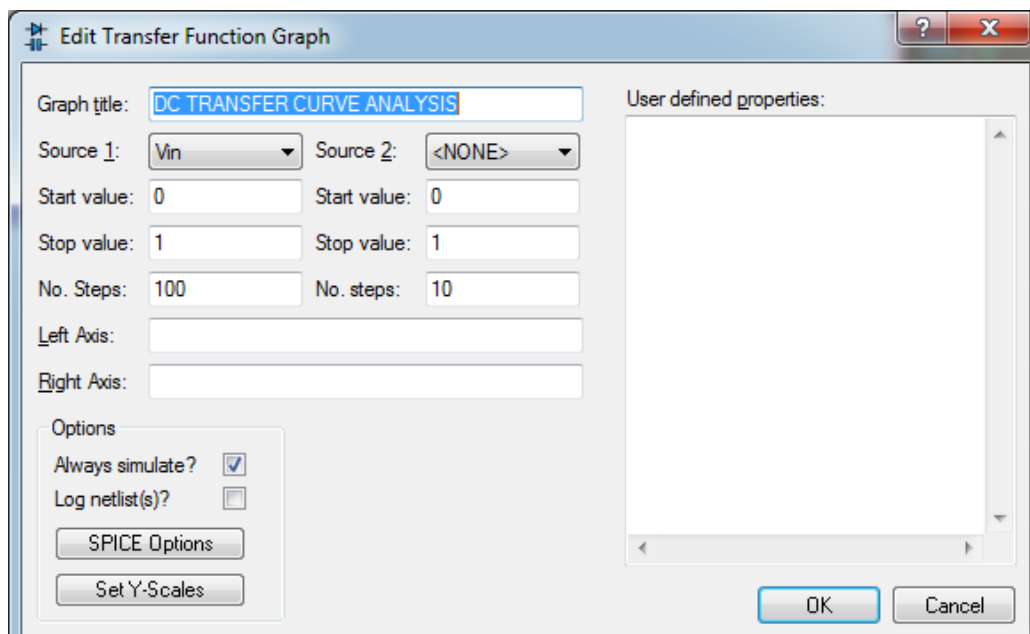
Таблиця 1.3

### Варіанти завдань

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип діода	10A01	1N4001G	1N5401	6A1	DFLR1200	S1A	S2A	S3A	S5AC	1N4148

Побудувати пряму гілку вольт-амперної характеристики діода в режимі Graph Mode > Transfer Function Graph (рис. 1.7), змінюючи напругу на вході  $V_{in}$  від 0 до 1 В. Зробити скріншот отриманого графіка.

Побудувати зворотну гілку вольт-амперної характеристики діода в режимі Graph Mode > Transfer Function Graph, змінюючи напругу на вході  $V_{in}$  від -10 до 0 В. Зробити скріншот графіка.



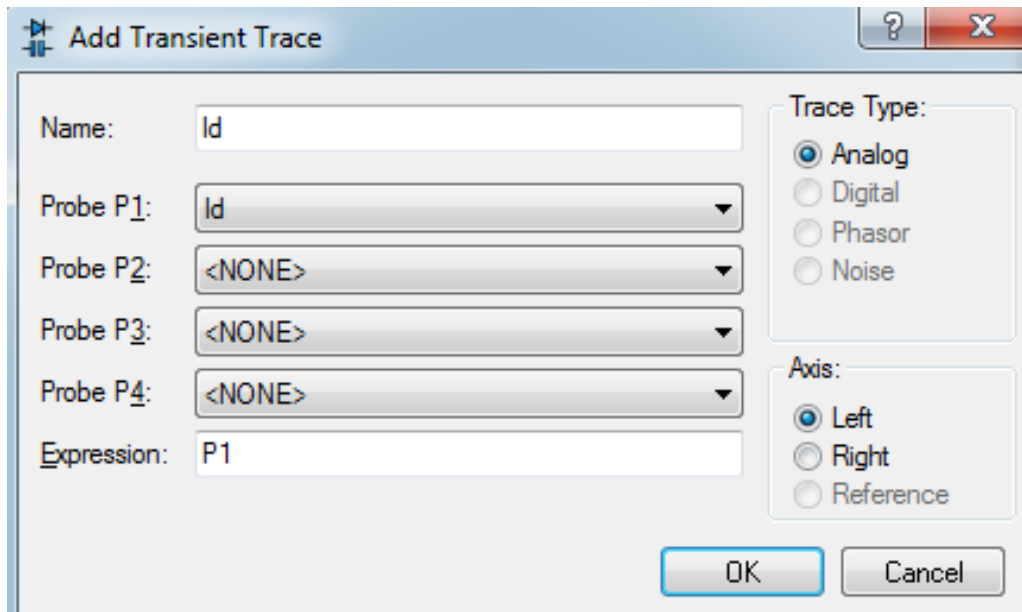


Рис. 1.7. Параметри для побудови прямої гілки ВАХ діода

3. Визначити прямий і зворотній опір діода.

Використовуючи ВАХ діода, визначити прямий статичний ( $R_{пр}$ ) і диференціальний ( $r_{пр}$ ) опір діода відповідно до формул (1.2).

Визначити зворотний статичний ( $R_{зв}$ ) опір діода при напрузі  $U_{зв} = 10$  В відповідно до формули (1.3).

4. За допомогою програми Proteus дослідити однопівперіодний випрямляч (рис. 1.8). Встановити амплітуду вхідної напруги (Amplitude) 12 В, а частоту (Frequency) – 50 Гц. Проаналізувати форму напруги на виході випрямляча без фільтруючого конденсатора (рис. 1.8,а) та при наявності конденсатора (рис. 1.8,б). Зробити скріншоти осцилограм напруги на вході та виході випрямляча для обох випадків. Дослідити вплив ємності конденсатора на величину пульсацій вихідної напруги. Підібрати ємність, при якій пульсації практично відсутні.

5. Дослідити двопівперіодний мостовий випрямляч. Підключити до входу випрямляча генератор синусоїдальних сигналів з амплітудою 12 В та частотою 50 Гц (рис. 1.9). Проаналізувати форму напруги на виході випрямляча без фільтруючого конденсатора (рис. 1.9, а) та при наявності конденсатора (рис. 1.9, б). Зробити скріншоти осцилограм напруги на вході та виході випрямляча для обох випадків. Дослідити вплив ємності конденсатора на величину пульсацій вихідної напруги. Підібрати ємність, при якій пульсації практично відсутні.

6. Оформити звіт з лабораторної роботи.

7. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

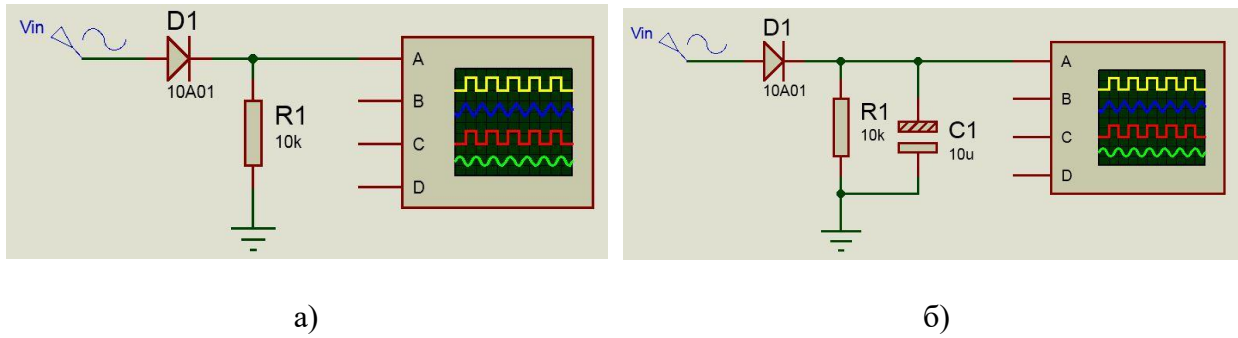


Рис. 1.8. Схема для дослідження однопівперіодного випрямляча

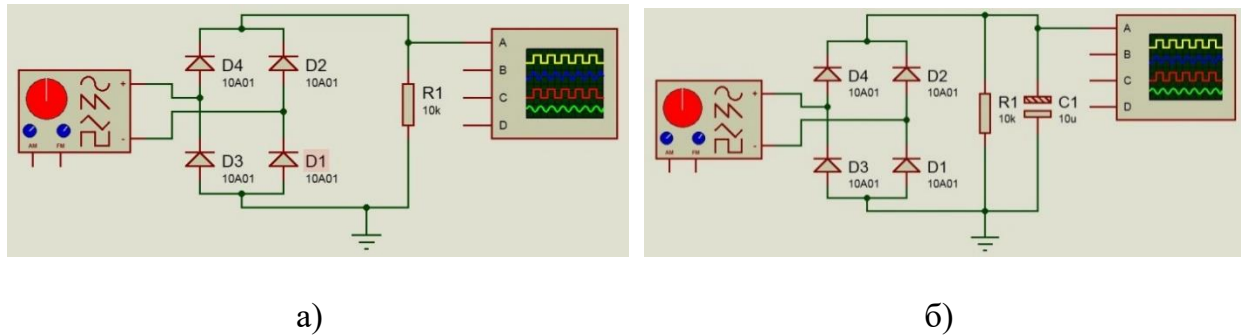


Рис. 1.9. Схема для дослідження двопівперіодного мостового випрямляча

## Зміст звіту

1. Тема і мета роботи.
2. Схеми для дослідження напівпровідникового діода.
3. Вольт-амперна характеристика діода (побудована за результатами вимірювання або скріншоти за результатами моделювання).
4. Значення прямого і зворотного опорів діода.
5. Осцилограми, отримані при дослідженні схем випрямлення.

## Контрольні запитання

1. Дайте визначення напівпровідникового діода.
2. Чим відрізняються між собою напівпровідники n та p типу?
3. Опишіть фізичні процеси, що протікають при формуванні p-n переходу.
4. Які процеси мають місце при прямому включенні p-n переходу?
5. Що відбувається при зворотному включенні p-n переходу?
6. Нарисуйте та поясніть ВАХ напівпровідникового діода.
7. Назвіть основні види напівпровідникових діодів. Поясніть особливості та призначення кожного виду.
8. Нарисуйте однопівперіодну схему випрямлення змінного струму. Поясніть принцип дії випрямляча.
9. Нарисуйте двопівперіодну мостову схему випрямлення змінного струму. Поясніть принцип дії.

## Лабораторна робота № 2

### НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ СТАБІЛІТРОН

**Мета роботи:** дослідити вольт-амперну характеристику напівпровідникового стабілітрона, навчитись визначати напругу стабілізації та диференційний опір стабілітрона, дослідити параметричний стабілізатор та амплітудний обмежувач.

#### Теоретичні відомості

**Напівпровідникові стабілітрони** застосовують для побудови стабілізаторів напруги та амплітудних обмежувачів. Принцип дії стабілітронів заснований на явищі електричного пробую р-п переходу.

**Під пробоем р-п переходу** розуміють значне зменшення зворотного опору переходу, що супроводжується зростанням зворотного струму при збільшенні прикладеної напруги. Розрізняють електричний і тепловий пробій. Електричний пробій є зворотним, тобто може виникати багато разів. В залежності від механізму розрізняють два види такого пробую: лавинний і тунельний. Тепловий пробій є незворотним. Такий пробій може відбутися лише один раз, при цьому р-п перехід руйнується [1, 5].

Розглянемо механізм лавинного пробую. При малій зворотній напрузі р-п перехід закритий, через границю напівпровідників протікає незначний струм, зумовлений переміщенням неосновних носіїв заряду. З підвищенням зворотної напруги зростає напруженість електричного поля в області р-п переходу, що викликає збільшення кінетичної енергії вільних електронів. При певному рівні зворотної напруги електрони набувають енергії, достатньої для іонізації атомів. В результаті зіткнення електрона з атомом вибивається новий електрон, який також розганяється за рахунок зовнішнього електричного поля і вибиває нові електрони. Таким чином відбувається лавиноподібне розмноження носіїв заряду, опір р-п переходу стрімко зменшується, а струм через перехід стрімко збільшується. Лавинний пробій виникає в р-п переходах, які мають достатньо велику ширину і досить високий опір напівпровідників.

В основі тунельного пробую лежить тунельний ефект, тобто «просочування» електронів крізь потенційний бар'єр, висота якого більша, ніж енергія електронів. Такий пробій найчастіше виникає у напівпровідникових приладах, що мають вузький перехід і мале значення питомого опору. При чому напруженість електричного поля повинна бути досить високою (більше  $10^5$  В/см). При такій напруженості енергетичні зони викривляються настільки, що енергія електронів валентної зони напівпровідника р-типу стає такою ж, як і енергія вільних електронів зони провідності напівпровідника n-типу. В результаті переходу електронів з області р в область n виникає тунельний струм і, як наслідок, тунельний пробій.

Тепловий пробій виникає в результаті розігрівання р-п переходу, коли кількість теплоти, що виділяється зворотним струмом в переході, більше кількості теплоти, що відводиться від нього. При розігріві р-п переходу відбувається інтенсивна генерація електронно-діркових пар і збільшення струму через перехід. Це, в свою чергу, призводить до подальшого збільшення зворотного струму і підвищення температури. В результаті струм через р-п перехід стрімко збільшується і настає тепловий пробій.

Вольт-амперна характеристика стабілітрона представлена на рис. 2.1, а. Розглянемо **основні параметри стабілітронів та їх типові значення** [1, 4].

1. Напруга стабілізації  $U_{ст}$  – напруга, при якій настає електричний пробій (одиниці – десятки вольт).

2. Мінімальний струм стабілізації  $I_{ст\ min}$  – мінімальний струм через стабілітрон, при якому настає електричний пробій (одиниці – десятки мА).

3. Максимальний струм стабілізації  $I_{ст\ max}$  – максимальний струм, при якому ще не настає тепловий пробій (десятки мА – кілька ампер).

4. Диференціальний опір  $r_{диф}$ , який визначається при заданому струмі на ділянці пробою як  $r_{диф} = \partial U_{ст} / \partial I_{ст}$  (десяткові частки Ом – сотні Ом).

5. Температурний коефіцієнт напруги стабілізації  $\alpha_{ст}$  (тисячні частки відсотка на один градус) – відносна зміна напруги стабілізації  $\Delta U_{ст}$  при зміні температури навколишнього середовища на  $\Delta T$ .

Включення стабілітрона в схему стабілізації вихідної напруги показано на рис. 2.1, б. Таку схему називають параметричним стабілізатором. Розглянемо принцип дії такого стабілізатора. При збільшенні вхідної напруги збільшується струм через обмежуючий резистор  $R_{обм}$  і стабілітрон, а падіння напруги на стабілітроні і навантаженні  $R_{н}$  залишається практично незмінним. При цьому зростає падіння напруги на резисторі  $R_{обм}$ . Іншими словами, майже весь приріст вхідної напруги падає на обмежуючому резисторі, а вихідна напруга залишається незмінною за рахунок своєї зворотної гілки ВАХ стабілітрона. При зменшенні вхідної напруги у схемі протікають аналогічні процеси. Зменшується струм через обмежуючий резистор  $R_{обм}$  і стабілітрон, зменшується падіння напруги на резисторі  $R_{обм}$ , а вихідна напруга залишається практично незмінною.

Параметри стабілізатора обираються таким чином, щоб задовольняти наступні нерівності:

$$I_{ст\ min} \leq \frac{U_{вх\ min} - U_{ст}}{R_{обм}} - I_{н\ max}, \quad I_{ст\ max} \geq \frac{U_{вх\ max} - U_{ст}}{R_{обм}} - I_{н\ min}, \quad (2.1)$$

де  $U_{вх\ max}$  і  $U_{вх\ min}$  – максимальне та мінімальне значення вхідної напруги;  
 $I_{н\ max}$  та  $I_{н\ min}$  – максимальний і мінімальний струм навантаження,  
 який буде протікати, відповідно, при  $R_{н\ min}$  та  $R_{н\ max}$ .

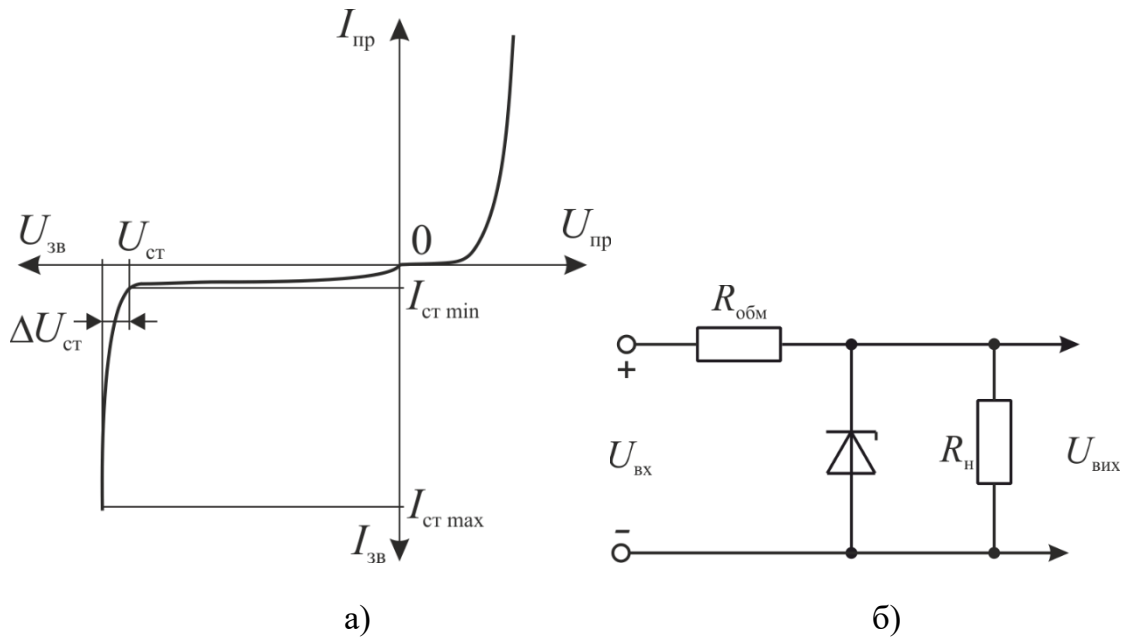


Рис. 2.1. Вольт-амперна характеристика стабілітрона (а) та його включення у схему стабілізації напруги (б)

### Порядок виконання роботи (для очної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.
2. Виміряти пряму гілку вольт-амперної характеристики (ВАХ) стабілітрона.

Зібрати схему (рис. 2.2). Підключити джерело живлення.

Підвищуючи напругу джерела живлення  $E$ , встановлювати певні значення прямого струму через стабілітрон  $I_{пр}$ , вимірюючи при цьому відповідні значення напруги  $U_{пр}$ . Виміряти 8-10 значень. Заповнити табл. 2.1.

