

Волинський національний університет імені Лесі Українки

Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики  
та інформаційно-вимірювальних технологій**

**Андрій Кевшин, Олексій Новосад**

## **ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ**

методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт

Луцьк

2025

УДК 539.2

К-33

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки

(протокол № 6 від 20 лютого 2025 р.).

**Рецензенти:** *Назарчук П.Ф.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра фізики та вищої математики, ЛНТУ;

*Трохимчук П.П.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

**К 33** Кевшин А. Г., Новосад О. В. **Основи електроніки** : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. Луцьк, 2025. 69 с.

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт складено для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузі знань 01 Освіта / Педагогіка при вивченні ними освітнього компонента «Основи електроніки».

Навчально-методичне видання відповідає чинним навчальним програмам підготовки й рекомендовано для здобувачів освіти спеціальності 014.15 Середня освіта (Природничі науки) першого (бакалаврського) рівня Волинського національного університету імені Лесі Українки, а також для студентів природничих та інженерно-технічних спеціальностей, що виконують лабораторні роботи з даної дисципліни.

УДК 539.2  
© Кевшин А. Г., Новосад О. В., 2025  
© Луцьк, 2025

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	5
Лабораторна робота №1. Дослідження кола постійного струму	7
Лабораторна робота №2. Визначення активного та реактивного опорів в колах змінного струму. Перевірка закону Ома	10
Лабораторна робота №3. Дослідження роботи напівпровідникового діода та схем випрямлення змінного струму	19
Лабораторна робота №4. Дослідження фотодіодів та світлодіодів	25
Лабораторна робота №5. Дослідження ВАХ стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги	29
Лабораторна робота №6. Зняття характеристик біполярних транзисторів	33
Лабораторна робота №7. Дослідження статичних характеристик і параметрів польових транзисторів	36
Лабораторна робота №8. Дослідження роботи тиристора та його використання в схемах регулювання потужності	43
Лабораторна робота №9. Тунельний діод і резонансний генератор на його основі	48
Лабораторна робота №10. Амплітудно-частотні характеристики електричних фільтрів	54
Лабораторна робота №11. Вивчення поширення електромагнітних хвиль у двопровідній лінії Лехера	62
ЛІТЕРАТУРА	68

## Вступ

Основи електроніки – це фундаментальний розділ науки, який вивчає принципи роботи електронних компонентів, таких як резистори, конденсатори, діоди, транзистори, і їх використання у побудові електронних схем. Ця галузь охоплює поняття напівпровідникових матеріалів, основні електричні величини (струм, напруга, опір), закони електричних кіл (зокрема, закони Ома та Кірхгофа) та аналіз простих схем.

Методичні рекомендації до лабораторних робіт структуровані відповідно до тем ОК «Основи електроніки», які вивчають здобувачі освіти спеціальності 014.15 Середня освіта (Природничі науки), за освітньою програмою Середня освіта. Природничі науки. До кожної роботи подано стисло теоретичну інформацію, яка охоплює досліджуване явище, об'єкт, або електронну систему, і цього достатньо для підготовки та проведення експерименту. Більшість лабораторних робіт також адаптовані для студентів, які навчаються за спеціальностями, що належать до галузі знань 10 Природничі науки.

Інструкції до лабораторних робіт містять опис цілей дослідження, характеристики вимірювальних приладів та обладнання, послідовність виконання завдань, приклади таблиць для фіксації результатів, а також контрольні запитання. Для якісної підготовки до роботи і для відповіді на контрольні запитання, які можуть бути поставлені під час допуску або оцінювання результатів, здобувачам освіти рекомендовано уважно вивчити теоретичний матеріал з лабораторної роботи та лекційний курс. За потреби можна звернутися до рекомендованих підручників, список яких наведено в кінці даного видання.

Головна мета методичних вказівок – допомогти здобувачам освіти через експерименти вивчити фізичні явища і процеси в електронних приладах і системах. Опис лабораторних робіт не прагне надати повне уявлення про явища, які досліджуються, оскільки це залежить від опрацювання лекцій і літератури. Для успішного виконання завдань важливою є попередня теоретична підготовка. На занятті студенти проходять допуск до роботи, проводять вимірювання, виконують розрахунки та оформлюють звіт, доводячи його до висновків. Результати експериментів обговорюються з викладачем і затверджуються. Графіки виконуються на міліметровому папері або за допомогою програм, таких як Excel чи Origin.

## **ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ**

### **Виконання лабораторних робіт**

1. Процес виконання лабораторної роботи включає роботу студента в лабораторії та самостійну підготовку.
2. Самостійна робота студента охоплює:
  - а) підготовку теоретичних знань для виконання роботи;
  - б) підготовку відповідей на контрольні запитання, вказані в завданні;
  - в) аналіз результатів експериментів, проведених у лабораторії;
  - г) виконання математичних розрахунків і побудову графіків на основі отриманих даних.
3. Теоретична підготовка до наступної лабораторної роботи включає:
  - а) опрацювання теоретичних матеріалів, які пояснюють методику і зміст дослідження;
  - б) ознайомлення з методичними рекомендаціями до роботи, використовуючи рекомендовану навчальну літературу.
4. Робота студента в лабораторії складається з наступних етапів:
  - а) проходження допуску до виконання лабораторної роботи;
  - б) отримання дозволу на використання лабораторної установки;
  - в) проведення експериментів і фіксація результатів вимірювань;
  - г) представлення та захист виконаної лабораторної роботи.

### **Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт**

1. Відповідно до вимог правил безпеки, студенти перед початком роботи в лабораторії проходять інструктаж із безпеки праці, основ надання першої допомоги при можливих ушкодженнях. Інструктаж проводить викладач фізики, його проведення реєструється у відповідному журналі.
2. До лабораторних робіт допускаються лише ті, хто ознайомився з правилами техніки безпеки.
3. Після ознайомлення з інструкцією студент ставить підпис у журналі охорони праці та бере на себе відповідальність за дотримання її положень.
4. Під час роботи в лабораторії слід дотримуватися чистоти й порядку на робочому місці, виконувати правила техніки безпеки. Недбалість, поспіх чи порушення правил можуть призвести до нещасних випадків.
5. Перед початком роботи перевірте наявність та справність усіх частин обладнання, що використовуватиметься.
6. Виконувати лабораторні роботи без дозволу викладача суворо заборонено.
7. Роботи не виконуються за відсутності викладача чи лаборанта, відповідального за лабораторію.
8. Не торкайтеся неізольованих частин електрообладнання чи оголених проводів під напругою.
9. Заборонено самовільно проводити з'єднання на головному розподільному щиті.
10. Встановлювати чи замінювати плавкі запобіжники дозволяється лише з відома викладача та за умови вимкнення напруги.
11. Складання електричних схем проводиться тільки при вимкненій напрузі.
12. Увімкнення напруги в коло допускається лише після схвалення викладача.
13. Переконайтеся в надійному кріпленні провідників під час роботи з лабораторними установками.
14. Неухильно дотримуйтеся правил охорони праці та безпеки, викладених в інструкціях до обладнання та лабораторних завдань.
15. Під час роботи не відволікайтеся і не заважайте іншим.

16. Заборонено виконувати дії, не пов'язані із завданням або не схвалені викладачем.
17. Переносити прилади чи матеріали з одного робочого місця на інше без дозволу забороняється.
18. Під час заняття не дозволяється переміщуватися лабораторією без потреби.
19. У разі поломки обладнання, приладів або інших несправностей негайно повідомте викладача.
20. У разі ураження струмом вимкніть напругу на головному розподільному щиті, звільніть постраждалого від дії струму, сповістіть викладача, організуйте надання першої допомоги та викличте швидку медичну допомогу.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## Дослідження кола постійного струму

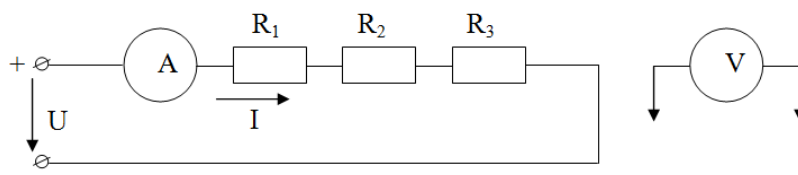
**Мета роботи:** дослідити загальні властивості електричних кіл з послідовним, паралельним і змішаним з'єднанням приймачів.

### Прилади і матеріали

1. Джерело постійної напруги
2. Амперметр.
3. Вольтметр.
4. Стенд УТЛЕ01.
5. Мультиметр.
6. З'єднувальні провідники.

### Теоретичні відомості

Різні електричні приймачі енергії можуть бути з'єднані між собою кількома способами. Послідовне з'єднання (рис. 1) передбачає, що кінець одного приймача підключається до початку наступного, далі кінець другого до початку третього і так далі:



**Рис 1.** Послідовне з'єднання приймачів.

У такій схемі через усі приймачі проходить один і той самий струм, тобто:  $I=I_1=I_2=I_3$ . Згідно із законом Ома, напруга на кожній ділянці кола прямо пропорційна її опорі:

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3.$$

Загальна напруга на кінцях кола дорівнює сумі напруг на окремих елементах:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

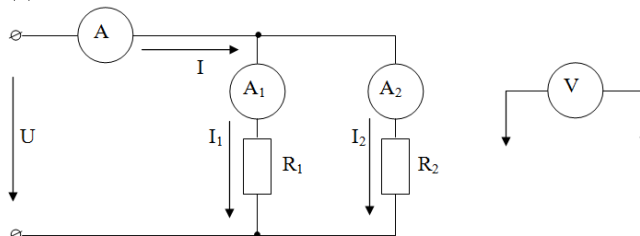
Загальний опір при послідовному з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих ділянок:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Сумарна потужність всієї системи визначається як сума потужностей окремих приймачів:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = IU_1 + IU_2 + IU_3 = I(U_1 + U_2 + U_3) = IU.$$

Паралельне з'єднання (рис. 2) полягає в тому, що початки всіх приймачів підключені до однієї точки, а їх кінці – до іншої:



**Рис. 2.** Паралельне з'єднання приймачів

У цьому випадку всі приймачі підключені до однакової напруги:

$$U = U_1 = U_2.$$

Якщо приймачі з'єднані між двома точками електричного кола (вузлами), вони утворюють паралельні гілки або розгалуження. Струм у кожній із гілок визначається за законом Ома:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}.$$

Загальний струм у колі дорівнює сумі струмів у всіх гілках:

$$I = I_1 + I_2,$$

або

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

де  $R$  – загальний опір кола.

На основі цих співвідношень можна записати:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}.$$

Якщо обидві частини рівняння поділити на  $U$ , отримаємо вираз:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Оскільки  $G = \frac{1}{R}$  – загальна провідність кола, то можемо записати:

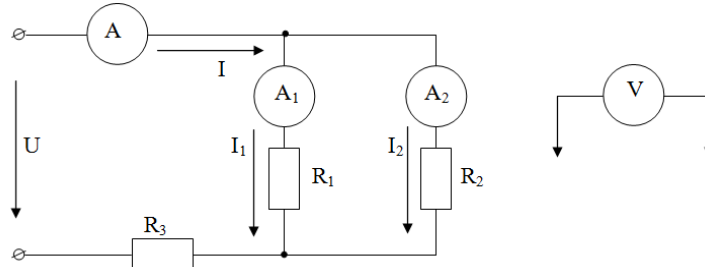
$$G = G_1 + G_2,$$

де  $G_1 = \frac{1}{R_1}$  і  $G_2 = \frac{1}{R_2}$  – провідності окремих гілок.

Для двох опорів, з'єднаних паралельно, загальний опір обчислюється за формулою:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Змішане з'єднання приймачів поєднує в собі елементи як послідовного, так і паралельного з'єднання (рис. 3).



**Рис 3.** Змішане з'єднання приймачів

У такому разі загальний опір кола визначається як сума еквівалентних опорів послідовно з'єднаних ділянок:

$$R = R_{12} + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3.$$

Загальний струм у змішаній схемі пропорційний напрузі та обернено пропорційний загальному опору:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3}.$$

### Хід роботи

1. Ознайомитися з обладнанням стенду УТЛЕ01 та його функціональними елементами.



2. Скласти електричне коло з послідовним з'єднанням приймачів (див. рис. 1). Значення опорів надає викладач.

3. Провести вимірювання сили струму, напруги на кожному резисторі та напруги на затискачах кола. Записати результати в таблицю 1.

Таблиця 1

Виміряно						Обчислено												
U	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	I	R	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P	

4. Виміряти загальний опір кола за допомогою мультиметра.

5. Обчислити абсолютну та відносну похибки вимірювання опорів, враховуючи відомі істинні значення.

6. Зібрати електричне коло з паралельним з'єднанням приймачів (див. рис. 3). Значення опорів визначає викладач.

7. Провести вимірювання напруги на кожному приймачі, на затискачах кола та струмів у всіх гілках. Занести дані в таблицю 2.

Таблиця 2

Виміряно						Обчислено										
U	U <sub>1</sub>	U <sub>3</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I	R	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P		

8. За допомогою мультиметра визначити загальний опір кола.

9. Розрахувати абсолютну та відносну похибки вимірювання опорів, враховуючи відомі їхні точні значення.

10. Зібрати електричне коло зі змішаним з'єднанням приймачів (див. рис. 3). Значення опорів задає викладач.

11. Виконати вимірювання сили струму, напруги на кожному резисторі та напруги на затискачах. Записати результати в таблицю 3.

Таблиця 3

Виміряно						Обчислено											
U	U <sub>1, U<sub>2</sub></sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	R	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P

12. Виміряти загальний опір кола за допомогою мультиметра.

13. Обчислити абсолютну та відносну похибки вимірювання опорів, беручи до уваги їхні відомі точні значення.

### Контрольні запитання

1. Записати формулювання закону Ома для окремої ділянки електричного кола.
2. Навести вираз для обчислення загального опору схеми з урахуванням рис. 1.
3. Навести вираз для обчислення загального опору схеми з урахуванням рис. 2.
4. Навести вираз для обчислення загального опору схеми з урахуванням рис. 3.
5. Як зміниться сила струму в колі, якщо при послідовному з'єднанні резисторів один із них увімкнути чи вимкнути?
6. Як зміниться напруга на кожному приймачі при послідовному з'єднанні, якщо змінити опір одного з трьох резисторів?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Визначення активного та реактивного опорів в колах змінного струму. Перевірка закону Ома

Мета роботи: перевірити закон Ома для кола змінного струму та визначити зміщення за фазою між силою змінного струму, а також визначити індуктивність котушки і ємність конденсатора та накреслити векторні діаграми для відповідних дослідів.

#### Прилади і матеріали

1. Автотрансформатор типу ЛАТР.
2. Випрямляч типу ВУП.
3. Батарея конденсаторів від 0,5 до 30 мкФ.
4. Котушка індуктивності.
5. Реостат будь-якого типу на 180 Ом, 1 А.
6. Амперметр типу АСТ або Э513 до 5 А.
7. Вольтметр типу АСТ або Э515 на 50 В.
8. З'єднувальні проводи.

#### Теоретичні відомості

Змінним струмом називають такий струм, параметри якого змінюються з часом. На рис. 1 наведені приклади осцилограм різних типів змінного струму.

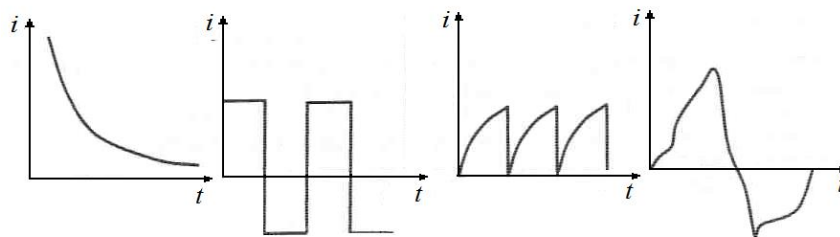


Рис. 1. Приклади змінного струму.

Розглянемо детальніше періодичний змінний струм, що змінюється відповідно до закону синуса (рис. 2). Загальне рівняння для такого струму має вигляд:

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

де  $i$  – миттєве значення струму,  $I_m$  – амплітудне значення струму,  $\omega t + \alpha$  – фаза коливань в момент часу  $t$ ,  $\omega$  – циклічна частота,  $t$  – час,  $\alpha$  – початкова фаза.

Миттєве значення струму ( $i$ ) в момент часу обчислюється за рівнянням (1). Амплітудне значення струму ( $I_m$ ) – це максимальне значення струму в часі (рис. 2).

