



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

5482 Методичні вказівки
до лабораторних робіт
із дисципліни «Твердотільна електроніка»
для студентів спеціальностей *171 «Електроніка»*,
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
усіх форм навчання

Суми
Сумський державний університет
2022

Методичні вказівки до лабораторних робіт із дисципліни «Твердотільна електроніка» / укладачі: А. С. Опанасюк, А. І. Новгородцев, О. А. Любивий, О. В. Д'яченко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 84 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	С. 5
ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.....	6
ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	10
ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ.....	8
Лабораторна робота 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРЯМНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЮДІВ І СТАБІЛІТРОНІВ.....	12
Лабораторна робота 2 ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА У СХЕМІ ЗІ СПІЛЬНИМ ЕМІТЕРОМ В АКТИВНОМУ РЕЖИМІ.....	19
Лабораторна робота 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА З КЕРУВАЛЬНИМ P-N-ПЕРЕХОДОМ І З ІЗОЛЬОВАНИМ ЗАТВОРОМ.....	25
Лабораторна робота 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРА В ДИНІСТОРНОМУ ТА ТРИНІСТОРНОМУ РЕЖИМАХ.....	32
Лабораторна робота 5 ДОСЛІДЖЕННЯ СИМІСТОРА ТА ТИРИСТОРА В КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	37
Лабораторна робота 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМНОВИХ І СВІТЛОВИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	42

Лабораторна робота 7 ДОСЛІДЖЕННЯ ДІОДНОГО ОПТРОНА.....	54
Лабораторна робота 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТОТИРИСТОРА ТА ОПТОСИМІСТОРА.....	58
Лабораторна робота 9 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА НА АНАЛОГОВІЙ ІНТЕГРАЛЬНІЙ СХЕМІ ТИПУ КР140УД1Б.....	61
Лабораторна робота 10 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТА ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНОЇ ЛОГІКИ.....	74
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	83

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика.

БТ – біполярний транзистор.

ЕП – емітерний перехід.

КП – колекторний перехід.

ПТКП – польовий транзистор із керувальним переходом.

МОН – метал-оксид-напівпровідник.

ЕРС – електрорушійна сила.

E_{ϕ} – електрорушійна сила фотоструму.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Лабораторні роботи з навчальної дисципліни «Твердотільна електроніка» сприяють поглибленню і закріпленню знань студентів, розвивають у них первинні навички досліджень.

Мета роботи:

- експериментальна перевірка характеристик і параметрів напівпровідникових приладів, теорію яких вивчають на лекціях;
- набуття практичного інженерного досвіду.

Під час підготовки до лабораторних робіт студент повинен:

- вивчити лекційний матеріал згідно з контрольними питаннями до даної лабораторної роботи;
- усвідомити мету і завдання експериментальних досліджень;
- продумати план і очікувані результати досліджень;
- навести у звіті з лабораторних робіт схему досліджень, таблиці, зробити попередні розрахунки, тобто підготувати матеріал, що не вимагає використання результатів експерименту.

Студента допускають до роботи лише в тому разі, якщо він виявив достатній рівень опанування теоретичного матеріалу під час опитування, що проводиться на початку заняття.

Під час виконання лабораторної роботи студент повинен:

- обережно ставитися до лабораторних установок, вимірювальної апаратури, приладів, характеристики яких досліджують;
- пильно виконувати вимоги техніки безпеки;
- вмикання джерел електроживлення здійснювати після того, як викладач (інженер лабораторії) перевірів правильність збирання схеми досліджень і дав дозвіл на подальше виконання роботи;
- експериментальні дослідження виконувати згідно з програмою, що міститься в описі даної лабораторної роботи;
- дослідні дані, одержані під час виконання роботи, порівнювати з даними теорії. У разі значного розходження теоретичних і дослідних даних повторити дослідження;

– заповнювати звіти в чистовику після перевірки викладачем результатів у чернетці.

Після закінчення лабораторної роботи студент повинен:

– вимкнути лабораторну установку, навести порядок на робочому місці і показати робоче місце інженерові лабораторії для перевірки його стану;

– здати викладачу письмовий звіт із лабораторної роботи на перевірку.

Письмовий звіт із лабораторної роботи виконують у зошиті та має вміщувати в собі перелік елементів і приладів, що досліджують; схеми досліджень, розрахункові формули і результати розрахунку, таблиці, графіки й аналіз результатів досліджень, висновки до роботи.

Звіт заповнюють акуратно ручкою. Графіки потрібно або будувати з використанням комп'ютерних графобудівників або рисувати кольоровими олівцями (ручками) на міліметровці, водночас обов'язково відмічають точки, за якими будували експериментальні залежності, у таблиці потрібно вносити досліджувані величини та вказувати їхні розмірності.

ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторна установка, зовнішній вигляд якої наведено на рисунку 1, складається з комбінованого блока живлення, який містить у собі лівий блок живлення на 5 В і правий блок живлення на 50 В, стрілкових вимірювальних приладів 1, 2, 3, цифрового вольтметра 19 та комутаційної плати 18.

Роботу лівого і правого блоків живлення і досліджуваної схеми контролюють вимірювальні прилади: вольтметри 1, міліамперметри 2, мікроамперметри 3.

До входних гнізд вимірювальних приладів (рис. 1) підпаяні електроди:

- дроти 4 – до гнізд вольтметрів;
- дроти 5 – до гнізд міліамперметрів;
- дроти 6 – до гнізд мікроамперметра.

У схемі наявні перемикачі опорів вимірювальних приладів:

- 7 – перемикачі додаткових опорів вольтметрів 1;
- 8 – перемикачі шунтових опорів міліамперметрів 2.

Потрібну вихідну напругу лівого і правого блоків живлення виставляють ручками потенціометрів 9 і знімають із гнізд 10. Гнізда 11 із підпаяними до них дротами і перемикачі 12 на передній панелі зв'язані з дискретними опорами, які виконують функції обмежувальних опорів у схемах досліджень статичних характеристик напівпровідникових приладів.

Гнізда 20 – гнізда змінної напруги 10 В.

Тумблер 13 на передній панелі комбінованого блока служить для вимикання всієї установки.

Під час збирання схеми дослідження електроди приладу, характеристики якого зніматимуться, підпаяють до контактів 14, 15, 16, 17 комутаційної плати 18. Водночас під час дослідження триелектродних напівпровідникових приладів використовують з'єднувальний провідник, що сполучає контакти 15 і 17 комутаційної плати.

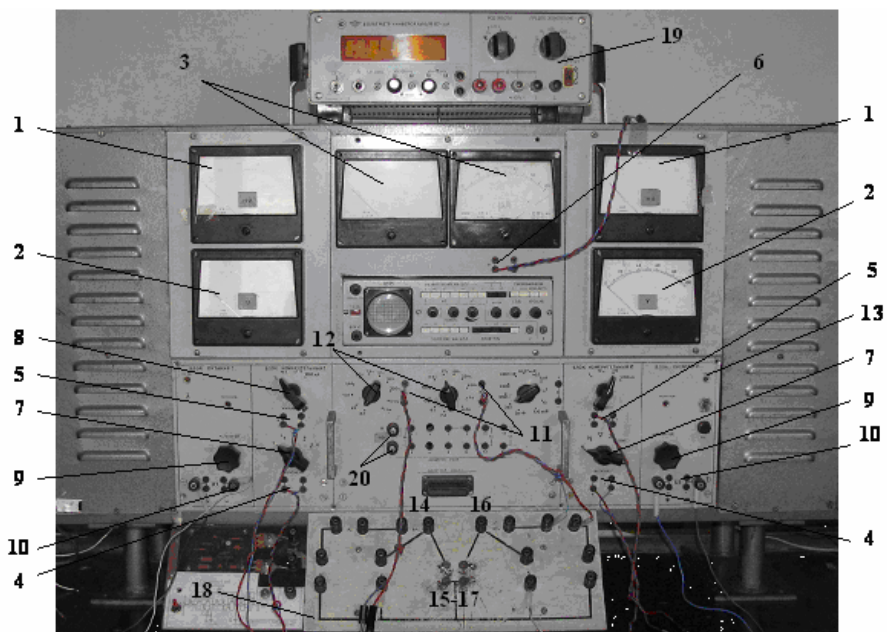


Рисунок 1

Рисунок 1 – Лабораторна установка для дослідження ВАХ напівпровідникових приладів

Увага! Підняювання електродів приладу, що досліджують, до контактів комутаційної плати виконують за умови вимкненої установки.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. Перед вмиканням лабораторної установки (див. рис. 1) необхідно вивчити її конструкцію й особливості експлуатації, здійснити ретельний огляд, перевірити правильність збирання схеми, надійність контактів в електричних колах і справність заземлення. Необхідно твердо знати розміщення елементів і контактів, на яких діє небезпечна для життя напруга.

Пам'ятайте, що напруга 24 В змінного струму та 50 В постійного струму небезпечні для життя людини.

2. Вмикання установки без дозволу викладача або інженера лабораторії суворо заборонено.

3. Перед вмиканням установки потрібно попередити товаришів за бригадою. У момент вмикання потенціометри блоків живлення 9 (див. рис. 1) мають обов'язково бути в крайньому лівому положенні.

4. Під час вмикання установки і роботи на ній необхідно перебувати на діелектричних килимках.

5. Будь-які переключення, зміни сполучень елементів у схемах потрібно здійснювати лише за умови вимкнених джерел живлення.

6. Під час роботи заборонено виймати дроти з роз'ємів, замінювати запобіжники і здійснювати ремонт установки. Потрібно слідкувати, щоб у вихідному колі не було перевантажень, пов'язаних із різким збільшенням струму.

7. Під час виконання налаштувань схеми необхідно користуватися інструментами з ізольованими ручками, а також, якщо можна, працювати однією рукою.

8. Не можна торкатися відкритими частинами тіла поверхонь реостатів і контактів, що проводять струм.

9. У разі ураження будь-кого з оточення струмом необхідно вимкнути лабораторну установку або загальне електроживлення лабораторії, викликати лікаря і до його приходу робити потерпілому штучне дихання та непрямий масаж серця.

10. Потрібно додержуватися суворого порядку в лабораторії, виконувати всі правила техніки безпеки і вимагати того самого від товаришів. Пам'ятайте, що нехтування цими правилами може призвести до тяжких наслідків для здоров'я!

За псування лабораторного обладнання винні несуть матеріальну відповідальність.

Лабораторна робота 1
**ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРЯМНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ І СТАБІЛІТРОНІВ**

Мета роботи – закріпити знання з теорії p - n -переходів, напівпровідникових діодів і стабілітронів, набути практичних навичок зняття вольт-амперних (ВАХ) характеристик діодів і стабілітронів та застосування їх в електроніці.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал із фізики p - n -переходу, з випрямних діодів і стабілітронів.

2. Навести в зошитах-звітах схеми для зняття прямої (рис. 1.1) і зворотної гілок (рис. 1.2) ВАХ діодів, зворотної гілки вольт-амперної характеристики стабілітрона (рис. 1.3.), а також нарисувати таблиці 1.1, 1.2, 1.3.

3. Ознайомитися із питаннями, винесеними на письмове опитування перед лабораторною роботою.

Список контрольних питань

1. Механізм власної, електронної, діркової провідності напівпровідників.

2. Що є причиною виникнення контактної різниці потенціалів у p - n -переході та від чого вона залежить?

3. Провести порівняльну характеристику ВАХ германієвого і кремнієвого діодів.

4. Універсальні (високочастотні) діоди. Особливості технології виготовлення.

5. Тунельний і обернений діоди, їхні ВАХ і сфера використання.

6. Фізичні процеси на межі «метал-напівпровідник».

7. Напівпровідникові стабілітрони. Їхні параметри і характеристики.

8. Схема і принцип дії стабілізатора на стабілітроні.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з розміщенням елементів лабораторної установки згідно з наведеним вище описом (див. рис. 1). З'ясувати послідовність збирання досліджуваних схем.

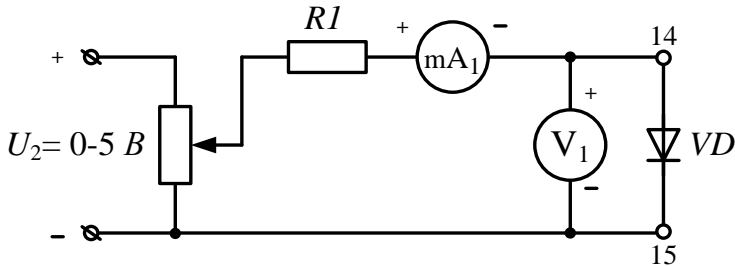


Рисунок 1.1 – Схема для зняття прямої гілки ВАХ діода

2. Впевнитися у працездатності діодів. Для цього вимірювальний прилад (тестер) потрібно перевести в режим вимірювання опору. Для прямого увімкнення діода гніздо «+» необхідно з'єднати з анодом діода (згідно з позначкою на його корпусі), а на катод діода подати негативний потенціал від тестера. Діод можна вважати робочим, якщо його прямий опір становить кілька десятків Ом, а зворотний – кілька сотень кОм.

3. Зібрати схему (див. рис. 1.1) для зняття прямої гілки ВАХ напівпровідникового діода. Для цього застосувати кремнієвий діод Д 226 або його зарубіжний аналог, який потрібно підпаяти до лівої пари контактів 14, 15 комутаційної плати. Величину обмежувального опору **R1** вибрати в межах (62–620) Ом.

4. Максимальна пряма напруга (спад напруги) $U_{np\max}$ на кремнієвих діодах досягає значень (0,8–1,0) В.

Змінюючи напругу на діоді VD1 (положення перемикача 7 діапазонів вимірювання вольтметра $V_1 = 1$ В), простежити зміну струму через діод. З цією метою зробити декілька вимірів

струму, змінюючи напругу з кроком $\Delta U_{np} = 0,1$ В. Результати вимірювань занести до таблиці 1.1.

У разі якщо максимальна пряма напруга буде менша ніж 1 В, дискретність вимірювань треба зменшити (наприклад, $\Delta U_{np} = 0,05$ В).

Таблиця 1.1

U_{np}, B	0	0,1	0,2	...	0,8	$U_{np_{max}}$
I_{np}, mA				...		

5. Зібрати схему для зняття зворотної гілки ВАХ напівпровідникового діода, що досліджували раніше (див. рис. 1.2). Для цього діод підпаюють до правої пари контактів 16, 17 комутаційної плати у зворотній полярності (тобто анодом до «-» правого джерела, а катодом до «+»). Величину обмежувального опору R_2 водночас потрібно зробити мінімальною.

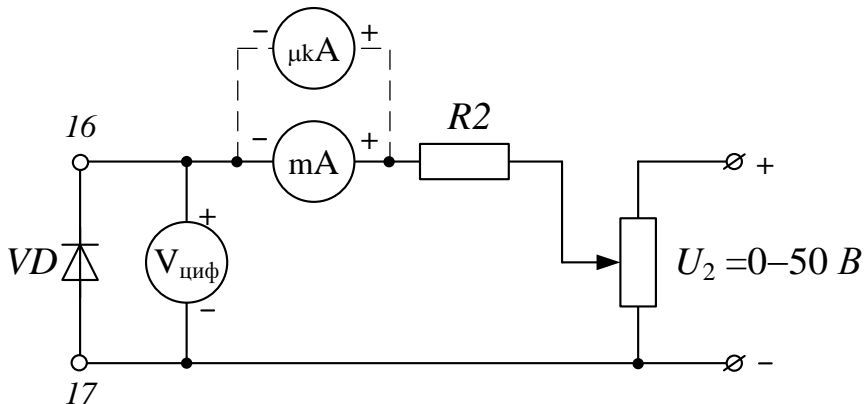


Рисунок 1.2 – Схема для зняття зворотної гілки ВАХ діода

Користуючись методикою, викладеною у п. 4, зняти зворотну гілку ВАХ кремнієвого діода Д226 або його зарубіжного аналога. Взяти до уваги, що для діодів цього типу $\Delta U_{zв_{max}} = 200$ В, а $I_{zв_{max}} = 50$ мкА, тому напругу на ньому змінювати від 0 до 40 В. Напругу необхідно вимірювати цифровим вольтметром 19, а струм – мікроамперметром. Результати вимірювань занести до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

$U_{zв},$ В	0	5	10	...	35	40
$I_{zв},$ мкА				...		

6. Замінивши кремнієвий діод Д226 на германієвий діод Д7 або його зарубіжний аналог, зняти для нього пряму і зворотну гілки ВАХ згідно з методикою, викладеною в пунктах 3, 4, 5.