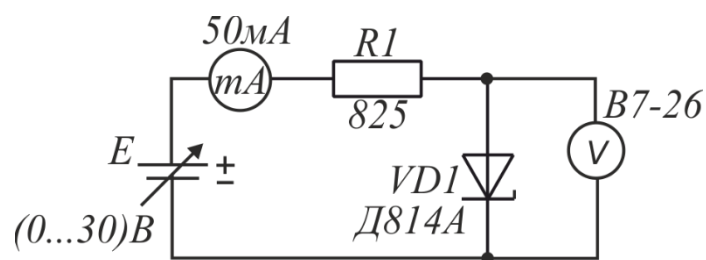


Рис. 2.2. Схема для вимірювання ВАХ стабілітрона

Таблица 2.1

### Результати вимірювання прямої гілки ВАХ стабілітрона

$I_{пр}, \text{мА}$									
$U_{пр}, \text{В}$									

### 3. Виміряти зворотну гілку ВАХ стабілітрона

У схемі для вимірювання ВАХ (рис. 2.2) змінити полярність включення стабілітрона.

Повторити вимірювання аналогічно п. 2. Заповнити табл. 2.2.

Таблиця 2.2

#### Результати вимірювання зворотної гілки ВАХ стабілітрона

$I_{зв}, \text{мА}$									
$U_{зв}, \text{В}$									

За результатами вимірювань побудувати ВАХ стабілітрона.

Використовуючи отриману ВАХ, визначити напругу стабілізації ( $U_{ст}$ ) і диференціальний зворотній опір стабілітрона ( $r_{диф}$ ) при струмі 10 мА

$$r_{диф} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}, \quad (2.2)$$

де  $\Delta U_{ст}$ ,  $\Delta I_{ст}$  – приріст напруги та відповідний приріст струму на ділянці пробою стабілітрона.

### 4. Дослідити параметричний стабілізатор

Зібрати схему (рис. 2.3). Підключити джерело живлення.

Підвищуючи напругу джерела живлення, встановлювати певні значення напруги на вході стабілізатора  $U_{вх}$ , вимірюючи відповідні значення вихідної напруги  $U_{вих}$ . Виміряти 8-10 значень. Заповнити табл. 2.3.

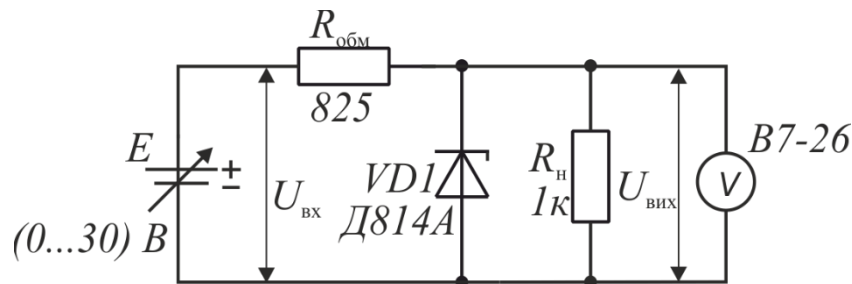


Рис. 2.3. Схема для дослідження параметричного стабілізатора

Таблиця 2.3

#### Результати дослідження параметричного стабілізатора

$U_{вх}, \text{В}$									
$U_{вих}, \text{В}$									

За результатами вимірювань побудувати передатну характеристику стабілізатора  $U_{вих} = f(U_{вх})$ . Визначити коефіцієнт стабілізації ( $K_{ст}$ ):

$$k_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вхmin}}}{\Delta U_{\text{вих}} / U_{\text{ст}}}, \quad (2.3)$$

де  $U_{\text{вх min}}$  – мінімальне значення вхідної напруги, при якому настає стабілізація;

$\Delta U_{\text{вх}}$  – приріст вхідної напруги на ділянці стабілізації;

$\Delta U_{\text{вих}}$  – приріст вихідної напруги на ділянці стабілізації;

$U_{\text{ст}}$  – напруга стабілізації.

5. Дослідити амплітудний обмежувач.

Зібрати схему (рис. 2.4). Подати на вхід змінну напругу  $U_{\text{вх}}=12$  В.

Підключити осцилограф спочатку до входу, а потім до виходу амплітудного обмежувача. Зарисувати осцилограми напруги  $U_{\text{вх}}(t)$  і  $U_{\text{вих}}(t)$ .

6. Оформити звіт з лабораторної роботи.

7. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

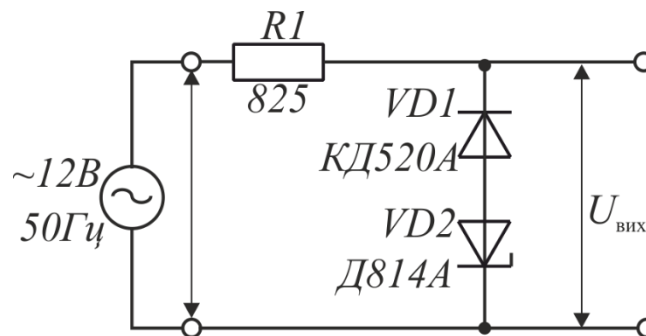


Рис. 2.4. Схема для дослідження амплітудного обмежувача

### Порядок виконання роботи

(для дистанційної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.

2. За допомогою програми Proteus дослідити параметричний стабілізатор (рис. 2.5). Тип стабілітрона обрати відповідно до табл. 2.4. Номер варіанту відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи.

Змінювати вхідну напругу  $V_{\text{in}}$  в межах від 0 до 12 В. Дослідити, як при цьому змінюється вихідна напруга  $V_{\text{out}}$ . В режимі Graph Mode > Transfer Function Graph побудувати передатну характеристику параметричного стабілізатора (залежність вихідної напруги від напруги на вході). Зробити скріншот отриманого графіка. За допомогою передатної характеристики визначити напругу стабілізації стабілітрона. Відповідно до формули (2.3) розрахувати коефіцієнт стабілізації ( $K_{\text{ст}}$ ).

3. Зібрати схему для дослідження вольт-амперної характеристики стабілітрона (рис. 2.6). В режимі Graph Mode > Transfer Function Graph побудувати вольт-амперну характеристику стабілітрона. Напругу на вході

змінювати в межах від  $U_{\min}$  до 1 В, де  $U_{\min} = -U_{cm} - 0,4 В$ . Наприклад, напруга стабілізації стабілітрона дорівнює 5 В, тоді  $U_{\min} = - 5,4 В$ .

Зробити скріншот отриманого графіка.

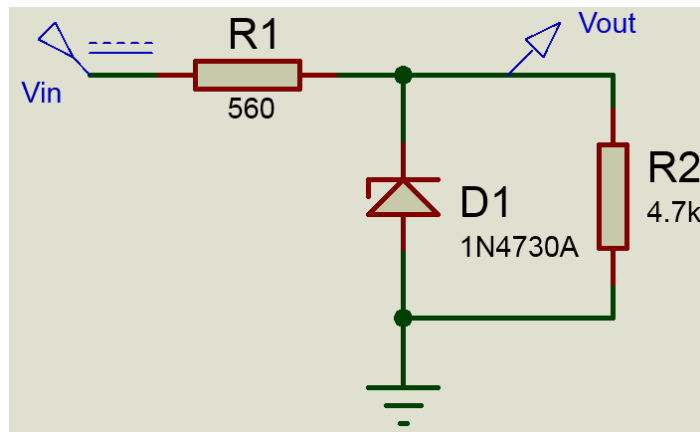


Рис. 2.5. Схема для дослідження параметричного стабілізатора напруги

Таблиця 2.4

### Варіанти завдань

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип стабілітрона	1N4730	1N4728	1N4732	1N4370	1N4734	1N4736	1N4738	1N4739	1N4737	1N4735

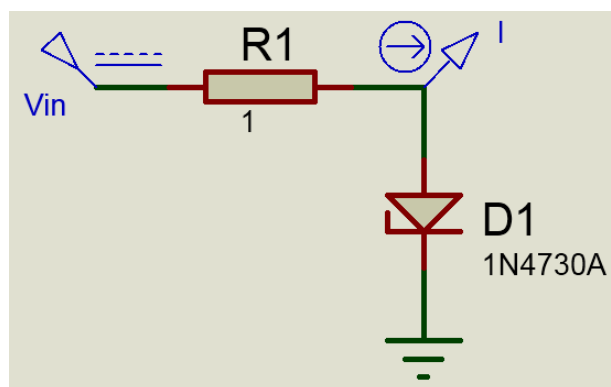


Рис. 2.6. Схема для дослідження ВАХ стабілітрона

Використовуючи отриману ВАХ, відповідно до формули (2.2) визначити диференціальний зворотній опір стабілітрона ( $r_{\text{диф}}$ ).

4. Дослідити амплітудний обмежувач (рис. 2.7). Подати на вхід синусоїдальну напругу амплітудою 12 В та частотою 50 Гц. Зробити скріншот осцилограм вхідної та вихідної напруги.

Підключити замість діоду другий стабілітрон (рис. 2.8). Дослідити, як при цьому змінилась форма сигналу на виході. Зробити скріншот осцилограми вихідної напруги.

5. Оформити звіт з лабораторної роботи.

6. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

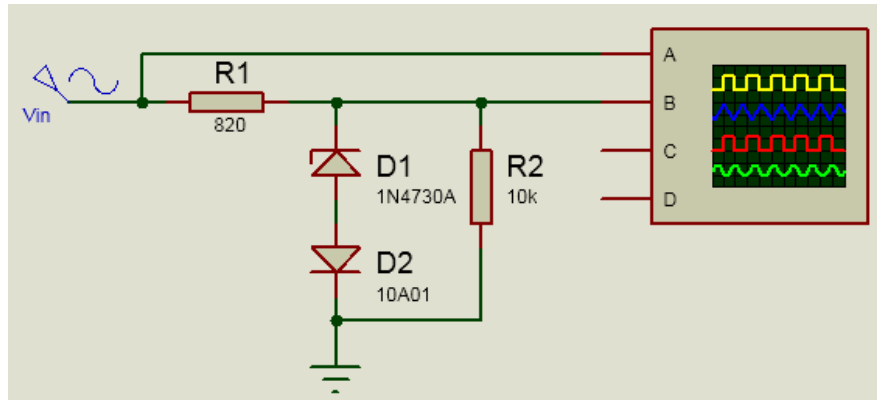


Рис. 2.7. Схема для дослідження одностороннього амплітудного обмежувача

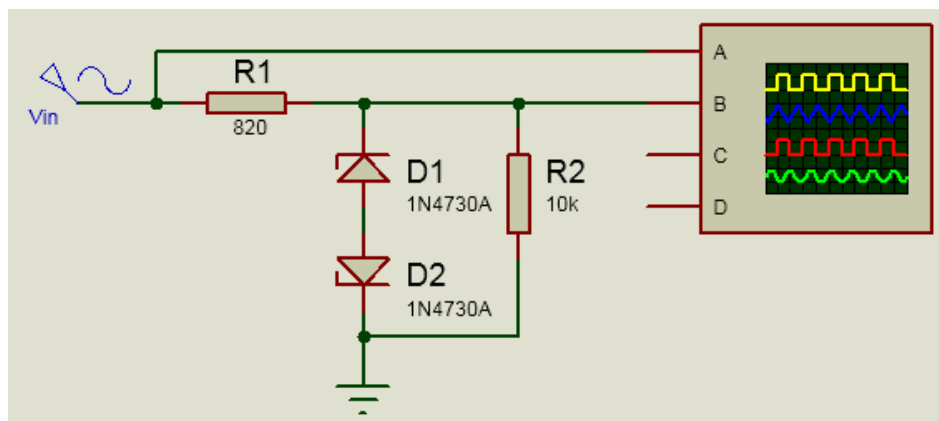


Рис. 2.8. Схема для дослідження двостороннього амплітудного обмежувача

### Зміст звіту

1. Тема і мета роботи.
2. Схеми для дослідження стабілітрона.
3. ВАХ стабілітрона і передатна характеристика параметричного стабілізатора (побудовані за результатами вимірювання або скріншоти за результатами моделювання).
4. Отримані значення напруги стабілізації, диференціального опору стабілітрона і коефіцієнта стабілізації.
5. Осцилограми, отримані при дослідженні амплітудних обмежувачів.

### Контрольні запитання

1. Які існують види пробою р-n переходу?

2. Опишіть механізм лавинного та тунельного пробію.
3. Поясніть, чому виникає тепловий пробій р-п переходу.
4. Нарисуйте та поясніть вольт-амперну характеристику стабілітрона.
5. Назвіть основні параметри стабілітронів.
6. Які функції може виконувати стабілітрон?
7. Для забезпечення стабілізації напруги використовується пряме чи зворотнє включення напівпровідникового стабілітрона?
8. Нарисуйте схему параметричного стабілізатора напруги. Поясніть принцип дії стабілізатора.
9. Нарисуйте схему одностороннього амплітудного обмежувача. Поясніть принцип дії.
10. Поясніть, як зміниться форма напруги на виході одностороннього амплітудного обмежувача, якщо замість діода включити другий стабілітрон.

### Лабораторна робота № 3 БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР

**Мета роботи:** дослідити вольт-амперні характеристики біполярного транзистора, навчитись визначати первинні та вторинні параметри транзистора, дослідити вплив напруги зміщення на характеристики транзисторного підсилювача.

#### Теоретичні відомості

Транзистори призначені для підсилення, генерації або перетворення електричних сигналів. В залежності від принципу дії та конструктивних ознак транзистори поділяються на два великих класи: біполярні і польові.

**Біполярними транзисторами** називають напівпровідникові прилади з двома р-п переходами і трьома виводами, підсилювальні властивості яких зумовлені явищами інжекції та екстракції носіїв заряду. Транзистори складаються з трьох областей (шарів) напівпровідника з електропровідностями різних типів. В залежності від типу електропровідності зовнішніх шарів розрізняють транзистори п-р-п і р-п-р типів (рис. 3.1). Електронно-дірковий перехід *III* називається емітерним, а перехід *II* – колекторним. Відповідні зовнішні напівпровідникові шари називають емітером (*E*) і колектором (*K*), а середній напівпровідниковий шар – базою (*B*). При виготовленні транзисторів емітер і колектор виконують низькоомними з

високою концентрацією носіїв заряду, а базу – високоомною з низькою концентрацією носіїв [3, 6, 7].

Розглянемо **фізичні процеси в транзисторі**. Схема руху носіїв заряду в транзисторі р-п-р типу представлена на рис. 3.2. При підключенні до виводів транзистора напруги  $E_1$  та  $E_2$  емітерний перехід зміщується у прямому напрямі, а колекторний – у зворотному. Під дією напруги  $E_1$  відбувається зменшення потенційного бар'єру в області емітерного переходу. В результаті цього дірки переміщуються з емітера до бази (інжекція дірок), а електрони – з бази до емітера. Внаслідок цього виникає струм емітера ( $I_e$ ). Так як концентрація дірок в емітері набагато більша концентрації електронів у базі, то в першому наближенні можна вважати, що емітерний струм зумовлений тільки переходом дірок. Невелика частина дірок після потрапляння до бази рекомбінує з електронами, приймаючи участь в утворенні струму бази ( $I_b$ ), проте основна частина дірок дифундує через тонкий базовий шар до колекторного переходу і втягується електричним полем цього переходу в колекторну область (екстракція дірок). Для компенсації заряду дірок у колектор із зовнішнього кола переміщуються електрони. Таким чином утворюється колекторний струм ( $I_k$ ). Чим більша величина напруги  $E_1$ , тим більша кількість дірок переходить до бази і втягується до колектору, що призводить до збільшення колекторного струму. Отже, для зміни колекторного струму за певним законом необхідно до емітерного р-п переходу прикласти невелику напругу, що змінюється за цим же законом. Таким чином, за допомогою біполярних транзисторів можна підсилювати електричні сигнали.

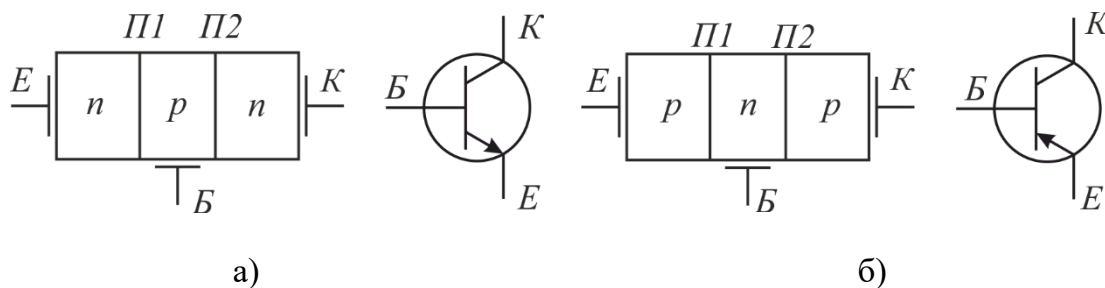


Рис. 3.1. Спрощена структура та умовне графічне позначення транзисторів n-p-n типу (а) і p-n-p типу (б)

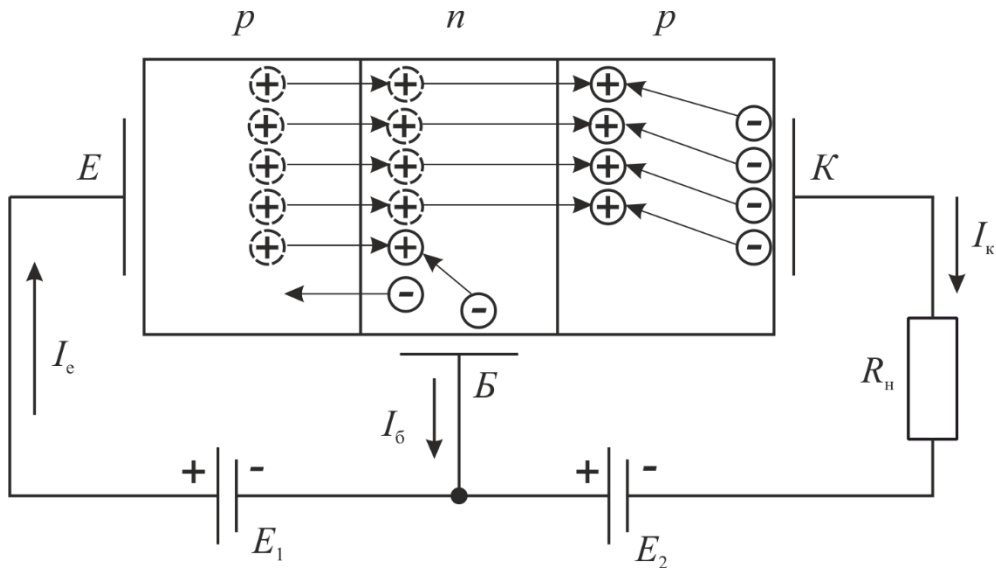


Рис. 3.2. Схема руху носіїв заряду в транзисторі

Співвідношення струмів у транзисторі:

$$I_e = I_k + I_b, \quad I_k = \alpha \cdot I_e = \beta \cdot I_b, \quad (3.1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт передачі емітерного струму ( $\alpha = 0,9-0,99$ );

$\beta$  – коефіцієнт передачі струму бази ( $\beta = 10-500$ ).