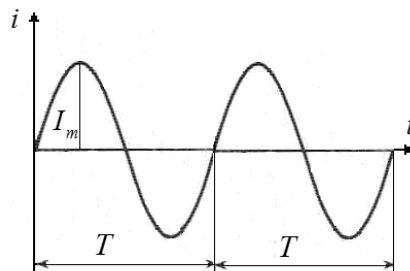


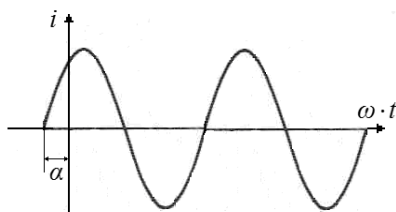
Рис. 2. Змінний синусоїдальний струм

Якщо графік залежності сили струму від часу, як показано на рис. 2, має початкову фазу, що дорівнює нулю ( $\alpha = 0$ ), то рівняння струму буде:

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (2)$$

Коли початок синусоїди струму зсувається вліво від початку координат (рис. 3), початкова фаза стає додатною ( $\alpha > 0$ ). У цьому випадку струм описується рівнянням (1). При зсуві синусоїди вправо початкова фаза від'ємна ( $\alpha < 0$ ), і рівняння струму матиме вигляд:

$$i = I_m \sin(\omega t - \alpha), \quad (3)$$



**Рис. 3.** Змінний синусоїдальний струм з початковою фазою.

Періодом ( $T$ ) називають час, за який струм здійснює одне повне коливання, а частота ( $\nu$ ) – це кількість коливань за одиницю часу. Взаємозв'язок між періодом і частотою описується формулою:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Частоту вимірюють у герцах (Гц), а період – у секундах. Циклічна частота ( $\omega$ ) визначає кількість коливань за  $2 \cdot \pi$  секунди й вимірюється у радіанах за секунду (рад/с):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu = \frac{\pi n}{30},$$

де  $n$  – кількість коливань за хвилину.

В енергосистемах України та Європи частота струму становить 50 Гц, тоді як у США, Канаді та Японії – 60 Гц. Всі наведені характеристики стосуються також синусоїдно змінних ЕРС і напруги.

Діюче значення струму  $I$  – це таке постійне значення струму, яке виділяє в резистивному опорі за період стільки ж енергії, скільки синусоїдний змінний струм. Воно позначається як і пов'язане з амплітудним значенням співвідношенням:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m.$$

Таким чином, діюче значення струму завжди менше амплітудного у разів. Аналогічно визначають діючі значення ЕРС і напруги:

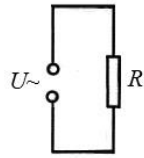
$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Більшість електровимірювальних приладів для змінного струму показують саме діюче значення величин. У теоретичних розрахунках інколи зручно використовувати середнє значення струму ( $I_c$ ), напруги ( $U_c$ ) або ЕРС ( $E_c$ ), яке визначається як середнє арифметичне значення відповідної величини за півперіод:

$$I_c = \frac{2 \cdot I_m}{\pi}, \quad E_c = \frac{2E_m}{\pi}, \quad U_c = \frac{2U_m}{\pi}.$$

На відміну від постійного струму, у колах змінного струму існує три види опорів.

Розглянемо найпростіший випадок: електричне коло змінного струму, яке містить лише резистивний елемент (рис. 4).



**Рис. 4.** Електричне коло змінного струму з резистивним елементом

Припустимо, що напруга на резистивному елементі змінюється з часом за законом:

$$u = U_m \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

Миттєве значення струму в цьому колі можна визначити за формулою:

$$i = \frac{u}{R},$$

або

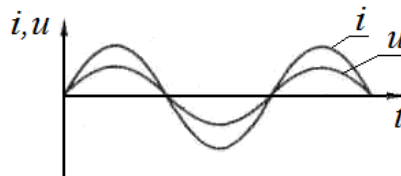
$$i = \frac{U_m \sin(\omega \cdot t)}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega \cdot t).$$

Оскільки  $\frac{U_m}{R} = I_m$  є амплітудним значенням сили струму, закон зміни струму в такому колі запишемо як:

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t) \quad (5)$$

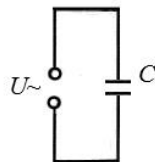
Порівнюючи рівняння (4) і (5), можна зробити висновок, що у провіднику з активним опором зміни струму відбуваються синхронно зі змінами напруги (рис. 5). Іншими словами, коливання сили струму і напруги в такому колі є синфазними. Амплітудне значення струму визначається формулою:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$



**Рис. 5.** Струм та напруга в електричному колі з резистивним елементом.

Тепер розглянемо електричне коло змінного струму з ємнісним елементом (рис. 6).



**Рис.6.** Електричне коло змінного струму з ємнісним елементом/

Припустимо, що ємність конденсатора є великою, а індуктивність кола – незначною. Якщо струм у колі змінюється за законом  $i = I_m \sin(\omega \cdot t)$ , то напругу на конденсаторі можна описати як різницю потенціалів на його обкладинках:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Звідси:

$$\begin{aligned}dq &= I \cdot dt, \\dq &= I \cdot dt = I_m \sin(\omega \cdot t) \cdot dt, \\q &= \int I_m \sin(\omega \cdot t) \cdot dt = -\frac{I_m}{\omega} \cos(\omega \cdot t) + q' .\end{aligned}$$

де  $q'$  – стала інтегрування, що відповідає початковому заряду конденсатора.

Припустимо, що в початковий момент часу ( $t=0$ ) заряд на обкладинках конденсатора дорівнював нулю ( $q' = 0$ ). Тоді:

$$q = -\frac{I_m}{\omega} \cos(\omega \cdot t) = \frac{I_m}{\omega} \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Оскільки  $u_c = \frac{q}{C}$ , то:

$$u = u_c = \frac{q}{C} = \frac{I_m}{C\omega} \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right),$$

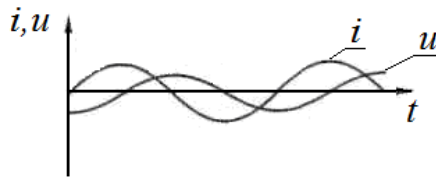
або

$$u = U_{Cm} \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (6)$$

У цьому виразі  $\frac{I_m}{C\omega} = U_m$  є амплітудним значенням напруги в колі. Величину

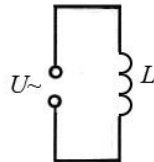
$R_c = X_c = \frac{1}{C\omega}$  називають ємнісним опором.

Порівнюючи закони зміни струму і напруги, можна зробити висновок, що в колі з ємнісним елементом коливання сили струму випереджають зміни напруги на конденсаторі на кут  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 7):



**Рис. 7.** Струм та напруга в електричному колі з ємнісним елементом.

Електричним колом змінного струму з індуктивним елементом називають таке коло, яке має індуктивність, а активний і ємнісний опори є дуже малими (рис. 8).



**Рис. 8.** Електричне коло змінного струму з індуктивним елементом.

Нехай струм у цьому колі змінюється за гармонічним законом  $i = I_m \sin \omega t$ . Через явище самоіндукції в котушці виникає електрорушійна сила (ЕРС)  $\varepsilon_c$ , що робить це коло неоднорідним. Застосуємо закон Ома для неоднорідної ділянки кола:

$$i = \frac{u + \varepsilon_c}{R}.$$

Оскільки  $R = 0$ , то  $u = -\varepsilon_c$ , або:

$$u = -\varepsilon_c = L \frac{di}{dt},$$

де  $L$  – індуктивність котушки.

Підставимо гармонічний закон зміни струму в останній вираз:

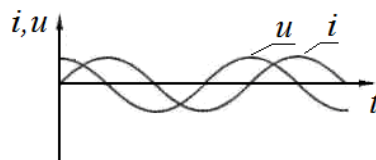
$$\begin{aligned} u &= L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin(\omega \cdot t))}{dt} = I_m L \frac{d(\sin(\omega \cdot t))}{dt} = \\ &= I_m L \omega \cdot \cos(\omega \cdot t). \end{aligned}$$

$I_m L \omega = U_m$  – амплітудне значення напруги в колі.

Вираз  $R_L = X_L = L\omega$  називають індуктивним опором. Враховуючи, що  $\cos(\omega \cdot t) = \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2})$ , можемо записати:

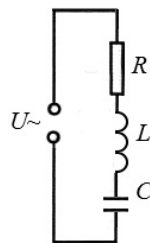
$$u = U_m \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}).$$

Порівнюючи рівняння струму та напруги, можна зробити висновок, що в колі з індуктивністю коливання напруги випереджають коливання струму на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 9).



**Рис. 9.** Струм та напруга в електричному колі з індуктивним елементом.

Індуктивний та ємнісний опори залежать від частоти. Якщо коло містить обидва ці опори, його називають таким, що має реактивний опір. Розглянемо коло, що містить послідовно з'єднані активний ( $R$ ), ємнісний ( $X_C$ ) та індуктивний ( $X_L$ ) опори (рис. 10).



**Рис. 10.** Електричне коло змінного струму з індуктивним, ємнісним та резистивним елементом.

Провівши аналіз за допомогою векторних діаграм, можна знайти повний опір кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2},$$

де  $X$  – повний реактивний опір, який визначається як:

$$X = \frac{1}{\omega C} - \omega L.$$

З двох останніх виразів можемо записати:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}.$$

Знаючи повний опір, закон Ома для ділянки кола змінного струму запишеться так:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}},$$

де  $U$  та  $I$  – діючі значення напруги та струму відповідно. Використовуючи зв'язок між амплітудними та діючими значеннями можемо також записати:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}.$$

Фазовий зсув між струмом і напругою в колі описується виразом:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Ефективне значення сили змінного струму дорівнює силі постійного струму, який створює такий самий тепловий ефект. Більшість вимірювальних приладів градуйовані в діючих значеннях. Для гармонічних величин часто використовують метод векторних діаграм (рис. 11), де вздовж горизонтальної осі відкладається струм, а вертикальні осі показують напруги на індуктивному та ємнісному опорах. Їх протилежні напрямки свідчать про протифазність цих напруг.

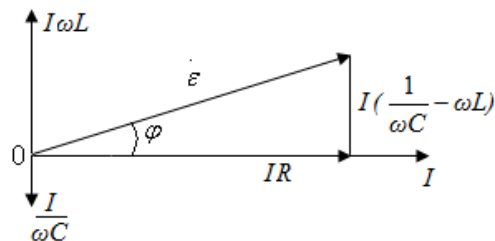


Рис. 11. Векторна діаграма змінного струму.

### Порядок виконання роботи

**Завдання 1. Визначити індуктивний опір котушки та її індуктивність.**

1) Зберіть електричне коло відповідно до схеми, наведеної на рис. 12.

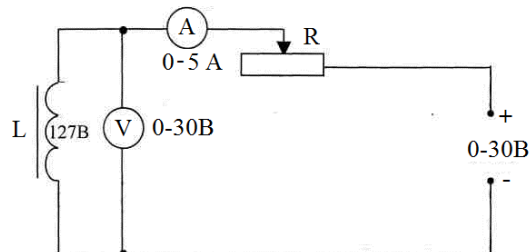


Рис. 12. Схема електричного кола для визначення активного опору котушки.

2) Виміряйте силу струму  $I$  і напругу  $U$  при різних положеннях повзунка реостата  $R$  (3–5 разів). Внесіть результати у таблицю 1.

Таблиця 1

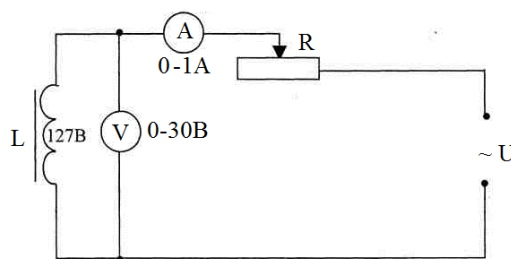
№	U, под	U, В	I, под	I, А	R, Ом	$\Delta R$ , Ом
1						
...						

3) Обчисліть значення опорів  $R$ ,  $R_C$ ,  $\Delta R$ ,  $\Delta R_C$  та запишіть у таблицю 1.

4) Підключіть джерело змінного струму (рис. 13) і повторіть вимірювання  $U$  та  $I$  при різних положеннях повзунка реостата (3–5 разів). Дані занесіть у таблицю 2.

Таблиця 2

№	U, под	U, В	I, под	I, А	Z, Ом	$\Delta Z$ , Ом
1						
...						



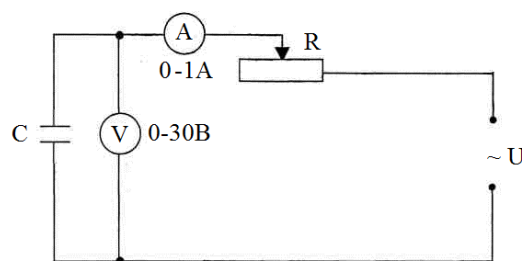
**Рис. 13.** Схема електричного кола для визначення індуктивного опору котушки.

5) За отриманими даними розрахуйте:  $Z$ ,  $Z_C$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta Z_C$ ,  $X_L$  та  $L$ .

6) Розрахуйте відносну похибку та запишіть остаточні результати.

**Завдання 2. Визначити ємнісний опір в колі змінного струму та розрахувати ємність конденсатора.**

1) Зберіть електричне коло, схему якого наведено на рис. 14.



**Рис. 14.** Схема електричного кола для визначення ємнісного опору конденсатора.

2) Виміряйте напругу  $U$  та силу струму  $I$  при різних положеннях повзунка потенціометра (3–5 разів). Дані вимірювань занесіть у таблицю 3.

Таблиця 3

№	U, под	U, В	I, под	I, А	$X_C$ , Ом	$\Delta X_C$ , Ом
1						
...						

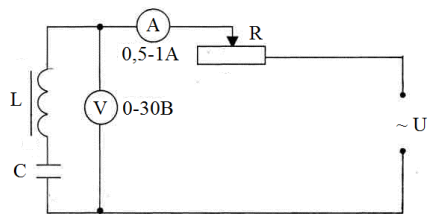
3) Розрахуйте ємнісний опір  $X_C$ , похибку  $\Delta X_C$  та ємність конденсатора  $C$ .

4) Обчисліть відносну похибку та запишіть кінцеві результати.

**Завдання 3. Перевірити закон Ома для кола змінного струму та визначити  $\text{tg}\phi$ .**

1. Зберіть електричне коло згідно зі схемою на рис. 15.





**Рис. 15.** Схема електричного кола для перевірки закону Ома для ділянки кола змінного струму.

2. Виміряйте  $U$  та  $I$ , а також розрахуйте  $Z$ ,  $Z_C$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta Z_C$ . Дані внесіть до таблиці 4.

Таблиця 4

№	U, под	U, В	I, под	I, А	Z, Ом	$\Delta Z$ , Ом
1						
...						

- Розрахуйте  $Z$ , використовуючи значення  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , знайдені в попередніх завданнях.
- Порівняйте розраховане значення  $Z$  із експериментальними даними (таблиця 4).
- Накресліть векторну діаграму і визначте  $tg\varphi$ .

#### Методичні вказівки

У колі змінного струму, що містить активний  $R$  та індуктивний  $X_L$  опори (завдання 1), вимірявши  $I$ ,  $U$  розраховують:

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

Якщо в цьому колі замість джерела змінного струму підключити джерело постійного струму, то, вимірявши  $U$  і  $I$ , знаходять активний опір:

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

При  $X_C=0$  визначають:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

Якщо врахувати, що  $X_L = \omega L$ ,  $\omega = 2\pi\nu = 314$ , то:

$$L = \frac{1}{314} \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{314} X_L.$$

Коли в коло змінного струму увімкнено конденсатор, а  $R \rightarrow 0$  і  $X_L \rightarrow 0$  (завдання 2), повний опір:  $Z = X_C$ . Вимірявши  $I$ ,  $U$ , знаходять, що ємнісний опір:

$$X_C = Z = \frac{U}{I}$$

Так як  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ , то ємність конденсатора:

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{314 X_C}$$

У колі змінного струму, що містить активний  $R$ , ємнісний  $X_C$  та індуктивний  $X_L$  опори (завдання 3), вимірюють  $I$ ,  $U$  і розраховують:

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

#### Контрольні питання

1. Що таке змінний струм? Назвіть його основні параметри.
2. Що визначає індуктивний опір у колі змінного струму?
3. Запишіть формулу індуктивного опору.
4. Що визначає ємнісний опір у колі змінного струму?
5. Запишіть формулу ємнісного опору.
6. Як розрахувати повний опір?
7. Як формулюється закон Ома для змінного струму?
8. Якими параметрами характеризується змінний струм?
9. Як виглядає векторна діаграма закону Ома для змінного струму?
10. У чому різниця між середнім і діючим значенням змінного струму?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### Дослідження роботи напівпровідникового діода та схем випрямлення змінного струму

Мета роботи: Ознайомитись з принципом дії напівпровідникового діода та схемами випрямлення змінного струму.

#### Прилади і матеріали

7. Установка для вивчення *p-n*-переходу ФПК-06.
8. Діоди, діодний місток.
9. Осцилограф.
10. Резистор.
11. Конденсатори.
12. Перемикач.
13. Трансформатор.
14. З'єднувальні провідники.