Водночас урахувати, що максимальна пряма напруга (спад напруги) на германієвому діоді досягає (0,3–0,4) В.

7. Використати для дослідження діод Шоттки і зняти для нього пряму і зворотну гілку ВАХ згідно з методикою п. 3, 4, 5. Звернути увагу на різницю між ВАХ діодів: кремнієвого, германієвого та Шоттки.

8. Побудувати зняті ВАХ на міліметровому папері (або з використанням комп'ютерних графобудівників). Водночас для зручності спостереження за зростанням зворотного струму $I_{zв}$ бажано пряму і зворотну гілки діодів зображувати у спільних осях координат у різних масштабах. Зробити та записати висновки.

9. Зібрати схему (див. рис. 1.3) для дослідження напівпровідникового стабілітрона **VD1** із відомим маркуванням.

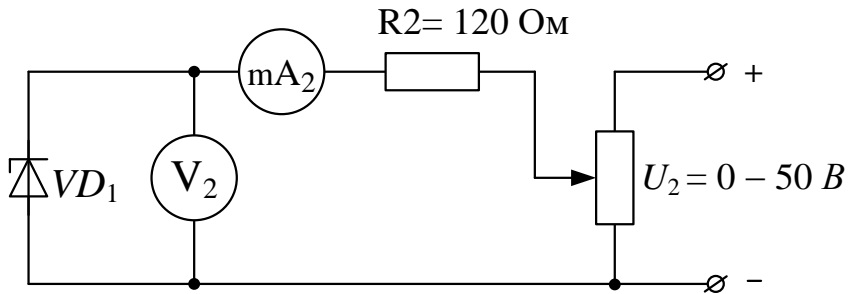


Рисунок 1.3– Схема для дослідження ВАХ стабілітрона

10. Зняти зворотну гілку його ВАХ, використовуючи методику п. 5.

У разі наближення до ділянки стабілізації, для точного відображення ВАХ стабілітрона, крок вимірювань потрібно зменшити. Водночас, збільшуючи зворотну напругу $U_{зв}$, треба слідкувати, щоб струм стабілітрона не перевищував величини $I_{см} = 200$ мА. Замість мікроамперметра водночас до схеми потрібно під'єднати міліамперметр mA₂!

Результати дослідження записати в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3

$U_{зв}, B$	0	2	4	6	8	10	...	$U_{см}$
$I_{зв}, mA$								

Отриману напругу стабілізації $U_{см}$ порівняти з аналогічним довідниковим параметром $U_{см}$ цього приладу.

11. За результатами виконання пункту 10 побудувати ВАХ дослідженого стабілітрона.

За графіком визначити:

– напругу стабілізації $U_{см}$;

- струм стабілізації I_{cm} ;
- ширину ділянки стабілізації ΔU_{cm} .

Для точки (U_{cm}, I_{cm}) за робочою ділянкою ВАХ, задаючись приростом струму $\Delta I = 5$ мА, визначити диференціальний опір стабілітрона

$$r_{cm} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

і порівняти його з довідниковим значенням.

12. На додатковій комутаційній платі з випрямними діодами, яку видає викладач, за допомогою паяльника і провідників змонтувати навісним монтажем схему параметричного стабілізатора (рис. 1.4), яку потрібно через провідники 2 і 4 під'єднати до джерела змінної напруги 10 В комбінованого блока живлення (контактні гнізда 20 на лицьовій панелі лабораторної установки). Резистори R_H та R_D видають додатково.

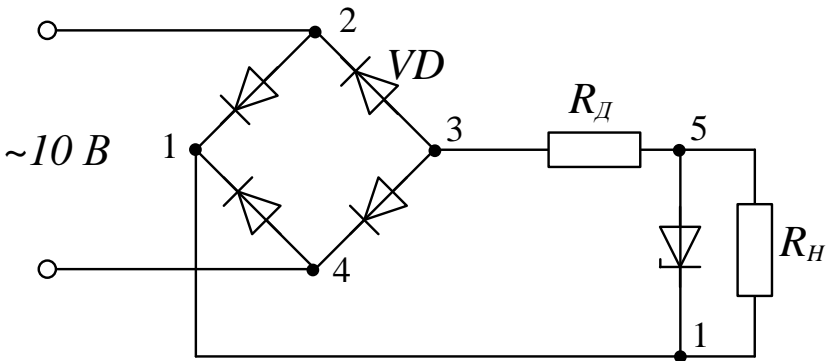


Рисунок 1.4 – Схема параметричного стабілізатора

За допомогою осцилографа зняти осцилограми в контрольних точках схеми рисунка 1.4:

- у точках 2, 4 – вхідної напруги $U_{вх}(t)$;

- у точках 1, 3 – вихідної випрямленої напруги $U_H(t)$;
- у точках 1, 5 – напруги стабілізації $U_{CT}(t)$.

Одержані результати у формі часових діаграм напруги $U_{вх}(t)$, $U_H(t)$ і $U_{CT}(t)$ зарисувати в одній системі координат за зразком рисунка 1.5. Проаналізувати одержані результати і зробити висновки.

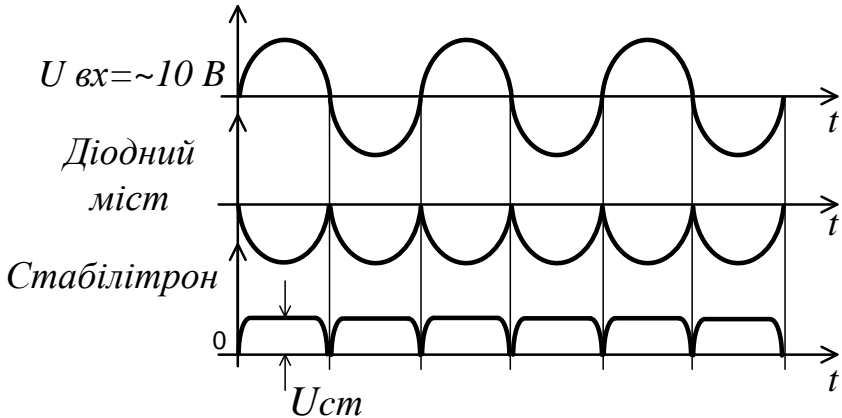


Рисунок 1.5 – Часові діаграми роботи стабілітрона за змінної напруги

Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Схеми рисунків 1.1, 1.2, 1.3 для зняття статичних ВАХ діодів і схема параметричного стабілізатора (див. рис. 1.4).
4. Заповнені таблиці 1.1, 1.2, 1.3.
5. Графіки залежності $I = f(U)$ та для всіх діодів і стабілітрона.
6. Часові діаграми напруги схеми рисунка 1.5.
7. Загальні висновки до роботи. Вони мають містити короткий опис проведених досліджень і їхній аналіз.

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА У СХЕМІ ЗІ СПІЛЬНИМ ЕМІТЕРОМ В АКТИВНОМУ РЕЖИМІ

Мета роботи – експериментальне визначення характеристик і параметрів біполярного транзистора (БП).

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про характеристики і параметри БТ.
2. Ознайомитися з контрольними питаннями.

Перелік контрольних питань

1. Схема БТ зі спільною базою: статичні вхідні характеристики та коментарі до них.
2. Схема БТ зі спільною базою: статичні вихідні характеристики та коментарі до них.
3. Схема БТ зі спільним емітером: статичні вхідні характеристики та коментарі до них.
4. Схема БТ зі спільним емітером: статичні вихідні характеристики та коментарі до них.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 2.1) для зняття сім'ї статичних характеристик біполярного транзистора з провідністю $p-n-p$ у схемі зі спільним емітером.

Увага! У цій лабораторній роботі транзистор досліджують в активному режимі. Водночас емітерний перехід (ЕП) вмикається в прямому напрямку, колекторний перехід (КП) вмикається у зворотному напрямку.

Для транзистора з провідністю $n-p-n$ полярність напруги U_1 і U_2 у схемі потрібно змінити на протилежну.

Розміщення електродів транзистора і його тип провідності потрібно визначити за довідником. Працездатність транзисто-

ра можна перевірити за допомогою тестера, вимірявши опори переходів (рис. 2.2). Якщо прямі опори переходів становлять десятки Ом, зворотні – сотні кілоом і більше, а опір між емітером і колектором максимальний, то біполярний транзистор є працездатним.

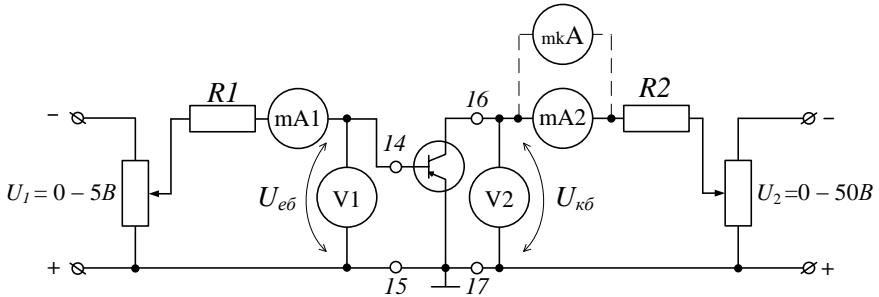


Рисунок 2.1 – Схема для зняття характеристик транзистора

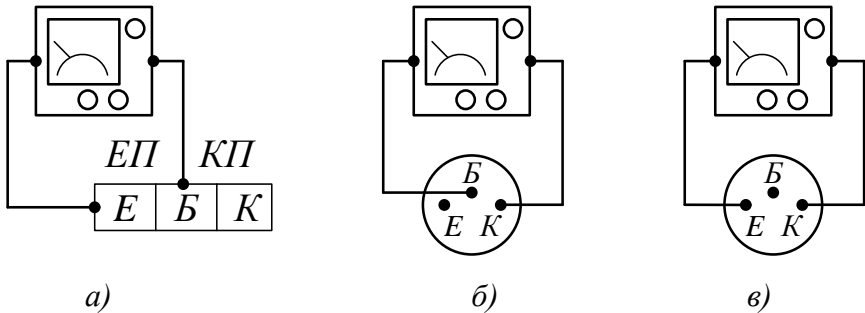


Рисунок 2.2 – Схема перевірки працездатності транзистора

Для збирання схеми використати з'єднувальний провідник між контактами 15 та 17 комутаційної плати. Значення обмежувальних опорів **R1** та **R2** задає викладач. Після перевірки викладачем зібраної схеми увімкнути лабораторну установку.

2. Зняти статичні вхідні характеристики одержаного транзистора у схемі зі спільним емітером

$$I_{\bar{b}} = f(U_{\bar{e}b}) | U_{ke} = \text{const}.$$

З цією метою виставити напругу $U_{ke} = 0 \text{ В}$ за допомогою потенціометра правого блока живлення. Змінюючи напругу $U_{\bar{e}b}$ потенціометром лівого блока живлення в межах від 0 В до 1 В , слідкувати за зміною вхідного струму транзистора $I_{\bar{b}}$. Водночас кожного разу після чергового виставлення $U_{\bar{e}b}$ перед вимірюванням чергового значення $I_{\bar{b}}$ необхідно підстроювати напругу $U_{ke} = 0 \text{ В}$.

Після зняття характеристики за $U_{ke} = 0 \text{ В}$ аналогічно зняти вхідні характеристики за $U_{ke} = 0,5 \text{ В}, 1 \text{ В}, 2 \text{ В}, 3 \text{ В}$.

З усіх знятих характеристик вибрати для звіту мінімальну кількість – три характеристики, зокрема нульова, які не повинні перетинатись. Якщо напруги вибраної величини U_{ke} досягти не вдається, вимірювання потрібно припинити і вибрати меншу константу.

Результати досліджень занести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

$U_{ke} = 0 \text{ В}$	$U_{\bar{e}b}, \text{В}$	0	0,1	0,2	...	0,9
	$I_{\bar{b}}, \text{mA}$					
$U_{ke} = 1 \text{ В}$	$U_{\bar{e}b}, \text{В}$					
	$I_{\bar{b}}, \text{mA}$					
...						
$U_{ke} < 3 \text{ В}$	$U_{\bar{e}b}, \text{В}$					
	$I_{\bar{b}}, \text{mA}$					

3. Зняти статичні вихідні характеристики одержаного транзистора у схемі зі спільним емітером.

$$I_K = f(U_{ke}) | I_{\delta} = const .$$

З цією метою виставити потенціометром лівого блока живлення струм $I_e = 0$ мА. Змінюючи напругу U_{ke} потенціометром правого блока живлення від 0 В до 15 В, робити заміри вихідного струму транзистора I_K , водночас підтримуючи сталі значення I_{δ} .

Крім вихідної характеристики за $I_{\delta} = 0$, зняти криві

$$I_K = f(U_{ke}), \text{ за } I_{\delta} = 1 \text{ мА, } 2 \text{ мА, } 3 \text{ мА, } 4 \text{ мА.}$$

Результати досліджень занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

$I_{\delta} = 0 \text{ мА}$	$U_{ke}, \text{В}$	0	1	...	15
	$I_K, \text{мА}$				
$I_{\delta} = 1 \text{ мА}$	$U_{ke}, \text{В}$			...	15
	$I_K, \text{мА}$				
$I_{\delta} = 2 \text{ мА}$	$U_{ke}, \text{В}$			...	15
	$I_K, \text{мА}$				

4. Визначити коефіцієнти підсилення струму у схемі зі спільним емітером. Для цього потрібно виставити напругу $U_{ke} = 10$ В. Потім виставити потенціометром лівого блока живлення вхідну напругу, наприклад (0,1–0,3) В, і провести вимірювання приростів вихідного струму $\Delta I_K (\text{мА}_2)$, вхідного струму $\Delta I_{\delta} (\text{мА}_1)$. Визначити коефіцієнти підсилення за формулою

$$K_I = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}}$$

5. Аналогічно провести вимірювання приростів вхідної напруги $U_{еб}$ (вольтметр V_1), вихідної напруги $U_{ке}$ (вольтметр V_2) і визначити

$$K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}} = \left| \frac{\Delta U_{ке}}{\Delta U_{еб}} \right|$$

Варто пам'ятати, що вихідний сигнал транзистора $U_{вих} = U_{ке}$ є інвертованим щодо вхідного, тому приріст вихідної напруги відбувається у зворотному напрямі (вольтметр V_2 фіксує зменшення цих значень).

Відомо, що у схемі зі спільним емітером $K_I > 1$, $K_U > 1$.

6. Навести сім'ю статичних характеристик транзистора у схемі зі спільним емітером за даними таблиць 2.1 і 2.2.

Одержані значення параметрів порівняти з їхніми довідниковими значеннями.

7. На макетній платі, що видає викладач, змонтовано підсилювальний каскад на транзисторі у схемі зі спільним емітером (ССЕ, рис. 2.3), що живиться постійною напругою (0–10) В від лабораторного стенда (клеми 10).

На вхід схеми подати сигнал від додаткового генератора синусоїдальних коливань з амплітудою (0÷0,5) В (т. 1, загальна). За допомогою осцилографа зняти осцилограми вхідного і вихідного сигналів у динамічному режимі і визначити коефіцієнт підсилення напруги в динамічному режимі

$$K_U = \frac{\Delta U_{ке}}{\Delta U_{еб}}$$

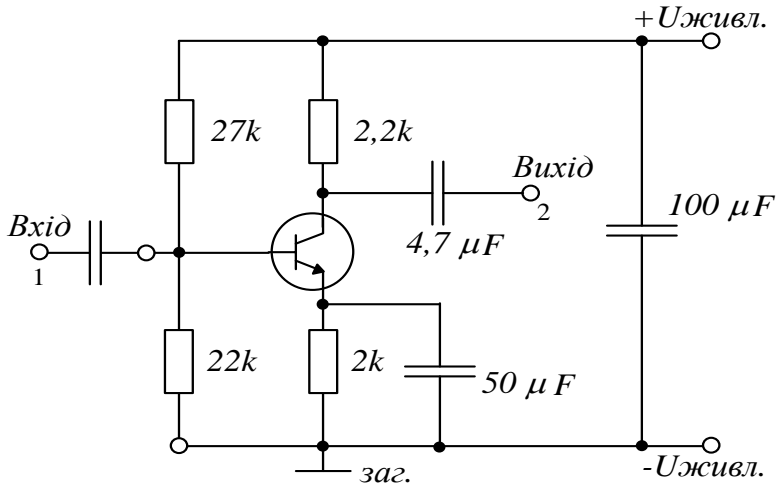


Рисунок 2.3 – Підсилювальний каскад на транзисторі у схемі зі спільним емітером

Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема дослідження (див. рис. 2.2).
4. Заповнені таблиці 2.1, 2.2.
5. Графіки сімей статичних характеристик транзистора у схемі зі спільним емітером.
6. Загальні висновки до роботи.