Розрізняють чотири основні режими роботи біполярного транзистора: активний, відсічки, насичення та активний інверсний [9].

В активному режимі зовнішньою напругою емітерний перехід зміщується в прямому напрямку, колекторний перехід – у зворотному. У цьому режимі існує пропорційна залежність між колекторним і базовим струмами, а також між колекторним і емітерним струмами. Активний режим використовується у підсилювальних пристроях.

В активному інверсному режимі колекторний перехід включений прямо, емітерний – зворотно. Такий режим практично не використовується.

У режимі відсічки обидва переходи транзистора за допомогою зовнішньої напруги зміщуються у зворотному напрямку. Транзистор в такому режимі закритий, його опір – максимальний, струми електродів – мінімальні (через колекторний перехід протікає незначний тепловий струм  $I_{к60}$ ).

У режимі насичення транзистора обидва p-n переходи включені прямо. Падіння напруги на транзисторі мінімальне, струм колектору досягає максимально можливого значення для даної схеми.

Режими відсічки та насичення використовуються в імпульсних пристроях, де біполярний транзистор виконує функції електронного ключа.

В залежності від того, який електрод транзистора є спільним для вхідного та вихідного кіл, розрізняють три схеми включення транзистора: із загальною базою, загальним емітером, загальним колектором.

Статичні вольт-амперні характеристики (ВАХ) транзистора відображають залежність між струмом і напругою на електродах транзистора за відсутності резисторів у його колах. Для кожної зі схем включення транзистора розрізняють сімейство входних ВАХ ( $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$  при  $U_{\text{вих}} = \text{const}$ ) та вихідних ВАХ ( $I_{\text{вих}} = f(U_{\text{вих}})$  при  $I_{\text{вх}} = \text{const}$ ). На рис. 3.3 представлені входні і вихідні вольт-амперні характеристики для схеми із загальним емітером [6].

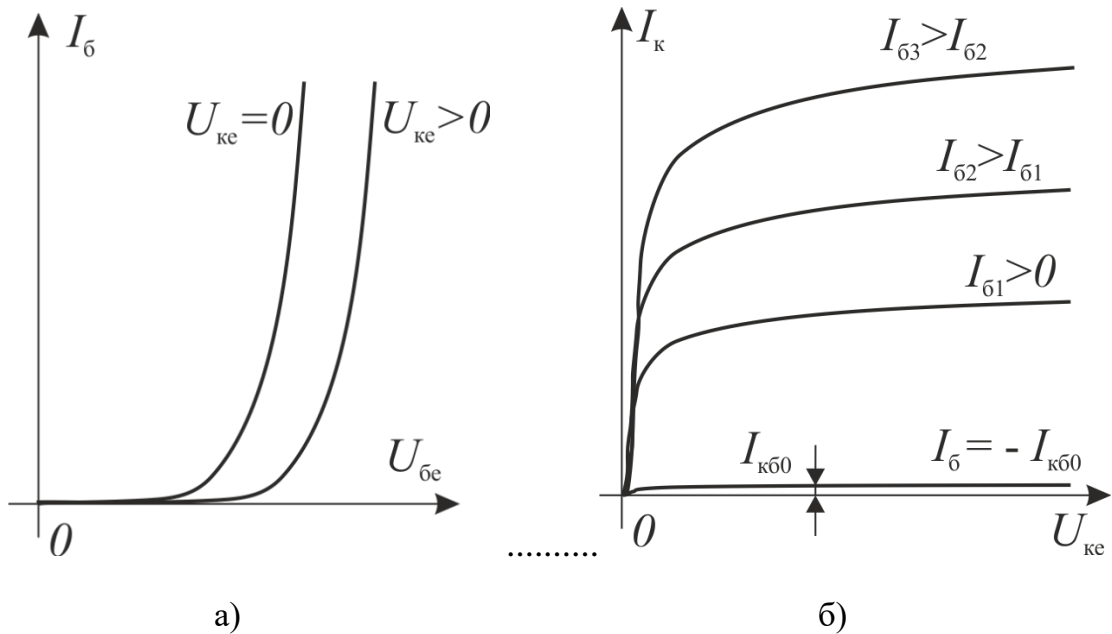


Рис. 3.3. Статичні входні (а) та вихідні (б) вольт-амперні характеристики транзистора для схеми із загальним емітером

Для аналізу транзисторних схем використовують різні еквівалентні схеми транзистора. На рис. 3.4, а представлена еквівалентна схема р-п-р транзистора, яка використовується для розрахунку транзисторних кіл за постійним струмом (режим великого сигналу). У цій схемі напівпровідникові діоди  $VD1$  і  $VD2$  замінюють, відповідно, емітерний і колекторний р-п переходи. Завдяки введенню в схему резистора  $r_б$  враховується опір базової області. Для відображення підсилювальних властивостей транзистора в схему включено джерело струму  $\alpha I_e$ .

При розрахунку транзисторних кіл за змінним струмом (режим малого сигналу) застосовується лінійна еквівалентна схема, представлена на рис. 3.4, б. У цій схемі  $r_e^*$  і  $r_k^*$  – диференціальні опори, відповідно, емітерного і колекторного переходів. При аналізі високочастотних кіл в еквівалентну схему вводиться конденсатор  $C_k$ , що дозволяє врахувати ємність колекторного переходу. Параметри  $r_б$ ,  $r_e^*$ ,  $r_k^*$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $C_k$  називають первинними або фізичними параметрами транзистора [5, 9].

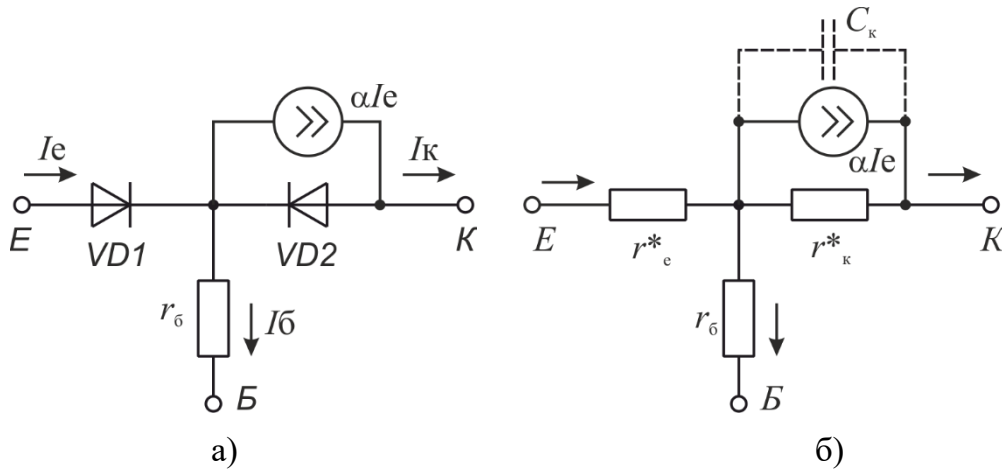


Рис. 3.4. Еквівалентна схема р-п-р транзистора в режимі великого сигналу (а) та малосигнальна еквівалентна схема (б)

Для будь-якої схеми включення транзистор може бути представлений у вигляді активного чотириполюсника, на вході якого діє напруга  $U_{вх}$  і протікає струм  $I_{вх}$ , а на виході – напруга  $U_{вих}$  і струм  $I_{вих}$ . Система рівнянь чотириполюсника з  $h$ -параметрами має вигляд

$$\begin{aligned} U_{вх} &= h_{11} \cdot I_{вх} + h_{12} \cdot U_{вих}, \\ I_{вих} &= h_{21} \cdot I_{вх} + h_{22} \cdot U_{вих}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $h_{11}$  – вхідний опір чотириполюсника;  
 $h_{12}$  – коефіцієнт зворотної передачі за напругою;  
 $h_{21}$  – коефіцієнт передачі за струмом;  
 $h_{22}$  – вихідна провідність чотириполюсника.

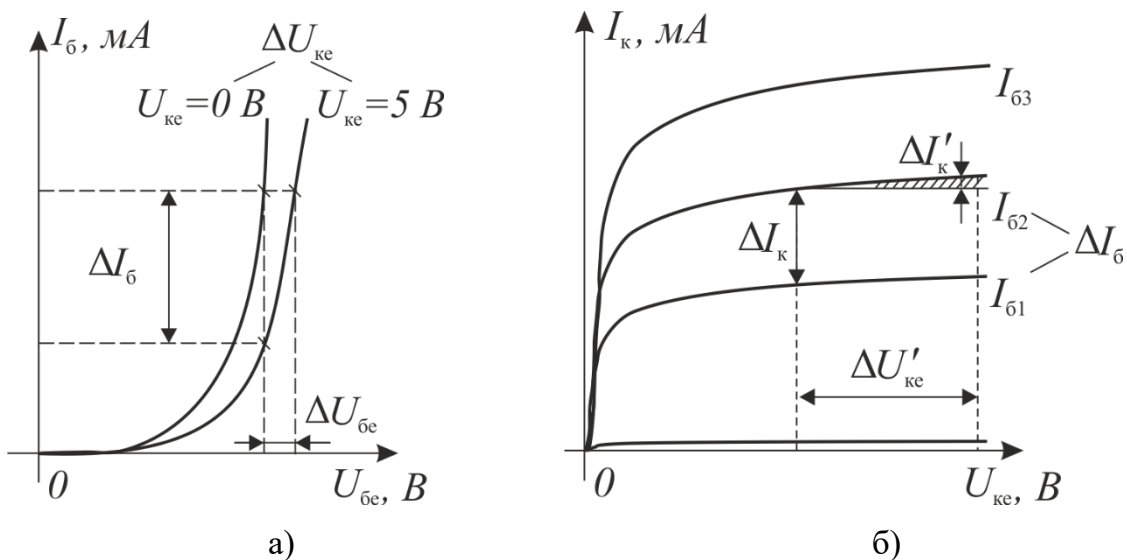


Рис. 3.5. Визначення  $h$ -параметрів транзистора для схеми із загальним емітером за вхідними (а) та вихідними (б) характеристиками

Для схеми із загальним емітером  $h$ -параметри розраховуються за наступними формулами:

$$h_{11} = \left. \frac{dU_{\text{бе}}}{dI_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{ке}}=\text{const}}, \quad h_{12} = \left. \frac{dU_{\text{бе}}}{dU_{\text{ке}}} \right|_{I_{\text{б}}=\text{const}}, \quad h_{21} = \left. \frac{dI_{\text{к}}}{dI_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{ке}}=\text{const}}, \quad h_{22} = \left. \frac{dI_{\text{к}}}{dU_{\text{ке}}} \right|_{I_{\text{б}}=\text{const}}. \quad (3.3)$$

Для визначення  $h$ -параметрів можна використовувати графоаналітичний метод. При цьому параметри  $h_{11}$ ,  $h_{12}$  визначаються за допомогою вхідних ВАХ транзистора (див. рис. 3.5, а), а параметри  $h_{21}$ ,  $h_{22}$  – за допомогою вихідних ВАХ (див. рис. 3.5, б).

### Порядок виконання роботи (для очної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.
2. Виміряти вхідні ВАХ біполярного транзистора.  
Зібрати схему для дослідження транзистора (рис. 3.6).

Встановити  $U_{\text{ке}} = 0$ . За допомогою змінного резистора  $R_1$  задавати певні значення струму бази  $I_{\text{б}}$ , вимірюючи відповідні значення напруги  $U_{\text{бе}}$ . Результати занести до табл. 3.1.

Встановити  $U_{\text{ке}} = 5$  В. Повторити виміри аналогічно попередньому пункту. Результати занести до табл. 3.1. При вимірюванні вхідних ВАХ струм бази не повинен перевищувати 1 мА.

Згідно отриманих даних побудувати вхідні ВАХ транзистора.

3. Виміряти вихідні ВАХ транзистора.

Встановити струм бази  $I_{\text{б}} = 50$  мкА. Змінюючи напругу джерела живлення  $E_2$ , задавати певні значення напруги  $U_{\text{ке}}$ , при цьому вимірювати відповідні значення колекторного струму  $I_{\text{к}}$ . Результати занести до табл. 3.2.

Провести вимірювання аналогічно попередньому пункту при струмі бази 100 мкА і 150 мкА. Результати занести до табл. 3.2.

Побудувати вихідні ВАХ транзистора.

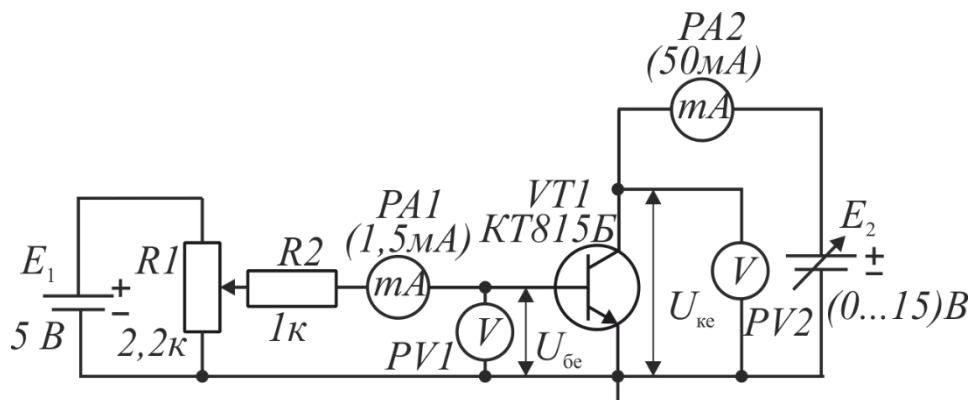


Рис. 3.6. Схема для дослідження біполярного транзистора

## Результати вимірювання вхідних ВАХ біполярного транзистора

$U_{ке} = 0 \text{ В}$	$I_{\text{б}}, \text{ мА}$								
	$U_{\text{бe}}, \text{ В}$								
$U_{ке} = 5 \text{ В}$	$I_{\text{б}}, \text{ мА}$								
	$U_{\text{бe}}, \text{ В}$								

## Результати вимірювання вихідних ВАХ біполярного транзистора

$I_{\text{б}} = 50 \text{ мкА}$		$I_{\text{б}} = 100 \text{ мкА}$		$I_{\text{б}} = 150 \text{ мкА}$	
$U_{ке}, \text{ В}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$	$U_{ке}, \text{ В}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$	$U_{ке}, \text{ В}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$
...					

4. За статичними ВАХ графоаналітичним методом визначити  $h$ -параметри транзистора для схеми із загальним емітером при  $U_{ке} = 5 \text{ В}$  і  $I_{\text{б}} = 100 \text{ мкА}$  (див. рис. 3.5).

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{\text{бe}}}{\Delta I_{\text{б}}} \Big|_{U_{ке}=\text{const}}, \quad h_{12e} = \frac{\Delta U_{\text{бe}}}{\Delta U_{ке}} \Big|_{I_{\text{б}}=\text{const}}, \quad h_{21e} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \Big|_{U_{ке}=\text{const}}, \quad h_{22e} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{ке}} \Big|_{I_{\text{б}}=\text{const}}. \quad (3.4)$$

де  $\Delta I_{\text{б}}, \Delta I_{\text{к}}, \Delta U_{\text{бe}}, \Delta U_{ке}$  – приріст струмів і напруг.

5. Розрахувати значення  $h$ -параметрів для схем із загальною базою і загальним колектором:

$$h_{11\text{б}} = \frac{h_{11e}}{1+h_{21e}}, \quad h_{12\text{б}} = \frac{h_{11e} \cdot h_{22e}}{1+h_{21e}}, \quad h_{21\text{б}} = \frac{h_{21e}}{1+h_{21e}}, \quad h_{22\text{б}} = \frac{h_{22e}}{1+h_{21e}}, \quad (3.5)$$

$$h_{11\text{к}} = h_{11e}, \quad h_{12\text{к}} = \frac{1}{1+h_{21e}}, \quad h_{21\text{к}} = 1+h_{21e}, \quad h_{22\text{к}} = h_{22e}.$$

6. Розрахувати значення фізичних параметрів транзистора

$$r_e^* = \frac{h_{12e}}{h_{22e}}, \quad r_k^* = \frac{1+h_{21e}}{h_{22e}}, \quad r_{\text{б}} = h_{11e} - \frac{h_{12e}}{h_{22e}}, \quad \beta = h_{21e}, \quad \alpha = \frac{h_{21e}}{1+h_{21e}}. \quad (3.6)$$

де  $r_e^*, r_k^*$  – диференціальні опори емітерного і колекторного переходів,  
 $r_{\text{б}}$  – опір бази,  
 $\beta$  – коефіцієнт передачі струму бази,  
 $\alpha$  – коефіцієнт передачі струму емітера.

7. Оформити звіт з лабораторної роботи.
8. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

### Порядок виконання роботи (для дистанційної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.
2. За допомогою програми Proteus дослідити біполярний транзистор (рис.3.7). Тип транзистора вибрати відповідно до табл. 3.3. Номер варіанту відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи.

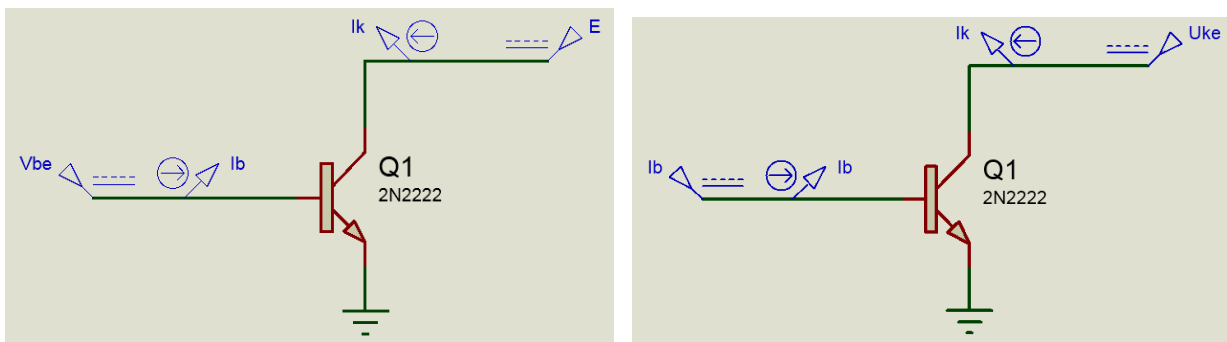
Таблиця 3.3

#### Варіанти завдань

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип транзистора	2N2222	2N1711	2N3390	2N3391	2N3392	2N3393	2N3415	2N3416	2N3417	2N3859

2.1. Зібрати схему для дослідження входних вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзистора (рис. 3.7, а). Побудувати входні ВАХ транзистора в режимі Graph Mode > Transfer Function Graph для двох значень колекторної напруги: 0 та 5 В. При цьому напругу в колі база-емітер змінювати від 0 до 1 В (рис. 3.8). Зробити скріншот отриманого графіка.