#### Теоретичні відомості

Властивості однорідних напівпровідників застосовують переважно для створення напівпровідникових резисторів. У більшості ж напівпровідникових пристроїв і елементів електроніки використовуються неоднорідні структури, ключовими серед яких є контакти між напівпровідниками різного типу провідності або між напівпровідником і металом.

Контакт між напівпровідниками різних типів провідності називається електронно-дірковим переходом або *p-n*-переходом. Такий перехід неможливо створити простим з'єднанням напівпровідникових пластин, оскільки поверхні будуть забруднені оксидною плівкою чи залишками повітря. Для утворення *p-n*-переходу використовують методи дифузії або вплавлення домішок у монокристал напівпровідника, а також вирощування з розплаву.

Властивості *p-n*-переходу залежать від його конструкції, способу виготовлення та концентрації донорних і акцепторних домішок. Наприклад, у випадку рівних концентрацій донорних і акцепторних домішок відбувається формування особливого шару поблизу переходу (рис. 1). У напівпровіднику типу *n* основними носіями заряду є електрони, тоді як у напівпровіднику типу *p* – дірки. Поблизу *p-n*-переходу носії заряду дифундують крізь перехід і рекомбінують один з одним, що призводить до утворення збідненого шару, позбавленого вільних носіїв заряду. Ширина цього шару становить приблизно десять частки мікрометра. У цьому шарі в напівпровіднику *p*-типу залишаються негативні іони акцепторної домішки, а в напівпровіднику *n*-типу – позитивні іони донорної домішки.

Електричне поле, яке виникає через розподіл зарядів у цьому шарі, створює потенціальний бар'єр висотою кілька десятих вольта, що перешкоджає подальшій дифузії носіїв заряду. Це поле спрямоване від позитивних іонів-донорів до негативних іонів-акцепторів, уповільнюючи рух основних носіїв заряду та прискорюючи рух неосновних. Електрони, які потрапляють у область *p*-типу, повертаються назад у область *n*-типу через дію електричного поля, аналогічно дірки відштовхуються в область *p*-типу.

Завдяки наявності шару збіднення шириною  $L$ , провідність *p-n*-переходу значно менша, ніж у решті частини напівпровідника. Крім того, електричне поле і просторовий розподіл зарядів обумовлюють залежність провідності переходу від напрямку зовнішнього електричного поля.

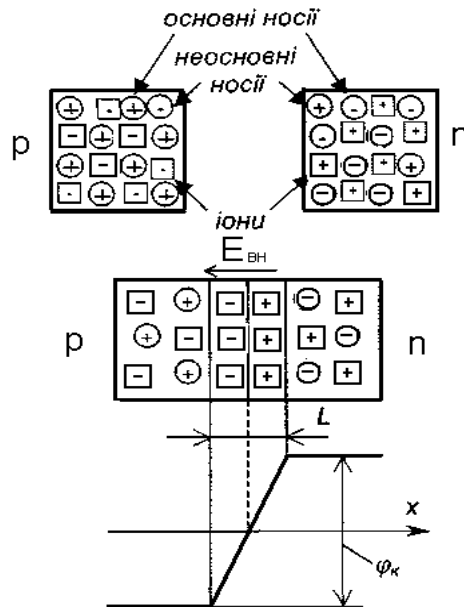


Рис. 1. Утворення потенціального бар'єру в  $n$ - $p$ -переході.

У напівпровідниках постійно утворюються та зникають теплові електронно-діркові пари, які забезпечують певну кількість неосновних носіїв заряду. Поблизу  $n$ - $p$ -переходу ці неосновні носії, перш ніж рекомбінувати з основними, можуть потрапити в область потенціального бар'єра та викликати дрейфовий струм. За відсутності зовнішніх впливів цей дрейфовий струм компенсується дифузійним струмом основних носіїв, що створює динамічну рівновагу в межах переходу.

Якщо до  $n$ - $p$ -переходу, що перебуває в рівновазі, прикласти зовнішнє електричне поле, через нього почне проходити електричний струм, величина якого залежатиме від напрямку прикладеного поля (рис. 2).

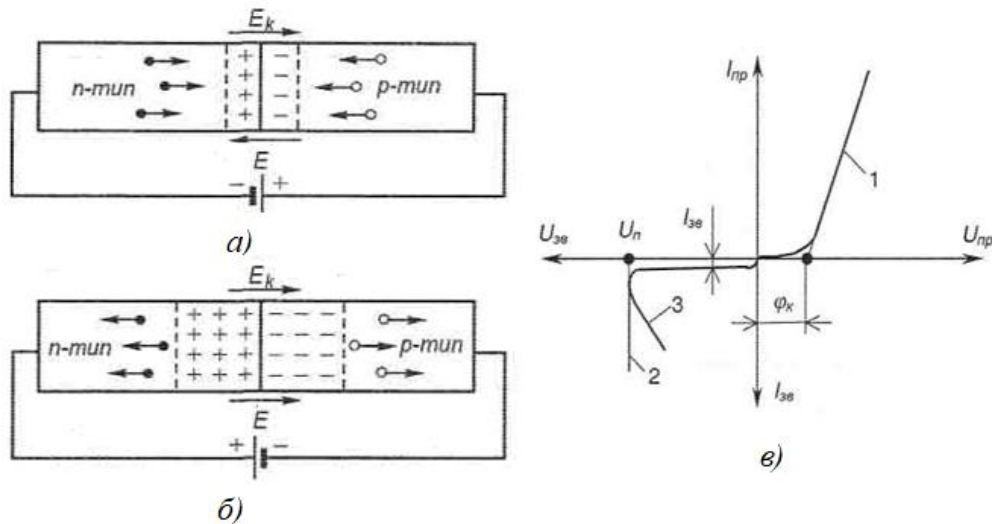


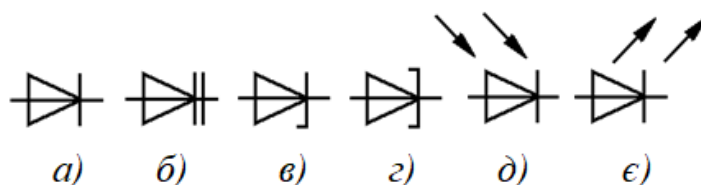
Рис. 2. Пряме (а) та зворотнє (б) включення електронно-діркового переходу до зовнішнього джерела живлення та його вольт-амперна характеристика (в).

Коли електричне поле діє в напрямку, протилежному потенціальному бар'єру (рис. 2, а), цей бар'єр зменшується, а згодом може повністю зникнути. Основні носії заряду спрямовуються через  $n$ - $p$ -перехід, зменшуючи його ширину й опір. Потрапивши на іншу сторону переходу, ці носії стають неосновними та рекомбінують із основними носіями напівпровідника. Відновлення кількості основних носіїв забезпечується через зовнішнє коло, що створює прямий дифузійний струм. Із підвищенням напруги зовнішнього електричного поля прямий струм зростає експоненційно.

Якщо зовнішнє електричне поле направлене в тому ж напрямку, що й поле потенціального бар'єра (рис. 2, б), то зі збільшенням його напруженості потенціальний бар'єр зростає. Це призводить до розширення збідненої носіями заряду області (ширина  $L$  збільшується) та підвищення опору n-p-переходу. Через це кількість основних носіїв заряду, які можуть подолати потенціальний бар'єр, зменшується, а дифузійний струм основних носіїв знижується. Основні носії під впливом зовнішнього поля відсуваються від приконтактних зон у глибину напівпровідника.

Для неосновних носіїв потенціальний бар'єр у зоні n-p-переходу відсутній, тому вони втягуються в перехід під дією електричного поля. Такий режим роботи n-p-переходу називається зворотним. У цьому режимі основний дрейфовий струм, створений неосновними носіями, має невелику величину, яка майже не залежить від зовнішньої напруги, але суттєво залежить від температури.

Таким чином, ключовою властивістю n-p-переходу є його однобічна провідність і нелінійність вольт-амперної характеристики (рис. 2, в). Напівпровідникові діоди – це прилади з одним електронно-дірковим переходом і двома виводами. Вони розрізняються за основним матеріалом, технологією виготовлення та конструктивними особливостями, що визначає широкий спектр їхніх електричних характеристик і сфер застосування (рис. 3).

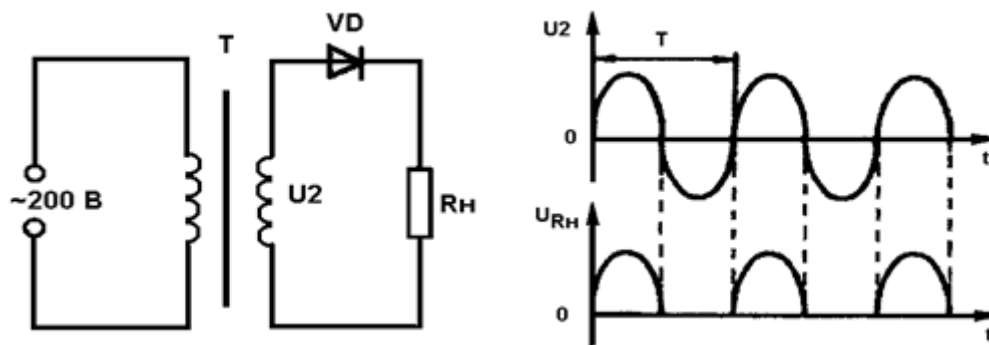


**Рис. 3.** Умовні графічні позначення напівпровідникових діодів: а – загальне; б – варикап; в – стабілітрон; г – тунельний діод; д – фотодіод, е – світлодіод.

Діоди класифікують за різними характеристиками. Найпоширенішими є германієві та кремнієві діоди – за основним матеріалом; точкові та площинні – за конструкцією; сплавні, зварні та дифузійні – за технологією виготовлення; універсальні, високочастотні, імпульсні та випрямні – за умовами використання. Окремо виділяють спеціалізовані діоди, які базуються на параметричних властивостях n-p-переходу, електричному пробі, тунельному ефекті та інших фізичних явищах.

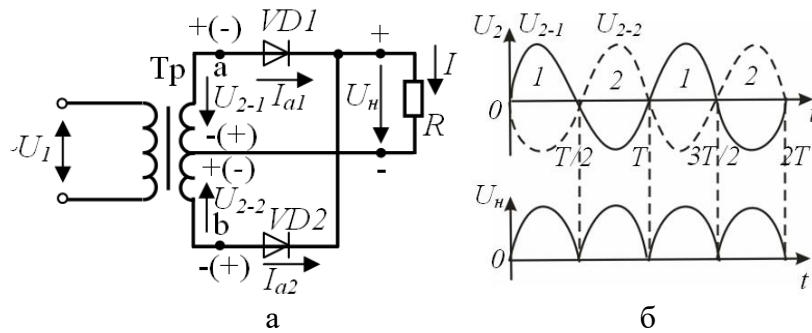
Сучасні електронні пристрої зазвичай містять велику кількість транзисторів, фотоелементів та інтегральних мікросхем (ІМС), що працюють від постійного струму. Постійна напруга отримується шляхом випрямлення змінного струму.

Простий однопівперіодний випрямляч (рис. 4) включає послідовно підключені джерело живлення, діод і навантаження. У цій схемі струм проходить через випрямляч та навантаження лише протягом одного півперіоду змінного струму, що призводить до отримання пульсуючого постійного струму. Такі випрямлячі використовують у випадках, коли пульсації струму не критичні для роботи пристрою.



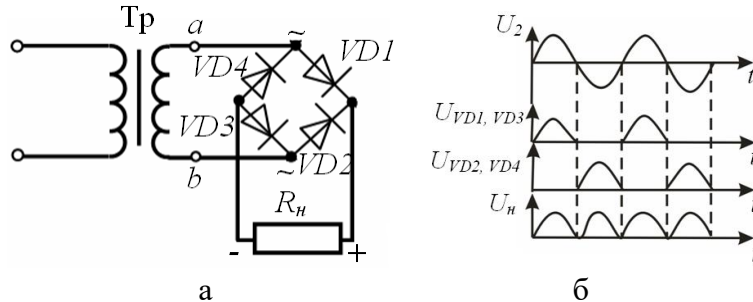
**Рис. 4.** Однопівперіодний випрямляч та часові діаграми його роботи.

Більш ефективним є двопівперіодний випрямляч (рис. 1.5), у якому навантаження підключено до середньої точки вторинної обмотки трансформатора. У цій схемі струм через навантаження проходить під час обох півперіодів змінного струму, що зменшує пульсації.



**Рис. 5.** Однофазний двопівперіодний випрямляч з нульовим виводом: а – схема, б – часові діаграми.

Серед сучасної електроніки найбільш популярна однофазна мостова схема випрямляча (рис. 1.6).



**Рис. 6.** Схема місткового випрямляча (а) та його часова діаграма (б).

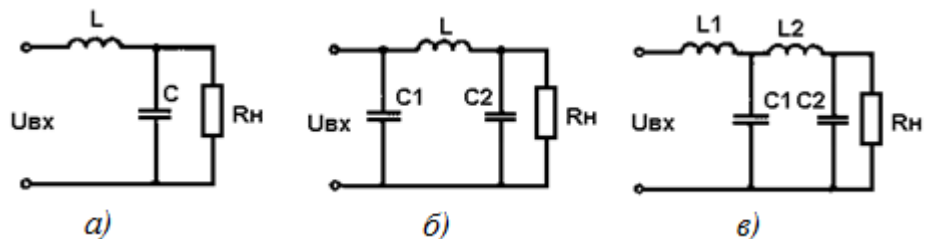
У цій схемі первинна обмотка трансформатора підключається до мережі змінного струму, а вторинна – до чотирьох діодів, з'єднаних у вигляді мосту. Вторинна обмотка трансформатора входить в одну діагональ мосту, а опір навантаження – в іншу. Такий випрямляч забезпечує проходження струму через навантаження під час обох півперіодів.

Випрямлена напруга, отримана в зазначених схемах, зазвичай має значні пульсації. Для їх згладжування на виході випрямлячів встановлюють спеціальні фільтри, які зменшують пульсації до рівня, що не впливає на роботу електронного обладнання.

Згладжувальні фільтри поділяють на:

*прості* – ємнісні та індуктивні (рис. 7, а);

*складні* – одноланкові (рис. 7, б) та багатоланкові (рис.7, в).



**Рис. 7.** Згладжувачі фільтри.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з паспортом та інструкцією щодо роботи з установкою ФПК-06, призначеною для вивчення р-п-переходу.
2. Провести зняття вольт-амперних і вольт-фарадних характеристик зазначених діодів відповідно до пункту 7 «Порядок роботи» паспорта установки ФПК-06.
3. Зняти осцилограму змінного струму.
4. Зібравши схему з напівпровідниковим діодом і навантаженням відповідно до рис .8, отримати осцилограму однопівперіодного випрямлення змінного струму.

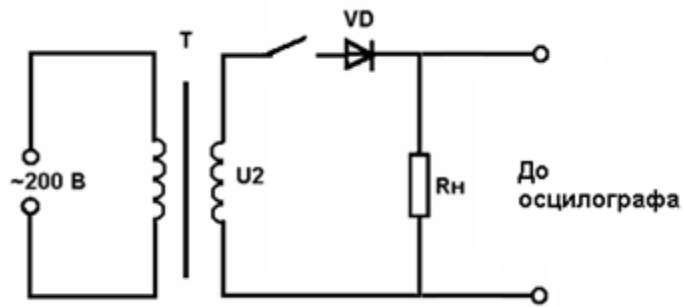


Рис.8. Дослідження однопівперіодного випрямлення змінного струму.

5. Використовуючи мостову схему випрямлення, отримати осцилограму двопівперіодного випрямленого струму на екрані осцилографа.

6. Додати до мостової схеми випрямлення змінного струму ємнісний фільтр (рис. 9) та зняти відповідну осцилограму.

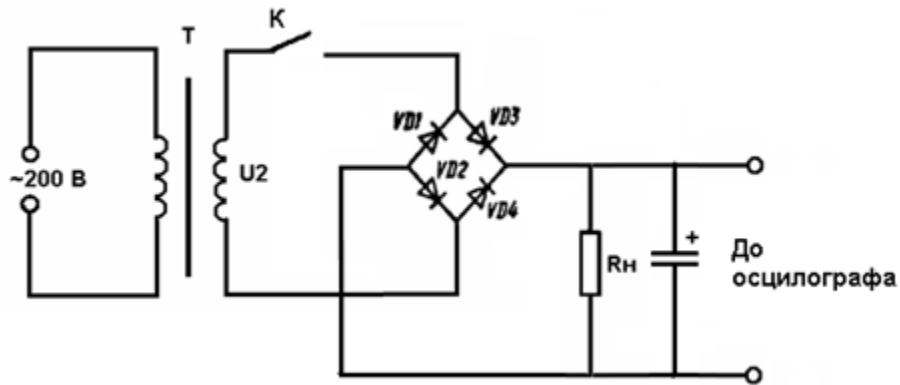


Рис. 9. Дослідження двопівперіодного випрямлення змінного струму.

15. Розрахувати пульсації струму, які залишаються після згладжування за допомогою ємнісного фільтра.