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА З КЕРУВАЛЬНИМ P-N-ПЕРЕХОДОМ І З ІЗОЛЬОВАНИМ ЗАТВОРОМ

Мета роботи – експериментально одержати вхідні і вихідні характеристики та параметри вказаних викладачем транзисторів.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про польові транзистори.
2. Ознайомитися з питаннями письмового опитування.

Перелік контрольних питань

1. Будова і принцип дії польового транзистора (ПТКП) з керувальним *p-n*-переходом.
2. Будова і принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором (МОН, МДН).
3. Статичні прохідні характеристики ПТ з керувальним *p-n*-переходом $I_c = f(U_{зв})$, $U_{св} = const$.
4. Статичні вихідні характеристики ПТ з керувальним *p-n*-переходом $I_c = f(U_{св})$, $U_{зв} = const$.
5. Статична прохідна характеристика МОН-транзистора $I_c = f(U_{зв})$, $U_{св} = const$.
6. Статичні вихідні характеристики МОН-транзистора $I_c = f(U_{св})$, $U_{зв} = const$.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 3.1) для зняття статичних характеристик ПТ (схема зі спільним витоком на рисунку подана для *p*-канального приладу). Розміщення електродів транзистора і тип провідності його каналу визначити за довідником. Для транзистора з *n*-каналом знак вхідної і вихідної напруги змінюється

на протилежний. Значення обмежувальних опорів вибрати такими $R1 = 8,2 \text{ Ом}$, $R2 = (120-620) \text{ Ом}$.

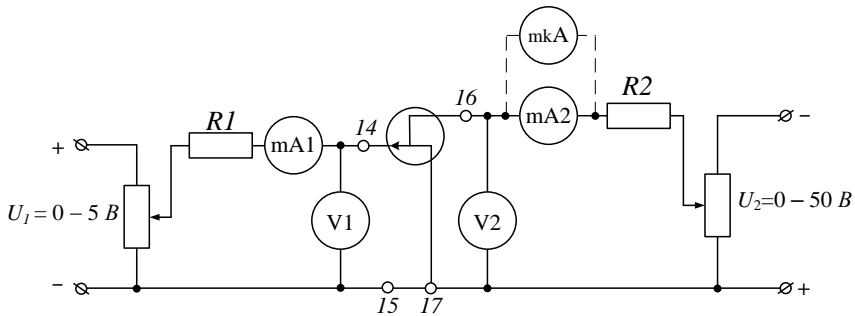


Рисунок 3.1 – Схема для зняття вхідних і вихідних характеристик транзистора

Після перевірки зібраної схеми увімкнути лабораторну установку.

Увага! Увімкнення транзистора у схему з порушенням полярності вхідної напруги $U_{зв}$ може вивести транзистор із ладу (подачу на закрив прямої напруги, яка перевищує величину $0,5 \text{ В}$, заборонено!).

2. Визначити напругу $U_{зв.відс}$. З цією метою виставити потенціометром правого джерела живлення напругу $U_{св} = 4 \text{ В}$.

Після цього, збільшуючи потенціометром лівого джерела напругу $U_{зв}$, досягти мінімального струму стоку I_c (для більшої точності знаходження замість міліамперметра mA_2 скористатися мікроамперметром). Напруга, на якій струм I_c вже не зменшується, буде саме напругою відсічки $U_{зв.відс}$.

3. Зняти статистичні прохідні характеристики транзистора

$$I_c = f(U_{зв}) \Big|_{U_{св} = const} .$$

З цією метою, змінюючи напругу $U_{зв}$ в межах від 0 до $U_{зв.відс}$ та підтримуючи під час кожного вимірювання напругу $U_{св}$ сталою, прослідкувати за зміною струму I_c . Прохідні характеристики зняти за трьох значень напруги $U_{св} = -4\text{ В}, -8\text{ В}, -10\text{ В}$.

Зважаючи те, що вони еквідістантні і майже зливаються, можна обмежитися будь-якою з них.

4. Зняти статичні вихідні (стокові) характеристики транзистора

$$I_c = f(U_{св})|U_{зв} = const .$$

Для цього, змінюючи напругу стоку $U_{св}$ від 0 до 15 В та підтримуючи напругу затвора $U_{зв}$ за кожного вимірювання сталою ($U_{зв} = 0\text{ В}, 0,2\text{ В}, 0,4\text{ В}, 0,6\text{ В}, 0,8\text{ В} \dots U_{зв.відс}$), виміряти стоковий струм I_c .

Результати вимірювання за п. 3 і 4 занести до таблиць 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1

$U_{св} = -4\text{ В}$	$U_{зв}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	.....	$U_{зв.відс}$
	$I_c, \text{ mA}$						
$U_{св} = -8\text{ В}$	$U_{зв}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	.....	$U_{зв.відс}$
	$I_c, \text{ mA}$						
$U_{св} = -10\text{ В}$	$U_{зв}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	.....	$U_{зв.відс}$
	$I_c, \text{ mA}$						

Таблиця 3.2

$U_{зв} = 0 B$	$U_{св}, B$	0	1	2	..... 15 B
	I_c, mA				
$U_{зв} = 0,2 B$	$U_{св}, B$	0	1	2	..... 10 B
	I_c, mA				
...					
$U_{зв} = 1 B$	$U_{св}, B$	0	1	2	..... 10 B
	I_c, mA				

5. За даними таблиць 3.1 і 3.2 побудувати сім'ї вхідних і вихідних характеристик досліджуваного польового транзистора.

6. Застосовуючи відому з лекцій методику, визначити диференційні параметри ПТКП. Для цього потрібно задати невеликий приріст напруги $\Delta U_{зв}$, $\Delta U_{св}$ і визначити відповідний приріст струму ΔI_c .

За одержаними даними визначити:

– крутизну ВАХ: $S_{nm} = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}} \left(\frac{mA}{B} \right)$;

– внутрішній опір приладу: $r_{nm} = \frac{\Delta U_{св}}{I_c} (кОм)$;

а також визначити величину статичного коефіцієнта підсилення

$$\mu = S_{nm} \cdot r_{nm}.$$

Знайдені величини параметрів звірити з поданими в довіднику для досліджуваного транзистора.

7. На макетній платі, що видає викладач, друкованим монтажем змонтовано підсилювальний каскад на польовому транзисторі у схемі зі спільним витоком (рис. 3.2), що живиться постійною напругою від лабораторного стенда (гнізда 10).

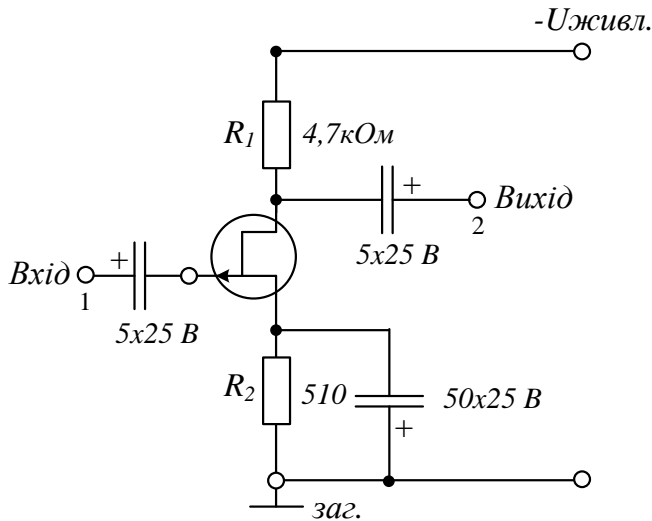


Рисунок 3.2 – Підсилювальний каскад на польовому транзисторі у схемі зі спільним витоком

На вхід схеми (точка 1, спільний контакт) подати сигнал від додаткового генератора синусоїдальних коливань з амплітудою $(0 \div 0,5)$ В.

За допомогою осцилографа зняти осцилограми вхідного і вихідного сигналів у динамічному режимі і визначити коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = \frac{|\Delta U_{вих}|}{\Delta U_{вх}}$$

8. Зібрати схему (рис. 3.3) зі спільним витоком для зняття статичних характеристик польового транзистора з ізольованим затвором (зарубіжні аналоги транзистора IRF, SSF).

Цей потужний МОН-транзистор з індукованим каналом *n*-типу має такі параметри:

– струм стоку 30 А;

- напруга затвор-витік 20 В;
- потужність 45 Вт.

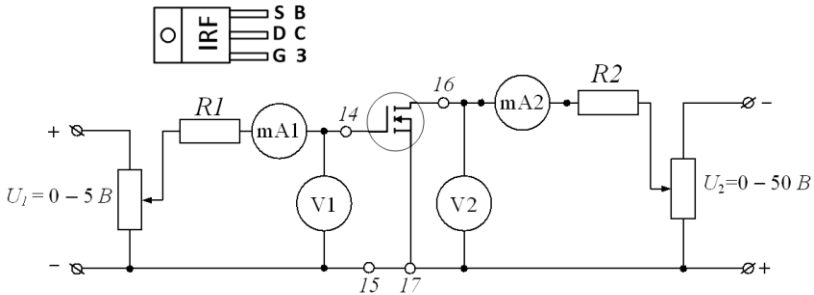


Рисунок 3.3 – Цоколівка МОН-транзистора та схема для зняття його статичних характеристик

9. Визначити напругу $U_{зпор}$. З цією метою виставити потенціометром правого джерела живлення напругу $U_{СВ} = 10$ В. Потім, подаючи напругу на затвор з лівого блока живлення, зафіксувати її в момент початку зростання струму I_c .

Границі виміру приладів такі:

$$mA_1 = 1 \text{ мА}, V_1 = 5 \text{ В}, mA_2 = 100 \text{ мА}, V_2 = 10 \text{ В}, \\ R_1 = 8,2 \text{ Ом}, R_2 = 62 \text{ Ом}.$$

10. Зняти статичну прохідну характеристику транзистора, досягаючи струму стоку $I_c = 100$ мА, і дані занести в таблицю 3.3.

$$I_c = f(U_{зв}) \Big| U_{СВ} = const .$$

Таблиця 3.3

$U_{СВ} = 10$ В	$U_{ЗВ}$, В	$U_{ЗВ 1}$, В	$U_{ЗВ 2}$, В	$U_{ЗВ 3}$, В
	I_c , мА			

11. Зняти статичні вихідні (стокові) характеристики транзистора

$$I_c = f(U_{cb})|U_{zb} = const .$$

Задаючись трьома значеннями напруги U_{zb} з попереднього пункту і підтримуючи її сталою, виміряти стоковий струм I_c до межі 100 мА, дані занести в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4

U_{zb1}, B	U_{cb}, B				
	I_c, mA				
U_{zb2}, B	U_{cb}, B				
	I_c, mA				
U_{zb3}, B	U_{cb}, B				
	I_c, mA				

Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема зняття статичних характеристик польових транзисторів і розташування їхніх цоколівок.
4. Заповнені таблиці 3.1–3.4.
5. Графіки сімей статичних характеристик досліджуваних транзисторів.
6. Розрахунки диференційних параметрів транзистора ПТКП.
7. Загальні висновки до роботи.

Лабораторна робота 4
**ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРА
В ДИНІСТОРНОМУ ТА ТРИНІСТОРНОМУ РЕЖИМАХ**

Мета роботи – ознайомитися з дією тиристора малої та середньої потужності; одержати ВАХ тиристора в диністорному та триністорному режимах.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про тиристри.
2. Підготуватися до письмового опитування.

Перелік контрольних питань

1. Будова, принцип дії та ВАХ диністора.
2. Будова, принцип дії та сім'я ВАХ триністора.
3. Пояснити механізм утворення внутрішнього позитивного зворотного зв'язку у триністорній структурі.
4. Вмикання та вимикання тиристора в диністорному та триністорному режимах.

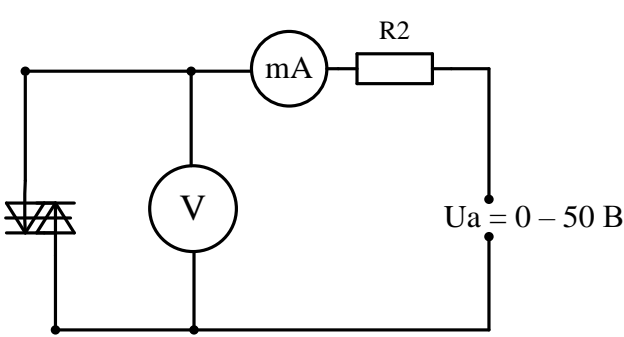
Порядок виконання роботи

1. Визначити в довіднику розміщення електродів тиристорів КН 101 (діодний тиристор), КУ 201, КУ 202 (тріодний тиристор) та симетричного диністора DB3, одержаних від викладача, а також дізнатися, керування за анодом чи за катодом використовується в них.

2. Зібрати схему (рис. 4.1) для зняття ВАХ диністора. Для цього пропонується симетричний диністор DB3 (або його зарубіжний аналог).

Виставити вхідну напругу зібраної схеми $U_2 = 0$ В. Поступово збільшуючи анодну напругу U_a , спостерігати за міліамперметром, як змінюється анодний струм у закритому стані диністора. У момент відкриття диністора прослідкувати, щоб не було перевантаження в анодному колі за струмом. Якщо це є, то необ-

хідно збільшити величину опору R_2 , або виставити потрібну межу виміру струму (наприклад, 100 мА або 1000 мА).



$$U_{\text{відм}} = 28 \text{ В}$$

$$I_{\text{max}} = 2 \text{ А}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ кОМ}$$

Рисунок 4.1 – Схема для дослідження диністора

Відмітити координати ($U_{\text{вм}}, I_{\text{вм}}$) – точки, у якій диністор відкривається.

Відмітити координати точки ($U_{\text{упр}}, I_{\text{упр}}$), у якій опинилися характеристики диністора у відкритому стані.

У подальшому потрібно, збільшуючи напругу на диністорі, спостерігати за збільшенням струму через нього до значень 200–300 мА, поки не спрацює схема захисту приладу від перевантаження. Через одержані точки провести якісну ВАХ диністора.

Змінивши полярність вмикання диністора, провести вказані дослідження на зворотній ВАХ приладу. На одержаних характеристиках порівняти координати точок вмикання та утримання диністора.

I. Диністорний режим

3. Зібрати схему (рис. 4.2) для зняття ВАХ у диністорному режимі тріодного тиристора (триністора) КУ 202.

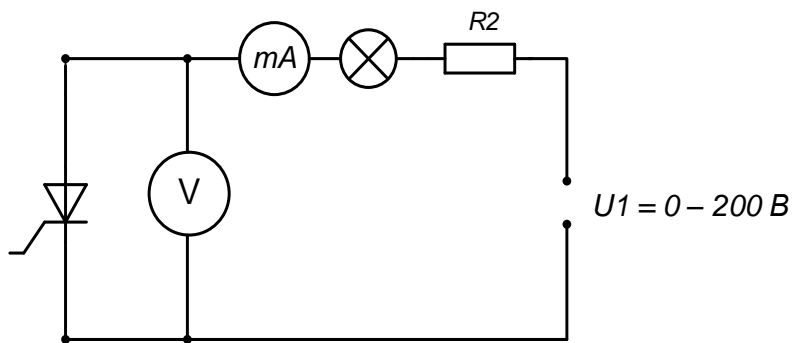


Рисунок 4.2 – Схема для дослідження диністорного режиму

Відмінністю цієї схеми від попередньої є вмикання триністора без участі керувального електрода, тобто $I_{кер} = 0$, і подача на нього підвищеної напруги від додаткового джерела живлення.

За методикою попереднього пункту ввімкнути триністор.

Зафіксувати точки вмикання та утримання триністора і побудувати якісну ВАХ приладу.

II. Триністорний режим

4. Зібрати схему (рис. 4.3).