2.2. Зібрати схему для дослідження вихідних ВАХ транзистора (рис. 3.7, б). В параметрах базового джерела обрати пункт Current Source (Джерело струму). Побудувати вихідні ВАХ транзистора в режимі Graph Mode > Transfer Function Graph для трьох значень базового струму: 100 мкА, 200 мкА та 300 мкА. При цьому напругу в колі колектор-емітер змінювати від 0 до 10 В (рис. 3.9). Зробити скріншот отриманого графіка.



а)

б)

Рис. 3.7. Схеми для дослідження біполярного транзистора

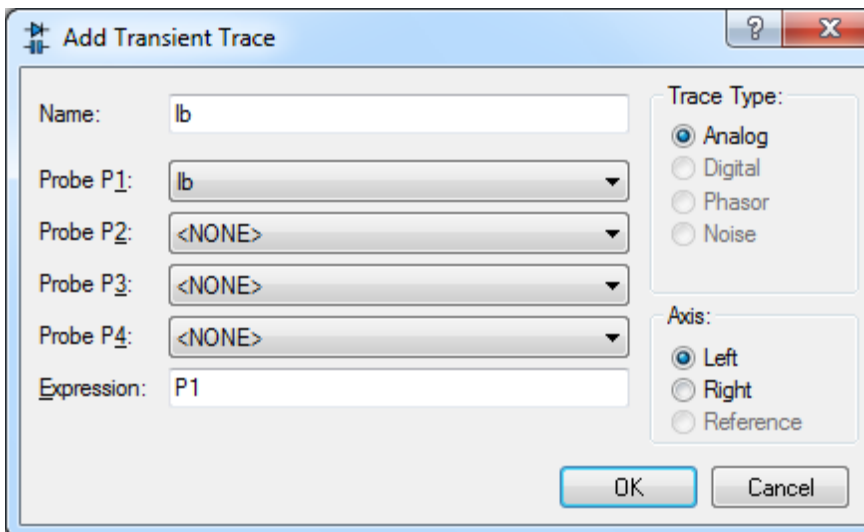
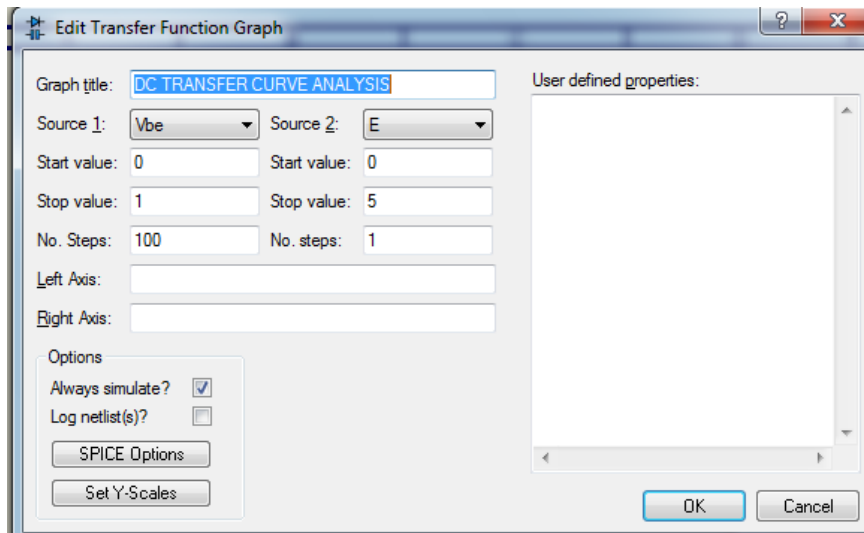
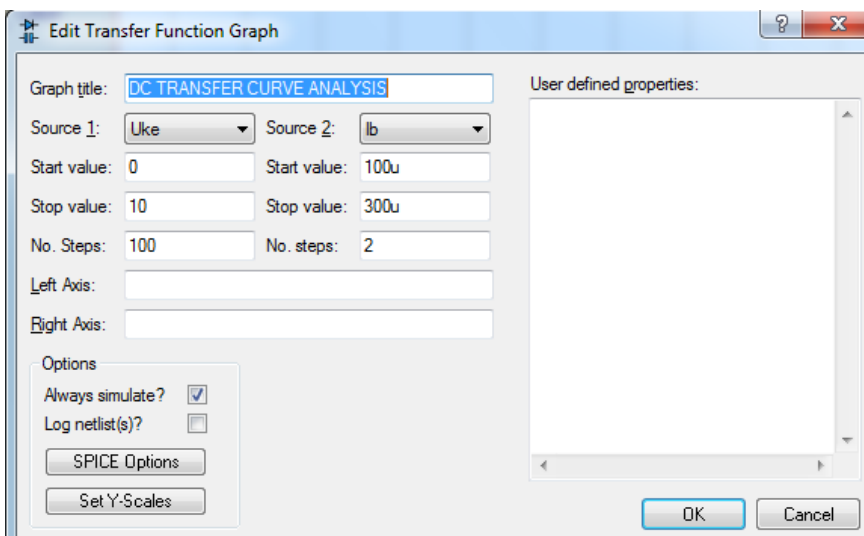


Рис. 3.8. Параметри для побудови вхідних ВАХ транзистора



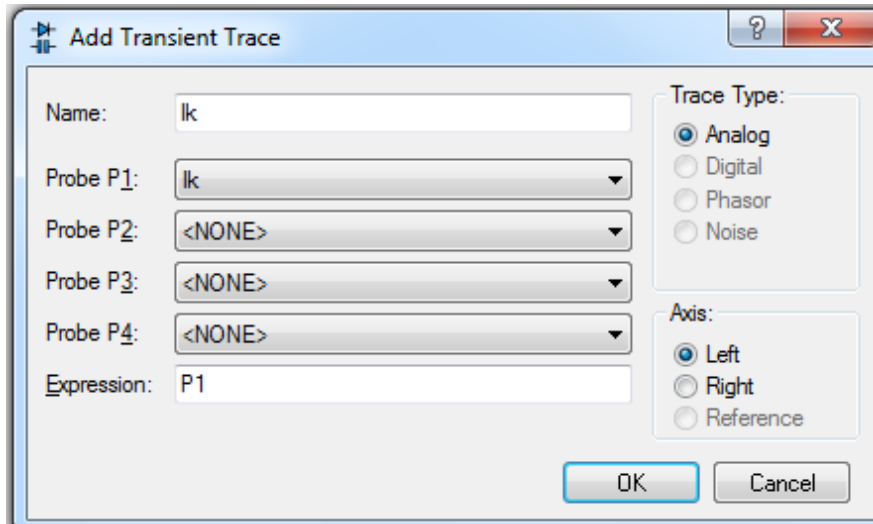


Рис. 3.9. Параметри для побудови вихідних ВАХ транзистора

3. За допомогою отриманих ВАХ відповідно до формул (3.4) визначити графоаналітичним методом  $h$ -параметри транзистора для схеми із загальним емітером при  $U_{ке}=5$  В і  $I_{б}=200$  мкА (див. рис. 3.5).

4. Розрахувати значення  $h$ -параметрів для схем із загальною базою і загальним колектором (див. формули (3.5)).

5. Відповідно до формул (3.6) розрахувати значення фізичних параметрів транзистора.

6. Дослідити підсилювач на біполярному транзисторі (рис.3.10). Подати на вхід підсилювача синусоїдальну напругу амплітудою 10 мВ, частотою 1 кГц, задати напругу зміщення 700 мВ. За допомогою віртуального осцилографа визначити амплітуду вихідної напруги, розрахувати коефіцієнт підсилення за напругою (відношення амплітуди вихідної напруги до амплітуди вхідної). Змінити напругу зміщення, проаналізувати як при цьому зміниться форма вихідного сигналу.

7. Оформити звіт з лабораторної роботи.

8. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

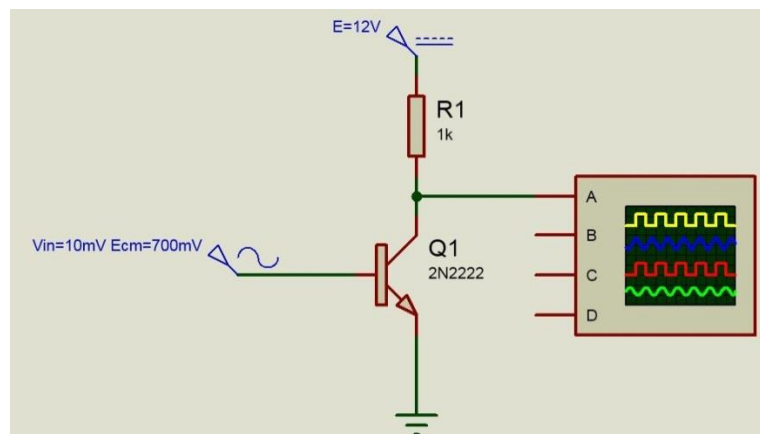


Рис. 3.10. Дослідження транзисторного підсилювача

## Зміст звіту

1. Тема і мета роботи.
2. Схеми для дослідження транзистора.
3. Вхідні і вихідні ВАХ транзистора (побудовані за результатами вимірювання або скріншоти за результатами моделювання).
4. Отримані значення  $h$ -параметрів для всіх трьох схем включення транзистора.
5. Значення фізичних параметрів транзистора.

## Контрольні запитання

1. Назвіть види транзисторів.
2. З яких областей складається біполярний транзистор? Які особливості кожної області?
3. Поясніть, які фізичні процеси відбуваються в біполярному транзисторі.
4. Нарисуйте та поясніть еквівалентну схему біполярного транзистора в режимі великого сигналу.
5. Нарисуйте та поясніть малосигнальну еквівалентну схему біполярного транзистора.
6. Назвіть первинні (фізичні) та вторинні параметри біполярного транзистора.
7. Поясніть фізичний зміст  $h$ -параметрів.
8. Нарисуйте вхідні та вихідні ВАХ транзистора для схеми із загальним емітером.
9. Опишіть режими роботи біполярного транзистора.

## Лабораторна робота № 4

### ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

**Мета роботи:** дослідити вольт-амперні характеристики польового транзистора з керуючим р-n переходом та МДН-транзистора з індукованим каналом, навчитись визначати параметри транзисторів, дослідити схеми підсилення на польових транзисторах.

### Теоретичні відомості

**Польовими транзисторами** називають напівпровідникові прилади, робота яких заснована на модуляції опору напівпровідникового матеріалу поперечним електричним полем. Такі транзистори також називають уніполярними внаслідок того, що у них в перенесенні струму беруть участь носії заряду лише одного типу (дірки або електрони). Розрізняють польові

транзистори зі структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори) та з керуючим р-п переходом. МДН-транзистори бувають з індукованим та вбудованим каналом [2, 3, 5].

Спрощена структура польового транзистора з керуючим р-п переходом та п-каналом представлена на рис. 4.1, а. Основу такого транзистора становить напівпровідникова пластина п-типу, що містить дві напівпровідникові області р-типу. Виводи, прилеглі до торців пластини, називають виток (В) і стоком (С), а вивід від області р-типу називають затвором (З) [7].

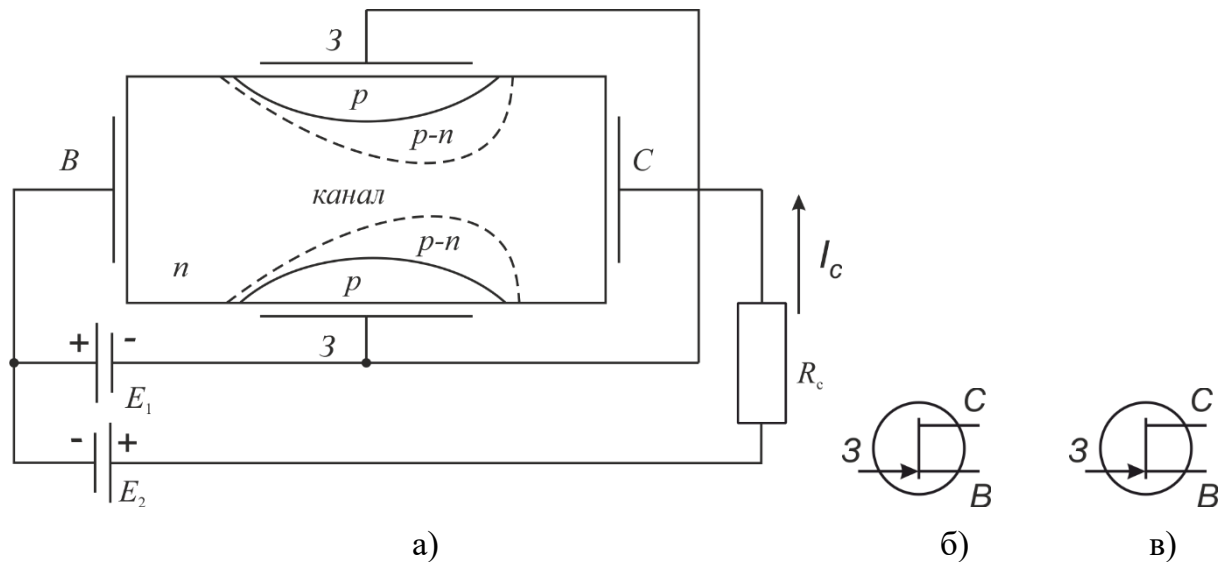


Рис. 4.1. Спрощена структура польового транзистора з керуючим р-п переходом (а); умовні позначення транзистора, що має канал п-типу (б) і р-типу (в)

Під дією ЕРС  $E_2$  в колі витік-стік виникає струм, величина якого залежить від опору каналу (напівпровідникової області між р-п переходами) та опору навантаження  $R_c$ . Полярність ЕРС  $E_1$  обрана з міркувань забезпечення зміщення у зворотному напрямку р-п переходів між витком і затвором. При цьому, чим більша напруга затвор-витік, тим ширшими стають області р-п переходів, опір яких значно вищий, ніж опір каналу. Підвищення ЕРС  $E_1$  зумовлює розширення областей р-п переходів і звуження каналу. Внаслідок цього опір каналу збільшується, струм між витком і стоком зменшується. При деякій напрузі затвор-витік, яку називають напругою відсічки, напівпровідникові області перекриваються, канал зникає, і струм стоку стає рівним нулю. Отже, для зміни за певним законом струму стоку, необхідно між витком і затвором прикласти невелику напругу, яка змінюється за цим же законом. Таким чином, польові транзистори з керуючим р-п переходом забезпечують можливість підсилення електричних сигналів.

На рис. 4.1 приведені умовні позначення транзистора, що має канал п-типу (рис. 4.1, б) та канал р-типу (рис. 4.1, в). Основними для польових транзисторів є стоко-затворні характеристики (рис. 4.2, а) та вихідні вольт-амперні характеристики (рис. 4.2, б) [2, 3, 5].

На рис. 4.3, а зображена спрощена структура та схема включення МДН-транзистора з індукованим каналом n-типу. Такий транзистор містить напівпровідникову пластину р-типу (підкладку), в якій формуються дві напівпровідникові області n-типу з високою концентрацією основних носіїв заряду. До цих областей підключаються стік (C) та витік (B). Підкладка (П) зазвичай підключається до витіку. Затвор (З) відділяється від напівпровідникової пластини шаром діелектрика. Якщо в якості діелектрика використовується оксид кремнію ( $SiO_2$ ), то отримується транзистор зі структурою метал-оксид-напівпровідник (МОН-транзистор) [1].

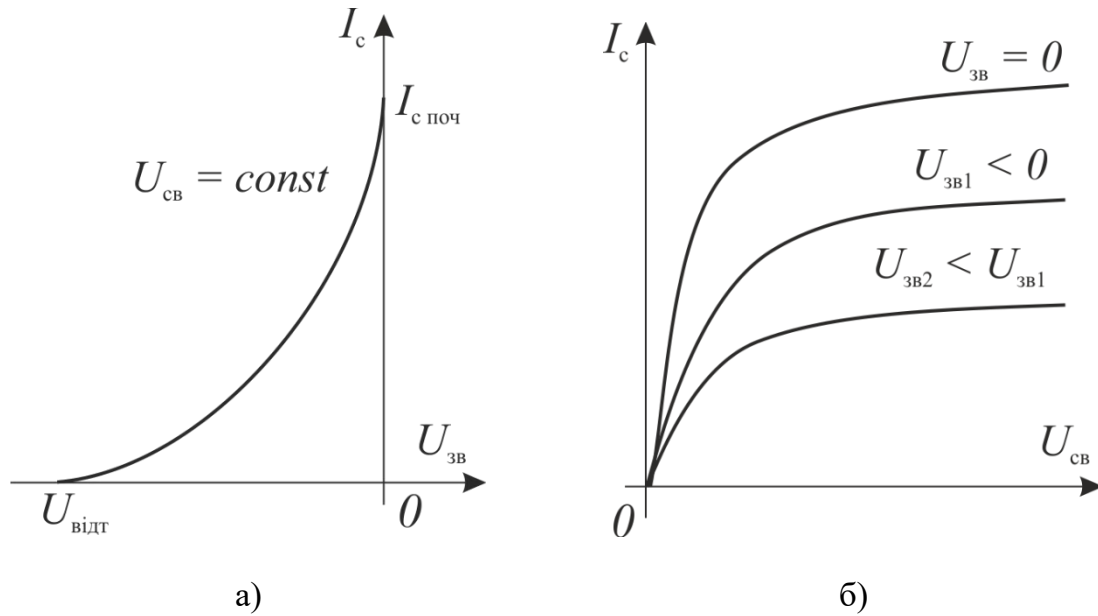


Рис. 4.2. Стоко-затворна (а) і вихідні вольт-амперні характеристики (б) польового транзистора з керуючим р-п переходом і n-каналом

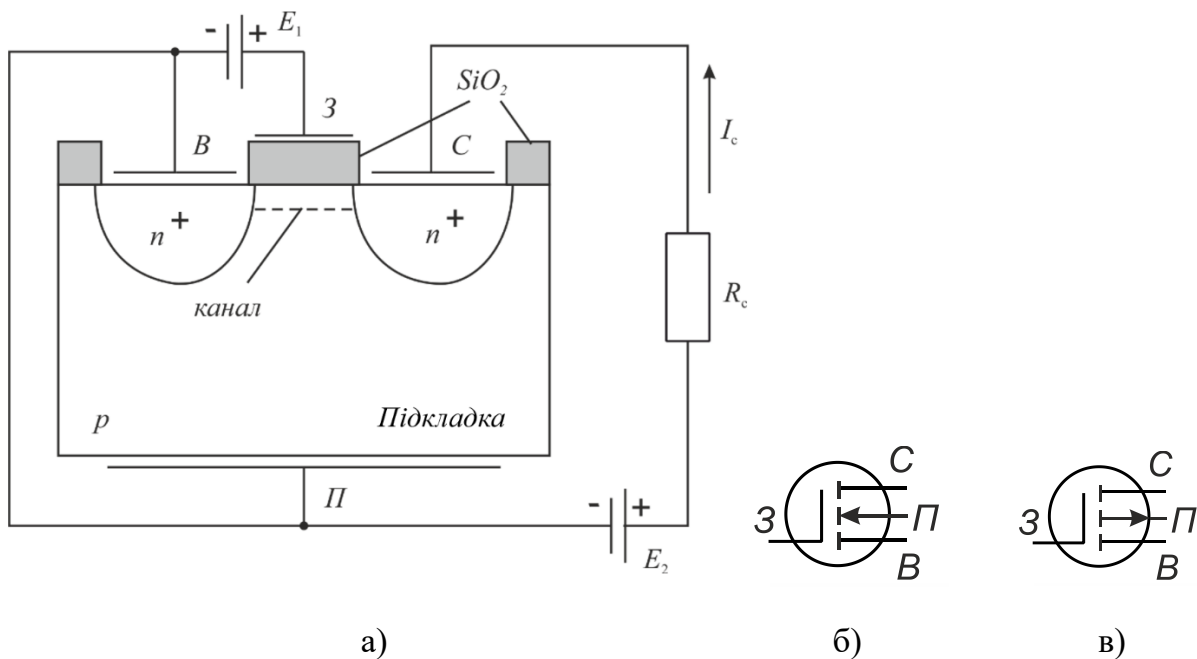


Рис. 4.3. Спрощена структура МДН-транзистора з індукованим каналом (а); умовні позначення МДН-транзистора з індукованим каналом n-типу (б) і р-типу (в)

Розглянемо принцип дії МДН-транзистора з індукованим каналом. Якщо напруга затвор-витік дорівнює нулю, то канал для протікання струму між стоком і витком відсутній, струм стоку дорівнює нулю. При підвищенні напруги затвор-витік виникає електричне поле між підкладкою та затвором. Під дією цього поля відбувається відштовхування дірок від затвора і притягування електронів з підкладки до затвора. При деякому значенні напруги затвор-витік, яке називають пороговою напругою, поблизу затвора виникає напівпровідниковий шар, в якому концентрація електронів вища за концентрацію дірок. Таким чином виникає канал n-типу через який між стоком і витком починає протікати струм під дією ЕРС  $E_2$ . При подальшому підвищенні напруги затвор-витік канал розширюється, його опір зменшується і струм стоку збільшується. Отже, за допомогою напруги затвор-витік можна змінювати струм стоку. Таким чином, МДН-транзистори також забезпечують можливість підсилення електричних сигналів.