Таблиця 1. Електричні параметри деяких напівпровідникових діодів

Тип діода	Граничний струм $I_{np, max}$ , А	Прямий спад напруги $U_{np}$ , А	Максимальна зворотна напруга $U_{зв, max}$ , В	Зворотний струм $I_{зв}$ , мА	Гранична частота, кГц
КД103А ... КД105В	0,1...0,3	1...1,2	30...600	0,05...0,3	1
Д226	0,3	1	400	0,3	50
Д202 ... Д205	0,4	1	100...400	0,5	50
КД202	1...5	0,8	50...600	0,9	5
Д242 ... Д284Б	5...10	1...1,5	100...600	3	1,2
Д9А ... Д9М	0,015...0,04	1	10...100	0,06...1	40 000
Д223 ... Д233Б	0,02...0,05	1	50...150	0,0005...0,001	30 000
ГД402А ... ГД402Б	0,025	15	15	0,1	10 000

## Контрольні запитання

1. Опишіть процес формування р-n-переходу.
2. Дайте характеристику вольт-амперної залежності (ВАХ) напівпровідникового діода.
3. Перелічіть основні види діодів.
4. Вкажіть умовні позначення для різних типів діодів на схемах.
5. Розкажіть про маркування напівпровідникових діодів.
6. Які фізичні явища забезпечують роботу варикапів?
7. Які фізичні явища лежать в основі функціонування тунельних діодів?
8. Які фізичні явища визначають принцип роботи стабілітронів?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 Дослідження фотодіодів та світлодіодів

Мета роботи: Ознайомитись з принципом дії фотодіодів, світлодіодів та оптопар. Дослідити їх основні властивості та параметри.

### Прилади і матеріали

1. Установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ - 05.
2. Осцилограф.
3. З'єднувальні провідники.

### Теоретичні відомості

Фотодіод – це напівпровідниковий діод, зворотний струм якого змінюється залежно від рівня освітленості. У якості фотодіода використовують напівпровідниковий діод із р-п-переходом, що зміщений у зворотному напрямку за допомогою зовнішнього джерела живлення.

Коли квант світла поглинається в р-п-переході або в прилеглих до нього областях, утворюються додаткові носії заряду. Неосновні носії заряду, що виникають у ділянках поблизу р-п-переходу на відстані, меншій за дифузійну довжину, дифундують до переходу і переносяться через нього під дією електричного поля. Це викликає збільшення зворотного струму при освітленні. Аналогічний ефект виникає при поглинанні світлових квантів безпосередньо в р-п-переході. Зростання зворотного струму називають фотострумом.

На рис. 1 зображено схему підключення фотодіода. Напруга від джерела живлення подається на фотодіод у зворотному напрямку. У темряві через діод протікає невеликий зворотний (темновий) струм, який становить приблизно 10-20 мкА для германієвих діодів і 1-2 мкА для кремнієвих.

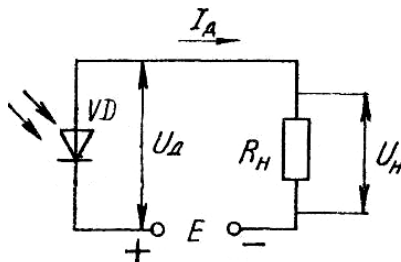


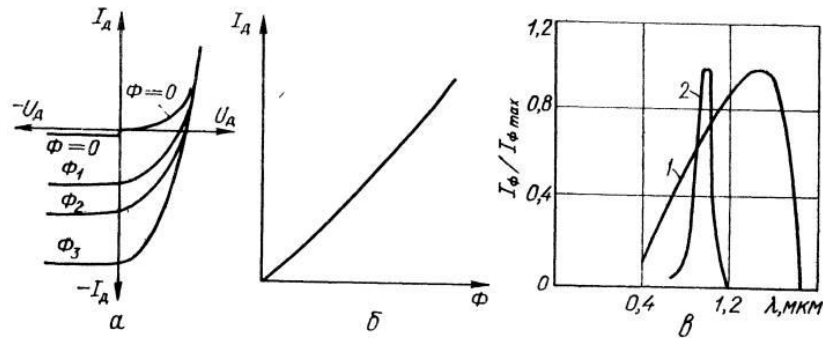
Рис. 1. Схема включення фотодіода.

Фотодіод може працювати як із зовнішнім джерелом живлення, так і без нього. У режимі із зовнішнім джерелом живлення пристрій працює у фотодіодному режимі, а без нього – у фотовентильному (або генераторному) режимі.

У фотовентильному режимі під дією світлового потоку в фотодіоді виникає електрорушійна сила, що дозволяє працювати без додаткового джерела напруги.

Основні характеристики фотодіода:

1. Вольт-амперна характеристика ( $I_d=f(U_d)$  при  $\Phi=const$ ) описує залежність струму фотодіода від напруги за умови постійного рівня освітлення (рис. 2, а). У темряві ( $\Phi=0$ ) через фотодіод протікає темновий струм. Із підвищенням світлового потоку  $I_d$  зростає. У робочій області характеристик струм фотодіода майже не залежить від напруги при зворотній напрузі близько 1 В. Велике співвідношення струму освітлення до темнового струму робить фотодіод зручним для індикації освітленості. Однак, якщо зворотна напруга перевищить допустиме значення, у р-п-переході може виникнути лавиноподібне розмноження носіїв, що призведе до виходу пристрою з ладу.



**Рис. 2.** Характеристики фотодіода: а) ВАХ; б) світлова; в) спектральна (1 – германієвий фотодіод; 2 – кремнієвий фотодіод).

2. Світлова характеристика – це залежність фотоструму від рівня освітленості (рис. 2, б). У широкому діапазоні освітленості ця характеристика є лінійною. Це пояснюється тим, що товщина бази фотодіода значно менша за дифузійну довжину неосновних носіїв заряду. Завдяки цьому майже всі носії, що виникли в базі, беруть участь у створенні фотоструму.

3. Спектральна характеристика – це залежність фотоструму від довжини хвилі світла, що падає на фотодіод (рис. 2, в). Її форма залежить від ширини забороненої зони матеріалу. Для малих довжин хвиль зростає коефіцієнт поглинання, але також посилюється вплив поверхневої рекомбінації, що зменшує фотострум. Чутливість у короткохвильовій частині спектру залежить від товщини бази і швидкості поверхневої рекомбінації. Положення максимуму спектральної характеристики залежить від збільшення коефіцієнта поглинання.

4. Стала часу – це період, за який фотострум змінюється після включення або виключення освітлення, досягаючи  $\frac{1}{e}$  від свого сталого значення.

5. Темновий опір – опір фотодіода за відсутності освітлення.

6. Інтегральна чутливість ( $K = \frac{I_\phi}{\Phi}$ ) – відношення фотоструму ( $I_\phi$ ) до рівня освітленості ( $\Phi$ ).

Світлодіод – це напівпровідниковий пристрій, який випромінює некогерентне світло завдяки явищу електролюмінесценції, коли через нього проходить електричний струм. Випромінюване світло звичайних світлодіодів охоплює вузьку ділянку спектра, а його колір визначається хімічним складом напівпровідникового матеріалу. Сучасні світлодіоди здатні випромінювати світло в діапазоні від інфрачервоного до близького ультрафіолету, а також існують технології для розширення спектрального діапазону і створення білих світлодіодів.

На відміну від ламп розжарювання, які рівномірно випромінюють світло у всіх напрямках і охоплюють широкий спектр, світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі і у заданому напрямку. На основі світлодіодів були розроблені лазерні діоди, які також працюють за принципом електролюмінесценції, але випромінюють когерентне світло у вузькому промені.

Як і всі напівпровідникові діоди, світлодіоди мають р-п-перехід. Коли струм протікає через цей перехід у прямому напрямку, носії заряду – електрони та дірки – рекомбінують, випромінюючи фотони.

Не всі напівпровідники ефективно випромінюють світло під час рекомбінації. Найкращими матеріалами для цього є прямозонні напівпровідники, такі як сполуки АІІВV (наприклад, GaAs, InP) і АІІВVI (наприклад, ZnSe, CdTe). Варіюючи склад напівпровідника, можна виготовляти світлодіоди, що випромінюють світло різних довжин хвиль – від ультрафіолету (GaN) до середнього інфрачервоного діапазону (PbS).

Непрямозонні напівпровідники, такі як кремній, германій або їх сплави (SiGe, SiC), майже не випромінюють світло. Однак завдяки високому рівню розвитку кремнієвих технологій дослідження у сфері створення кремнієвих світлодіодів активно тривають.

### Порядок виконання роботи

#### 1. Дослідити роботу світло діодів.

1.1. Підготуйте лабораторне обладнання для проведення експерименту відповідно до пункту 6 паспорта установки, призначеної для дослідження фотодіода і світлодіода ФДСВ-05.

1.2. Установіть постійну пряму напругу живлення світлодіодів, перевівши перемикач (поз. 5 на рис. 3) у положення «-». Регулятор «УРОВЕНЬ» (поз. 4) поверніть до крайнього положення за годинниковою стрілкою.

1.3. Використовуючи перемикач (поз. 2 на рис. 3), підключайте світлодіоди, встановлені на стенді, один за одним.

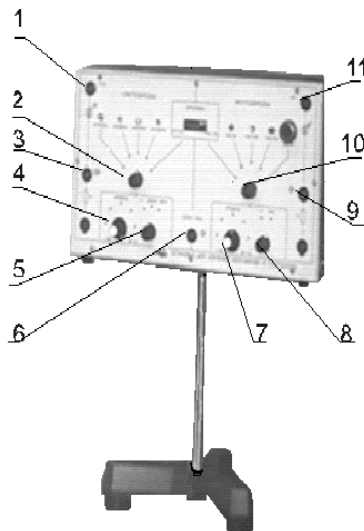


Рис. 3. Установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ - 05.

1.4. Обертайте регулятор «УРОВЕНЬ» і досліджуйте, як змінюється сила світла в залежності від прямого струму через світлодіод.

#### 2. Дослідити вольт-амперну характеристику (ВАХ) світло діодів.

2.1. Установіть двополярну лінійно зростаючу напругу живлення світлодіодів, перевівши перемикач (поз. 5 на рис. 3) у положення «ВАХ». «У»-вхід осцилографа, підготовленого згідно з пунктом 6.7 паспорта установки, підключіть сигнальним кінцем з'єднувального шнура до верхнього гнізда (поз. 3 рис. 3), а спільним кінцем – до нижнього гнізда.

2.2. На екрані осцилографа побудуйте ВАХ у прямокутній системі координат, встановивши початок координат у центрі екрана. Виберіть масштаб по горизонталі – 0,5 В/поділ. Перемикачем (поз. 2 на рис. 3) послідовно підключайте різні світлодіоди.

**3. Дослідження роботи фотодіодів.** 3.1. Установіть постійну зворотну напругу для живлення фотодіодів, перевівши перемикач (поз. 8, рис. 3) у положення «-». Переведіть регулятор «УРОВЕНЬ» (поз. 7) у середнє положення. «У»-вхід осцилографа, підготовленого згідно з п. 6.7 паспорта установки, підключіть сигнальним кінцем до верхнього гнізда, а спільним кінцем – до нижнього гнізда (поз. 9, рис. 3).

3.2. Використовуючи перемикач (поз. 10, рис. 3), послідовно підключіть фотодіоди, розташовані на стенді.

3.3. Закрийте фотодіод непрозорим предметом: осцилограф покаже відсутність струму або наявність початкового зворотного струму через опір навантаження у контурі фотодіода.

3.4. Освітліть фотодіод зовнішнім джерелом світла, наприклад, лампою розжарювання: осцилограф продемонструє збільшення зворотного струму. Наближайте

джерело світла до фотодіода, щоб побачити залежність зворотного струму від рівня освітлення.

3.5. Перевірте, що різні фотодіоди при однаковому рівні освітлення мають різні струми через навантаження, що свідчить про різну струмову чутливість фотодіодів.

#### **4. Дослідження ВАХ фотодіодів.**

4.1. Установіть двополярну лінійно зростаючу напругу для живлення фотодіодів, перевівши перемикач (поз. 8, рис. 3) у положення «ВАХ». «Y»-вхід осцилографа підключіть, як описано в п. 3.1. На екрані осцилографа отримайте ВАХ у прямокутній системі координат з початком у центрі екрана. Установіть масштаб по горизонталі на рівні 0,5 В/поділ. Перемикачем (поз. 10, рис. 2.3) послідовно виберіть фотодіоди.

4.2. Освітлюйте фотодіод і наближайте джерело світла, спостерігаючи, як змінюється зворотна гілка ВАХ через збільшення зворотного струму.

#### **5. Дослідження роботи оптоелектронної пари світлодіод-фотодіод.**

5.1. Установіть живлення світлодіодів періодичними прямокутними імпульсами, перевівши перемикач (поз. 5, рис. 3) у положення «-». Переведіть регулятор «УРОВЕНЬ» у крайнє положення за годинниковою стрілкою. Використовуючи перемикач (поз. 2, рис. 3), подайте напругу на інфрачервоний світлодіод оптопари.

5.2. Установіть постійну зворотну напругу для фотодіодів, перевівши перемикач (поз. 8, рис. 3) у положення «-». Регулятор «УРОВЕНЬ» (поз. 7, рис. 3) залиште в середньому положенні. Перемикачем (поз. 10, рис. 2.3) подайте напругу на фотодіод оптопари.

5.3. На екрані осцилографа, підключеного як у п. 3.1, спостерігайте сигнал, який приймається фотодіодом. Регулюючи «УРОВЕНЬ» (поз. 4, рис. 3), досліджуйте залежність амплітуди імпульсів, прийнятих фотодіодом, від струму через світлодіод. Закриваючи оптичний канал оптопари непрозорим предметом, перевірте припинення прийому сигналу фотодіодом.

#### **Контрольні запитання**

1. Які фізичні процеси визначають принцип роботи фотодіодів?
2. Які фізичні процеси визначають принцип роботи світлодіодів?
3. Які основні характеристики фотодіодів?
4. Де застосовують світлодіоди та фотодіоди?
5. Чим відрізняються лазер і світлодіод?
6. Що таке оптоелектронна пара?
7. Як підключаються фотодіоди та світлодіоди в електричні схеми?
8. З яких матеріалів виготовляють фотодіоди та світлодіоди?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### Дослідження ВАХ стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги

Мета роботи: Отримати осцилографічним методом ВАХ стабілітрона. Ознайомитись з принципом дії параметричних та компенсаційних стабілізаторів напруги. За результатами експерименту знайти коефіцієнт стабілізації компенсаційного стабілізатора напруги.

#### Прилади і матеріали

1. Звуковий генератор ГЗ-ЗМ.
2. Понижувальний трансформатор.
3. Панель із закріпленими на ній стабілітронами та резисторами.
4. Осцилограф С1-5.
5. Змонтований на панелі компенсаційний стабілізатор напруги.
6. Блок живлення В-24 М.
7. З'єднувальні проводи.

#### Теоретичні відомості

Зворотне ввімкнення *n-p*-переходу також використовується у стабілітронах, принцип роботи яких базується на властивості стабілізації, що виникає через явище електричного пробію. Для створення стабілітронів зазвичай застосовують кремній, який має кращу температурну стабільність у порівнянні з германієм. Під дією сильного електростатичного поля, що створюється зворотною напругою, у напівпровіднику виникає електричний пробій. Він супроводжується появою зворотного струму, величина якого майже не залежить від подальшого зростання напруги. Особливістю цього пробію є його оборотність, тобто він не пошкоджує *n-p*-перехід.

Електричний пробій полягає в тому, що електрони, рухаючись з великою швидкістю, при зіткненні з нейтральними атомами у зоні *n-p*-переходу іонізують їх, генеруючи нові вільні електрони та дірки. Цей процес відбувається лавиноподібно, що призводить до різкого збільшення струму. У стабілітронах електричний пробій виникає при низьких значеннях зворотної напруги, тому потужність, яка виділяється у *n-p*-переході, незначна, і теплового пробію не спостерігається. Вольт-амперна характеристика та схема підключення стабілітрона наведені на рис. 1 (а і б відповідно):

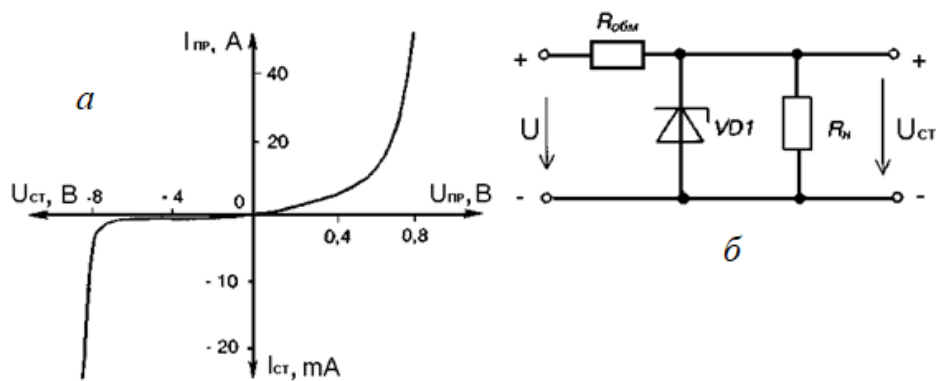


Рис. 1. ВАХ (а) і схема вмикання стабілітрона(б).