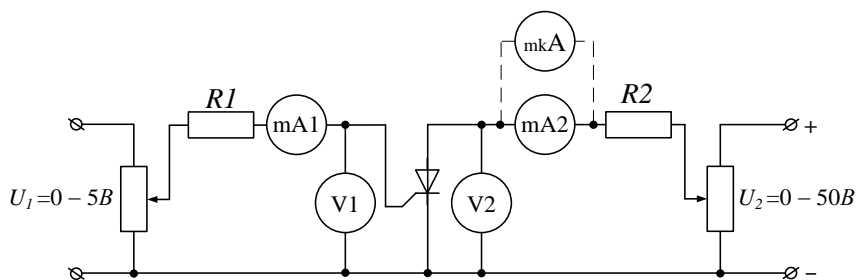


Рисунок 4.3 – Схема для дослідження триністорного режиму

Виконати вмикання тиристора 2 способами.

Перший спосіб. Вмикання за допомогою струму керування.

З правого блока живлення на тиристор подати анодну напругу $U_a = (10-15)$ В. Цю напругу вважаємо напругою вмикання ($U_{\text{вм}}$), під яку необхідно підібрати відповідну величину струму керування $I_{\text{кер}}$. Наразі $I_{\text{кер}} = 0$ мА, і тому через тиристор проходить анодний струм закритого стану – струм вмикання $I_{\text{вм}}$.

З лівого блока живлення на керівний електрод тиристора подаємо напругу U_k . Збільшуючи її потенціометром 9, слідкуємо за лівим міліамперметром mA_1 за зростанням струму керування $I_{\text{кер}}$. У момент вмикання тиристора фіксуємо цей струм (наприклад, $I_{\text{кер}} = 3$ мА). Одночасно за показами правих міліамперметра mA_2 і вольтметра V_2 визначаємо координати точки переходу тиристора у відкритий стан ($I_{\text{утр}}, U_{\text{утр}}$).

Одержавши координати двох точок ($U_{\text{вм}}, I_{\text{вм}}$) та ($I_{\text{утр}}, U_{\text{утр}}$), будуємо якісну ВАХ тиристора за даного струму керування $I_{\text{кер}}$.

Другий спосіб. Вмикання тиристора за допомогою анодної напруги.

З цією метою виставити на міліамперметрі mA_1 лівого блока живлення зафіксований раніше струм керування (наприклад, $I_{\text{кер}} = 3$ мА). Потім, подаючи анодну напругу правим блоком живлення, слідкувати за моментом вмикання тиристора.

Порівняти характеристики приладу для обох способів вмикання, для чого навести їх у спільних координатах.

5. Зняти сімейства ВАХ одержаного тиристора у триністорному режимі.

Для цього задати кілька значень анодної напруги U_a і для кожного з них, фіксуючи струм керування (перший спосіб вмикання), зняти чергову ВАХ тиристора. Визначити, за якого значення $I_{\text{кер}}$ ВАХ тиристора набирає вигляду звичайної ВАХ напівпровідникового діода.

Результати досліджень занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

$U_a, \text{В}$	3 В	20 В	45 В
$I_{\text{кер}}, \text{мА}$			

Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема зняття ВАХ тиристорів.
4. Заповнена таблиця 4.1.
5. Графіки ВАХ для диністорного і триністорного режимів приладу.
6. Висновки.

Лабораторна робота 5
**ДОСЛІДЖЕННЯ СИМІСТОРА ТА ТИРИСТОРА
В КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Мета роботи – ознайомитися з роботою симістора та тиристора в колі змінного струму.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про тиристорти.
2. Ознайомитися з питаннями письмового опитування.

Порядок виконання роботи

I. Дослідження симістора

Вимірювальні прилади для проведення досліду:

- блок живлення;
- лабораторний стенд;
- вимірна панель змінного струму та напруги.

Проведення роботи

Для дослідження запропоновано симістори КУ208Г і зарубіжний аналог – ВТ134, параметри яких наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Параметр	КУ208Г	ВТ134
Напруга закритого стану	400 В	600 В
Максимальна напруга відкритого стану	2 В	1,7 В
Максимальний струм відкритого стану	5 А	4 А
Струм відмикання	15 мА	10 мА

4. Досліджуваний симістор вставити у вимірну панель, схему з'єднань якої наведено на рисунку 5.1.

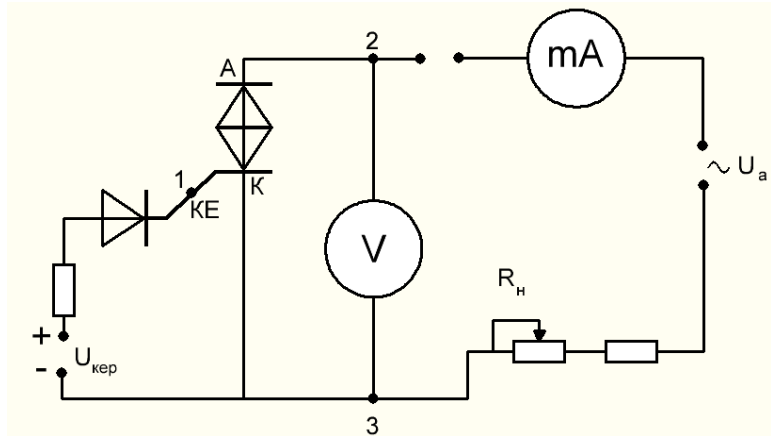


Рисунок 5.1 – Схема для дослідження симістора

5. Підвести до схеми змінну анодну напругу 10 В, для чого контактні штекери з правого боку вимірної панелі вставити в гнізда блока живлення «Електроніка» з позначкою «~» або в гнізда блока живлення паяльника.

6. Підвести до схеми постійну напругу $U_{кер}$, для чого контактні штекери з лівого блоку вимірної плати вставити в гнізда 14 і 15 лабораторного стенда з дотриманням полярності.

7. Поступово збільшуючи постійну напругу на керівному електроді, спостерігати, як змінюється анодний струм у закритому стані симістора. У момент відкриття симістора зафіксувати струм керування ($I_{кер}$), а також анодний струм відкритого стану симістора ($I_{утр}$) і порівняти його з довідниковими даними.

8. Зафіксувати точки ($U_{вм}, I_{вм}$) та ($U_{утр}, I_{утр}$) симістора, за якими побудувати якісну ВАХ приладу.

9. Зняти сімейства ВАХ одержаного симістора.

Для цього задати кілька значень анодної напруги U_a і для кожного з них, фіксуючи струм керування, зняти чергову ВАХ симістора. Водночас кожному значенню анодної напруги U_a повинно бути під'єднане відповідне значення регульованого опору навантаження R_H (табл. 5.2). Визначити, за якого значення $I_{кер}$ ВАХ тиристора набирає вигляду звичайної ВАХ напівпровідникового діода.

Результати досліджень занести до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

R_H	0 Ом	16 Ом	33 Ом
$U_a, В$	3 В	15 В	32 В
$I_{кер}, МА$			

10. Збільшуючи опір навантаження R_H , зняти залежність $I_a = f(R_H)$.

II. Дослідження тиристора в колах змінного струму

Вимірювальні прилади для проведення досліду:

- блок живлення змінного струму;
- осцилограф СІ-83;
- тиристорний регулятор, змонтований на платі за наведеною схемою.

Принцип роботи схеми

У разі вмикання тиристора в ділянку схеми, що містить: мостову схему $VD_1 - VD_4$, навантаження R_H та вторинну обмотку трансформатора W_2 , за нею проходить знакозмінний

струм I_2 , величина якого залежить від інтервалу часу відкриття тиристора.

Для регулювання кута відмикання тиристора використовують схему фазового методу керування, яка формує короткий імпульс, що надходить на керівний електрод тиристора VS_1 . Кут відмикання пропорційний постійній часу T , заряду конденсатора C_1 і регулюється потенціометром R_4 .

Проведення досліду

1. Під'єднати тиристорний регулятор до джерела змінної напруги 30 В. Потенціометр R_4 установити у крайнє ліве положення, а R_6 – у крайнє праве положення.

2. У контрольних точках схеми зняти і зарисувати в одній системі координат часові діаграми зміни напруги для заданого кута відмикання тиристора:

- на діодному випрямлячі $U(VD_1 - VD_4)$;
- стабілітроні $U(VD)$;
- тиристорі $U(VS_1)$;
- навантаженні $U(R_H)$.

3. Визначити за допомогою вольтметра величину напруги на навантаженні.

Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Схеми для зняття статичних характеристик триністора, диністора.
3. Графіки статичних характеристик диністора, триністора, симістора.
4. Часові діаграми триністора в режимі змінного струму.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Чому під час відкривання тиристора напруга на його аноді знижується?
2. Чому в разі зростання струму керування напруга увімкнення тиристора знижується?
3. Способи комутації тиристорів (вмикання та вимикання).
4. Роботи тиристорів у колах постійного і змінного струмів.
5. ВАХ тиристорів.
6. Симетричні тиристори.
7. Сфера застосування тиристорів.
8. Недоліки тиристорів.

Лабораторна робота 6

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМНОВИХ І СВІТЛОВИХ
ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

1. Мета роботи

Ознайомитися з фізичними принципами роботи фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії.

Дослідити темнові вольт-амперні характеристики СЕ.

Дослідити світлові вольт-амперні характеристики ФЕП.

Визначити основні характеристики фотоперетворювачів.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про ФЕП сонячної енергії – сонячні елементи (СЕ).

2. Ознайомитися з питаннями письмового опитування.

Перелік контрольних питань

1. ФЕП сонячної енергії. Фізичні процеси на *p-n*-переході в темноті та за умови освітлення.

2. Будова та принцип дії ФЕП.

3. Темнові та світлові ВАХ СЕ.

4. Основні робочі характеристики СЕ (напруга холостого ходу (U_{oc}), струм короткого замикання (j_{sc}), чинник заповнення ВАХ (FF)) та їхнє визначення.

5. Вплив послідовного R_s та паралельного R_{sh} опорів на FF .

2. Теоретичні відомості

Сонце – важливе поновлюване та екологічно чисте джерело енергії. Сонячну енергію можна перетворювати в електричну за допомогою ФЕП. Такі перетворювачі використовують на космічних кораблях, у радіомаяках і океанських навігаційних буях, в автономних мережах зв'язку та електропостачання, калькуляторах, електронних іграшках тощо.

У ФЕП вільні носії заряду утворюються внаслідок взаємодії напівпровідника зі світлом, а розділяються під дією електричного поля, що виникає всередині елемента, завдяки наявності p - n -переходу, гетеропереходу або МДН структури.

Донедавна практично всі ФЕП виготовляли з кремнію, де формувалися p - n -переходи, проте зараз все більш широке застосування знаходять сонячні елементи (СЕ) на основі гетеропереходів із використанням таких поглинальних напівпровідникових матеріалів, як CdTe, GaAs, InP, CuInGaSe₂ (CIGS), Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) тощо.

Для дослідження СЕ найбільш важливим із практичного погляду є вивчення їхніх темнових і світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ). Аналіз цих залежностей дозволяє визначити ефективність перетворення енергії СЕ, ступінь впливу паразитних опорів тощо.

Освітлення p - n -переходу та його світлова ВАХ

Припустимо, що на p - n -перехід падають фотони з енергією більшою, ніж ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу ($h\nu > E_g$). Унаслідок поглинання фотона виникає електронно-діркова пара. Під дією внутрішнього поля в p - n -переході створені світлом носії заряду рухаються в протилежних напрямках: дірки – в p -область, а електрони – в n -область. Водночас носії заряду, що перейшли через p - n -перехід, створюють додатковий струм. Оскільки надлишкові дірки, що перейшли в p -область, зменшують від'ємний об'ємний заряд, відбувається зниження потенційного бар'єра на межі p - n -переходу.

Поділ фотогенерованих носіїв електричним полем у приконтактній області гомопереходу призводить до виникнення різниці потенціалів, що прикладена до переходу в прямому напрямі, так званої фото-ЕРС. Це еквівалентно прикладанню додаткової напруги U в прямому напрямі до неосвітленого p - n -переходу.

Електрони з n -області і дірки з p -області, долаючи знижений потенційний бар'єр, будуть інжектовані в іншу область, де вони стануть неосновними носіями заряду і рекомбінують. Водночас

струми, обумовлені інжекткованими носіями заряду, спрямовані з p - в n -область. Стаціонарний стан установиться тоді, коли число створених світлом електронно-діркових пар зрівняється з числом носіїв заряду, що проходять через знижений потенційний бар'єр p - n -переходу у протилежному напрямі.

Якщо p - n -перехід з'єднаний із зовнішнім електричним колом, то в ньому генерується фото-ЕРС. ВАХ освітленого СЕ являє собою суперпозицію темної ВАХ p - n -переходу і фотогенерованого (світлового) струму. Під дією світла темнова ВАХ зміщується вниз за віссю струмів у четверту чверть, у якій прилад генерується корисна потужність (рис. 6.1). Оскільки освітлення СЕ призводить до збільшення струму p - n -переходу на світловий струм, рівняння діода набуває вигляду

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right] - I_L, \quad (1)$$

де I_L – світловий струм.

Величина фотоструму I_L визначається числом надлишкових носіїв заряду, що створені світлом і дійшли до p - n -переходу, і дорівнює

$$I_L = j_L S = q\alpha\gamma\beta SI_r / h\nu, \quad (2)$$

де j_L – густина фотоструму;

S – площа p - n -переходу;

α – коефіцієнт поглинання світла;

β – квантовий вихід;

γ – коефіцієнт збирання носіїв – частка електронно-діркових пар, що непрореккомбінували та були розділені переходом;

I_r – інтенсивність випромінювання.

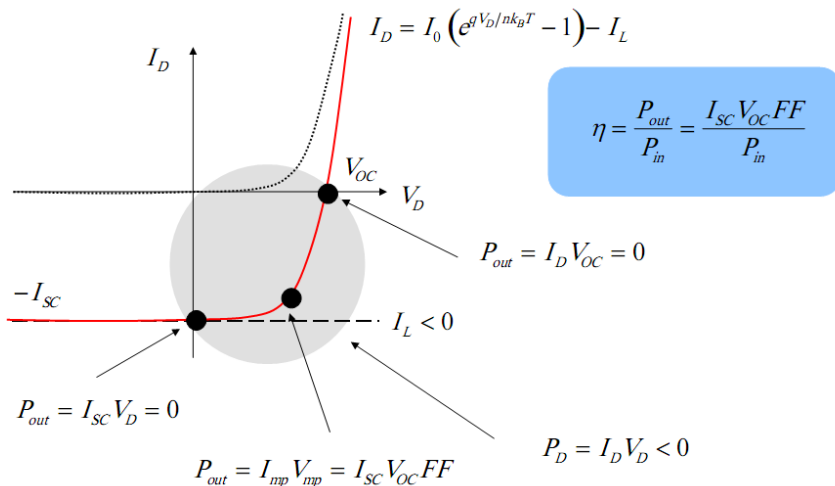


Рисунок 6.1 – Світлова ВАХ та основні характеристики СЕ

Останній вираз справедливий для випадку, коли все світло, що падає на напівпровідник, поглинає матеріал. Рівняння світлової ВАХ залишається справедливим у разі освітлення фотоелемента світлом довільного спектрального складу, водночас змінюється лише значення фотоструму I_L .

Струм короткого замикання I_{sc} (рис. 6.1) відповідає максимальному струму, який може протікати через ФЕП під час освітлення, коли він замкнений сам на себе ($R = 0$). Якщо взяти $U = 0$, то з виразу (1) можна визначити величину струму короткого замикання $I_{sc} = -I_L$. Отже, струм короткого замикання дорівнює струму, що генерується СЕ.

Напруга холостого ходу СЕ U_{oc} (див. рис. 6.1) відповідає напрузі на розімкнених клеммах фотоелемента ($R = \infty$). Вона може бути отримана, якщо взяти у співвідношенні (5) $I = 0$.

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\left(\frac{I_L}{I_0} \right) + 1 \right]. \quad (3)$$

З виразу (3) випливає, що напруга U_{oc} може бути підвищена внаслідок збільшення відношення I_L/I_0 . Цього можна досягти, знижуючи темновий струм за допомогою збільшення рівня легування підкладки, або часу життя неосновних носіїв заряду. Збільшення струму короткого замикання також може призвести до підвищення напруги холостого ходу, однак ефект від цього не такий виражений, як у разі зменшення темнового струму.

Коефіцієнт корисної дії ФЕП розраховується за формулою (4)

$$\eta = \frac{P}{P_s} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P_s}, \quad (4)$$

де P_s – потужність сонячного випромінювання, що падає на сонячний елемент;

FF – чинник заповнення ВАХ (коефіцієнт форми ВАХ), який дорівнює

$$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_m U_m}, \quad (5)$$

де I_m та U_m – густина струму та напруга, що відповідають найбільшій потужності приладу (рис. 5).