На рис. 4.3 зображено умовне позначення МДН-транзисторів з індукованим каналом n-типу (рис. 4.3, б) та р-типу (рис. 4.3, в). Стоко-затворна характеристика транзистора з індукованим каналом приведена на рис. 4.4, а, вихідні ВАХ – на рис. 4.4, б [2, 3, 5].

У МДН-транзисторах з вбудованим каналом при нульовій напрузі затвор-витік вже існує канал для протікання струму між стоком і витком. У таких транзисторах при одній полярності напруги затвор-витік канал розширюється (режим збагачення), а при іншій полярності – звужується (режим збіднення).

Основною перевагою польових транзисторів є високий вхідний опір. Так у транзисторів з керуючим р-п переходом вхідний опір досягає значень  $10^7$ - $10^9$  Ом, а у МДН-транзисторів –  $10^{10}$ - $10^{14}$  Ом.

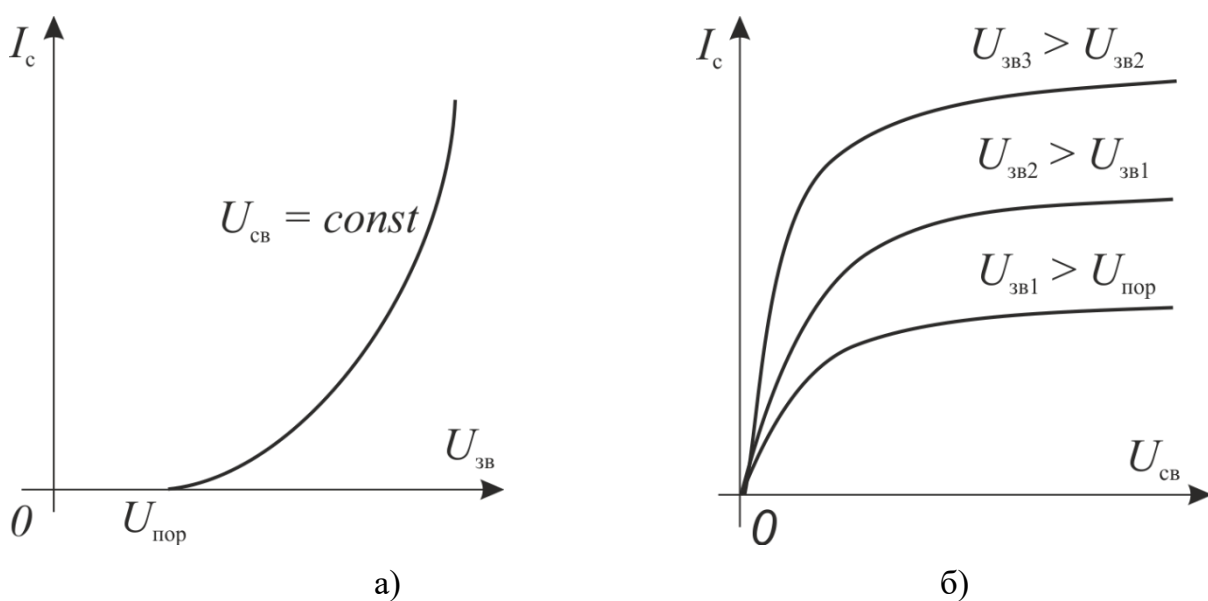


Рис. 4.4. Стоко-затворна (а) і вихідні вольт-амперні характеристики (б)  
МДН-транзистора з індукованим n-каналом

### Основні параметри польових транзисторів

#### 1. Крутизна стоко-затворної характеристики

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зв}} \right|_{U_{св}=\text{const}}$$

#### 2. Внутрішній опір

$$R_i = \left. \frac{dU_{св}}{dI_c} \right|_{U_{зв}=\text{const}}$$

3. Початковий струм стоку ( $I_{c \text{ поч}}$ ) (див. рис. 4.2, а).
4. Напряга відсічки ( $U_{відг}$ ) (див. рис. 4.2, а).
5. Порогова напруга ( $U_{пор}$ ) (див. рис. 4.4, а).
6. Опір стік-витік у відкритому стані ( $R_{св \text{ відкр}}$ ).
7. Максимально допустимий струм стоку ( $I_{c \text{ max}}$ ).
8. Максимально допустима напруга стік-витік ( $U_{св \text{ max}}$ ).
9. Максимально допустима напруга затвор-витік ( $U_{зв \text{ max}}$ ).
10. Максимально допустима потужність ( $P_{\text{max}}$ ).

### Порядок виконання роботи

(для очної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.
2. Виміряти стоко-затворну характеристику польового транзистора з керуючим р-n переходом.

Зібрати схему для дослідження (рис. 4.5).

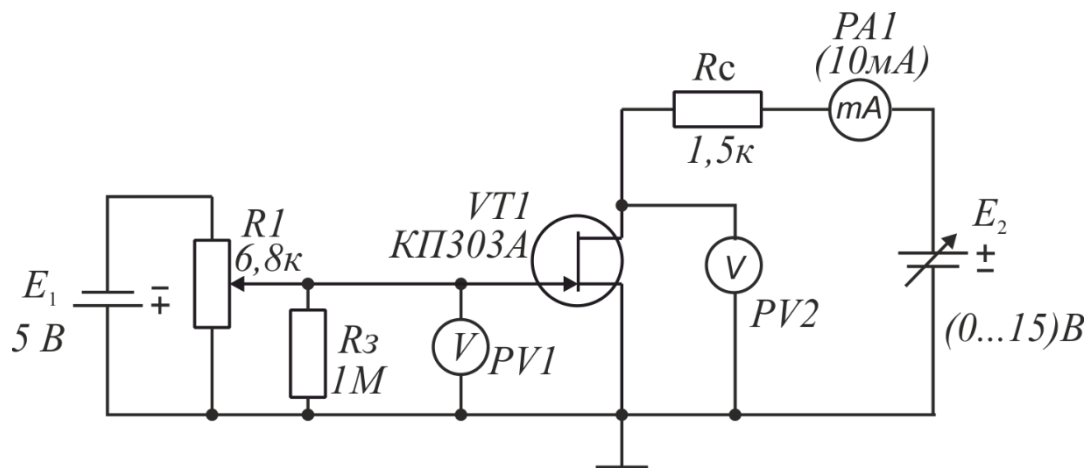


Рис. 4.5. Схема для дослідження польового транзистора з керуючим р-n переходом

Встановити  $E_2 = 10 \text{ В}$ . За допомогою змінного резистора  $R_1$  підвищувати

напругу затвор-витік ( $U_{зв}$ ), вимірюючи відповідні значення струму стоку ( $I_c$ ). Виміряти 8-10 значень, заповнити табл. 4.1.

Таблиця 4.1

**Результати вимірювання стоко-затворної характеристики польового транзистора з керуючим р-п переходом**

$U_{зв}, \text{В}$									
$I_c, \text{мА}$									

Побудувати стоко-затворну характеристику. Визначити початковий струм стоку  $I_{c \text{ поч}}$ , напругу відсічки  $U_{відт}$  і крутизну стоко-затворної характеристики

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}} \right|_{U_{св}=\text{const}} . \text{ Робочу точку при визначенні крутизни обрати довільно.}$$

3. Виміряти вихідні ВАХ польового транзистора з керуючим р-п переходом.

Встановити напругу затвор-витік  $U_{зв} = 0,5 \text{ В}$ . Змінюючи напругу джерела  $E_2$ , встановлювати певні значення струму стоку ( $I_c$ ), вимірюючи при цьому напругу стік-витік ( $U_{св}$ ). Виміряти 8-10 значень.

Повторити вимірювання аналогічно попередньому пункту при  $U_{зв} = 1 \text{ В}$  і  $U_{зв} = 1,5 \text{ В}$ . Заповнити табл. 4.2.

Побудувати вихідні ВАХ. Визначити внутрішній опір транзистора

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{св}}{\Delta I_c} \right|_{U_{зв}=\text{const}} . \text{ Робочу точку при визначенні внутрішнього опору обрати довільно.}$$

Таблиця 4.2

**Результати вимірювання вихідних ВАХ польового транзистора з керуючим р-п переходом**

$U_{зв} = 0,5 \text{ В}$		$U_{зв} = 1 \text{ В}$		$U_{зв} = 1,5 \text{ В}$	
$U_{св}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$	$U_{св}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$	$U_{св}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$
...					

4. Виміряти стоко-затворну характеристику МДН-транзистора з індукованим каналом.

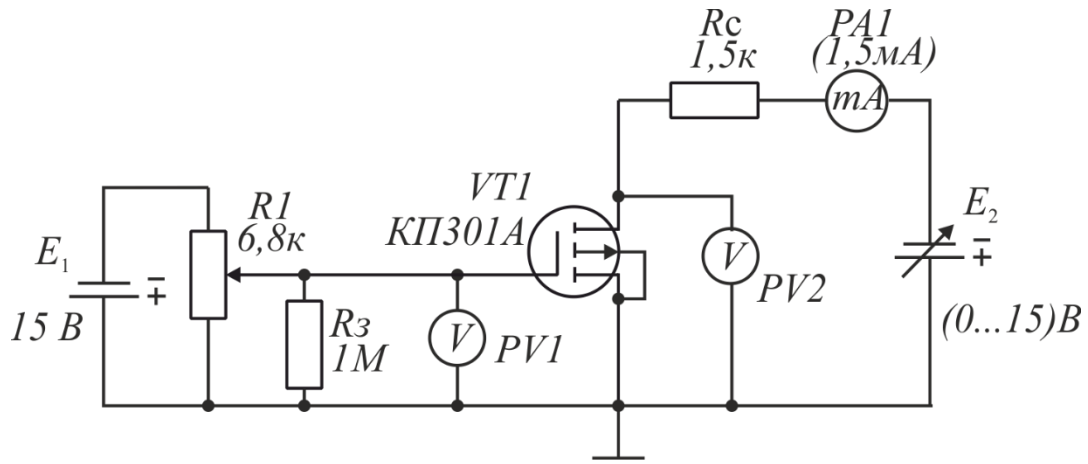


Рис. 4.6. Схема для дослідження МДН-транзистора з індукованим каналом

Зібрати схему для дослідження (рис. 4.6).

Провести вимірювання аналогічно п. 2. Заповнити табл. 4.3.

Таблиця 4.3

**Результати вимірювання стоко-затворної характеристики МДН-транзистора з індукованим каналом**

$U_{зв}, В$									
$I_c, мА$									

Побудувати стоко-затворну характеристику. Визначити порогову напругу  $U_{пор}$  і крутизну стоко-затворної характеристики  $S$ . Робочу точку при визначенні крутизни обрати довільно.

5. Виміряти вихідні ВАХ МДН-транзистора.

Провести вимірювання аналогічно п. 3 при  $U_{зв} = 6 В, 9 В, 12 В$ . Заповнити табл. 4.4.

Таблиця 4.4

**Результати вимірювання вихідних ВАХ МДН-транзистора з індукованим каналом**

$U_{зв} = 6 В$		$U_{зв} = 9 В$		$U_{зв} = 12 В$	
$U_{св}, В$	$I_c, мА$	$U_{св}, В$	$I_c, мА$	$U_{св}, В$	$I_c, мА$
...					

Побудувати вихідні характеристики МДН-транзистора. Визначити внутрішній опір транзистора  $R_i$ . Робочу точку при визначенні внутрішнього

опору обрати довільно.

6. Оформити звіт з лабораторної роботи.

7. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

### Порядок виконання роботи (для дистанційної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.

2. За допомогою програми Proteus дослідити польовий транзистор з керуючим р-п переходом (JFET транзистор). Тип транзистора обрати відповідно до табл. 4.5. Номер варіанту відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи.

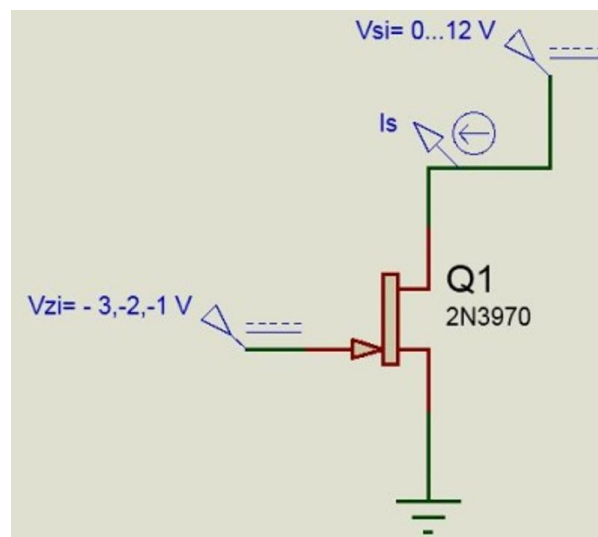
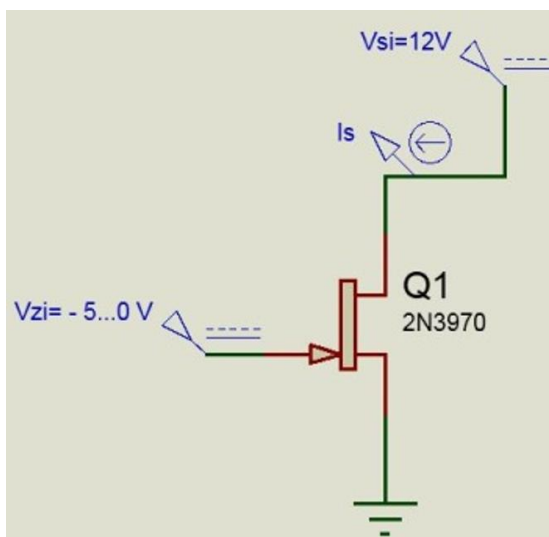
Обрати напругу живлення кола стоку 12 В (рис.4.7, а). Побудувати стоко-затворну характеристику транзистора в режимі Graph Mode > Transfer Function Graph, змінюючи напругу в колі затвор-витік від -5 до 0 В. Зробити скріншот отриманого графіка. Визначити напругу відсічки та оцінити крутизну стоко-затворної характеристики (відношення приросту струму стоку до приросту напруги затвор-витік).

Таблиця 4.5

#### Варіанти завдань

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип транзистора	2N3970	2N3370	2N3458	2N3459	2N3922	2N3954	2N3971	2N3972	2N3955	2N3957

Побудувати вихідні ВАХ транзистора в режимі Graph Mode > Transfer Function Graph для трьох значень напруги в колі затвор-витік: -3 В, -2 В та -1 В (рис.4.7, б). При цьому напругу в колі стік-витік змінювати від 0 до 12 В. Зробити скріншот отриманого графіка.



а)

б)

Рис.4.7. Схеми для дослідження польового транзистора з керуючим р-п переходом: а – вимірювання стоко-затворної характеристики; б – вимірювання вихідних ВАХ

3. За допомогою програми Proteus дослідити МДН-транзистор з індукованим каналом (MOSFET транзистор). Тип транзистора обрати відповідно до табл. 4.6. Номер варіанту відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи.

Обрати напругу живлення кола стоку 12 В (рис.4.8, а). Побудувати стоко-затворну характеристику транзистора в режимі Graph Mode > Transfer Function Graph, змінюючи напругу в колі затвор-витік від 0 до 5 В. Зробити скріншот отриманого графіка. Визначити порогову напругу, а також оцінити крутизну стоко-затворної характеристики.

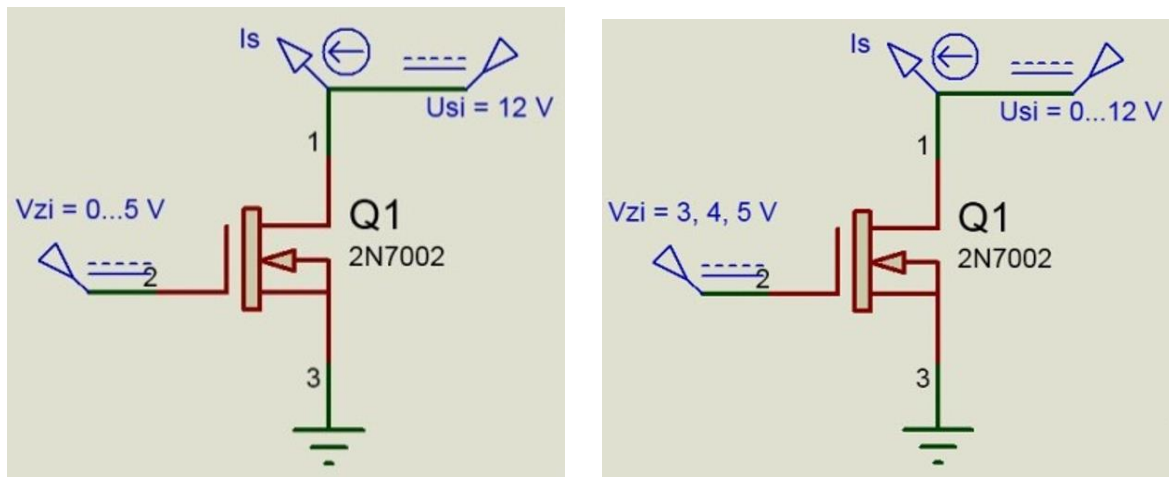
Таблиця 4.6

### Варіанти завдань

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип транзистора	2N6660	2N7008	2N7000	2N6661	TN0104	2N7002	2SK133	TN0110	TN0604	TD9944

Побудувати вихідні ВАХ транзистора режимі Graph Mode > Transfer Function Graph для трьох значень напруги в колі затвор-витік: 3 В, 4 В та 5 В (рис.4.8, б). При цьому напругу в колі стік-витік змінювати від 0 до 12 В. Зробити скріншот отриманого графіка.