Основні характеристики стабілітрона включають:

1. Напруга стабілізації ( $U_{ст}$ ) – це напруга, що спостерігається на стабілітроні в режимі стабілізації при номінальному струмі. Саме за цим параметром здійснюють вибір стабілітронів для конкретного застосування.
2. Мінімальний струм стабілізації ( $I_{ст.min}$ ) – найменше значення зворотного струму, що забезпечує стабільний електричний пробій стабілітрона.

3. Номінальний струм стабілізації – це струм, при якому вимірюють напругу стабілізації. Для підтримання цього струму стабілітрон завжди підключають у коло із послідовним резистором.

У промисловості використовується широкий спектр напівпровідникових приладів. Щоб уникнути плутанини, для ідентифікації таких приладів застосовують спеціальне буквено-цифрове маркування.

Для дослідження вольт-амперної характеристики (ВАХ) стабілітрона використовують осцилограф і спеціальну експериментальну установку, схема якої зображена на рис. 2. Змінний струм пропускають через стабілітрон і послідовно підключений резистор. Напругу зі стабілітрона подають на горизонтальні пластини осцилографа, а напругу з резистора RRR, пропорційну струму через стабілітрон, подають на вертикальні пластини. Після калібрування осцилографа напругу стабілізації можна визначити експериментально.

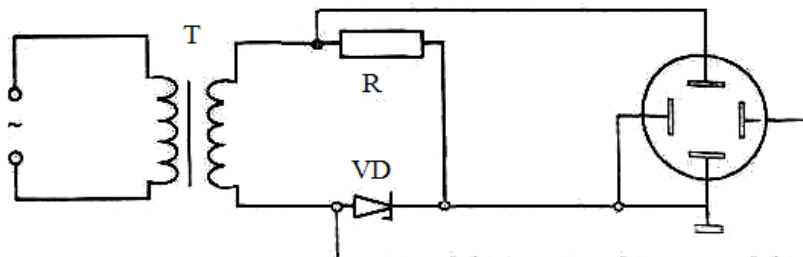


Рис. 2. Схема дослідження ВАХ стабілітрона за допомогою осцилографа.

У більшості електронних пристроїв напруга, яка подається на трансформатор, є нестабільною і може варіюватися у значних межах. Такі коливання впливають на роботу обладнання, що живиться від цієї напруги. Щоб забезпечити стабільність роботи апаратури незалежно від змін у мережі, використовуються електронні стабілізатори (рис. 3). Вони можуть бути побудовані на основі транзисторів, стабілітронів або інтегральних мікросхем (ІМС) і мають основну функцію – утримувати вихідну напругу на постійному рівні.

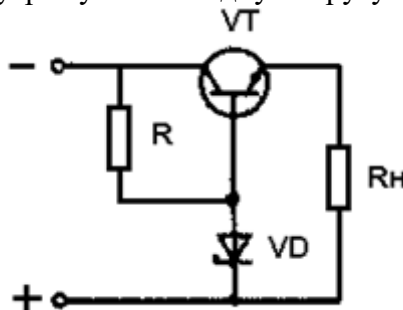


Рис. 3. Схема електронного стабілізатора напруги.

Якісні характеристики стабілізаторів визначаються коефіцієнтом стабілізації напруги, який розраховується за формулою:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX}}{\Delta U_{ВНХ} / U_{ВНХ}}$$

Значення цього коефіцієнта може варіюватися від кількох одиниць до тисяч залежно від типу стабілізатора.

Ще одним важливим показником стабілізатора є коефіцієнт пульсацій напруги, який обчислюється як:

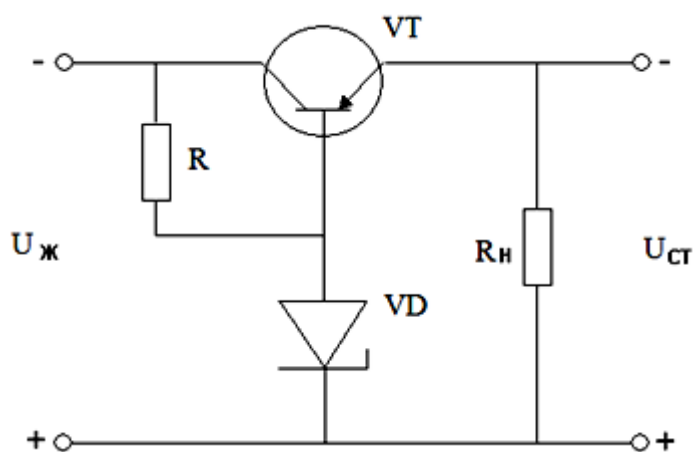
$$K_{П} = \frac{\Delta U_{\sim m}}{\Delta U_{ВНХ}} \cdot 100\%$$

де  $\Delta U_{\sim m}$  – змінна складова вихідної напруги стабілізатора, виражена у відсотках.

Стабілізатори напруги поділяються на параметричні та компенсаційні. *Параметричні стабілізатори* забезпечують стабілізацію напруги завдяки нелінійній залежності характеристик окремих елементів, таких як вольт-амперна характеристика (ВАХ) стабілітрона. На рис. 1 зображена схема простого параметричного стабілізатора постійної напруги. Ця схема є своєрідним подільником напруги, що включає обмежуючий резистор  $R_{обм}$  та стабілітрон  $VDI$ , паралельно якому підключено навантажувальний резистор  $R_H$ . Коли змінюється вхідна напруга  $U_{вх}$ , струм через обмежуючий резистор також змінюється. За відсутності стабілітрона це призвело б до коливань напруги на резисторі  $R_H$ . Проте наявність стабілітрона забезпечує стабільну напругу завдяки його особливій ВАХ: змінюється лише струм через стабілітрон, а напруга на ньому залишається практично незмінною. Відповідно, напруга на навантажувальному резисторі також стабільна.

Якщо вхідна напруга залишається сталою, але змінюється опір  $R_H$ , то струм через стабілітрон змінюється. Зменшення  $R_H$  (тобто збільшення струму навантаження) призводить до зменшення струму через стабілітрон, але напруга залишається стабільною. Серед недоліків параметричних стабілізаторів варто зазначити низьку ефективність, невеликі робочі струми та порівняно невисокий коефіцієнт стабілізації.

Компенсаційний стабілізатор, схема якого зображена на рис. 4, позбавлений зазначених недоліків.



**Рис. 4.** Схема компенсаційного стабілізатора напруги.

У цій схемі резистор  $R$  і стабілітрон  $VD$  утворюють параметричний стабілізатор, який забезпечує стабільну напругу на базі регулюючого транзистора. Вихідна напруга стабілізатора, а отже, і напруга на резисторі навантаження  $R_H$ , визначається як:

$$U_{RH} = U_{VD} - U_{BE}.$$

Якщо напруга на вході стабілізатора підвищується, збільшується струм  $I_e$ , що спричиняє зростання напруги на навантажувальному резисторі  $U_{RH}$ . Водночас підвищення  $U_{RH}$  призводить до зменшення прямої напруги між базою та емітером транзистора  $U_{BE}$ . Це зменшення напруги частково закриває транзистор, збільшуючи спад напруги на ділянці емітер-колектор. Таким чином, транзистор компенсує зміну вхідної напруги, забезпечуючи стабільність вихідної напруги.

#### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему для дослідження вольт-амперної характеристики (ВАХ) стабілітрона методом осцилографії.
2. За допомогою осцилографа отримати ВАХ стабілітронів КС168Д та КС133А (див. Табл. 2).
3. Скласти електричну схему для експериментів із компенсаційним стабілізатором напруги.
4. Виміряти вихідну напругу стабілізатора при зміні вхідної напруги, записати результати у Таблицю 1.

Таблиця 1.

№	1	2	3	...	22
$U_{BX}, B$	1	2	2	...	22
$U_{ВИХ}, B$					

5. Розрахувати коефіцієнт стабілізації на основі отриманих експериментальних даних.
6. Побудувати навантажувальну характеристику стабілізатора напруги на основі даних Таблиці 1 у прямокутній системі координат.

Таблиця 2. Параметри досліджуваних стабілітронів.

Тип стабілітрона	$U_{ст.}, B$	$I_{ст. min}, mA$	$I_{ст. max}, mA$	Диференціальний опір, Ом	$P_{max}, Вт$
КС168Д	6,12...7,48	3	50	30	0,3
КС133А	2,97...3,63	3	50	65	0,3

### Контрольні запитання

1. Які типи напівпровідникових діодів застосовуються для створення стабілізаторів напруги?
2. Назвіть основні характеристики стабілітронів.
3. Що таке параметричний стабілізатор напруги, і як він працює?
4. Яке основне призначення стабілізаторів напруги?
5. Які недоліки мають параметричні стабілізатори?
6. Які основні схеми стабілізаторів напруги існують?
7. Як визначається коефіцієнт пульсації?
8. Що таке коефіцієнт стабілізації, і як він характеризує стабілізатор напруги?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### Зняття характеристик біполярних транзисторів

Мета роботи: Ознайомитись з принципом дії біполярного транзистора. Дослідити ВАХ транзистора, включеного за схемою зі спільним емітером.

#### Прилади і матеріали

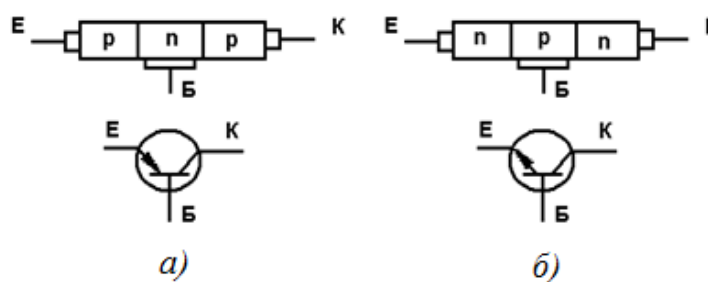
1. Панель з досліджуваним транзистором.
2. Блок живлення 0-12 В.
3. Блок живлення 0-20 В.
4. Реостат (28 Ом).
5. Вольтметр (В7-21А).
6. Вольтметр (М2042).
7. Міліамперметр (МВА-47/5).
8. Мікроампервольтметр (М 109/1).
9. З'єднувальні провідники.

#### Теоретичні відомості

Транзистор – це напівпровідниковий пристрій із трьома або більше виводами, призначений для підсилення, генерування електричних сигналів і комутації електричних ланцюгів.

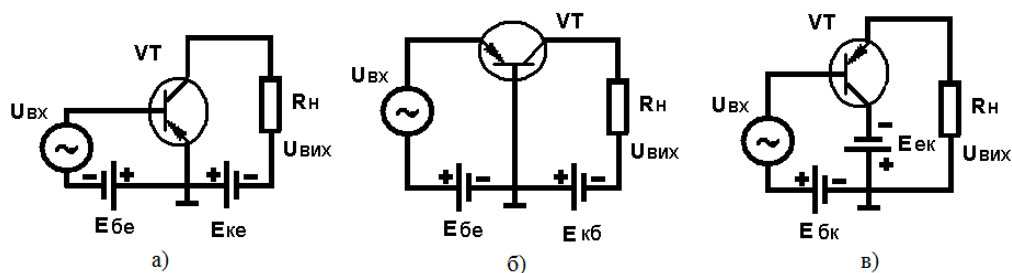
Транзистори є одними з найпоширеніших і найважливіших елементів сучасної напівпровідникової електроніки. За час свого існування вони зазнали значних змін у конструкції, технології виготовлення та електричних характеристиках, але принципи фізичних процесів, які лежать в основі їхньої роботи, залишилися незмінними.

Біполярний транзистор складається з трьох напівпровідникових шарів, два з яких мають однаковий тип провідності, розділених шаром протилежного типу провідності. Завдяки цьому утворюються транзисторні структури типу р-п-р або п-р-п з двома переходами (рис. 1), які наділені підсилювальними властивостями. Центральний шар називають базою (Б), а два зовнішні – емітером (Е) та колектором (К). Транзистори типу р-п-р (рис. 1 а) називають транзисторами прямої провідності, а типу п-р-п (рис. 1 б) – зворотної.



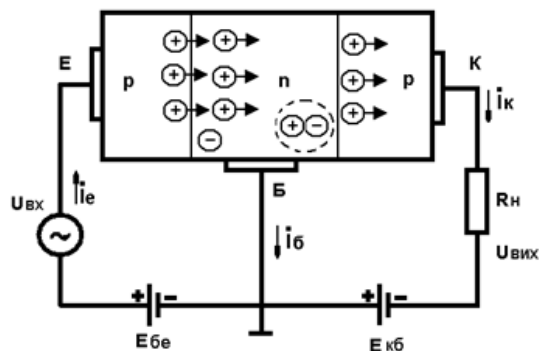
**Рис. 1.** Будова та умовне схематичне позначення біполярного транзистора структури р-п-р (а) та п-р-п (б).

Існує три основні схеми підключення транзистора (рис. 2): зі спільним емітером, зі спільною базою і зі спільним колектором:



**Рис. 2.** Схеми вмикання транзистора: *а)* зі спільним емітером; *б)* зі спільною базою; *в)* зі спільним колектором.

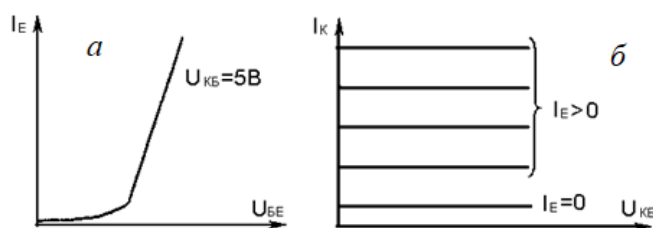
Принцип роботи транзистора базується на взаємодії двох р-п переходів (рис. 3):



**Рис. 3.** Принцип дії біполярного транзистора.

Одна з його структур підключається до джерела постійної напруги через відповідний електрод. При цьому емітерна область р-типу служить основним джерелом носіїв заряду.

Носії заряду, створені в емітері, проходять через середній шар транзистора – базу – і потрапляють у колекторну область р-типу, яка збирає заряд, інжектований емітером. Управління струмом у колекторному колі здійснюється завдяки зміні струму в емітерному колі. Для роботи транзистора обидва кола підключаються до джерел електричної енергії.



**Рис. 4.** ВАХ транзистора, увімкненого за схемою із спільною базою: *а)* вхідні; *б)* вихідні.

Взаємозв'язок між струмом і напругою у вхідних і вихідних колах транзистора визначається його вольт-амперними характеристиками (ВАХ). Набори таких характеристик для транзистора з конфігурацією «загальна база» наведено на рис. 4.

Режими роботи транзистора залежать від напруг, прикладених до його електродів (р-п-переходів), і поділяються на такі:

1) Активний режим (режим підсилення) - емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному.

2) Режим відсікання (відсічки) – обидва переходи зміщені у зворотному напрямку, через що вони закриті, а струми через них є мінімальними (майже нульовими). У цьому випадку між виводами транзистора практично відсутній струм, і коло можна розглядати як розрив.

3) Режим насичення – обидва переходи зміщені у прямому напрямку, транзистор повністю відкритий. Емітер і колектор вводять електрони в базу, утворюючи два зустрічні потоки (нормальний і зворотний). Від їх співвідношення залежить напрямок струмів у колах емітера та колектора. Через насичення бази транзистора надлишковими носіями заряду рекомбінація електронів із дірками значно зростає. Рекомбінаційний струм бази в цьому режимі значно більший, ніж в активному чи інверсному режимах. База і переходи транзистора мають низький опір, що зменшує потужність, яка розсіюється на колекторному переході. Цей режим зазвичай використовується у схемах перемикання.

4) Інверсний активний режим – емітерний перехід зміщений у зворотному напрямку, а колекторний – у прямому. Емітер і колектор фактично міняються ролями. Проте через низькі

підсилювальні властивості транзистора в цьому режимі він майже не використовується на практиці.

Біполярні транзистори виготовляються у корпусах з металу, пластмаси або кераміки. Як і напівпровідникові діоди, транзистори мають буквено-цифрову систему позначення.

*Перший символ* (буква чи цифра) вказує матеріал напівпровідника:

- Г або 1 – германій;
- К або 2 – кремній;
- А або 3 – арсенід галію.

*Другий символ* (буква) позначає тип приладу:

- Т – біполярні транзистори;
- П – польові транзистори.

*Третій символ* (цифра) вказує на потужність і частотні характеристики:

Малопотужні транзистори:

- низькочастотні (до 3 МГц) – 1;
- середньочастотні (3–30 МГц) – 2;
- високочастотні (понад 30 МГц) – 3.