З рівняння (5) випливає, що коефіцієнт форми вказує, наскільки реальна ВАХ СЕ відрізняється від ідеальної, що являє собою прямокутну сходику з напругою U_{oc} і струмом I_{sc} .

Вихідна потужність ФЕП дорівнює

$$P = IU = I_s U \left(\exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right) - I_L U. \quad (6)$$

Максимальну потужність СЕ, що виділяється в зовнішньому колі, можна отримати за правильного узгодження опорів ФЕП та навантаження. Положення точки максимальної потужності на світловій ВАХ можна знайти, взявши, що $dP/dU = 0$ (умова екстремуму функції) (рис. 6.2).

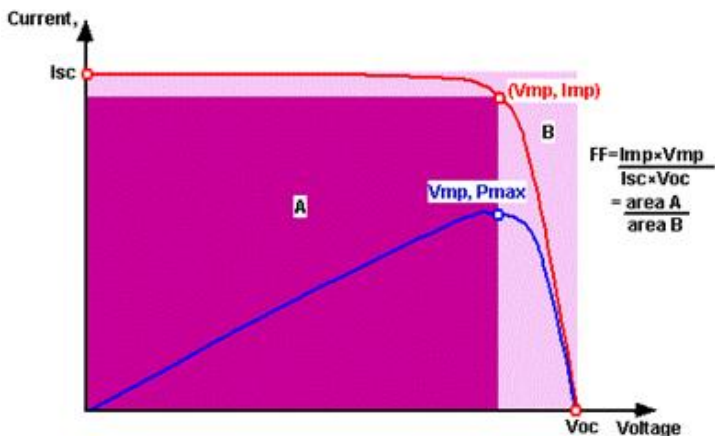


Рисунок 6.2 – Визначення чинника заповнення FF ВАХ СЕ

Звідси отримаємо значення струму та напруги в цій точці

$$I_m = I_s \beta U_m e^{\beta U_m} \sim I_L \left(1 - \frac{1}{\beta U_m}\right), \quad (7)$$

$$U_m = \frac{1}{\beta} \ln \frac{I_L/I_s + 1}{1 + \beta U_m} \sim U_{oc} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m), \quad (8)$$

де $\beta = \frac{q}{AkT}$ ($\beta \sim 38,7 \text{ В}^{-1}$ за $T = 300 \text{ К}$).

Формула (8) дозволяє визначити U_m методом послідовних наближень. Як перше наближення в праву частину підставляється $U_m = U_{oc}$, за другого наближення – визначене значення U_m . Двох ітераційних обчислень достатньо для отримання чотирьох правильних значущих цифр напруги. Можна також розв'язати трансцендентне рівняння (8), використавши функцію `fsolve` пакета `Marple`. Значення I_m визначається за допомогою підстановки U_m у співвідношення (7). Відповідно опір оптимального зовнішнього навантаження СЕ дорівнює $R_{op} = dU_m/dI_m$.

Отже, максимальна вихідна потужність ФЕП визначається співвідношенням

$$P_m = I_m U_m \approx I_L \left(U_{oc} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m) - \frac{1}{\beta} \right). \quad (9)$$

Реальний СЕ, на відміну від ідеального $p-n$ -переходу, має послідовний і шунтувальний опори. Здебільшого еквівалентну електричну схему освітленого ФЕП зображують у вигляді електричного кола із зосередженими опороми (рис. 6.3), а його ВАХ записують у вигляді

$$I = I_0 \left[\exp \frac{q(U - IR_s)}{kT} - 1 \right] + \frac{(U - IR_s)}{R_{sh}} - I_L, \quad (10)$$

де R_s – послідовний опір; R_{sh} – шунтувальний опір.

Послідовний опір обумовлений об’ємним опором шарів, що утворюють СЕ, та опором контактів на лицьовій і зворотній сторонах приладу. Шунтувальний опір пов’язаний здебільшого зі струмами витоку $p-n$ -переходу. Канали об’ємних витоків створюють чужорідні мікро- і макровключення в матеріалі діода. Канали поверхневих витоків утворюються за інтенсивної рекомбінації електронно-діркових пар через поверхневі енергетичні стани напівпровідника, що виникають через порушення валентних зв’язків, а також під час проходження струму по забрудненнях у місцях виходу $p-n$ -переходу на поверхню.

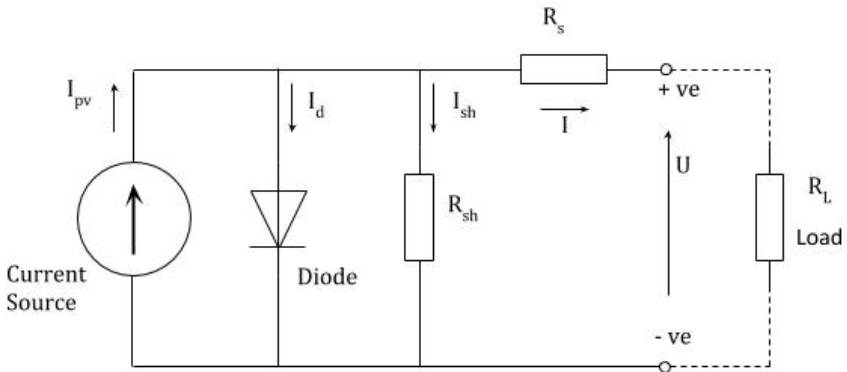


Рисунок 6.3 – Еквівалентна електрична схема реального СЕ з послідовним R_s і шунтувальним R_{sh} опором

Послідовний і шунтувальний опори обумовлюють втрати енергії в СЕ, які призводять до зменшення коефіцієнта форми ВАХ і напруги холостого ходу (рис. 6.4). Тому знання цих параметрів дуже важливо для вдосконалення технології виготовлення ФЕП.

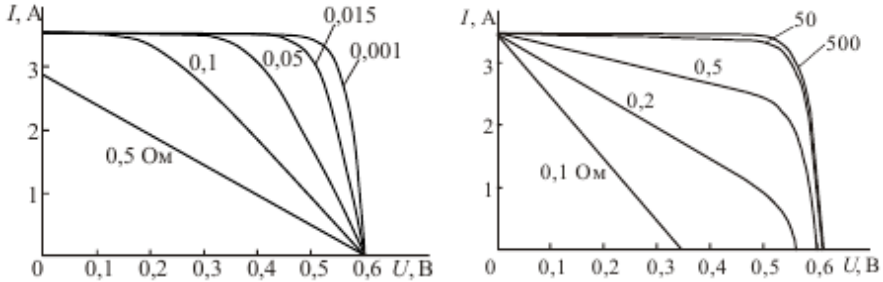


Рисунок 6.4 – Вплив послідовного R_s та шунтувального R_{sh} опорів на вигляд ВАХ СЕ

Падіння напруги на послідовному опорі R_s впливає на ВАХ, значно суттєвіше ніж падіння напруги на шунтувальному опорі (рис. 6.4, ліворуч). Як можна бачити з рисунка, у разі збільшення послідовного опору від 0 Ом до 5 Ом потужність СЕ зменшується більше ніж на 70 %. За умови $j_{sc} = 40 \text{ мА/см}^2$ і $U_{oc} = 0,6 \text{ В}$, для того щоб частка втрат була меншою ніж 3 %, послідовний опір квадратного сантиметра площі елемента не повинен перевищувати 0,5 Ом.

Аналогічно для того щоб втрати, обумовлені шунтувальним опором, не перевищували 3 %, R_{sh} кожного квадратного сантиметра площі СЕ має бути більшим ніж 500 Ом.

Рівняння (10) свідчить, що вплив R_s на ВАХ найбільш значний за сильних струмів (високої напруги зміщення), тоді як вплив R_p – за низької напруги, коли струм, що проходить через перехід, малий порівняно з шунтувальним струмом. Легко зрозуміти, що з ВАХ можна визначити як послідовний, так і шунтувальний опір приладу.

Процес перетворення сонячної енергії в електричну можна умовно розбити на чотири стадії: 1) поглинання світла; 2) генерація електронно-діркових пар; 3) поділ носіїв заряду p - n -переходом; 4) збирання носіїв заряду на електродах.

Ці чотири стадії перетворення сонячної енергії можна виділити в роботі практично всіх наявних СЕ. Непродуктивна робота будь-якої з цих стадій призводить до зниження ефективності перетворення енергії ФЕП загалом.

4. Прилади та пристрої

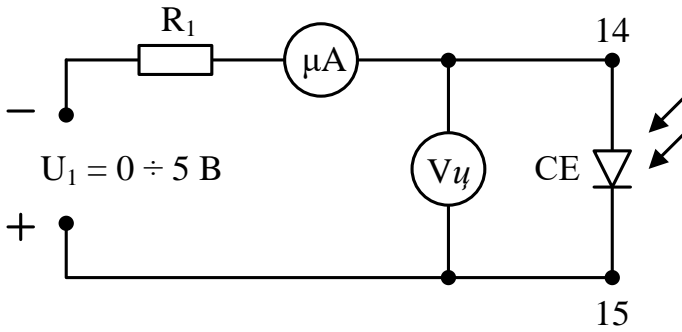
Принципову схему установки, що використовують під час дослідження темнових і світлових ВАХ СЕ, наведено на рисунку 1. Лівий блок живлення призначено для прикладання напруги до приладу. Цифровий вольтметр 19 і цифровий мультиметр **УТ-39** призначені для вимірювання падіння напруги U на ФЕП і струму I , що проходить через нього, відповідно. Для освітлення СЕ використовують світлодіодна панель, яку під'єднують до правої пари гнізд 16 і 17 лабораторного стенда з дотриманням полярності.

5. Хід роботи

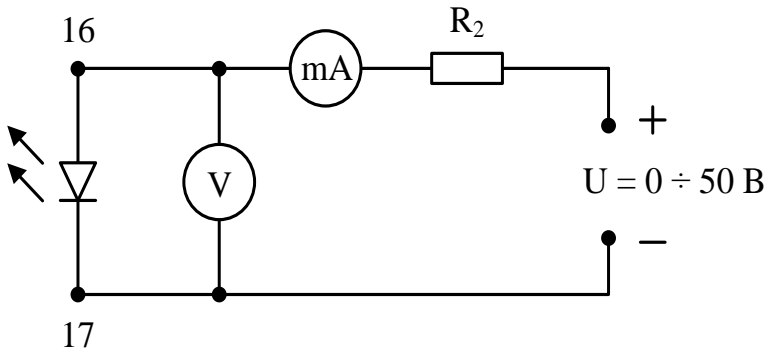
1. Під'єднати СЕ до лівої пари контактів 14 і 15 лабораторного стенда для дослідження електричних характеристик напівпровідникових приладів (див. рис. 1) так, щоб діод був увімкнений у запірному напрямі за схемою, наведеною на рисунку 6.5 а.

2. Увімкнути установку. Змінюючи напругу блока живлення, провести вимірювання темного струму та падіння напруги на СЕ (темнової ВАХ), перед цим щільно заклавши його підручним матеріалом. Вимірювання потрібно провести за 8–10 різних значень напруги до максимального значення струму $I = 2$ мА (3-й квадрант). На початковій ділянці ВАХ вимірювання потрібно провести з меншим кроком. Показання приладів занести до таблиці 6.1. Напруга, що подається на СЕ, не повинна переви-

щувати 5 В. Після закінчення вимірювань зменшити струм в електричному колі до нуля (зняти напругу).



а)



б)

Рисунок 6.5 – Принципова схема установки для дослідження темнових і світлових ВАХ CE

3. Для зняття прямої гілки темної ВАХ змінити полярність лівого блока живлення, не змінюючи полярності мікроамперметра і CE. Під час вимірювання зручніше покроково змінювати струм із причини його швидкої зміни за умови збільшення напруги (1-й квадрант). Показання приладів занести до таблиці 6.1. Максимальне значення струму $I = 2 \text{ mA}$.

Перед тим як відкрити СЕ, необхідно зменшити струм до нуля (зняти напругу).

4. Для зняття світлової ВАХ ФЕП (4 квадрант) перемикач 12 дискретних опорів R1 перевести в максимальне положення. Вхідні гнізда робочої плати замкнуті перетинкою, попередньо від'єднавши їх від лівого блока живлення.

Увімкнути установку, і ручкою 9 лівого блока живлення подати на СЕ напругу $U = 5$ В.

З правого блока живлення подати напругу на світлодіодну панель, забезпечивши тим самим освітлення приладу (рис. 6.1 б), і вибрати з таблиці 6.1 потрібні значення струму I_{ax} світлодіодів.

Прямий струм світлодіодів не повинен перевищувати 20 мА!

Зменшуючи дискретні значення опорів R1, провести вимірювання світлового струму та падіння напруги на СЕ, результати занести в таблицю 6.1.

Змінити полярність лівого блока живлення, і для вибраного світлового потоку (вхідного струму світлодіодів I_{ax}) зняти світлові ВАХ СЕ за оберненої полярності (3-й квадрант).

5. З використанням графічного редактора побудувати світлову та темнову ВАХ СЕ в пропускному і заперному напрямках, використовуючи різні масштаби (міліампери для прямої гілки ВАХ, мікроампери для зворотної). Правий верхній кут використати для побудови прямої гілки ВАХ, лівий нижній – для зворотної.

6. У точці перетину дотичної до прямої гілки темної ВАХ в області великих струмів із віссю напруги визначити контактну різницю потенціалів U_k . Розрахувати висоту потенційного бар'єра на переході qU_k . За кутом нахилу дотичної знайти послідовний опір СЕ ($R_s = dU/dI$). За зворотною гілкою ВАХ визначити струм насичення I_0 . За $U = 1$ В знайти коефіцієнт випрямлення діода (K) як відношення прямого струму до зворотного.

7. Із світлової ВАХ СЕ визначити струм короткого замикання I_{sc} , напругу холостого ходу U_{oc} , чинник заповнення ВАХ – FF (співвідношення (5)), ККД η (співвідношення (4)).

Таблиця 6.1 – Результати вимірювання ВАХ СЕ

Струм світлодіодної панелі	Обернена полярність			Пряма полярність		
	U	I , у темноті	I , за умови освітлення	U	I , у темноті	I , за умови освітлення
$I_{ex} = 0 \text{ мА}$						
$I_{ex} = 2 \text{ мА}$						
$I_{ex} = 4 \text{ мА}$						
$I_{ex} = 6 \text{ мА}$						
$I_{ex} = 8 \text{ мА}$						
$I_{ex} = 10 \text{ мА}$						
$I_{ex} = 15 \text{ мА}$						
$I_{ex} = 20 \text{ мА}$						

6. Зміст звіту

1. Номер, назва, мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості. Принципова схема вимірювань.
3. Робоча таблиця з результатами вимірювань.
4. Графік прямої та зворотної гілки темної ВАХ у координатах $I-U$.
5. Графіки прямої та зворотної гілки світлової ВАХ.
6. Розрахунки U_K, qU_K, I_0, K, R (рис. 3).
7. Визначення основних характеристик СЕ ($I_{sc}, U_{oc}, I_m, U_m, R_{op}, FF, \eta$).
8. Висновки.

Лабораторна робота 7
ДОСЛІДЖЕННЯ ДІОДНОГО ОПТРОНА

Мета роботи – ознайомитися з дією і характеристиками оптрона та його елементів – світлодіода та фотодіода.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про оптоелектронні прилади.
2. Ознайомитися з питаннями письмового опитування.

Перелік контрольних питань

1. Випромінювальні діоди (світлодіоди). Їхня характеристики, технологія виготовлення, способи налаштування кольору випромінювання.
2. Будова та принцип дії фоторезисторів.
3. Явище фотоефекту та механізм утворення фото ЕРС у фотодіодах.
4. ВАХ фотодіодів і коментарі до неї.
5. Режими роботи фотодіодів в електронних схемах.
6. Фототранзистори та фототиристри.
7. Будова та принцип дії оптрона.
8. Застосування оптронів в електронних схемах.

Порядок виконання роботи

1. Прочитавши завдання, усвідомити процес виконання роботи.

2. Використовуючи оптрон ЗОД 101А, зібрати схему для зняття його статичних характеристик (рис. 7.1). З цією метою визначити за допомогою довідника розміщення електродів оптрона ЗОД 101А.

Після перевірки викладачем схеми увімкнути лабораторну установку.

3. Зняти ВАХ випромінювача – вхідну характеристику оптрона. Змінюючи напругу на вхідних електродах оптрона за допомогою потенціометра лівого блока живлення в межах від 0 В до 1,5 В, зняти пряму гілку ВАХ світлодіода (випромінювального діода).