4. Дослідити підсилювач на польовому транзисторі з керуючим р-п переходом (рис.4.9). Подати на вхід підсилювача синусоїдальну напругу амплітудою 100 мВ, частотою 1 кГц, задати напругу зміщення -1 В. Виміряти амплітуду вихідної напруги, розрахувати коефіцієнт підсилення за напругою (відношення амплітуди вихідної напруги до амплітуди вхідної). Змінюючи напругу зміщення та амплітуду вхідної напруги, проаналізувати, як при цьому зміниться форма вихідного сигналу.



a)

б)

Рис.4.8. Схеми для дослідження МДН-транзистора з індукованим каналом: а – вимірювання стоко-затворної характеристики; б – вимірювання вихідних ВАХ

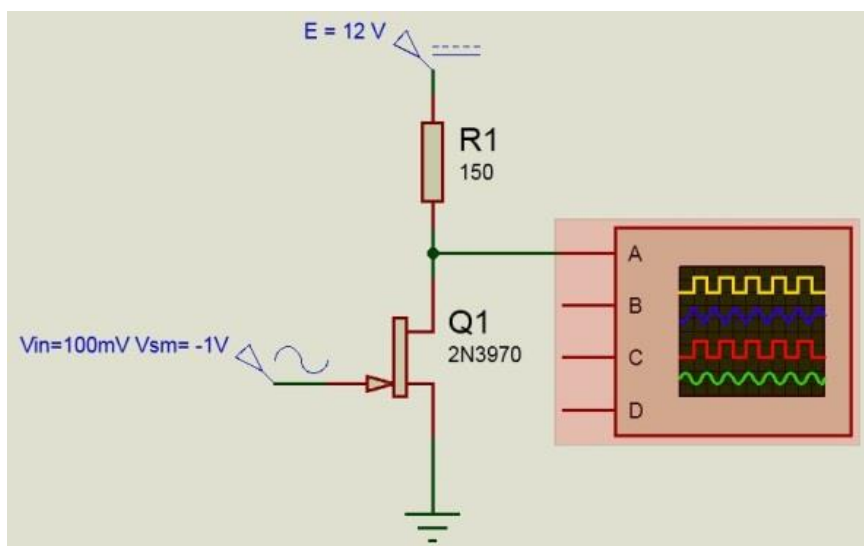


Рис.4.9. Дослідження підсилювача на польовому транзисторі з керуючим р-п переходом

5. Дослідити підсилювач на МДН-транзисторі з індукованим каналом (рис.4.10). Подати на вхід підсилювача синусоїдальну напругу амплітудою 100 мВ, частотою 1 кГц, задати напругу зміщення 3 В. Виміряти амплітуду вихідної напруги, розрахувати коефіцієнт підсилення за напругою. Змінюючи напругу зміщення і амплітуду вхідної напруги, проаналізувати, як при цьому зміниться форма вихідного сигналу.

6. Оформити звіт з лабораторної роботи.

7. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

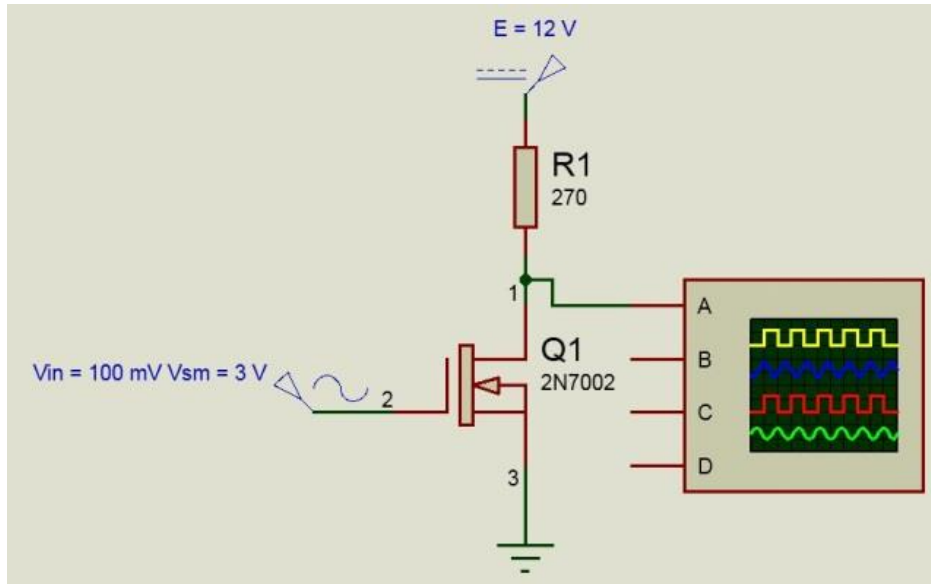


Рис.4.10. Дослідження підсилювача на МДН-транзисторі з індукованим каналом

### Зміст звіту

1. Тема і мета роботи.
2. Схеми для дослідження польових транзисторів.
3. Стоко-затворні і вихідні ВАХ польового транзистора з керуючим р-п переходом та МДН-транзистора (побудовані за результатами вимірювання або скріншоти за результатами моделювання).
4. Отримані значення параметрів транзисторів: напруга відсічки, крутизна стоко-затворної характеристики, порогова напруга, внутрішній опір.
5. Результати дослідження підсилювачів на польових транзисторах.

### Контрольні запитання

1. Які існують види польових транзисторів? Нарисуйте їх умовне графічне позначення, назвіть виводи польових транзисторів.
2. Нарисуйте спрощену структуру польового транзистора з керуючим р-п переходом, поясніть принцип дії транзистора.
3. Нарисуйте та поясніть стоко-затворну та вихідні вольт-амперні характеристики польового транзистора з керуючим р-п переходом.
4. Нарисуйте спрощену структуру МДН транзистора з індукованим каналом, поясніть принцип дії такого транзистора.
5. Нарисуйте та поясніть стоко-затворну та вихідні вольт-амперні характеристики МДН транзистора з індукованим каналом.
6. Які переваги польових транзисторів?
7. Назвіть основні параметри польових транзисторів.

## Лабораторна робота № 5

### ТИРИСТОРИ

**Мета роботи:** дослідити тріодний тиристор з керуванням за катодом, навчитись визначати параметри тиристорів, дослідити тиристорний регулятор потужності.

#### Теоретичні відомості

**Тиристорами** називаються напівпровідникові прилади з трьома (або більше) р-n переходами, призначені для використання в якості електронних ключів у схемах перемикання електричних струмів.

В залежності від конструктивних особливостей тиристори ділять на діодні (некеровані) і тріодні (керовані). У свою чергу тріодні тиристори бувають з керуванням за анодом та керуванням за катодом. На рис. 5.1 наведені умовні позначення різних видів тиристорів [1, 7].

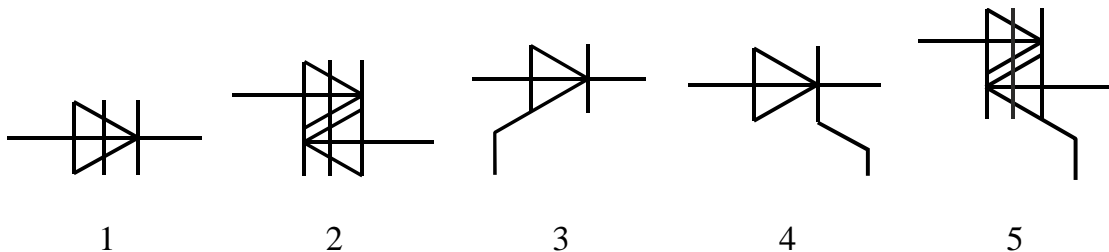


Рис. 5.1. Умовні позначення тиристорів:

- 1 - діодний; 2 - діодний симетричний; 3 - тріодний з керуванням за анодом;  
4 - тріодний з керуванням за катодом; 5 - тріодний симетричний

**Діодний тиристор** містить чотири р- і n-області, що чередуються (рис. 5.2). Електрод під'єднаний до області  $p_1$  називають анодом, а до області  $n_2$  – катодом. Електронно-діркові переходи  $P_1, P_3$  називають емітерними, а перехід  $P_2$  – колекторним [7].

Припустимо, що до тиристорю докладено зовнішню напругу плюсом до анода, а мінусом – до катода. При цьому переходи  $P_1, P_3$  виявляться відкритими, а перехід  $P_2$  – закритим. Зовнішня напруга, що має невеликі значення, практично повністю падає на колекторному переході  $P_2$ , який має високий опір. До переходів  $P_1, P_3$ , які мають малий опір, прикладена невелика різниця потенціалів. У цьому стані струм через тиристор малий і дорівнює зворотному струму через перехід  $P_2$ , тиристор закритий. Зі збільшенням зовнішньої напруги підвищується напруженість електричного поля в області колекторного переходу. При певній напрузі носії заряду прискорюються настільки, що при зіткненні з атомами в області переходу  $P_2$  іонізують їх, викликаючи появу нових носіїв заряду. Утворені при цьому дірки під впливом

електричного поля переходять в область  $p_2$ , а електрони – в область  $n_1$ . Струм через перехід  $\Pi_2$  збільшується, а його опір і падіння напруги на ньому зменшується. Це призводить до підвищення напруги, прикладеної до переходів  $\Pi_1, \Pi_3$ . При цьому починається інжекція носіїв заряду через ці переходи: дірки переходять з області  $p_1$  в область  $n_1$ , а електрони – з  $n_2$  в  $p_2$ . Це викликає подальше зростання струму через колекторний перехід, подальше зменшення опору цього переходу і збільшення інжекції через емітерні переходи. В результаті подібних процесів опір переходу  $\Pi_2$  стрімко зменшується, тиристор відкривається.

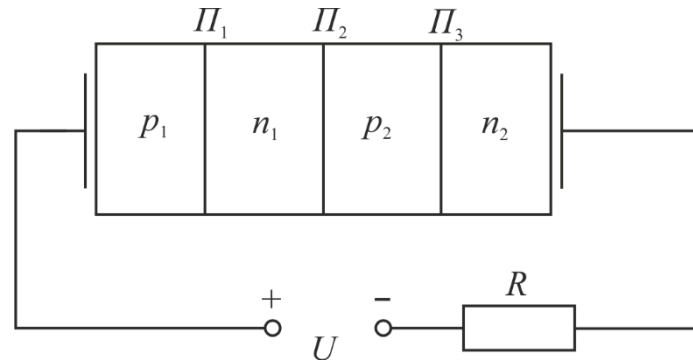


Рис. 5.2. Структура діодного тиристора

На рис. 5.3, а представлена вольт-амперна характеристика діодного тиристора. Ділянка 1 відповідає закритому стану тиристора, ділянка 3 – відкритому. Ділянка 2 з негативним диференціальним опором відповідає процесу перемикання тиристора. Для запирання тиристора потрібно, зменшуючи напругу живлення, зменшити струм через тиристор до значення  $I_{\text{утр}}$  (струм утримання) [1, 7].

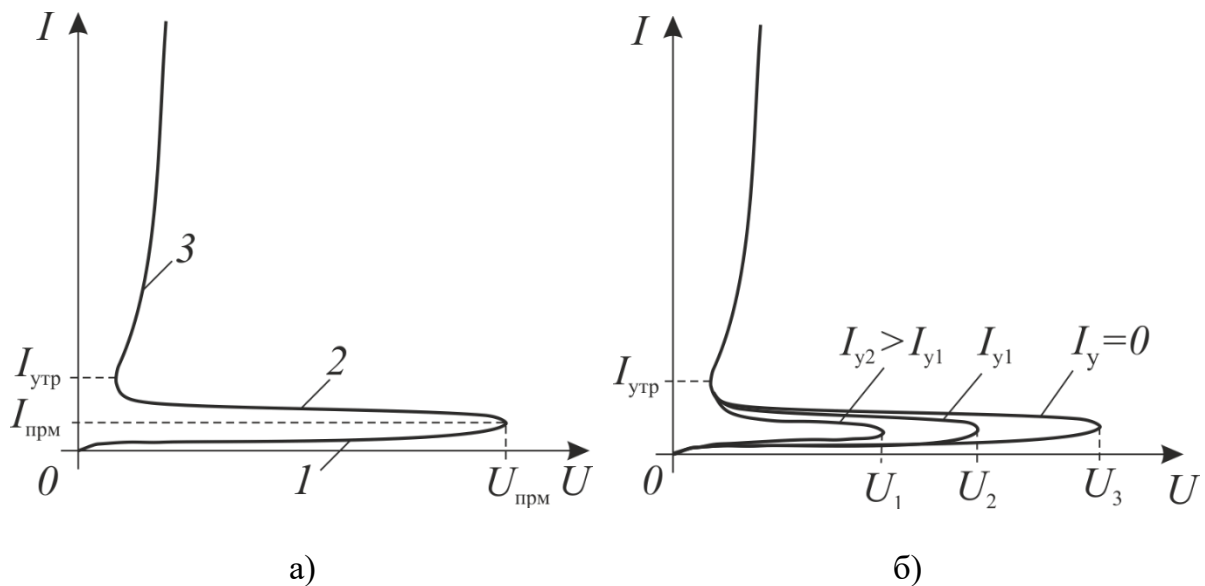


Рис. 5.3. Вольт-амперні характеристики діодного (а) і тріодного (б) тиристора

**Триодні тиристори** відрізняються від діодних тим, що до однієї з баз підключається зовнішній керуючий електрод (рис. 5.4). При подачі в коло керуючого електрода струму управління ( $I_y$ ) відбувається додаткова інжекція носіїв заряду через відповідний емітерний перехід. Це призводить до збільшення струму через закритий колекторний перехід. Таким чином, підвищення керуючого струму в першому наближенні є аналогічним збільшенню напруги, прикладеної до тиристора. Тому, змінюючи керуючий струм, можна змінювати напругу, за якої відбувається перемикання тиристора, і тим самим управляти його включенням. На рис. 5.3, б зображено сімейство ВАХ триодного тиристора [1, 7].

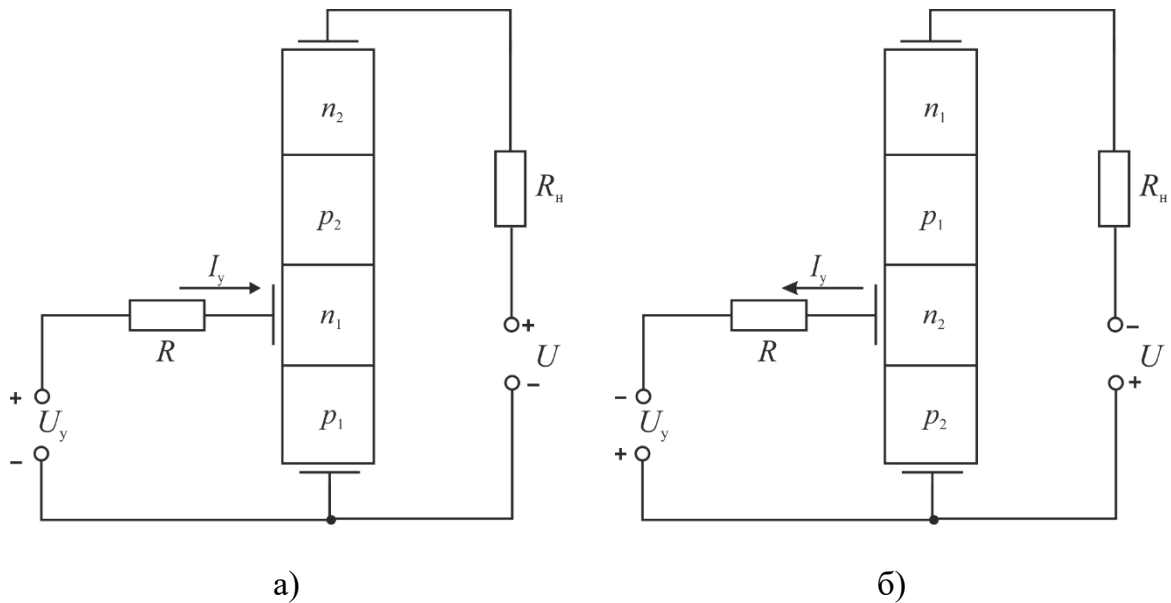


Рис. 5.4. Триодний тиристор з керуванням за катодом (а) і керуванням за анодом (б)

Для комутації змінних струмів використовуються симетричні тиристори (**симістори**). На рис. 5.1. представлено умовне графічне позначення діодного симістора (зображення 2) та триодного симістора (зображення 5). Симістори мають симетричну ВАХ та відкриваються як в прямому, так і в зворотному напрямку.

### Основні параметри тиристорів

1. Напруга перемикання  $U_{\text{прк}}$  – напруга на тиристорі, за якої він відкривається.
2. Напруга у відкритому стані  $U_{\text{вс}}$  – падіння напруги на тиристорі у відкритому стані.
3. Відкриваючий струм керування  $I_{\text{увідк}}$  – найменший струм керуючого електрода, необхідний для включення тиристора.
4. Струм утримання  $I_{\text{утр}}$  – мінімальний струм через тиристор, при якому ще не відбувається перехід в закритий стан.
5. Час відкривання  $t_{\text{вкл}}$  – час переходу тиристора із закритого у відкритий стан.

6. Час закривання  $t_{\text{вickl}}$  – час переходу тиристора із відкритого у закритий стан
7. Допустима зворотна напруга  $U_{\text{зв max}}$ .
8. Допустима пряма напруга у закритому стані  $U_{\text{пр max}}$ .
9. Допустимий струм у відкритому стані  $I_{\text{пр max}}$ .
10. Допустима потужність розсіювання на тиристорі  $P_{\text{max}}$ .

### Порядок виконання роботи (для очної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.
2. Зібрати схему для дослідження тріодного тиристора з керуванням за катодом (рис. 5.5).