Середньопотужні транзистори:

- низькочастотні (до 3 МГц) – 4;
- середньочастотні (3–30 МГц) – 5;
- високочастотні (понад 30 МГц) – 6.

Високотужні транзистори:

- низькочастотні (до 3 МГц) – 7;
- середньочастотні (3–30 МГц) – 8;
- високочастотні (понад 30 МГц) – 9.

• *Четвертий і п'ятий символи* (цифри) позначають порядковий номер розробки (від 01 до 99).

- *Шостий символ* (буква) розділяє транзистори за параметричними групами.

**Приклади маркування:**

- ГТ115А: германієвий транзистор, малопотужний, низькочастотний, розробка №15, група А.
- КТ360В: кремнієвий транзистор, малопотужний, високочастотний, розробка №60, група В.

### Порядок виконання роботи

- 1) Ознайомитися з обладнанням лабораторної установки.
- 2) Зібрати електричне коло, відповідно до схеми, наведеної на рис. 5, для дослідження транзистора в конфігурації зі спільним емітером.
- 3) Встановити напругу на колекторі транзистора  $U_{KE}=0$ .
- 4) Для отримання набору вхідних статичних характеристик транзистора  $I_B=f(U_{BE})$  при  $U_{KE}=0$ ; 1; 2; 3 В, змінювати напругу  $U_{BE}$  у межах, визначених викладачем, за допомогою резистора  $R$ .
- 5) Побудувати графіки вхідних статичних характеристик транзистора.
- 6) Для отримання набору вихідних статичних характеристик транзистора  $I_K=f(U_{KE})$  при  $I_B=0$ ; 40; 80 мкА, змінювати напругу  $U_{KE}$  у межах, вказаних викладачем.
- 7) Побудувати графіки вихідних статичних характеристик транзистора.
- 8) Використовуючи графіки вихідних характеристик, обчислити коефіцієнт підсилення за струмом:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}, \text{ при } U_{KE}=\text{const.}$$

- 9) Використовуючи графіки вхідних характеристик, визначити вхідний опір транзистора:

$$R_{BX} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}, \text{ при } U_{KE}=\text{const.}$$

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### Дослідження статичних характеристик і параметрів польових транзисторів

Мета роботи: Вивчити принцип дії польових транзисторів, експериментально дослідити статичні вольт-амперні характеристики. Дослідити залежність опору каналу від напруги на затворі транзистора з керуючим *p-n*-переходом.

#### Прилади і матеріали

1. Панель з польовим транзистором КП 301Б.
2. Джерело живлення (10 В).
3. Джерело живлення (25 В).
4. Два вольтметри.
5. Амперметр.
6. Мікроамперметр.

#### Теоретичні відомості

Прилади, у яких принцип роботи базується на зміні провідності каналу під впливом поперечного електричного поля, називаються польовими транзисторами. Оскільки у створенні струму через польовий транзистор беруть участь носії заряду одного типу (електрони або дірки), такі прилади також називають уніполярними транзисторами.

Залежно від способу формування провідного каналу, польові транзистори поділяють на: транзистори з керуючим *p-n*-переходом; транзистори структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори) із вбудованим або індукованим каналом.

#### Польові транзистори з керуючим *p-n*-переходом

Роботу польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом розглянемо на прикладі моделі, зображеної на рис. 1, а.

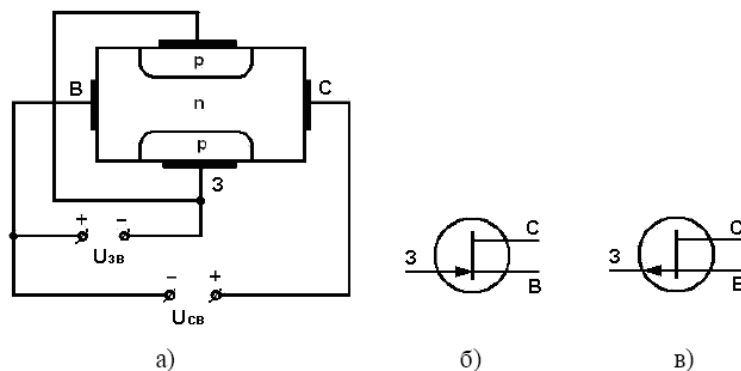


Рис. 1. а) польовий транзистор з керуючим *p-n*-переходом; б) умовне позначення польового транзистора з індукованим каналом *n*-типу в) умовне позначення польового транзистора з індукованим каналом *p*-типу.

У цій конструкції канал для струму утворений шаром напівпровідника *n*-типу, розташованим між двома *p-n*-переходами. Канал має контакти із зовнішніми електродами:

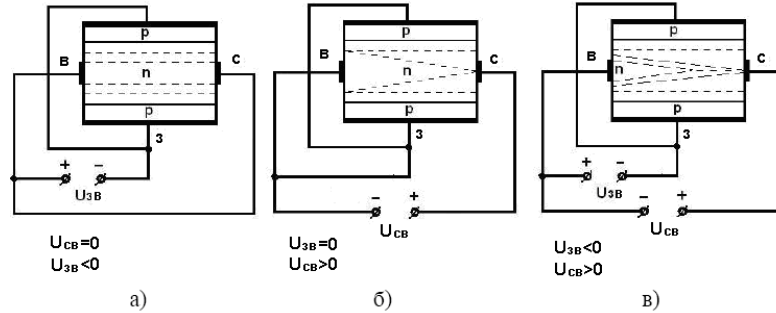
**Виток (В)** – електрод, з якого починають рух носії заряду (електрони). **Сток (С)** – електрод, до якого прямують носії заряду. Области *p*-типу, що формують два *p-n*-переходи з *n*-шаром, містять більше домішок, ніж сам *n*-шар. Обидва *p*-шари з'єднані між собою і мають спільний зовнішній електрод, який називається **затвором (З)**. Подібна конструкція застосовується і для транзисторів із каналом *p*-типу.

Умовні позначення транзисторів із каналами *n*- та *p*-типу для випадків індукованого каналу наведені на рис. 1, б і в. На рис. 1, а зображено полярність зовнішніх напруг, які подаються на польовий транзистор. Керуюча (вхідна) напруга  $U_{zb}$  подається між затвором і

витоком та є зворотною для обох  $p$ - $n$ -переходів. Напряга в робочому колі  $U_{CB}$  подається позитивним полюсом до стоку, утворюючи електричний струм через канал транзистора.

Керуючі властивості транзистора пояснюються тим, що зміна напруги  $U_{зв}$  змінює ширину  $p$ - $n$ -переходів, які є областями напівпровідника зі зниженою кількістю вільних носіїв заряду. Оскільки концентрація домішок у  $p$ -області значно вища, ніж у  $n$ -області, зміни ширини  $p$ - $n$ -переходів відбуваються переважно за рахунок каналу. При збільшенні напруги  $U_{зв}$   $p$ - $n$ -переходи розширюються, що зменшує переріз провідного каналу і збільшує його опір.

Особливістю польового транзистора є те, що на провідність каналу впливають як  $U_{зв}$ , так і  $U_{CB}$ . Цей вплив ілюструє рис. 2.



**Рис. 2.** Вплив напруг  $U_{зв}$  та  $U_{CB}$  на провідність каналу.

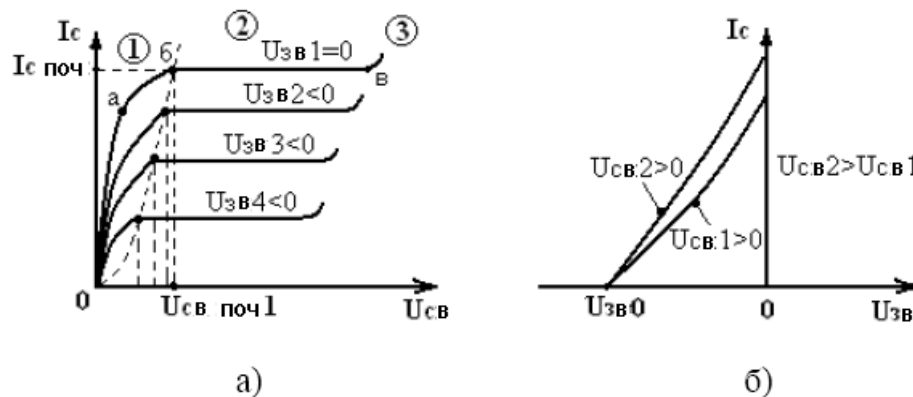
*Вплив тільки керуючої напруги ( $U_{зв}$ ).* Як показано на рис. 2, а, коли  $U_{CB}=0$ , прикладена напруга  $U_{зв}$  змінює провідність каналу, впливаючи на область об'ємного заряду, яка рівномірно звужується по всій довжині каналу. Проте через відсутність напруги  $U_{CB}$  струм стоку  $I_c$  дорівнює нулю.

*Вплив тільки напруги  $U_{CB}$ .* Як показано на рис. 2, б, за умови  $U_{зв}=0$ , при подачі напруги  $U_{CB}>0$  через канал проходить струм  $I_c$ , створюючи спад напруги вздовж каналу. Потенціал у точках каналу зростає у напрямку до стоку, тоді як потенціал  $p$ -області залишається сталим (рівний потенціалу затвора). Це спричиняє нерівномірне розширення  $p$ - $n$ -переходів від витоку до стоку, зменшуючи переріз каналу в цьому напрямку. При певній величині  $U_{CB}$  канал може повністю перекритися (рис. 2, б), що різко збільшує опір.

*Вплив одночасно  $U_{зв}$  та  $U_{CB}$ .* Взаємний вплив обох напруг на провідність каналу зображено на рис. 2. Комбінація  $U_{зв}$  та  $U_{CB}$  призводить до складнішого контролю ширини каналу, що дозволяє більш точно регулювати струм стоку  $I_c$ .

Таким чином, керування провідністю каналу польового транзистора забезпечується як зміною напруги  $U_{зв}$ , так і впливом  $U_{CB}$ , які разом визначають характеристики роботи транзистора.

На рис. 3, а наведено стокові (вихідні) вольт-амперні характеристики польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$ -переходом і каналом  $n$ -типу. Вони ілюструють залежність струму стоку від напруги стік-витік при фіксованій напрузі затвор-витік та представлені у вигляді набору кривих.



**Рис. 3.** а) стокові (вихідні) ВАХ польового транзистора. б) стік-затворні ВАХ польового транзистора.

На кожній з кривих, зображених на рис. 3 виділяють три основні області:

1. Сильна залежність струму стоку від напруги  $U_{св}$  – початкова частина кривої.
2. Режим насичення струму стоку – слабка залежність струму стоку від напруги  $U_{св}$ .
3. Область електричного пробую р-п-переходу.

У діапазоні малих значень  $U_{св}$  (ділянка 0-а на рис. 3, а) вплив напруги на провідність каналу незначний, оскільки область об'ємного заряду р-п-переходів ще мала. У цій області струм стоку  $I_c$  майже лінійно залежить від напруги  $U_{св}$ . При подальшому збільшенні напруги  $U_{св}$  (ділянка а-б) об'ємний заряд у р-п-переходах зростає, звужуючи провідний канал. Це призводить до поступового зменшення крутизни кривої, оскільки зростання струму стоку сповільнюється через зниження провідності каналу.

Коли струмопровідний канал у точці **б** (на межі ділянки 2) звужується до мінімального перерізу в області стоку, це відбувається через накладання об'ємних зарядів двох р-п-переходів. Напруга, при якій струм стоку досягає режиму насичення, називається *напругою насичення* ( $U_{св.нас}$ ). Після цього подальше збільшення напруги  $U_{св}$  практично не впливає на струм стоку, оскільки зростання напруги супроводжується підвищенням опору каналу. Це відбувається через подальше збільшення області об'ємного заряду, що поступово перекидає канал від стоку до витоків.

Невелике підвищення струму стоку в ділянці б-в пов'язане з витоками струму та впливом сильного електричного поля у прилеглих до каналу переходах. Ділянка 3 відповідає лавинному пробую р-п-переходів у колі стік-затвор поблизу стоку, що призводить до різкого зростання струму стоку. Напруга, при якій починається пробій, відповідає точці в.

При подачі зворотної напруги на затвор канал звужується через збільшення об'ємного заряду р-п-переходів, що знижує провідність каналу. Через це початкові ділянки характеристик при великих напругах на затворі мають менший нахил (меншу крутизну зростання струму). У разі зростання напруги  $U_{зв}$ , перекриття каналу об'ємним зарядом відбувається за меншої напруги  $U_{св}$ , тому межа між ділянками 1 і 2 зсувається до менших значень  $U_{св.нас}$ .

Напруга, при якій канал перекидається, відповідає абсцисам точок перетину стокових характеристик із пунктирною лінією на рис. 3, а. Важливим параметром транзистора є *напруга відсікання* ( $U_{зв(0)}$ ), тобто напруга на затворі, при якій струм стоку практично дорівнює нулю. Її значення дорівнює напрузі  $U_{св}$  у точці б стокової характеристики при  $U_{зв}=0$ .

Напруга насичення за певної напруги затвор-витік розраховується як різниця між напругою відсікання і напругою затвор-витік:

$$U_{св.нас} = U_{зв(0)} - U_{зв}$$

Оскільки керування струмом стоку в польових транзисторах відбувається за допомогою напруги у вхідному колі, важливе значення має перехідна характеристика (стік-затворна ВАХ). Вона відображає залежність струму стоку від напруги затвор-витік  $U_{зв}$  за фіксованої напруги стік-витік  $U_{св}$ .

Стік-затворна характеристика польового транзистора, наближений вигляд якої показано на рис. 3, б, пов'язана з його вихідними характеристиками і може бути побудована на їх основі. У пологій області стокової вольт-амперної характеристики струм стоку при заданій напрузі  $U_{зв}$  визначається за формулою:

$$I_c = I_{с.п.} \left( 1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв(0)}} \right)^2, \quad (1)$$

де  $I_{с.п.}$  – початковий струм стоку насичення (струм при  $U_{зв}=0$  і напрузі  $U_{св}$ , що перевищує напругу насичення  $U_{св.нас}$ ).

Для оцінки впливу напруги затвор-витік ( $U_{зв}$ ) на струм стоку ( $I_c$ ) використовується крутизна характеристики ( $S$ ):

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зв}}, \quad (2)$$

яка визначається при фіксованій напрузі  $U_{св}$ . Максимальне значення крутизни  $S_{п}$  досягається при  $U_{зв}=0$ .

Похідна струму стоку за напругою затвор-витік із рівняння (1) дає:

$$\frac{dI_c}{dU_{зв}} = \left( \frac{2I_{с.п.}}{U_{зв}(0)} \right) \left( 1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв}(0)} \right), \quad (3)$$

а при  $U_{зв}=0$  вираз набуває вигляду:

$$\frac{dI_c}{dU_{зв}} = S_{п.} = \left( \frac{2I_{с.п.}}{U_{зв}(0)} \right) \quad (4)$$

З двох останніх виразів маємо:

$$S = S_{п.} \left( 1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв}(0)} \right) \quad (5)$$

Розглянемо основні параметри польового транзистора.

1. **Максимальний струм стоку ( $I_{с.макс}$ )** – відповідає струму в точці в вихідної характеристики (при  $U_{зв}=0$ ).
2. **Максимальна напруга стік-витік ( $U_{св.макс}$ )** – вибирається в 1,2–1,5 разів меншою за напругу пробою ділянки стік-затвор при  $U_{зв}=0$ .
3. **Напруга відсікання  $U_{зв}(0)$**  – напруга на затворі, за якої струм стоку наближається до нуля.
4. **Диференційний внутрішній опір ( $R_i$ )** – визначається як похідна  $R_i = dU_{св}/dI_c$  на ділянці 2 (рис. 3, а), де  $U_{зв}$  – константа.
5. **Крутизна ( $S$ )** – виражає залежність вихідного струму від напруги затвор-витік  $S = dI_c/dU_{зв}$  (при  $U_{св} = \text{const}$ ), визначається за стік-затворною характеристикою (рис. 3, б).
6. **Вхідний опір  $R_{вх}$**  – визначається як  $R_{вх} = dU_{зв}/dI_з$ , залежить від опору р-п-переходів, зміщених у зворотному напрямку.

### МНД-транзистори

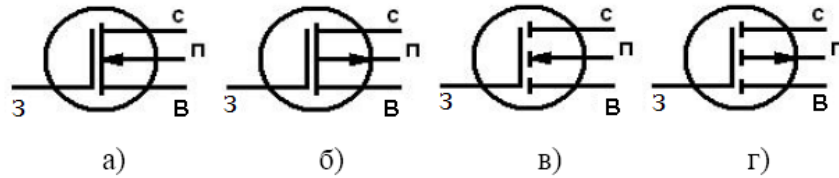
МНД-транзистори поділяються на два типи: транзистори з вбудованими каналами (канал формується під час виготовлення) і транзистори з індукованими каналами (канал створюється під впливом напруги, прикладеної до керуючих електродів). На відміну від польових транзисторів з керуючим р-п-переходом, де затвор має прямий електричний контакт із прилеглою ділянкою струмопровідного каналу, у МНД-транзисторах затвор ізольований від цієї ділянки діелектричним шаром. Через це їх класифікують як транзистори з ізольованим затвором.