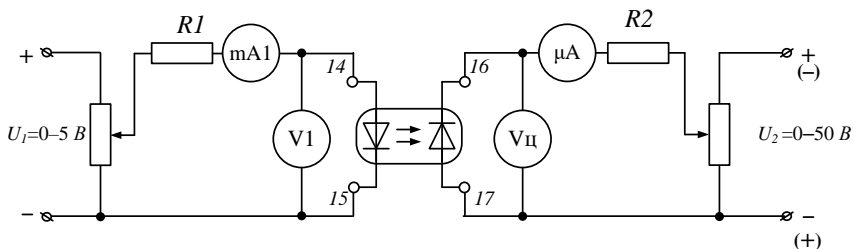


Рисунок 7.1 – Схема для дослідження оптрона

Увага! Прямий струм світлодіода не повинен перевищувати 20 мА!

Результати вимірювань занести до таблиці 7.1. Водночас вихідну напругу на оптроні підтримувати $U_{\text{вих}} = 0$ В.

Таблиця 7.1

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,3	...	1,2	1,5
$I_{\text{вх}}, \text{мА}$							

4. Зняти сім'ю ВАХ приймача (фотодіода) – вихідні характеристики оптрона

$$I_{\text{вих}} = f(U_{\text{вих}}) / I_{\text{вх}} = \text{const}$$

для кількох сталих значень вхідного струму (світлового потоку, що випромінює світлодіод).

Вихідний струм вимірюють цифровим міліамперметром, оскільки є перехід через нульове значення струму.

Вихідну напругу вимірюють цифровим вольтметром.

Спочатку потрібно зняти ті ділянки ВАХ, що з'являються під час подання прямої напруги на фотодіод, а саме на ділянку темної ВАХ ($I_{\text{вх}} = 0$ мА) і декілька ділянок світлових ВАХ, наприклад, $I_{\text{вх}} = 4$ мА, $I_{\text{вх}} = 10$ мА. Значення обмежувальних опорів дорівнює $R1 = 120$ Ом, $R2 = 620$ Ом.

Для знання ділянок зворотної ВАХ перемикаємо полярність правого блоку живлення, *не змінюючи полярності вмикання оптрона та міліамперметра*. Далі робимо вимірювання відповідно до вибраних констант струму світлодіода.

Результати вимірювань звести в таблицю 7.2.

Таблиця 7.2

Струм випромінювача	$U_{вих}, В$	-40	-10	-2	0	0,1	...	0,6
$I_{вх} = 0 \text{ мА}$	$I_{вих}, \text{мА}$							
$I_{вх} = 2 \text{ мА}$	$I_{вих}, \text{мА}$							
$I_{вх} = 4 \text{ мА}$	$I_{вих}, \text{мА}$							
$I_{вх} = 6 \text{ мА}$	$I_{вих}, \text{мА}$							
$I_{вх} = 8 \text{ мА}$	$I_{вих}, \text{мА}$							
• • • • •								
$I_{вх} = 20 \text{ мА}$	$I_{вих}, \text{мА}$							

5. Використовуючи таблиці 7.1 і 7.2, побудувати графіки вхідної та вихідних сімей характеристик оптрона. На сім'ї вихідних характеристик відшукати значення фото ЕРС для різних значень вхідного струму (світлового потоку). Заповнивши таблицю 7.3, побудувати графік залежності

$$E_{\phi} = f(I_{вх}).$$

Таблиця 7.3

$I_{вх}, \text{мА}$	0	4	10	20
$E_{\phi}, В$				

6. За таблицею 7.2 побудувати характеристику прямого передання оптрона

$$I_{вих} = f(I_{вх}) \Big|_{U_{вих} = const} \text{ для } U_{вих} = -10 \text{ В і } U_{вих} = 1 \text{ В.}$$

Зміст звіту

1. Схема зняття статичних характеристик оптрона ЗОД101А.

2. Заповнені таблиці 7.1–7.3.

3. Графіки статичних характеристик:

– вхідної $I_{вх} = f(U_{вх})$;

– вихідних $I_{вих} = f(U_{вих}) \Big|_{I_{вх} = const}$;

– прямого передання $I_{вих} = f(I_{вх}) \Big|_{U_{вих} = const}$.

4. Графік $E_{\phi} = f(I_{вх})$.

5. Загальні висновки до роботи.

Лабораторна робота 8
**ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТОТИРИСТОРА
ТА ОПТОСИМІСТОРА**

Мета роботи – ознайомитися з дією та характеристиками тиристорного та симісторного оптронів і їхніх елементів.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про оптоелектронні прилади.
2. Ознайомитися з питаннями письмового опитування.

Перелік контрольних питань

1. Тиристорний оптрон. Характеристики, технологія виготовлення. Різновиди оптронів.
2. Будова та принцип дії вказаного оптрона.
3. Симісторний оптрон. Характеристики. Будова. Принцип дії.
4. Застосування оптронів в електронних схемах.
5. Переваги та недоліки оптронів.

Порядок виконання роботи

1. Прочитавши завдання, з'ясувати процес виконання роботи.

Оптотиристор

2. Використовуючи тиристорний оптрон АОУ315, зібрати схему (рис. 8.1) для зняття його статичних характеристик. З цією метою визначити за допомогою довідника розміщення електродів вказаного оптрона.

Досліджуваний оптрон розміщують на додатковій спеціально змонтованій платі. Вхідну напругу подаємо з лівого боку живлення на цю плату за допомогою провідників. Вихідну напругу подаємо з правого блока живлення аналогічно.

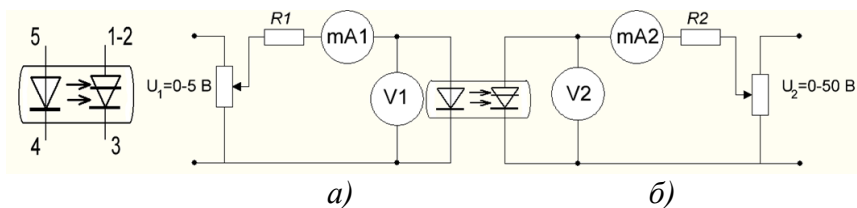


Рисунок 8.1 – Схема дослідження оптрона

Для нормальної роботи оптрона потрібно дотримуватися правильної полярності вмикання!

3. Із правого блоку живлення подати на вихідні виводи оптрона анодну напругу (10–15) В і вважати її напругою вмикання (U_{BM}). У вихідному колі оптрона проходить анодний струм закритого стану – струм вмикання (I_{BM}).

З лівого блока живлення на вхід оптрона подати напругу U_{BX} . Збільшуючи її потенціометром 9, слідкуємо з використанням лівого міліамперметра **mA1** за зростанням струму керування I_K . У момент вмикання тиристора фіксуємо цей струм.

Одночасно за показаннями правих міліамперметра **mA2** і вольтметра **V2** визначаємо координати точки переходу тиристора у відкритий стан ($I_{упр}$, $U_{упр}$). За координатами двох точок (U_{BM} , I_{BM}) та ($U_{упр}$, $I_{упр}$) будуємо якісну ВАХ оптрона за даного струму керування.

Оптосимістор

4. Використовуючи симісторний оптрон **МОС 322** (зарубіжний аналог), зібрати схему для зняття його характеристик (рис. 8.2 а). Внутрішня схема оптрона містить в собі арсенід – галієвий світлодіод і симетричний диністор. Параметри оптрона наведено в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

$I_{відкр, max}$ А	$I_{закр, max}$ мА	$I_{вх, max}$ мА	$I_{кер.откр, max}$ мА	$U_{відкр, max}$ В	$U_{закр, max}$ В
2	0,1	60	15	3	400

Для цього потрібно використовувати:

- лабораторний стенд;
- вимірювальну панель;
- установлювальну плату;
- блок живлення змінної напруги.

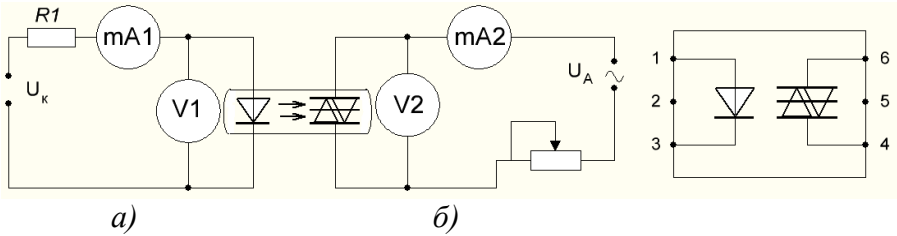


Рисунок 7.2 – Схема для дослідження оптрона

Досліджуваний оптрон вставити на установлювальну плату «ключем» до верхньої частини плати. На вхід оптрона гнізда 1, 3 цоколівки (рис. 8.2 б) подати постійну напругу від лівого блока живлення лабораторного стенда за допомогою провідників.

Вихід оптрона провідниками під'єднати до гнізд 2 і 3 вимірювальної панелі, а праву пару контактних провідників встановити в гнізда джерела змінної напруги 30 В (блок живлення паяльника). Після перевірки викладачем схеми увімкнути лабораторну установку.

5. Змінюючи напругу на входних електродах оптрона за допомогою потенціометра лівого блока живлення в межах від 0 В до 1,5 В, зафіксувати струм керування I_K в момент вмикання. Далі за приладами на вимірювальній панелі визначити координати точок (U_{BM}, I_{BM}) і ($U_{упр}, I_{упр}$) та побудувати якісну ВАХ оптосимістора.

Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема зняття ВАХ оптронів.
4. Графіки ВАХ оптронів.
5. Висновки.

Лабораторна робота 9
**ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА
НА АНАЛОГОВІЙ ІНТЕГРАЛЬНІЙ СХЕМІ
ТИПУ КР140УД1Б**

Мета роботи – вивчення і визначення статичних і динамічних характеристик операційного підсилювача на прикладі АІС типу КР140УД1Б.

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про операційні підсилювачі.
2. Ознайомитися з питаннями письмового опитування.

Загальні положення

У лабораторній роботі досліджується операційний підсилювач типу КР140УД1Б (рис. 9.1).

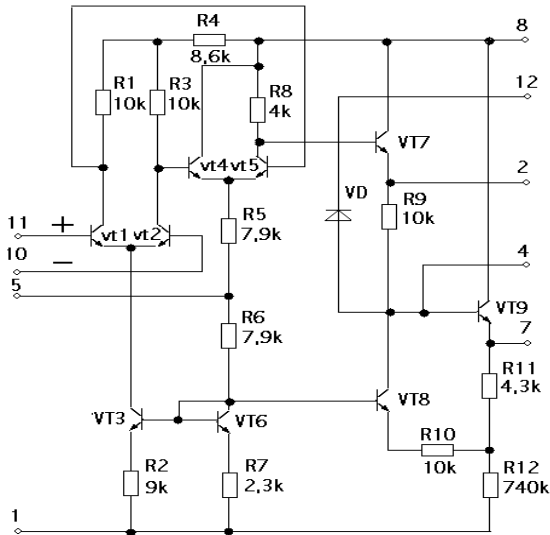


Рисунок 9.1 – Принципова схема операційного підсилювача КР140УД1Б

Роботу виконують на установці типу УМ16ПС для дослідження інтегральних схем.

Операційні підсилювачі характеризуються низкою зовнішніх параметрів (статичних і динамічних). Найважливіші з них необхідно визначити в цій роботі, а саме:

А. Параметри малого сигналу:

– $K_{\partial} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$ – диференційний коефіцієнт підсилення за

напругою за розімкненого зворотного зв'язку;

– $R_{вх.\partial} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}$ – вхідний опір для диференційного

сигналу;

– $R_{вх.сф} = \frac{\Delta U_{вхсф}}{\Delta I_{вх}}$ – вхідний опір для синфазного сигналу;

– $R_{вих} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta I_{вих}}$ – вихідний опір;

– $K_{сф} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вхсф}}$ – коефіцієнт підсилення синфазного сигналу;

– $K_{пос.сф} = \frac{K_{\delta}}{K_{сф}}$ – коефіцієнт послаблення синфазного си-

гналу;

– $f_{гп}$ – гранична частота (частота, на якій модуль K_{∂} зменшується на 3 дБ (у $\sqrt{2}$ рази порівняно зі своїм значенням на низькій частоті);

– f_{τ} – частота одиничного підсилення (на якій $|K_{\partial}| = 1$ або 0 дБ).

Б. Режимні параметри і параметри похибки:

– $U_{вих.max}$ – розмах вихідного сигналу – максимальна амплітуда симетричної вихідної напруги;

– $V = \frac{\Delta U_{вих.max}}{\Delta t}$ – максимальна швидкість зміни вихідної напруги;

– $U_{зм.0}$ – напруга зміщення «нуля» – зведена за входом напруга, еквівалентна до такого її значення, за якого $U_{вих} = 0$;

– $I_{вх.сер}$ – середнє значення струмів інверсного « \leftarrow » і прямого « \rightarrow » входів ОП;

– $\Delta I_{вх}$ – різниця вхідних струмів;

– $U_{ш.вх}$ – зведена напруга шуму;

– $U_{вх.об}$ – вхідна напруга обмеження – максимальне значення напруги на диференційному вході ОП, котра ще не викликає обмеження вихідного сигналу мікросхеми;

– $K_{в.н}$ – коефіцієнт впливу нестабільності джерел живлення за напругою

$$K_{в.н} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{живл}}$$

де $\tau_{нф}$ – тривалість переднього фронту імпульсів вихідного сигналу;

$t_{відн}$ – час відновлення вихідного сигналу;

$I_{спож}$ – струм споживання ОП від джерел живлення Д.Ж.1 і Д.Ж.2;

$P_{спож}$ – споживана потужність ОП.

Опис лабораторного макета

Установка для дослідження ІМС УМ16ПС складається з трьох основних частин:

- електронного блока;
- блока живлення;
- панелі комутації та установки плат із досліджуваними ІМС.

Функціональне призначення кожного органу управління і частин установки позначено умовними значками. На друкованій платі з досліджуваною ІМС наведено принципову схему з позначенням номерів виводів, а на комутаційній панелі зазначені гнізда, які відповідають усім номерам виводів ІМС (рис. 9.2).

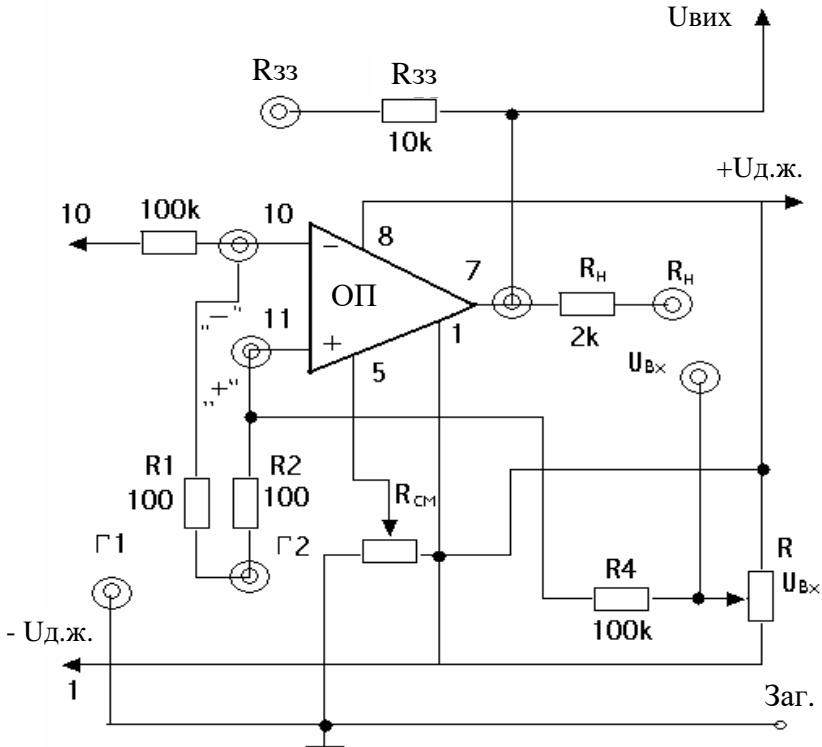


Рисунок 9.2 – Схема комутаційної панелі

Джерела живлення досліджуваних ІМС незалежні. Напругу на виході цих джерел можна змінювати дискретно (3 В, 4 В, 5 В і 6 В), а також плавно в межах від 0,8 В до $U_H + 10\%$.