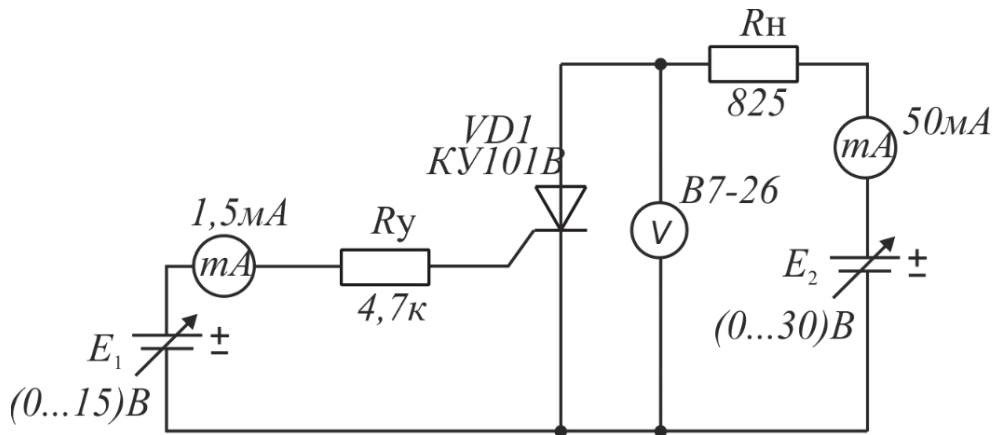


Рис. 5.5. Схема для дослідження тиристора

3. Виміряти відкриваючий струм керування ( $I_{\text{увідк}}$ ), напругу у відкритому стані ( $U_{\text{вс}}$ ) та струм утримання ( $I_{\text{утр}}$ ) при різних значеннях напруги живлення  $E_2$ .

Встановити  $E_2 = 30$  В. Підвищувати  $E_1$  до тих пір, поки не відкриється тиристор. Виміряти  $I_{\text{увідк}}$  і  $U_{\text{вс}}$ .

Встановити  $E_1 = 0$  В. Зменшувати  $E_2$  до тих пір, поки не закриється тиристор. Виміряти  $I_{\text{утр}}$ .

Повторити вимірювання аналогічно для інших значень напруги живлення  $E_2$ . Заповнити табл. 5.1. Побудувати залежність  $I_{\text{увідк}} = f(E_2)$ .

Таблиця 5.1

#### Результати дослідження тиристора

$E_2, \text{ В}$	30	26	22	18	14	10	7	5
$I_{\text{увідк}}, \text{ мА}$								
$U_{\text{вс}}, \text{ В}$								
$I_{\text{утр}}, \text{ мА}$								

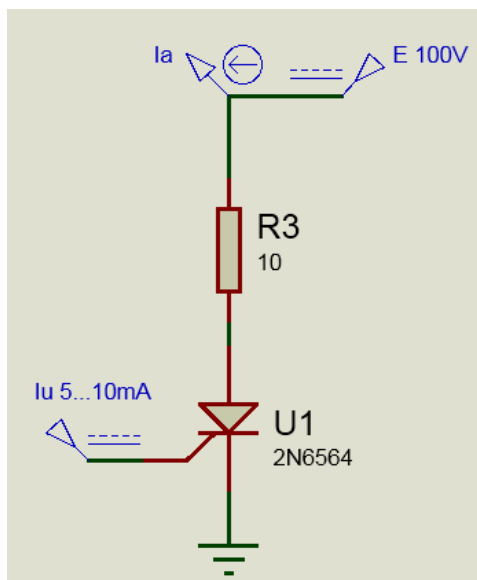
4. Оформити звіт з лабораторної роботи.
5. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

### Порядок виконання роботи (для дистанційної форми навчання)

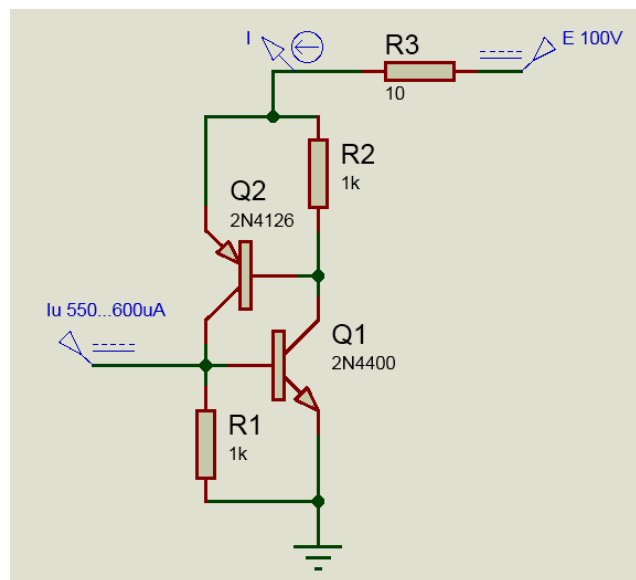
1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.

2. За допомогою програми Proteus дослідити тріодний тиристор з керуванням за катодом (рис.5.6, а). Змінюючи струм в колі керування тиристора  $I_u$  від 5 до 10 мА, контролювати струм в колі анода  $I_a$ . Визначити мінімальний струм керування  $I_{увідк}$ , який призводить до відкриття тиристора. Визначити падіння напруги на тиристорі у відкритому стані  $U_{bc}$  та струм навантаження (струм в колі анода  $I_a$ ). Записати результати у звіт.

Замінити тиристор його еквівалентною схемою, яка складається з двох біполярних транзисторів р-п-р та п-р-п типу (рис.5.6, б). Змінюючи струм в колі керування від 550 до 600 мкА, контролювати струм комутації  $I$ . Визначити мінімальний струм керування, який призводить до відкриття схеми. Записати отримане значення у звіт.



а)



б)

Рис.5.6. Схеми для дослідження тиристорів: а – дослідження тріодного тиристора; б – дослідження еквівалентної схеми тиристора

3. За допомогою програми Proteus дослідити ключову схему на базі тріодного тиристора (рис.5.7, а). Замкнути кнопку в колі живлення (на рисунку – права кнопка). Впевнитись у тому, що тиристор закритий і світлодіод не горить. Замикаючи кнопку в колі керування (на рисунку – кнопка зліва), відкрити тиристор, при цьому світлодіод повинен увімкнутися. Розімкнути кнопку в колі керування, впевнитись у тому, що тиристор як і раніше

залишається відкритим і світлодіод включений. Для вимкнення тиристора розімкнути кнопку в колі живлення.

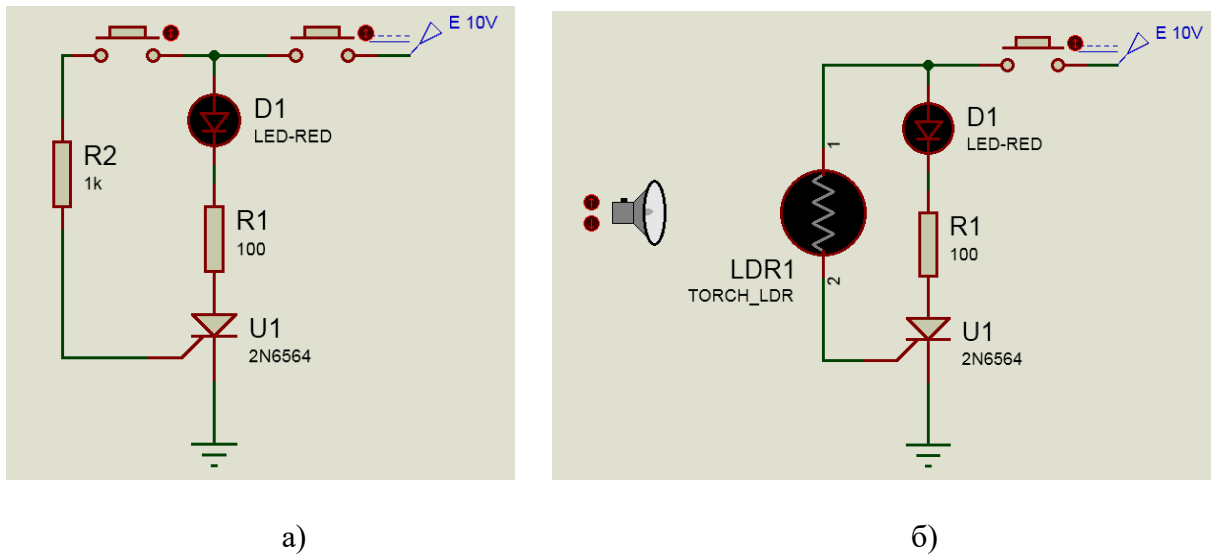


Рис.5.7. Дослідження ключових схем на базі тріодних тиристорів

Включити в коло керування тиристора фоторезистор (рис.5.7, б). Замкнути кнопку в колі живлення. Впевнитись у тому, що тиристор закритий і світлодіод не горить. Збільшуючи освітлення фоторезистора, досягти відкриття тиристора та включення світлодіода. Прибрати освітлення фоторезистора, впевнитись у тому, що тиристор як і раніше залишається відкритим і світлодіод включений. Для виключення тиристора розімкнути кнопку в колі живлення.

Таблиця 5.2

### Варіанти завдань

Варіант		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перший випадок	R3, кОм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	R4, кОм	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20
Другий випадок	R3, кОм	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	R4, кОм	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10

4. Дослідити регулятор потужності на базі тиристора з керуванням за катодом (рис.5.8). Подати на вхід регулятора змінну напругу з частотою 50 Гц та амплітудою 220 В, в якості навантаження підключити резистор R1 з опором

100 Ом. Значення опорів резисторів R3, R4 вибрати відповідно до табл. 5.2. Номер варіанту відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи. За допомогою вольтметра та амперметра змінного струму визначити напругу ( $U$ ), струм ( $I$ ) та розрахувати потужність ( $P$ ) у навантаженні для двох випадків. За допомогою осцилографу проаналізувати форму напруги та визначити тривалість позитивного імпульсу ( $t_i$ ) для обох випадків. Результати занести у таблицю 5.3. Зробити також скріншот осцилограм сигналів для кожного випадку.

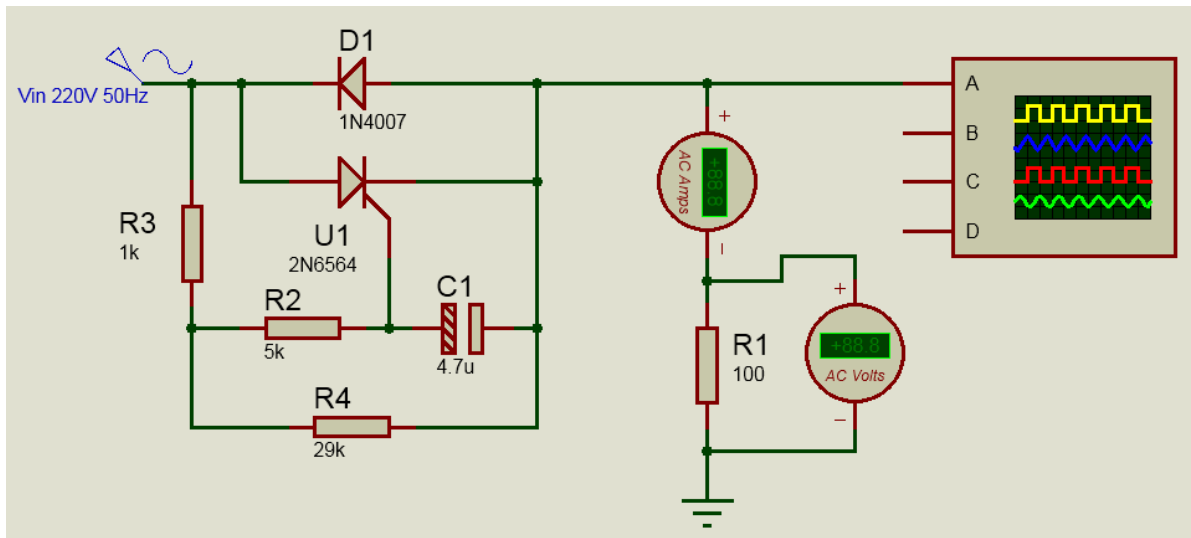


Рис.5.8. Дослідження регулятора потужності на базі тиристора з керуванням за катодом

5. Оформити звіт з лабораторної роботи.
6. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

Таблиця 5.3

### Результати дослідження тиристорного регулятора потужності

	Перший випадок	Другий випадок
$I, A$		
$U, B$		
$P, Вт$		
$t_i, мс$		

### Зміст звіту

1. Тема і мета роботи.
2. Схеми для дослідження тиристорів.
3. Результати дослідження.

4. Схема тиристорного регулятора потужності, результати його дослідження та скріншоти осцилограм сигналів (у разі дистанційного виконання лабораторної роботи).

### Контрольні запитання

1. Які існують види тиристорів? Нарисуйте їх умовне графічне позначення, назвіть виводи тиристорів.
2. Поясніть принцип дії діодного тиристора.
3. Нарисуйте вольт-амперну характеристику діодного тиристора.
4. Поясніть, за яких умов відбувається відкривання та закривання діодного тиристора.
5. Нарисуйте вольт-амперні характеристики тріодного тиристора.
6. Поясніть, за яких умов відбувається відкривання та закривання тріодного тиристора.
7. Які особливості симісторів?
8. Назвіть основні параметри тиристорів.

## Лабораторна робота № 6 ДІОДНИЙ ОПТРОН

**Мета роботи:** дослідити вхідну, передатну та вихідні вольт-амперні характеристики діодного оптрона, навчитись визначати параметри оптронів.

### Теоретичні відомості

**Оптроном** називається чотирьохполюсник, який містить джерело світла, світловод та фотоприймач (рис. 6.1). У такому чотирьохполюснику вхідний електричний сигнал у вигляді імпульсу або перепаду вхідного струму збуджує джерело світла і викликає світлове випромінювання. Світловий сигнал через світловод потрапляє на фотоприймач, на виході якого утворюється електричний імпульс або перепад вихідного струму. Таким чином, внутрішній зв'язок в оптроні – фотонний, а зовнішні зв'язки – електричні [3, 4, 7].

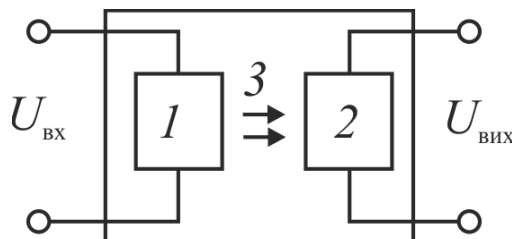


Рис. 6.1. Структурна схема оптрона:  
1 - джерело світла; 2 - фотоприймач; 3 - світловод

В оптронах забезпечується практично повна гальванічна розв'язка між вхідним і вихідним колами, відсутній зворотний вплив приймача сигналу на його джерело. За допомогою оптронів легко узгоджуються між собою електричні кола з різними вхідними та вихідними опорами.

В інтегральних оптронах в якості джерела світла, як правило, застосовуються світлодіоди, а в якості фотоприймачів можуть використовуватися фотодіоди, фототранзистори, фототиристри або фоторезистори. У відповідності до цього розрізняють діодні, транзисторні, тиристорні та резисторні оптрони. Умовні позначення різних видів оптронів представлені на рис. 6.2 [3, 4, 7].

**У діодних оптронах** (рис. 6.2, а) джерелом світла є світлодіод, а приймачем – фотодіод. Такі оптрони використовуються в якості ключів і можуть комутувати струми з частотою  $10^6$ - $10^7$  Гц. Опір в закритому стані (темновий) –  $10^8$ - $10^{10}$  Ом, у відкритому –  $10^1$ - $10^3$  Ом. Опір між вхідним і вихідним колами –  $10^{13}$ - $10^{15}$  Ом. Таким чином, діодний оптрон дозволяє практично повністю гальванічно розв'язати між собою вхідне і вихідне кола і забезпечити гарні характеристики перемикачів.

**Транзисторні оптрони** (рис. 6.2, б) завдяки високій чутливості фотоприймача (фототранзистора) є більш економічними на відміну від діодних. Однак їх швидкодія менша, максимальна частота комутації зазвичай не перевищує  $10^5$  Гц. Так само як діодні оптрони, транзисторні мають малий опір у відкритому стані, великий в закритому і забезпечують повну гальванічну розв'язку вхідних і вихідних кіл.

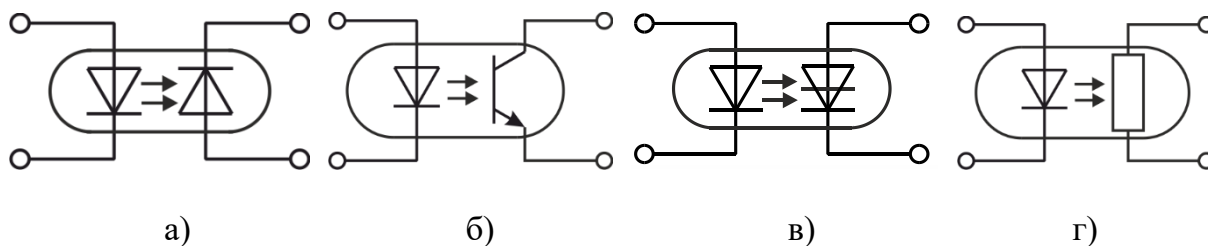


Рис. 6.2. Умовні позначення оптронів:  
а - діодний; б - транзисторний; в - тиристорний; г – резисторний

**У тиристорних оптронах** (рис. 6.2, в) в якості приймача світла використовується фототиристор. Це дозволяє збільшити імпульс вихідного струму до одиниць – десятків ампер. Такі оптрони дозволяють безпосередньо управляти потужними пристроями різного призначення.

**Резисторні оптрони** (рис. 6.2, г) реалізують на основі фоторезисторів і застосовують для різного роду безконтактних регулювань в колах автоматичного управління. Такі оптрони використовують також і в ключовому режимі. При цьому в порівнянні з оптронами інших типів вони мають більш широкий динамічний діапазон вхідних сигналів і менші значення темнових струмів. Однак їх швидкодія невисока, а максимальна робоча частота

обмежена декількома кГц. Крім цього, використання резисторних оптронів обмежене через невисоку часову стабільність і залежність характеристик перетворення від температури.

### Основні параметри оптронів

1. Коефіцієнт передачі за струмом:

$$k_i = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}} \cdot 100\% .$$

2. Темновий опір  $R_T$  – опір фотоприймача за відсутності вхідного струму.
3. Світловий опір  $R_c$  – опір фотоприймача при заданому вхідному струмі.
4. Опір гальванічної розв'язки  $R_{\text{роз}}$  – опір між виводами входу і виходу оптрона.
5. Час включення  $t_{\text{вкл}}$ .
6. Час виключення  $t_{\text{викл}}$ .
7. Максимально допустимий вхідний струм  $I_{\text{вх max}}$ .
8. Максимально допустима зворотна вхідна напруга  $U_{\text{вх зв max}}$ .
9. Максимально допустимий вихідний струм  $I_{\text{вих max}}$ .
10. Максимально допустима зворотна вихідна напруга  $U_{\text{вих зв max}}$ .