МНД-транзистори (метал-діелектрик-напівпровідник) виготовляють із кремнію, а оксид кремнію використовується як діелектрик. Звідси походить альтернативна назва цих транзисторів – МОН-транзистори (метал-оксид-напівпровідник). Завдяки діелектричному шару такі транзистори мають високий вхідний опір (у межах  $10^{12}$ – $10^{14}$  Ом), що значно перевищує вхідний опір польових транзисторів з керуючим р-п-переходом ( $10^8$ – $10^9$  Ом).

Принцип роботи МНД-транзисторів базується на зміні провідності приповерхневого шару напівпровідника на межі з діелектриком під впливом поперечного електричного поля. Приповерхнева ділянка напівпровідника виконує функцію струмопровідного каналу.

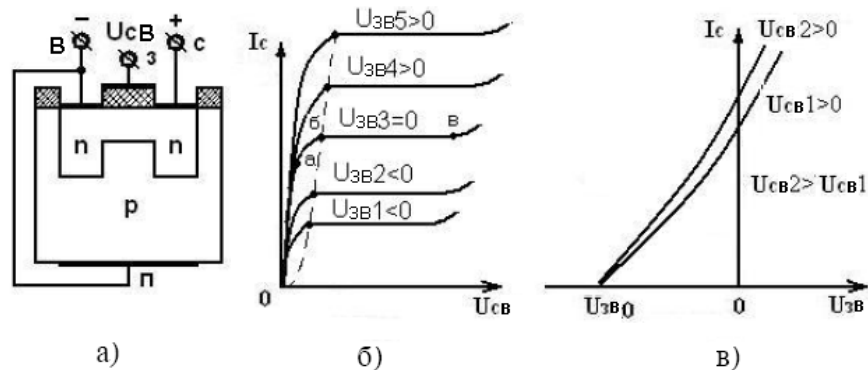
У загальному випадку МНД-транзистори є чотирьохелектродними приладами. Четвертий електрод, який виконує допоміжну функцію, називається підложкою – це вивід від підкладки напівпровідникової пластини.

МНД-транзистори можуть бути з каналами n-типу або p-типу. На рис. 5 зображено умовні позначення таких транзисторів:



**Рис. 5.** Умовні позначення МНД-транзисторів. а) транзистори з вбудованим каналом  $n$ -типу; б) транзистори з вбудованим каналом  $p$ -типу; в) транзистори з індукованим каналом  $n$ -типу; б) транзистори з індукованим каналом  $p$ -типу.

Розглянемо особливості роботи МНД-транзисторів із вбудованим каналом. Конструкція такого транзистора з каналом  $n$ -типу зображена на рис. 6, а.



**Рис. 6.** а) конструкція МНД-транзистора з вбудованим каналом  $n$ -типу; б) стокові (вихідні) характеристики польового транзистора з вбудованим каналом  $n$ -типу; в) стік-затворна характеристика транзистора з вбудованим каналом.

В основі транзистора лежить кремнієва пластина  $p$ -типу, у якій за допомогою дифузійної технології сформовані області витоку, стоку та каналу  $n$ -типу провідності. Шар оксиду кремнію виконує дві основні функції: 1) захищає поверхню в області витоку та стоку; 2) ізолює затвор від каналу. Якщо вивід підкладки не використовується як керуючий електрод, його з'єднують із витоком.

На рис. 6, б наведено стокові (вихідні) характеристики транзистора із вбудованим каналом  $n$ -типу. Ці характеристики схожі на характеристики польових транзисторів із керуючим  $p$ - $n$ -переходом.

Проаналізуємо характеристику при  $U_{зв}=0$ . Ця умова відповідає з'єднанню затвора з витоком. Зовнішню напругу  $U_{св}$  подають між витоком і стоком, причому позитивний полюс з'єднаний зі стоком, що відповідає зворотному зміщенню  $p$ - $n$ -переходу. За відсутності керуючої напруги ( $U_{зв}=0$ ) через транзистор проходить струм, визначений провідністю каналу.

*Початкова ділянка (0-а).* Коли спад напруги в каналі невеликий, струм стоку лінійно залежить від  $U_{св}$ . Це пояснюється тим, що об'ємний заряд у зворотному зміщеному переході незначний і майже не впливає на опір каналу.

*Ділянка (а-б).* У міру наближення до точки (б) зростає об'ємний заряд у стоковій області, оскільки там зворотна напруга на переході максимальна. Це призводить до звуження перерізу каналу, підвищення його опору та зниження швидкості зростання струму.

*Точка (б) і полого ділянка.* У точці (б) канал у стоковій області максимально звужується (канал замикається). Подальше підвищення напруги  $U_{св}$  спричиняє подальше зростання об'ємного заряду, який починає заповнювати канал у напрямку витоку. Опір каналу збільшується майже пропорційно підвищенню напруги, обмежуючи подальше зростання струму. Це формує пологу ділянку характеристики.

Розглянемо, як напруга  $U_{зв}$  впливає на стокові характеристики транзистора. Якщо на затвор подати напругу  $U_{зв}<0$ , створюване затвором електричне поле відштовхує електрони,



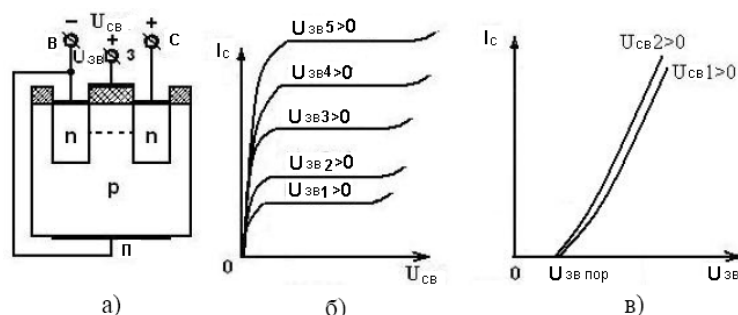
які є носіями заряду в каналі. Це призводить до зменшення концентрації електронів у каналі і, відповідно, до збільшення його опору. У такому разі стокові характеристики розташовуються нижче кривої для  $U_{зв}=0$ . Такий режим роботи транзистора, коли зменшується кількість заряду в каналі, називається *режимом збіднення*.

Якщо ж на затвор подати напругу  $U_{зв}>0$ , затворне поле притягує електрони з р-шару напівпровідника до каналу. Це збільшує концентрацію носіїв заряду в каналі, зменшує його опір і спричиняє зростання струму стоку. У цьому випадку стокові характеристики розташовуються вище кривої для  $U_{зв}=0$ . Режим, у якому концентрація заряду в каналі зростає, називають *режимом збагачення*.

Для транзистора існує межа збільшення напруги  $U_{сз}$  через можливість пробію на ділянці стік-затвор. На стокових характеристиках цей пробій відповідає певному значенню  $U_{св.пр}$  (область 3). Якщо  $U_{зв}<0$ , напруга пробію  $U_{св}$  зменшується через збільшення напруги  $U_{зв}$ .

Графік стік-затворної характеристики для транзистора з вбудованим каналом наведено на рис. 6. Вона відрізняється від характеристики транзистора з керуючим р-п-переходом тим, що прилад може працювати як у режимі збіднення, так і в режимі збагачення.

Конструкція МНД-транзистора з індукованим n-каналом зображена на рис. 7, а. У цьому типі транзистора струмопровідний канал не створюється спочатку, а утворюється завдяки припливу електронів до приповерхневого шару напівпровідникової пластини. Це відбувається, коли до затвору прикладають напругу позитивної полярності відносно витоку. Завдяки цьому змінюється електропровідність напівпровідника, утворюється струмопровідний канал n-типу, що з'єднає області стоку і витоку. Напруга на затворі, за якої канал індукується, називається *пороговою напругою*  $U_{зв.пор}$ .



**Рис. 7.** а) конструкція МНД-транзистора з індукованим каналом n-типу; б) стокові характеристики польового транзистора з індукованим каналом n-типу; в) стік-затворна характеристика транзистора з індукованим каналом.

Провідність каналу зростає зі збільшенням позитивної напруги, прикладеної до затвору. Отже, транзистор із індукованим каналом функціонує виключно в режимі збагачення. Стокові (вихідні) характеристики польового транзистора з індукованим n-каналом, зображені на рис. 7, б, подібні до характеристик транзистора з вбудованим каналом. Основна відмінність полягає в тому, що керування струмом стоку в цьому транзисторі відбувається за допомогою напруги однієї полярності, яка відповідає полярності напруги  $U_{св}$ . При  $U_{зв}=0$  струм стоку дорівнює нулю, тоді як у транзисторі з вбудованим каналом струм має ненульове значення через початкову провідність каналу.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з додатком і виписати довідкові характеристики польового транзистора КП301Б.
2. Скласти електричну схему для експериментального дослідження транзистора КП301Б.
3. Встановити верхню межу вимірювання струму амперметра на 200 мкА.
4. Налаштувати межу вимірювання напруги обох вольтметрів на 20 В.

5. Провести вимірювання стік-затворних характеристик  $I_c=f(U_{зв})$  для напруг  $U_{св}=3$  В,  $U_{св}=6$  В,  $U_{св}=9$  В.

6. Регулювати напругу  $U_{зв}$  у діапазоні від 1 В до 12 В із кроком 1 В.

7. Записати результати вимірювань у таблицю.

$U_{зв}$ В, В	$I_c$ , мкА		
	$U_{св}=3$ В	$U_{св}=6$ В	$U_{св}=9$ В

8. Провести вимірювання стокових характеристик  $I_c=f(U_{св})$  для напруг на затворі:  $U_{зв}=5$  В;  $U_{зв}=6$  В;  $U_{зв}=7$  В;  $U_{зв}=8$  В.

9. Регулювати напругу  $U_{св}$  у діапазоні від 1 В до 10 В із кроком 1 В.

10. Занести отримані результати в таблицю.

$U_{св}$ , В	$I_c$ , мкА			
	$U_{зв}=5$ В	$U_{зв}=6$ В	$U_{зв}=7$ В	$U_{зв}=8$ В

11. Побудувати графіки стік-затворних та стокових характеристик на основі отриманих даних.

12. Використовуючи стік-затворну характеристику при  $U_{св}=9$  В, визначити порогову напругу  $U_{зв,пор}$  як значення напруги затвору, за якої струм стоку становить 20 мкА.

13. За тією ж характеристикою при  $U_{св}=9$  В, визначити крутизну характеристики при  $U_{зв}=8$  В:

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

14. Використовуючи стокову характеристику для  $U_{зв}=8$  В, визначити опір каналу повністю відкритого транзистора при  $U_{св}=1$  В.

15. Розрахувати активну складову вихідної провідності для  $U_{зв}=8$  В і  $U_{св}=10$  В:

$$g_{22} \approx \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{св}} \right|_{U_{зв}=\text{const}}$$

16. Обчислити власний коефіцієнт підсилення за напругою для робочої точки, у якій визначено крутизну та активну складову вихідної провідності:

$$k_u = \frac{S}{g_{22}}$$

### Контрольні запитання

1. Дайте визначення термінам «транзистор» і «польовий транзистор».
2. Поясніть відмінність між польовими транзисторами з керуючим переходом та ізольованим затвором.
3. Охарактеризуйте виводи та поясніть принцип дії польового транзистора з керуючим р-n-переходами.
4. Намалюйте умовні графічні позначення польових транзисторів та позначте виводи.
5. Поясніть принцип дії та будову польового транзистора з ізольованим затвором.
6. Наведіть типові статичні характеристики польового транзистора та коротко охарактеризуйте їх.
7. Поясніть, як визначити крутизну стік-затворної характеристики та активну вихідну провідність.
8. Стисло охарактеризуйте особливості роботи та сферу застосування польових транзисторів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### Дослідження роботи тиристора та його використання в схемах регулювання потужності

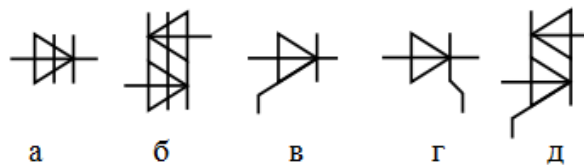
Мета роботи: Дослідити роботу електронного ключа на тиристорі. Ознайомитись зі схемою фазового регулювання споживаної потужності.

#### Прилади і матеріали

9. Панель з тиристором.
10. Джерело живлення (12 В).
11. Лампа розжарення 6,3 В, 0,3 А.
12. Міліамперметр (500 мА).
13. Вольтметр.
14. Панель для дослідження тиристора в схемі регулювання потужності.
15. З'єднувальні провідники.

#### Теоретичні відомості

Тиристори – це напівпровідникові прилади з трьома або більше  $p-n$ -переходами, які використовуються як електронні ключі в схемах для перемикання електричних струмів. Вони поділяються на дві основні категорії: *діодні* (диністори) та *тріодні* (триністори), залежно від конструкції та властивостей. Умовні графічні позначення тиристорів показані на рис.1.



**Рис. 1.** Умовні графічні позначення тиристорів: а - діодний тиристор, що замикається в зворотному напрямку; б - діодний симетричний тиристор (симетричний диністор); в - тріодний тиристор, що замикається в зворотному напрямку з керуванням по аноду; г - тріодний тиристор, що замикається в зворотному напрямку з керуванням по катоду; д - тріодний симетричний тиристор (симетричний триністор).

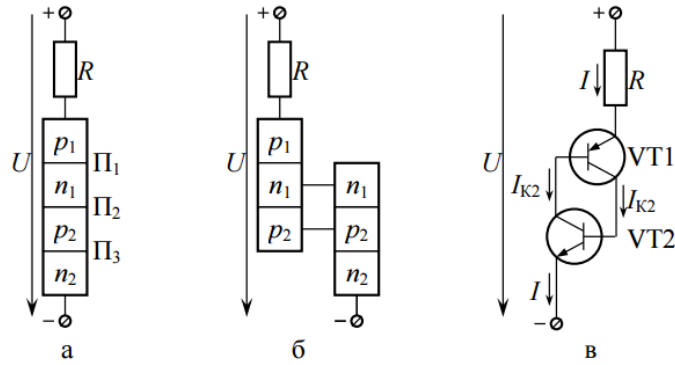
Діодні тиристори класифікуються за такими особливостями:

1. Ті, що блокують струм у зворотному напрямку.
2. Ті, що проводять струм у зворотному напрямку.
3. Симетричні тиристори.

Тріодні тиристори поділяються на:

1. Ті, що блокують струм у зворотному напрямку з керуванням по аноду чи катоду.
2. Ті, що проводять струм у зворотному напрямку з керуванням по аноду чи катоду.
3. Симетричні тиристори.

Прості діодні тиристори, які блокують струм у зворотному напрямку, виготовляються з кремнію. Вони мають чотири чергуючі  $p$ - і  $n$ -області: анод ( $p_1$ ), катод ( $n_2$ ), а також дві бази ( $n_1$  і  $p_2$ ) (рис. 1). Їхню структуру можна уявити як з'єднання двох транзисторів різної провідності:  $p_1-n_1-p_2$  (VT1) і  $n_1-p_2-n_2$  (VT2) (рис. 2).

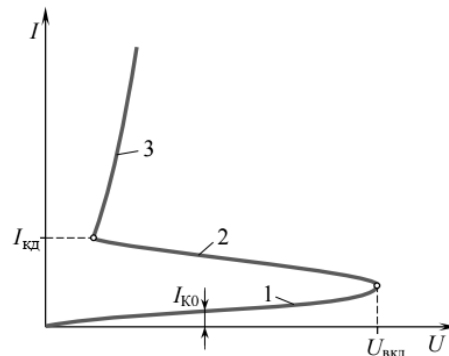


**Рис. 2.** Структура діодного тиристора.

Коллекторний струм одного транзистора слугує базовим струмом іншого, створюючи позитивний зворотний зв'язок, що дозволяє тиристорі перемикатися при досягненні певного порогу. Коли тиристор під'єднують до джерела напруги, переходи  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$  залишаються відкритими, а  $\Pi_2$  закритим. На ньому формується основний спад напруги, що обмежує струм. Однак при досягненні критичної напруги відбувається лавиноподібне зростання носіїв заряду, що спричиняє перехід тиристора у провідний стан. У цьому стані струм через нього зростає, а напруга на тиристорі значно знижується.