Ручки плавного регулювання $U_{\text{живл.}}$ розміщено на лицевій панелі біля стрілкових приладів (вольтметрів).

Під час виконання лабораторної роботи необхідно:

- вставити в роз'єми комутаційної панелі плату з досліджуваною ІМС, попередньо виставивши перемичками потрібну напругу живлення (під платою);

- здійснити комутацію елементів і частин установки згідно з описом і принциповою схемою для досліджуваного режиму ІМС;

- перевірити комутацію елементів, увімкнути установку;

- урахувати такі правила користування осцилографом, які стосуються виконання всіх лабораторних робіт.

Перед початком роботи потрібно засвоїти декілька прийомів роботи із двопробним двоканальним осцилографом С1-83. Сигнал (рівень напруги) на екрані має бути сформований у вигляді горизонтальної лінії, що досягається ступінчастим регулюванням горизонтальної розгортки і виставленням її, наприклад, на поділці 10 мс (чорна мітка на одному з ребер регулятора). У разі частого використання ступінчастого регулювання вертикального відхилення променя, регулятора вертикального зміщення променя, а також помножувача вертикального розмаху сигналу необхідно здійснити балансування каналу.

З цією метою:

- важільний перемикач входу каналу поставити в положення « \perp ». У цьому режимі всі сигнали, що надходять на вхід осцилографа, закорочуються на корпус осцилографа;

- регулятором вертикального зміщення сигналу каналу встановити горизонтальний сигнал на середину екрана осцилографа;

- перевести важільний перемикач у положення, що відповідає вимірюваному сигналу, і виконати вимірювання.

Ручка плавного регулювання вертикального відхилення променя має бути у правому крайньому положенні, водночас вимірюється істинна величина сигналу.

Порядок виконання роботи

1. Зняти передавальну характеристику $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вих}})$, для чого під'єднати ОП до джерела живлення $U_{\text{живл}} = \pm 6,3 \text{ В}$ (рис. 9.3). Живлення двополярне.

Для цього:

– на лабораторному стенді формують загальний потенціал («0», «земля»), з'єднавши «+» одного джерела і «-» іншого джерела в одну точку, а потім за допомогою провідників подають «0», «+6,3 В» і «-6,3 В» на відповідні гнізда макетної плати операційного підсилювача;

– входи ОП гніздо Г1 через резистори R_1 , R_2 під'єднати до загальної шини;

– установити напругу зміщення $U_{\text{зм.о}}$, для чого потенціометр $R_{\text{зм}}$ виставити до упору проти годинникової стрілки;

– за допомогою осцилографа перевірити розмах напруги на контрольному гнізді потенціометра $R_{U_{\text{вх}}}$ і впевнитися, що він відповідає $\pm U_{\text{д.ж.}}$ ($\pm 6,3 \text{ В}$).

– на вхід «+» ОП через подільник R_4 – R_2 подати напругу $\pm U_{\text{вх}}$ за допомогою потенціометра $R_{U_{\text{вх}}}$. Цей метод застосовують для забезпечення на вході різниці сигналів, що є необхідною умовою роботи ОП у режимі підсилення. Діапазон зміни вхідної напруги від -7 до $+7$ мВ із кроком 1 мВ, на ділянці перегину крок установити (0,20–0,25) мВ. Для цього регулятор вертикального зміщення сигналу каналу 1 відтягнути до себе ($\times 1$), регулятор ступінчастого відхилення каналу 1 поставити на мітку (1–2) мВ. Діапазон зміни вихідної напруги повинен змінюватися від -6 мВ до $+6$ мВ. Вимірювання вхідної і вихідної напруги здійснювати за допомогою осцилографа, установивши зазначені діапа-

зони органами ступінчастого регулювання каналів вертикального відхилення (I канал – вхідний сигнал, II канал – вихідний сигнал);
 – побудувати передавальну характеристику на міліметровому папері (або з використанням графікобудівників) розмірами (100 × 200) мм і визначити:

1) $U_{вих.мах}$ – максимальну вихідну напругу;

2) $K_{\partial} = \frac{\Delta U_{вих}}{U_{вх}}$ – коефіцієнт підсилення;

3) $U_{з.м.о}$ – напругу зміщення нуля;

4) $U_{вх.обм} = \frac{0,9 \cdot U_{вих.мах}}{K_{\partial}}$ – вхідну напругу обмеження.

меження.

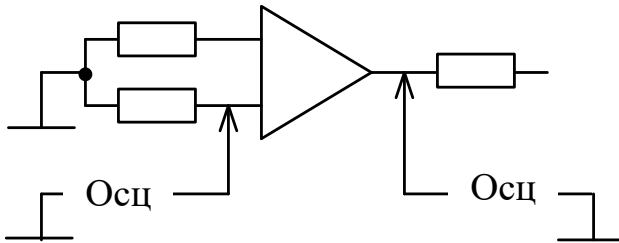


Рисунок 9.3 – Схема для зняття передаточної характеристики ОП

Коефіцієнт підсилення визначити щодо точки переходу $U_{вих}$ через нуль для $+\Delta U_{вх}$ і $-\Delta U_{вх}$, однакових за абсолютним значенням (на лінійній ділянці передаточної характеристики).

2. Визначити напругу шуму $U_{ш.вх}$, для чого (рис. 9.4):

– під'єднати живлення і гнізда «←» і «+» замкнуті на загальну шину;

- установити таку чутливість підсилювача вертикального відхилення на виході, щоб величина шумів подвійної амплітуди на екрані займала (4–5) см (на межі (5–10) мВ);
- установити рід роботи підсилювача вертикального відхилення – «~»;
- визначити за допомогою осцилографа розмах вихідної напруги шуму $U_{ш.вих}$.

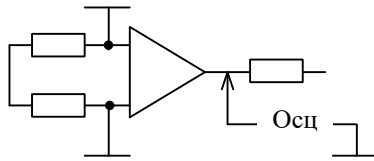


Рисунок 9.4 – Схема для визначення напруги шуму

$$\text{Обчислити } U_{ш.вих} = \frac{U_{ш.вих}}{2\sqrt{2}K_{\delta}}.$$

3. Виміряти параметри похибки $I_{вх}^-$ і $I_{вх}^+$. Визначити

$$\Delta I_{вх} = I_{вх}^+ - I_{вх}^-,$$

$$\Delta I_{вх.сер} = \frac{I_{вх}^+ - I_{вх}^-}{2}.$$

У досліджуваній схемі (рис. 9.5) За замкнених на загальну шину гнізд «-» і «+» установити за допомогою опору $R_{ЗМ}$ напругу $U_{вих}$, близьку до нуля. Розімкнути коло входу «-» мікросхеми і виміряти значення $U'_{вих}$. Визначити струм

$$I_{вх}^- = \frac{U'_{вих} - U_{вих}}{K_{\delta} \cdot R1}, \quad (R1 = R2 = 100 \text{ Ом}),$$

$$I_{\text{вх}}^- = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{R_1} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{K_{\delta} \cdot R_1}, \text{ (де } \Delta U_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{K_{\delta}} \text{)}.$$

Замкнути у вхідному колі « \leftrightarrow » мікросхеми резистор R_1 і розімкнуті резистор R_2 , визначити струм

$$I_{\text{вх}}^+ = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R_2} = \frac{U'_{\text{вих}^+} - U_{\text{вих}^+}}{K_{\delta} R_2}, \text{ (де } \Delta U_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}^+}}{K_{\delta}} \text{)}.$$

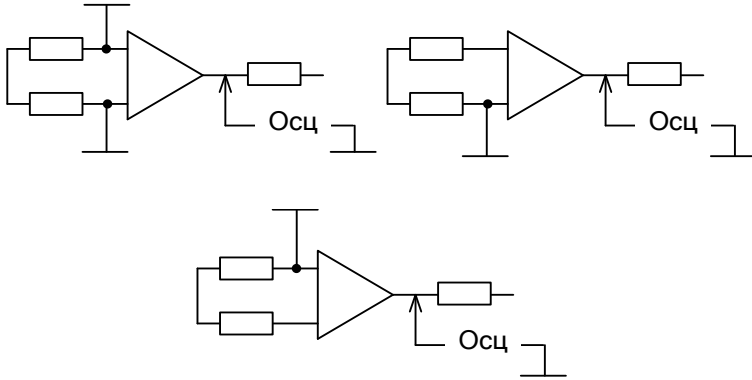


Рисунок 9.5 – Схема для вимірювання параметрів похибки ОП

Струми вхідних електричних кіл визначають за падінням напруги на відповідних резисторах R_1 і R_2 .

Середнє значення струму у вхідному колі дорівнює

$$\Delta I_{\text{вх} \text{ сеп}} = \frac{I_{\text{вх}}^+ - I_{\text{вх}}^-}{2}.$$

Різниця вхідних струмів

$$\Delta I_{\text{вх}} = I_{\text{вх}}^+ - I_{\text{вх}}^-.$$

4. Визначити вихідний опір ОП $R_{\text{вих}}$, для чого (рис. 9.6):

– під'єднати живлення, гнізда «-», «+» і R_H замкнути на загальну шину;

– за допомогою R_{3M} установити на виході напругу $U_{\text{вих}} = (1,5-2,0)$ В;

– від'єднати гніздо R_H від загальної шини і під'єднати $R_{3З}$ як навантаження;

– виміряти вихідну напругу $U'_{\text{вих}}$;

– обчислити $R_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}} - U'_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} R_H = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U'_{\text{вих}}} R_H$,

$R_H = 2$ кОм.

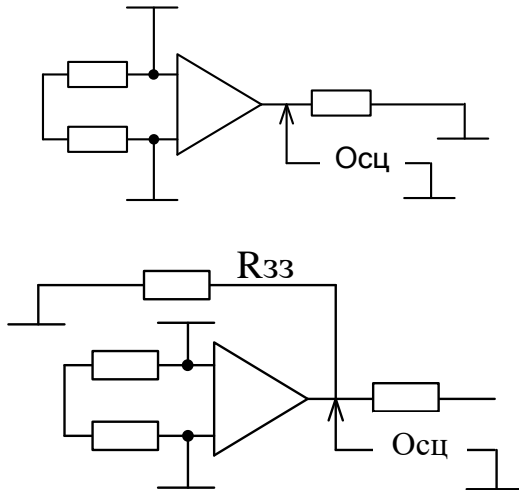


Рисунок 9.6 – Схема для вимірювання вихідного опору ОП

5. Обчислити коефіцієнт впливу нестабільності джерел живлення за напругою, для чого (рис. 9.7):

- під'єднати живлення і гнізда «←» і «+» замкнути на загальну шину;
- за допомогою потенціометра $R_{зм}$ установити $U_{вих} = 0$ В;
- зменшити $U_{живл1}$ на 1 В і виміряти $U_{вих1}$;
- установити початкове значення $U_{живл1}$;
- зменшити $U_{живл2}$ на 1 В і виміряти $U_{вих2}$;
- обчислити $K_{вн} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{живл}}$.

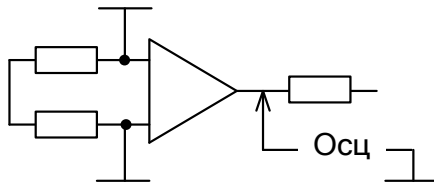


Рисунок 9.7 – Схема для вимірювання коефіцієнта впливу

6. Визначити коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу, для чого (рис. 9.8):

- під'єднати живлення, гнізда «←» і «+» замкнути між собою;
- на вхід установки подати імпульси прямокутної форми з виходу генератора установки (амплітуда і тривалість імпульсів максимальні);
- осцилографом виміряти амплітуду вхідного і вихідного сигналів $\Delta U_{вх_{сф}}$ і $\Delta U_{вих}$;
- обчислити коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу

$$K_{\text{пос.сф}} = \frac{K_{\delta}}{K_{\text{сф}}}$$

$$K_{\text{сф}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вхсф}}}$$

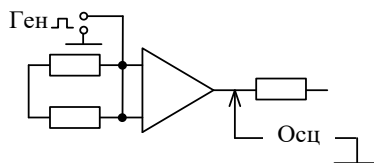


Рисунок 9.8 – Схема для вимірювання коефіцієнта ослаблення

7. Виміряти швидкість наростання вхідного сигналу, для чого (рис. 9.9):

– під'єднати живлення і гніздо «+» замкнути на загальну шину;

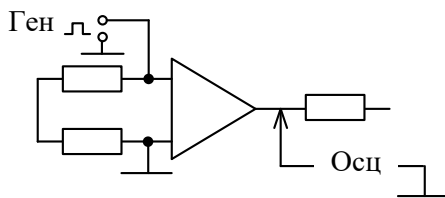


Рисунок 9.9 – Схема для виміру швидкості наростання $U_{вх}$

– на вхід підсилювача подати імпульси прямокутної форми з виходу генератора установки;

– установити амплітуду і тривалість імпульсів генератора такими, щоб форма вихідного сигналу наближалася до пилкоподібної;

– нарисувати осцилограму і виміряти амплітуду лінійної частини вихідного сигналу $\Delta U_{вих}$ і тривалість наростання вхідної напруги Δt , виміряну на рівні $0,5 U_{max}$;

– визначити швидкість наростання вхідної напруги і граничну частоту

$$V_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta t},$$

$$f_{гр} = \frac{V_U}{2\pi \Delta U_{вих}}.$$

8. Виміряти тривалість переднього фронту імпульсу і час відновлення вихідного сигналу ОП зі зворотним зв'язком і без нього, для чого (рис. 9.10):

- під'єднати живлення і з'єднати гніздо «+» із загальною шиною;
- подати імпульси прямокутної форми на вхід підсилювача (амплітуда і тривалість імпульсів максимальні);
- нарисувати осцилограму вхідного і вихідного сигналів, виміряти тривалість фронтів імпульсів;
- під'єднати $R_{зз}$ до входу «-»;
- нарисувати осцилограму вхідного і вихідного сигналів і визначити коефіцієнт підсилення ОП зі зворотним зв'язком.

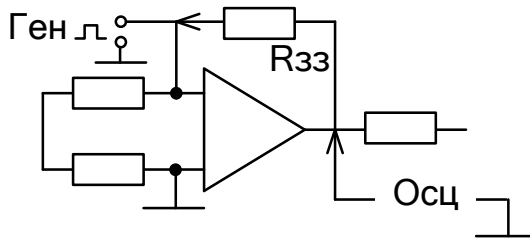


Рисунок 9.10 – Схема для вимірювання тривалості фронту імпульсу

Зміст звіту

1. Назва і мета роботи.
2. Схеми під'єднати ОП під час проведення досліджень.
3. Графік передаточної характеристики та осцилограми перехідних процесів.
4. Експериментальні результати досліджень і розрахунок необхідних параметрів.
5. Таблиця значень параметрів досліджуваної інтегральної мікросхеми.

Лабораторна робота 10
**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТА
ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНОЇ ЛОГІКИ (ТТЛ)**

Мета роботи – вивчення і визначення статичних і динамічних параметрів інтегральної ТТЛ схеми на прикладі елемента 2I-HE (K155ЛА3)

Підготовка до роботи

1. Вивчити теоретичний матеріал про інтегральні ТТЛ схеми.
2. Ознайомитися з питаннями письмового опитування.

Загальні відомості

У цій роботі потрібно дослідити представники цифрових ІС – логічні елементи ТТЛ та емітерно-зв'язаної логіки (ЕЗЛ). Розглянемо стисло відомості про їхні параметри і характеристики.

До статичних характеристик логічних елементів (ЛЕ) належать:

- вхідна характеристика $I_{вх} = f(U_{вх})$;
- передаточна характеристика $U_{вих} = f(U_{вх})$;
- вихідна характеристика $U_{вих} = f(I_{вих})$,

де $I_{вх}$, $I_{вих}$ – вхідний і вихідний струми ЛЕ; $U_{вх}$, $U_{вих}$ – вхідна і вихідна напруги ЛЕ.

На рисунок 10.1 наведено типові статичні характеристики ЛЕ. Вони мають три контрастно виражені області:

I – область, що відповідає вихідному сигналу, який дорівнює логічній 1;

II – область, що відповідає вихідному сигналу, що дорівнює логічному 0;

III – область неозначена, що відповідає переключенню з 1 до 0 та з 0 до 1.