**Світлодіод** являє собою випромінюючий р-п перехід, світіння в якому виникає внаслідок рекомбінації носіїв заряду (електронів і дірок). Припустимо, що до р-п переходу прикладена пряма напруга. У цьому випадку відбувається інжекція основних носіїв заряду через границю напівпровідників. Внаслідок цього підвищується концентрація неосновних носіїв заряду поблизу р-п переходу, тобто підвищується концентрація електронів у зоні провідності і концентрація дірок у валентній зоні. Такий стан є нестійким, тому відбувається рекомбінація інжекттованих частинок, тобто перехід електронів із зони провідності у валентну зону. При цьому виділяється енергія у вигляді квантів світла (фотонів). Чим більше струм через р-п перехід, тим більше інжекція, інтенсивніше відбувається рекомбінація, виділяється більше енергії і більший світловий потік випромінює р-п перехід.

**Фотодіод** призначений для перетворення світлового потоку в електричний сигнал. Припустимо, що до р-п переходу не прикладена зовнішня різниця потенціалів. Внаслідок освітлення в області р-п переходу з'являються нові носії заряду (відбувається фотогенерація носіїв заряду). На границі переходу нові носії заряду розділяються контактним електричним полем. Дірки переміщуються в р-область, а електрони – в п-область. Внаслідок цього виникає додаткова різниця потенціалів, яку називають фотоелектрорушійною силою або фото-ЕРС. Вона залежить від світлового потоку, який діє на р-п перехід, але не може перевищити контактну різницю потенціалів. Якщо до фотодіоду підключити зовнішній опір, то під дією фото-ЕРС виникатиме струм. Чим більшим буде освітлення, тим більшою буде фото-ЕРС і, відповідно, струм через опір навантаження. При цьому фотодіод працює в

режимі фотогенератора без стороннього джерела напруги, безпосередньо перетворюючи світлову енергію в електричну.

Фотодіод може працювати також спільно із зовнішнім джерелом живлення. При цьому фотодіод включається зворотно. Під дією джерела напруги за відсутності освітлення через фотодіод протікає незначний темновий струм. При освітленні фотодіода з'являються додаткові носії заряду і потік носіїв заряду через р-п перехід зростає. Збільшується струм у зовнішньому колі, величина якого залежить від зовнішньої напруги і світлового потоку.

### Порядок виконання роботи (для очної форми навчання)

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.
2. Зібрати схему для дослідження діодного оптрона (рис. 6.3).
3. Виміряти вхідну ВАХ оптрона.  
Встановити напругу  $E_2 = 0$  В.

Змінюючи напругу джерела  $E_1$ , встановлювати певні значення вхідного струму ( $I_{вх}$ ), вимірюючи при цьому вхідну напругу ( $U_{вх}$ ). Виміряти 8-10 значень. Заповнити табл. 6.1.

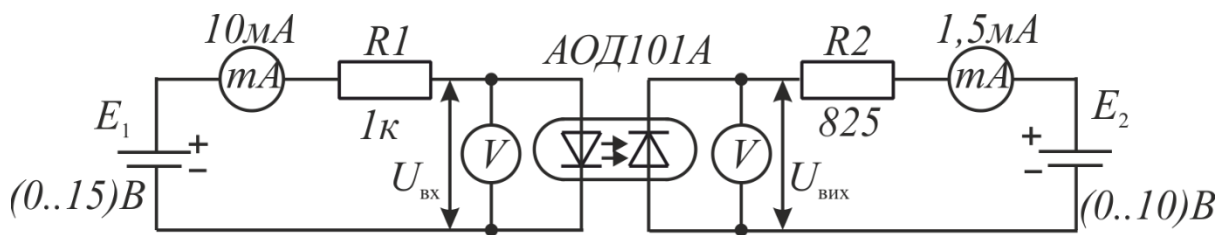


Рис. 6.3. Схема для дослідження діодного оптрона

Таблиця 6.1

### Результати вимірювання вхідної ВАХ оптрона

$I_{вх}, \text{mA}$								
$U_{вх}, \text{V}$								

Побудувати вхідну ВАХ  $I_{вх} = f(U_{вх})$ .

4. Виміряти передатну характеристику оптрона.

Встановити напругу  $E_2 = 5$  В.

Змінюючи напругу джерела  $E_1$ , встановлювати певні значення вхідного струму ( $I_{вх}$ ), вимірюючи при цьому вихідний струм ( $I_{вих}$ ). Виміряти 8-10 значень. Заповнити табл. 6.2.

Побудувати передаточну характеристику  $I_{вих} = f(I_{вх})$ .

Визначити коефіцієнт передачі за струмом при  $I_{вх} = 5$  мА.

$$k_i = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}} \cdot 100\% .$$

Таблиця 6.2

**Результати вимірювання передаточної характеристики оптрона**

$I_{\text{вх}}, \text{мА}$								
$I_{\text{вих}}, \text{мкА}$								

5. Виміряти вихідні ВАХ оптрона.

Змінюючи напругу джерела  $E_1$ , встановити вхідний струм  $I_{\text{вх}} = 2 \text{ мА}$ .

Змінюючи напругу джерела  $E_2$ , встановлювати певні значення вихідної напруги ( $U_{\text{вих}}$ ), вимірюючи при цьому вихідний струм ( $I_{\text{вих}}$ ). Виміряти 8-10 значень.

Провести вимірювання аналогічно п. 3 при вхідному струмі 4 мА і 6 мА. Результати занести в табл. 6.3.

Побудувати вихідні ВАХ  $I_{\text{вих}} = f(U_{\text{вих}})|_{I_{\text{вх}}=\text{const}}$ .

6. Оформити звіт з лабораторної роботи.

7. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

Таблиця 6.3

**Результати вимірювання вихідних ВАХ оптрона**

$I_{\text{вх}} = 2 \text{ мА}$	$I_{\text{вих}}, \text{мкА}$							
	$U_{\text{вих}}, \text{В}$							
$I_{\text{вх}} = 4 \text{ мА}$	$I_{\text{вих}}, \text{мкА}$							
	$U_{\text{вих}}, \text{В}$							
$I_{\text{вх}} = 6 \text{ мА}$	$I_{\text{вих}}, \text{мкА}$							
	$U_{\text{вих}}, \text{В}$							

**Порядок виконання роботи**

*(для дистанційної форми навчання)*

1. Вивчити необхідні теоретичні відомості.

2. За допомогою програми Proteus дослідити світлодіод (рис.6.4). Визначати струм через світлодіод, змінюючи напругу на діоді  $U_d$  від 0 до 2,5 В. Побудувати вольт-амперну характеристику світлодіода, використовуючи режим Transfer Function Graph (рис. 6.5). Зробити скріншот отриманого графіка.

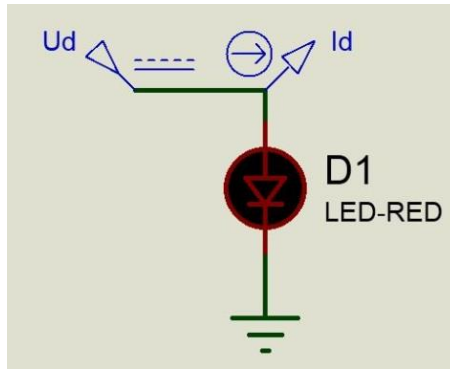


Рис. 6.4. Схема для дослідження світлодіода

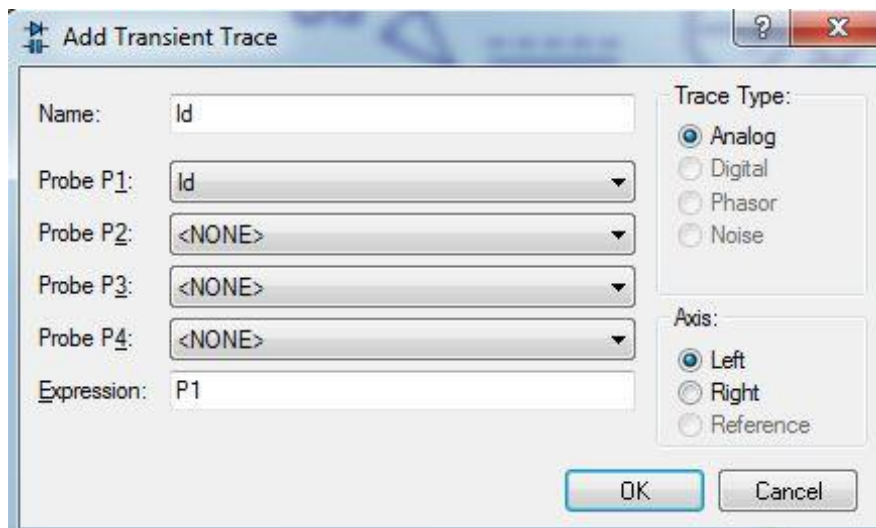
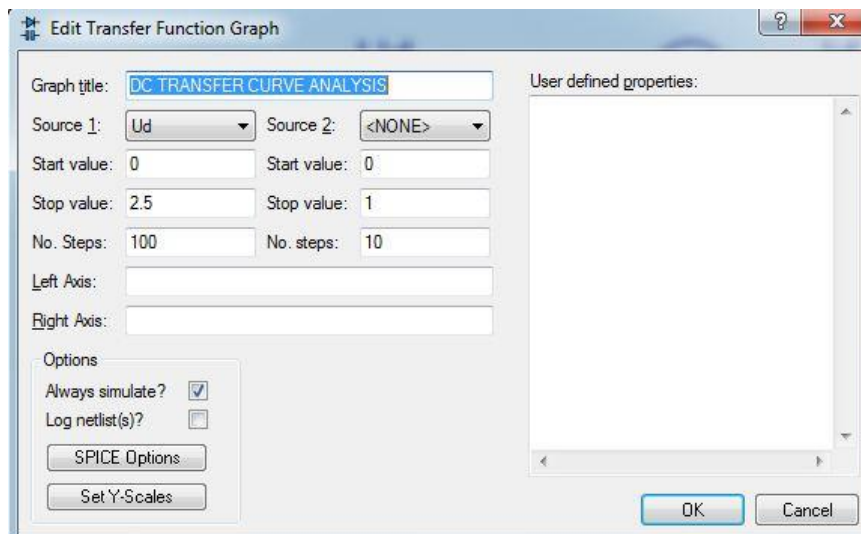


Рис. 6.5. Параметри для побудови ВАХ світлодіода

3. За допомогою програми Proteus дослідити діодний оптрон (рис.6.6). Значення опорів резисторів  $R1$ ,  $R2$  та напругу джерела живлення  $E$  вибрати відповідно до табл. 6.4. Номер варіанту відповідає останній цифрі порядкового номера студента у списку групи.

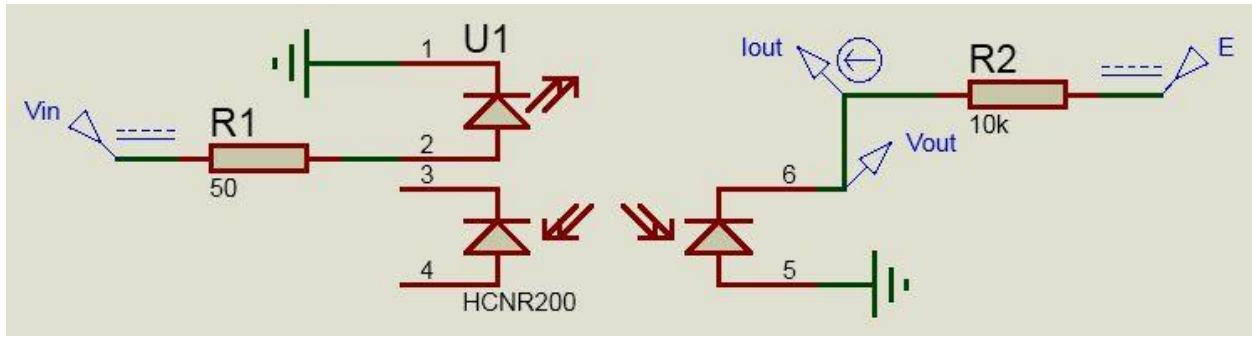


Рис. 6.6. Схема для дослідження діодного оптрона

3.1. Побудувати передатну характеристику оптрона (залежність вихідної напруги  $V_{out}$  від вхідної напруги  $V_{in}$ ), змінюючи вхідну напругу від 0 до 10 В. Для побудови графіка використовувати режим Transfer Function Graph (рис. 6.7). Зробити скріншот отриманого графіка.

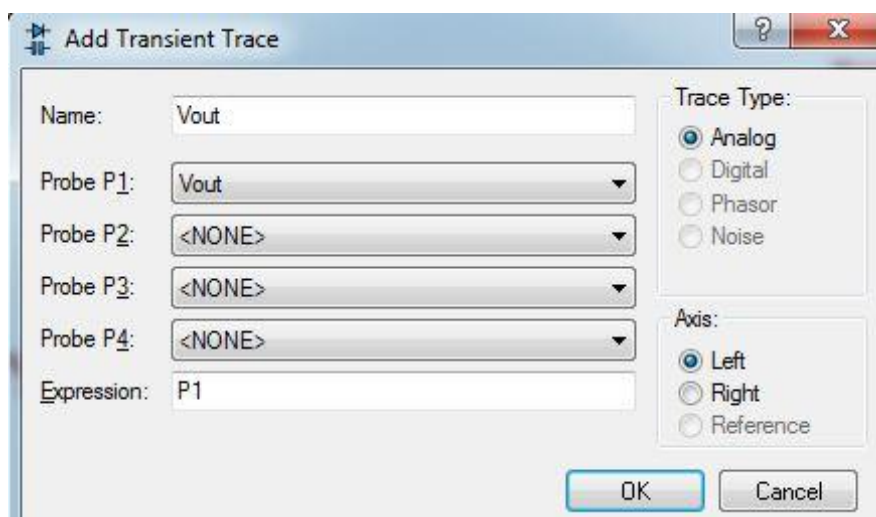
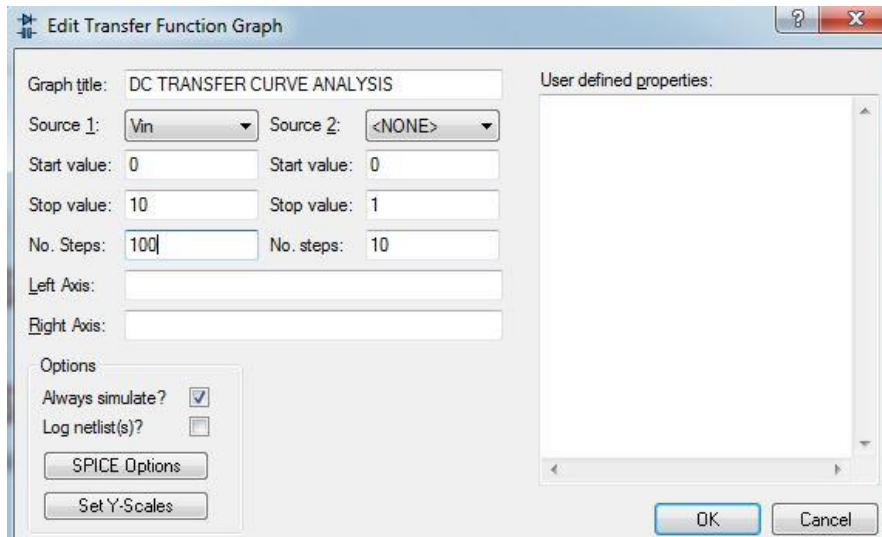


Рис. 6.7. Параметри для побудови передатної ВАХ оптрона

## Варіанти завдань

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R1, Ом	50	45	40	35	30	20	55	25	15	10
R2, кОм	10	9	8	7	6	5	6	7	8	9
E, В	5	6	4	3,5	3	2,5	3	5,5	6	6,5

3.2. Побудувати наскрізну вольт-амперну характеристику оптрона (залежність вихідного струму  $I_{out}$  від вхідної напруги  $V_{in}$ ), змінюючи вхідну напругу від 0 до 10 В. Для побудови графіка використовувати режим Transfer Function Graph. Зробити скріншот отриманого графіка.

Визначити максимальний вихідний струм ( $I_{вихmax}$ ) та напругу включення оптрона ( $U_{вкл}$ ) (вхідну напругу, при якій вихідний струм практично досягає максимального значення). Результати записати в табл. 6.5.

Таблиця 6.5

## Результати дослідження діодного оптрона

$I_{вихmax}$ , мкА	$U_{вкл}$ , В	$E_{ф}$ , В

3.3. Встановити вхідну напругу 10 В, а напругу живлення – 0 В (рис. 6.6). Визначити величину фото-ЕРС ( $E_{ф}$ ). Отримане значення записати в табл. 6.5.

4. Оформити звіт з лабораторної роботи.

5. Відповісти (усно) на контрольні запитання.

## Зміст звіту

1. Тема і мета роботи.
2. Схема для дослідження діодного оптрона.
3. Вольт-амперні та передатна характеристики діодного оптрона (побудовані за результатами вимірювання або скріншоти за результатами моделювання).
4. Результати дослідження діодного оптрона.

## Контрольні запитання

1. З яких частин складається оптрон?
2. Яке призначення оптронів?
3. Які особливості різних видів оптронів? Нарисуйте їх умовне графічне позначення.
4. Назвіть основні параметри оптронів.

5. Поясніть принцип дії світлодіода.
6. Які існують режими роботи фотодіода? Поясніть принцип дії фотодіода в кожному із режимів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сосков А. Г., Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка : підручник. Київ : Каравела, 2017. 536 с.
2. Мілих В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник. Київ : Каравела, 2017. 686 с.
3. Електроніка і мікропроцесорна техніка : навч. посіб. / В. І. Сенько та ін. Київ : «Агроосвіта», 2015. 676 с.
4. Щупляк Н. М. Основи електроніки і мікроелектроніки : підручник. Дрогобич, 2014. 443 с.
5. Напівпровідникові прилади : підручник / Л. Д. Васильєва та ін. Київ : ІВЦ Вид-во «Політехніка», 2012. 554 с.
6. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування : підручник / П. Г. Стахів та ін. Львів : Магнолія, 2010. 208 с.
7. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки: навч. посіб. / П. Г. Стахів та ін. Львів : Магнолія, 2010. 225 с.
8. Електроніка та мікросхемотехніка: навч. посіб. / В. Б. Дудикевич та ін. Львів : Вид-во національного університету «Львівська політехніка», 2010. Ч. I : Електроніка. 203 с.
9. Електроніка та мікросхемотехніка : навч. посіб. / В. Б. Дудикевич та ін. Львів : Вид-во національного університету «Львівська політехніка», 2010. Ч. II : Аналогова схемотехніка. 222 с.

Навчально-методичне видання

**Гончаров** Костянтин Вікторович,  
**Щека** Вадим Ігорович,  
**Ящук** Катерина Іванівна,  
**Рибалка** Роман Володимирович

## **ЕЛЕКТРОНІКА І МІКРОСХЕМОТЕХНІКА**

Навчально-методичні рекомендації до лабораторних занять  
(частина 1)

Електронне видання

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Володимир Профатилів

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.820 від 24.03.2025)

В авторській редакції  
Комп'ютерна верстка К. В. Гончаров

Формат 60x84<sub>1/16</sub>. Ум. друк. арк. 3,48. Обл.-вид. арк. 3,52.  
Зам. № 47

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010