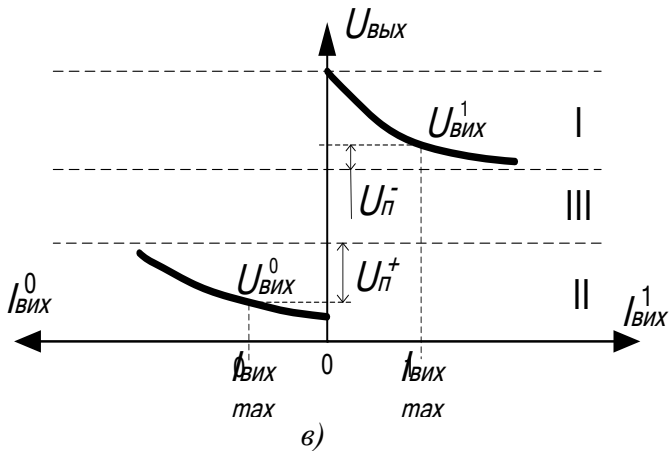
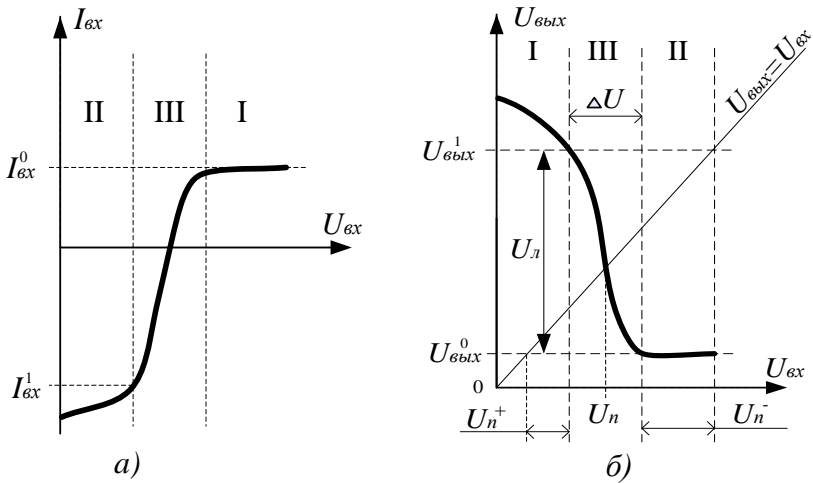


Рисунок 10.1 – Статичні характеристики ЛЕ:
а) вхідна; б) передаточна; в) вихідна

За статичними характеристиками визначають такі параметри ЛЕ:

- вхідні і вихідні струми 1 і 0: $I_{вх}^1$, $I_{вх}^0$, $I_{вих}^1$, $I_{вих}^0$;
- вихідна напруга 1 і 0: $U_{вих}^1$, $U_{вих}^0$;

- рівень логічного перепаду $U_n = U_{вих}^1 - U_{вих}^0$;
- значення потенціальної перешкоди для логічних 1 і 0: $U_{пер}^-, U_{пер}^+$;
- ширину зони неозначеності ΔU ;
- значення порога перемикання $U_{пор}$;
- навантажувальну здатність елемента

$$N = \min \{ N_0, N_1 \} = \min \left\{ \frac{I_{вих\max}^0}{I_{вих\max}^0}, \frac{I_{вих\max}^1}{I_{вих\max}^1} \right\}.$$

Крім перелічених, до статичних параметрів належать також споживана потужність P або споживаний струм $I_{спож}$, а також напруга живлення $E_{жив}$.

Динамічні параметри характеризують перехідні процеси в разі переключення ЛЕ зі стану 1 до стану 0 і навпаки. На рисунку 10.2 наведені часові діаграми вхідного і вихідного сигналів.

За часовими діаграмами визначають такі параметри:

- тривалість затримки перемикання з 1 до 0 – $t_{зад}^{10}$ і з 0 до 1 – $t_{зад}^{01}$;
- середній час затримки перемикання

$$t_{сеп}^{зад} = 0,5 (t_{зад}^{10} + t_{зад}^{01});$$

- тривалість фронтів перемикання $t_{ф}^{10}, t_{ф}^{01}$.

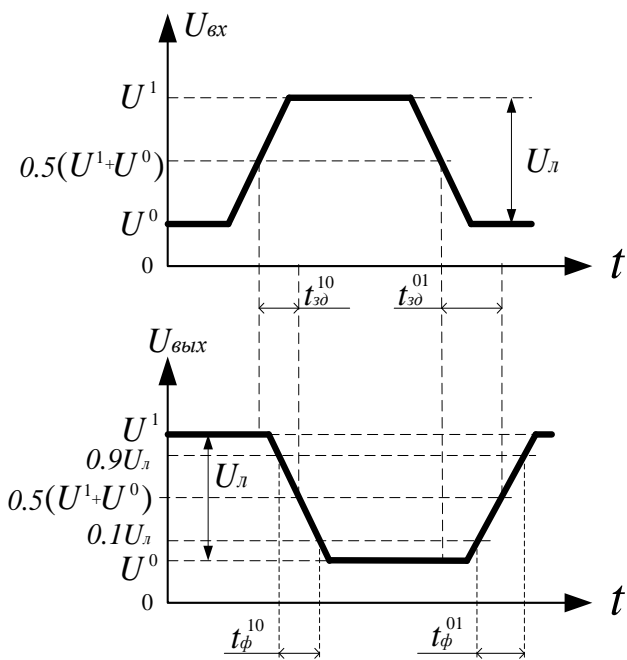


Рисунок 10.2 – Часові діаграми роботи логічних елементів

Опис лабораторної установки

Лабораторну роботу виконують на установці для дослідження ІС типу УМ16ПС, у якій змонтовані:

- два регульованих джерела живлення;
- регульовані генератори прямокутних імпульсів;
- регульовані ємнісне і резистивне навантаження.

Для вимірювання струмів і напруги застосовують міліамперметри і вольтметри (мультиметри). Вимірювання малої напруги, а також дослідження динамічних характеристик здійснюється за допомогою двоканального осцилографу типу С1-83.

Досліджувані ІС змонтовані на друкованій платі. Під'єднання елемента здійснюється монтажними дротами відповідно до схеми дослідження.

Підготовка до виконання роботи

1. Вивчити статичні і динамічні характеристики (параметри) елементів ТТЛ.

2. Вивчити схему і порядок функціонування ТТЛ елемента К155ЛА3, що досліджують у роботі. Схему одного з чотирьох елементів 2І-НЕ, що входять до складу ІС К155ЛА3, наведено на рисунку 10.3 а, цоколівку мікросхеми подано на рисунку 10.3 б.

3. Ознайомитися з лабораторною установкою, вивчити порядок виконання роботи і запису результатів.

4. Підготувати схему увімкнення ЛЕ під час проведення досліджень і необхідні таблиці для запису результатів.

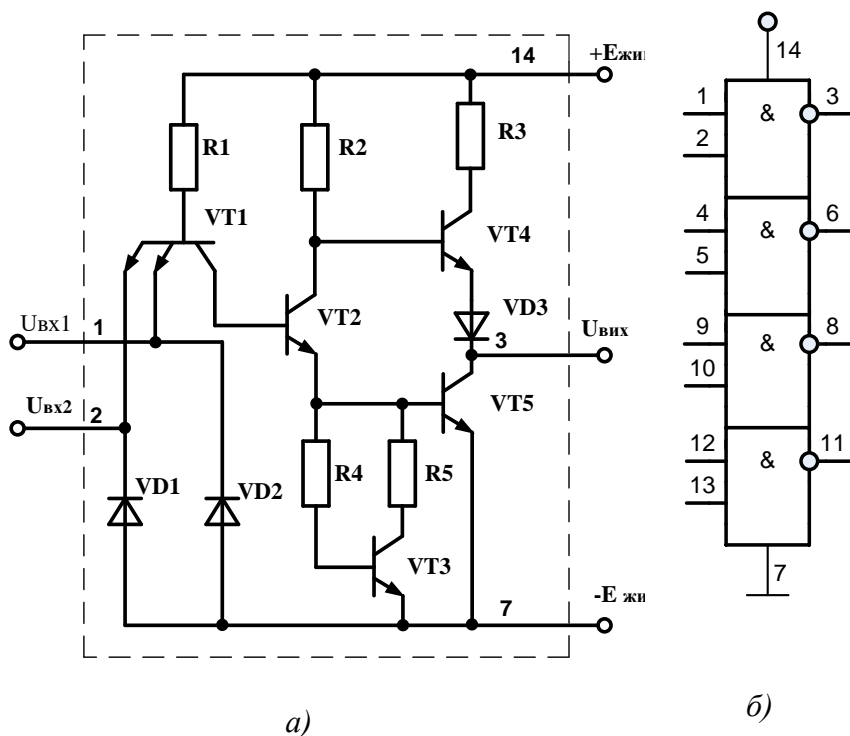


Рисунок 10.3 – Елемент 2І-НЕ (К155ЛА3)

Порядок виконання роботи

А. Дослідження статичних характеристик:

1. Зняти вхідну характеристику ЛЕ $I_{вх} = f(U_{вх})$ за відключеного навантаження і $E_{живл} = 5,5 \text{ В}$ ($E_{живл} = 4,5 \text{ В}$), для чого:

– під'єднати елемент до джерела живлення. Оскільки логіка позитивна, то негативні полюси обох джерел живлення з'єднати із загальним дротом («шиною») елемента, а з решти «полюсів» подати відповідну напругу на входи.

– на один із входів ЛЕ подати сигнал логічної одиниці, що дорівнює $E_{живл}$;

– другий вхід через міліамперметр під'єднати до другого джерела живлення (джерела вхідного сигналу);

– до другого входу під'єднати вольтметр (осцилограф) для вимірювання вхідної напруги;

– змінюючи напругу джерела сигналу з кроком 0,4 В, визначити вхідний струм.

Особливу увагу необхідно звернути на перехідну область (зменшити крок зміни $U_{вх}$ до (0,1–0,2) В).

2. Зняти передаточну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ за вимкненого навантаження та $E_{живл} = 5,5 \text{ В}$ / $E_{живл} = 4,5 \text{ В}$. Комутація елемента аналогічна попередньому пункту. Відмінність лише в тому, що осцилографом вимірюємо напругу на виході елемента. На ділянці перегину зменшити крок зміни $U_{вх}$ до (0,1–0,2) В.

3. Зняти вихідну характеристику $U_{вих} = f(I_{вих})$ за $E_{живл} = 5,5 \text{ В}$ ($E_{живл} = 4,5 \text{ В}$) для двох станів (рис. 10.4).

1-й стан: на виході ЛЕ установлюється напруга логічного нуля (рис. 10.4).

3.1. Під'єднати елементи до джерела живлення.

3.2. На всі входи ЛЕ подати напругу логічної одиниці, що дорівнює $E_{живл}$.

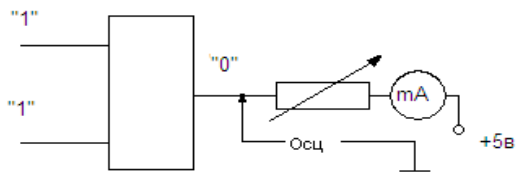


Рисунок 10.4 – Схема для зняття вихідних характеристик

3.3. Вихід ЛЕ через міліамперметр під'єднати до навантаження R_H (змінний резистор на панелі стенда), на другий контакт навантаження подати напругу живлення +5 В.

3.4. До виходу ЛЕ під'єднати вольтметр (осцилограф).

3.5. Змінюючи опір навантаження, виміряти $I_{вих}^0, U_{вих}^0$ у 5–6 точках.

2-й стан: на виході ЛЕ установлюється напруга логічної одиниці (рис. 10.5).

3.6. Подати на всі входи ЛЕ напругу логічного нуля – з'єднати входи із загальною шиною (рис. 10.5).

3.7. Другий контакт навантаження з'єднати із загальною шиною.

3.8. Змінюючи опір навантаження, виміряти $I_{вих}^1, U_{вих}^1$ у 5–6 точках.

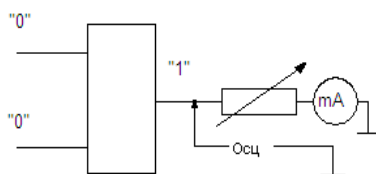


Рисунок 10.5 – Схема для зняття вихідних характеристик

4. Визначити струм, що споживається елементом, для чого:
- під'єднати ЛЕ через міліамперметр до джерела живлення;
 - подати на всі входи напругу логічної одиниці, що дорівнює $E_{живл}$ (ЛЕ – у стані нуля);
 - виміряти споживаний струм $I^0_{спож}$;
 - подати на всі входи напругу логічного нуля, з'єднати із загальною шиною (ЛЕ – у стані одиниці);
 - виміряти споживаний струм $I^1_{спож}$.
- За результатами вимірювань обчислити:

$$I_{спож} = 0,5 (I^0_{спож} + I^1_{спож});$$

$$P_{спож} = 0,5 E_{живл} (I^0_{спож} + I^1_{спож}).$$

5. Побудувати графіки статичних характеристик для двох значень напруги живлення і за ними визначити статичні параметри елемента.

Б. Дослідження динамічних характеристик:

- виміряти період коливань, тривалість імпульсу, а також переднього і заднього фронтів генератора прямокутних імпульсів;
- під'єднати ЛЕ до джерела живлення;
- на один із входів елемента подати напругу логічної одиниці, що дорівнює $E_{живл}$;
- другий вхід елемента під'єднати до генератора імпульсів;
- перший канал осцилографа під'єднати до виходу генератора, а другий – до виходу ЛЕ;
- виміряти динамічні характеристики ЛЕ;
- під'єднати вихід досліджуваного елемента до входів інших елементів, що містяться в корпусі мікросхеми;
- виміряти динамічні характеристики;

– під'єднати до виходу ЛЕ ємнісне навантаження і провести вимірювання динамічних характеристик.

Для проведення вимірювань синхронізація осцилографа має бути зовнішньою від лабораторної установки.

Зміст звіту

1. Назва і мета роботи.
2. Таблиці результатів вимірювань.
3. Графіки: $I_{вх} = f(U_{вх})$, $U_{вих} = f(U_{вх})$, $U_{вих} = f(I_{вих})$.
4. Виміряні значення статичних параметрів ЛЕ.
5. Осцилограми динамічних характеристик.
6. Розрахунки необхідних статичних і динамічних характеристик.
7. Принципові схеми ЛЕ і його під'єднати під час проведення досліджень.
8. Порівняльне оцінювання вимірних параметрів і довідникових даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Курс лекцій з дисципліни «Твердотільна електроніка» / укладачі: А. І. Новгородцев, О. А. Борисенко, О. М. Кобяков. – Суми : Видавництво СумДУ, 2008. – 205 с.
2. Твердотільна електроніка. Мікросхемотехніка / О. М. Кобяков, А. С. Опанасюк, І. Є. Бражник, О. А. Любивий. – Суми : Видавництво СумДУ, 2015. – 109 с.
3. Аналогова схемотехніка : навчальний посібник / О. М. Кобяков, М. М. Ляпа та ін. – Суми : СумДУ, 2007. – 209 с.
4. Твердотільна електроніка : підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко ; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.
5. Дружинін А. О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів : навч. посіб. / А. О. Дружинін. – Львів : Львівська політехніка, 2009. – 332 с.
6. Рябенський В. М. Цифрова схемотехніка : навчальний посібник / В. М. Рябенський, В. Я. Жуйков, В. Д. Гулий. – Львів : 2019. – 735 с.
7. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. – Київ : Каравела, 2007. – 384 с.
8. Матвієнко М. П. Основи електроніки : підручник / М. П. Матвієнко. Конотоп : Конотопський інститут СумДУ. 2017. – 363 с.
9. Фізичні основи електроніки: курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: К. С. Дрозденко. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,58 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 153 с. – Режим доступу : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/40978/1/FOE_navch_posibnyk.pdf.
10. Streetman B. Solid State Electronic Devices 7th Edition / B. Streetman, S. Banerjee. – TexasUniversity of Texas at Austin, 2016. – 212 p.
11. Brennan K. F. Physics of semiconductors with application to optoelectronic devices / K. F. Brennan. – Cambridge : Cambridge University press, 1999. – 762 p.

Електронне навчальне видання

Методичні вказівки
до лабораторних робіт
із дисципліни «Твердотільна електроніка»
для студентів спеціальностей 171 «Електроніка»,
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск А. С. Опанасюк
Редактор І. О. Кругляк
Комп'ютерне верстання Ю. О. Любивий

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 4,88. Обл.-вид. арк. 1,85

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.