На вольт-амперній характеристиці тиристора (рис. 3) відображені три основні ділянки:

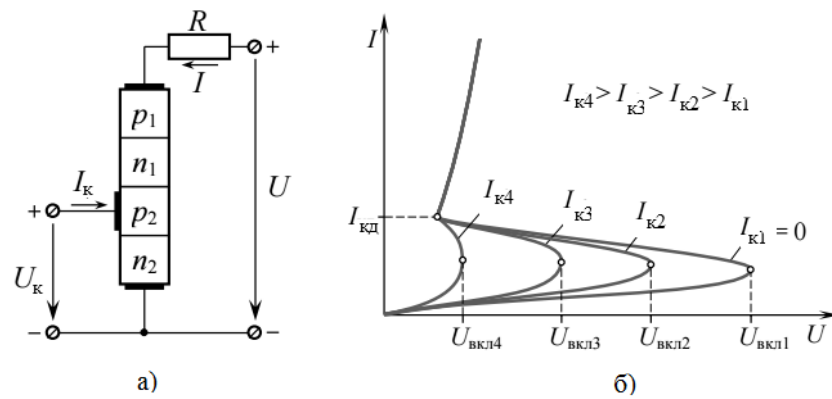
1. Закритий стан (ділянка 1).
2. Лавинний процес з негативним диференціальним опором (ділянка 2).
3. Провідний стан, схожий на ВАХ діода в прямому напрямку (ділянка 3).



**Рис. 3.** ВАХ тиристора.

Щоб вимкнути тиристор, необхідно знизити його робочий струм до значення, меншого за  $I < I_{\text{кд}}$ , за рахунок зменшення напруги живлення.

Триодний тиристор відрізняється від діодного наявністю зовнішнього виводу, який називається керуючим електродом. Для переведення тиристора у провідний стан на одну з його базових областей подають струм у прямому напрямку. Залежно від того, яка саме база використовується для керування, тиристри поділяються на триністри з керуванням по аноду або по катоду. Наприклад, підключення джерела керуючого струму до  $p$ -області другого транзистора наведено на рис. 4, а. Струм, необхідний для перемикання тиристора, називається керуючим струмом ( $I_{\text{к}}$ ).



**Рис. 4.** Тиристор, керований по катоду: а – структурна схема; б – ВАХ.

Симетричні тиристори широко використовуються в електроніці для комутації змінного струму. Їх вольт-амперна характеристика (ВАХ) однакова в першому і третьому квадрантах. Симістори, які є різновидом симетричних тиристорів із п'ятишаровою структурою, здатні відкриватися за сигналом на керуючому електроді незалежно від напрямку струму. Їх вимикання відбувається, коли напруга змінного струму проходить через нуль під час зміни полярності.

Області застосування тиристорів включають промислову та побутову апаратуру. Їх найчастіше використовують у:

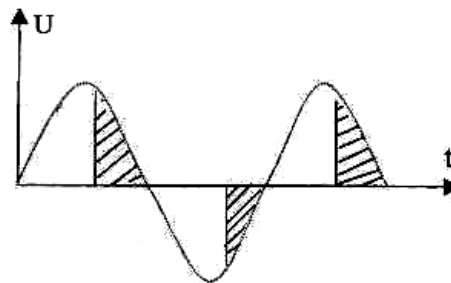
- пристроях електроживлення (випрямлячі, перетворювачі, регулятори частоти та потужності);
- системах керування електроприводом;
- пристроях захисту та комутації.

У порівнянні з потужними транзисторами тиристори мають наступні переваги:

- здатність працювати при дуже великих струмах (до сотень ампер) та високих зворотних напругах;
- низький спад напруги у провідному стані;
- потребують мінімальної потужності для керуючих сигналів;
- не вимагають додаткової енергії для підтримки стану (ввімкненого або вимкненого).

Однак їх головним недоліком є неможливість вимкнення за допомогою керуючого електрода.

Регулювання потужності може здійснюватися шляхом подачі змінної напруги на навантаження лише на частину періоду (рис. 5). Цей метод називають фазовим регулюванням.



**Рис. 5.** Напруга при фазовому регулюванні потужності.

У схемі тиристор включено в діагональ мосту, а його керування здійснюється напругою, знятою з конденсатора С. Час ввімкнення тиристора та потужність навантаження залежать від швидкості заряду конденсатора, яка регулюється опором резистора  $R_1$ . Зменшення  $R_1$  призводить до швидшого заряду конденсатора, що збільшує тривалість провідного стану тиристора і, відповідно, потужність навантаження.

## Порядок виконання роботи

### Завдання I

1. Зібрати електричну схему для дослідження роботи електричного ключа на основі тиристора (рис. 6).

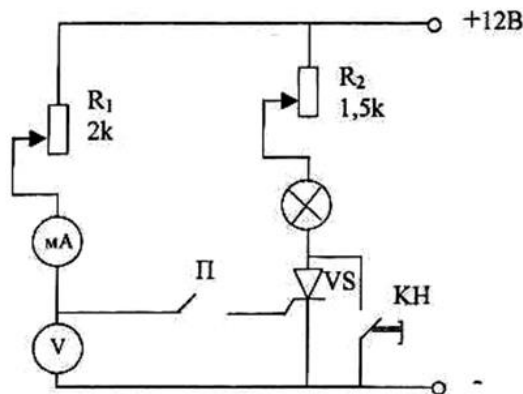


Рис. 6. Схема для дослідження електричного ключа на тиристорі.

2. Встановити повзунки резисторів  $R_1$  та  $R_2$  у положення, що відповідають їх максимальному та мінімальному опорам.

3. Увімкнути напругу живлення схеми.

4. Поступово зменшуючи опір резистора  $R_1$ , визначити струм через керуючий електрод тиристора VS та напругу на ньому, при якій лампа загориться.

5. Використовуючи вимикач П, вимкнути напругу на керуючому електроді, спостерігаючи за станом тиристора.

6. Натиснути кнопку КН, щоб заблокувати тиристор VS, і перевірити його стан після відпускання кнопки.

7. Вимкнути напругу живлення схеми.

8. Зібрати нову електричну схему (рис. 7), додавши міліамперметр в анодне коло тиристора.

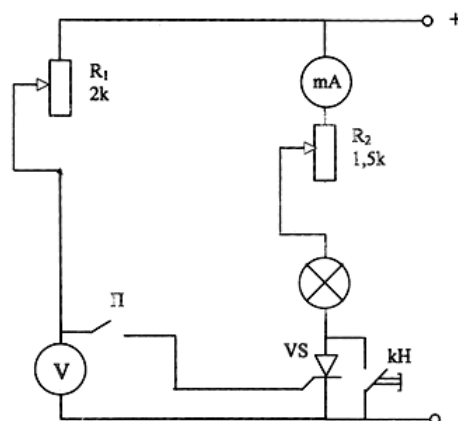


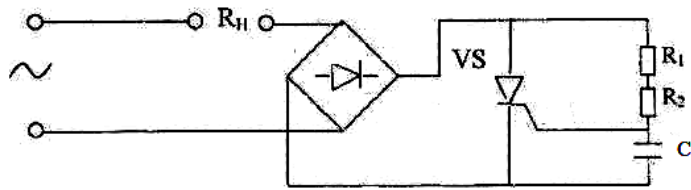
Рис. 7.

9. Поступово збільшуючи опір резистора  $R_2$ , визначити струм, при якому тиристор VS вимикається.

10. Оформити всі спостереження та зроблені висновки у вигляді звіту до лабораторної роботи.

### Завдання II

1. Зібрати електричну схему, у якій тиристор використовується для регулювання споживаної потужності (рис. 8).



**Рис. 8.** Схема регулювання потужності тиристором.

2. Увімкнути напругу живлення схеми.
3. Провести дослідження залежності часу та величини струму через резистор навантаження  $R_n$  від тривалості перебування тиристора у відкритому стані.
4. Використовуючи осцилограф, спостерігати різні форми напруги на навантаженні при двохпівперіодному випрямленні з фазовим регулюванням.

### Контрольні запитання

1. У чому полягає фізична причина нелінійності вольт-амперної характеристики (ВАХ) тиристора?
2. Які тиристири називають керованими?
3. Яка роль керуючого електрода в роботі тиристора?
4. Як перевести тиристор із відкритого стану в закритий?
5. Що таке фазове регулювання потужності, і як воно працює?
6. Назвіть основні характеристики симісторів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

### Тунельний діод і резонансний генератор на його основі

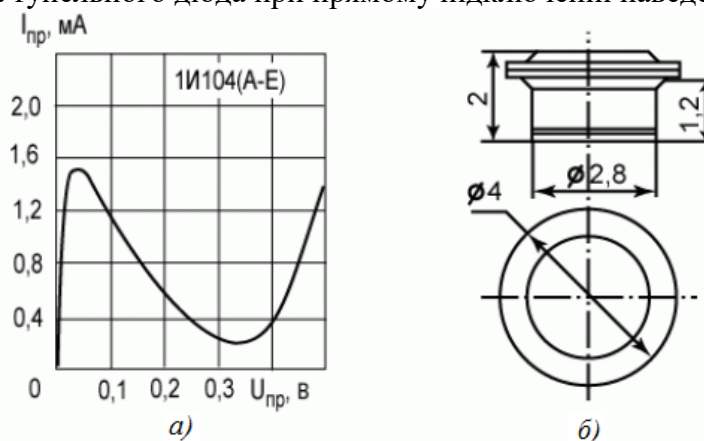
Мета роботи: вивчити принцип дії тунельного діода. Засвоїти методики вимірювання характеристик і параметрів тунельних діодів та резонансного генератора на його основі.

#### Прилади і матеріали

1. Панель з тунельним діодом та резонансним генератором.
2. Джерело живлення (1,5 В).
3. Мілівольтметр.
4. Вольтметр.
5. Мікроамперметр.
6. Частотомір.
7. Осцилограф.

#### Теоретичні відомості

Тунельний діод – це напівпровідниковий діод, основою якого є  $p^+n^+$ -перехід з високим рівнем легування обох областей. На прямій ділянці його вольт-амперної характеристики (ВАХ) спостерігається N-подібна залежність струму від напруги. Вольт-амперна характеристика тунельного діода при прямому підключенні наведена на рис. 1.

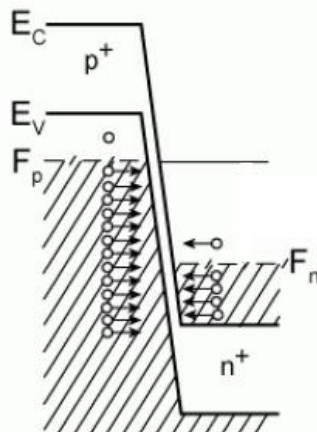


**Рис. 1.** Тунельний діод 1I104: а) вольт-амперна характеристика при прямому ввімкненні; б) геометричні параметри діода.

Для аналізу особливостей ВАХ цього діода розглянемо  $p^+n^+$ -перехід, утворений двома виродженими напівпровідниками. Якщо концентрація акцепторів у  $p^+$ - області та донорів у  $n^+$  області дорівнює приблизно  $N_A, N_D \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , то концентрація основних носіїв значно перевищує ефективну густину станів у дозволених зонах ( $p_{p0}, n_{n0} \gg N_C, N_V$ ). У такій ситуації рівень Фермі знаходиться в дозволених зонах обох напівпровідників.

У  $n^+$ -напівпровіднику всі стани зони провідності до рівня Фермі зайняті електронами, а в  $p^+$ -напівпровіднику – дірками. Зонна діаграма  $p^+n^+$ - переходу вироджених напівпровідників представлена на рис. 2. Для прямого струму необхідно подолати значний потенціальний бар'єр, тому для досягнення типової величини прямого струму потрібна велика пряма напруга, що перевищує або приблизно дорівнює половині ширини забороненої зони ( $E_g/2$ ). У зворотному напрямку струм буде малим через низьку концентрацію неосновних носіїв ( $p_{n0} = n_i^2 / N_D$ ).





**Рис. 2.** Зонна діаграма  $p^+ - n^+$ -переходу в рівновазі.

Геометрична ширина виродженого  $p-n$ - переходу, за умови, що область  $p^+$  легована сильніше, буде малою. Її можна оцінити за формулою:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 2\varphi_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 E_g}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx 10^{-6} \text{ см} = 100 \text{ \AA}.$$

Дебройлівську довжину хвилі електрона розраховують за формулами:

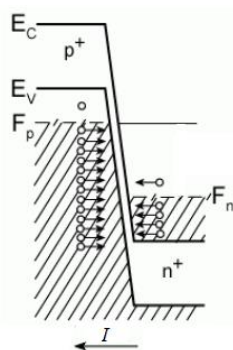
$$E = kT = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad E = \frac{\hbar^2 (2\pi)^2}{2m\lambda^2}; \quad \lambda = \frac{2mkT}{\hbar^2} = \frac{1}{h} \sqrt{2mkT};$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{2 \cdot 91 \cdot 10^{31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}}{6,3 \cdot 10^{-34}} \approx 140 \text{ \AA}.$$

Геометрична ширина  $p^+ - n^+$ - переходу виявляється порівнянною з довжиною хвилі Дебройля, що спричиняє прояв квантово-механічних ефектів, зокрема тунелювання через потенціальний бар'єр. При вузькому бар'єрі ймовірність тунелювання стає суттєвою. Далі розглянемо тунельні ефекти у  $p^+ - n^+$ - переходах за різних значень напруги.

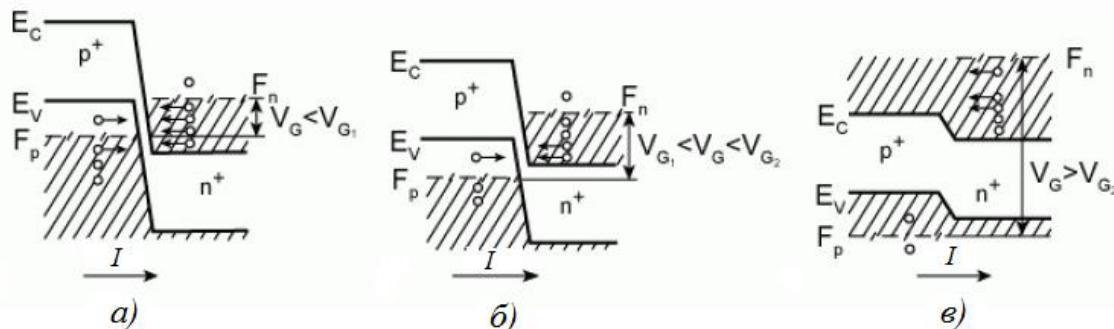
На рис. 3 зображено зонну діаграму тунельного діода при зворотному зміщенні. У цьому режимі струм через діод обумовлений тунелюванням електронів із валентної зони вільних місць у зоні провідності. Завдяки високій концентрації електронів і значній кількості доступних місць, тунельний струм різко зростає зі збільшенням зворотної напруги. Така особливість відрізняє тунельний діод від звичайного випрямного діода.

При прямій напрузі тунельний струм виникає внаслідок переходу електронів із зони провідності вільних місць у валентній зоні. Тунельні переходи відбуваються без втрат енергії, тобто з її повним збереженням, що на зонній діаграмі відображається горизонтальними лініями.



**Рис. 3.** Зонна діаграма тунельного діода при зворотному включенні.

На рис. 4 показані зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні, відповідні трьом основним точкам прямої ділянки ВАХ.



**Рис. 4.** Зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні: а) ділянка 1, б) ділянка 2, в) ділянка 3.

1. *Ділянка 1 (низька пряма напруга).* При незначному зростанні прямої напруги навпроти електронів у зоні провідності з'являються вільні місця у валентній зоні на тому ж енергетичному рівні. Зі збільшенням напруги кількість таких місць зростає, а разом з цим і тунельний струм.

2. *Ділянка 2 (максимальний тунельний струм).* Тунельний струм досягає максимуму, коли всі доступні вільні місця у валентній зоні розташовані на тому ж енергетичному рівні, що й електрони в зоні провідності.

3. *Ділянка 3 (спадання тунельного струму).* При подальшому збільшенні напруги кількість вільних місць, доступних для тунелювання, починає зменшуватися, оскільки енергетичні рівні в зоні провідності опиняються напроти забороненої зони, де в ідеальних напівпровідниках станів немає. На цій ділянці тунельний струм поступово знижується до нуля, і натомість починає проявлятися звичайний дифузійний струм *p-n*-переходу.

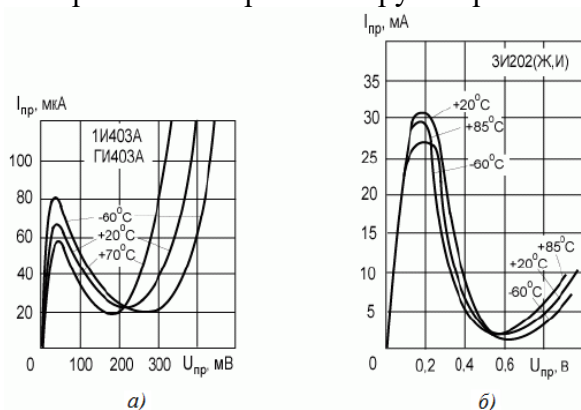
Особливістю ділянки 3 є те, що ця частина ВАХ характеризується від'ємним диференціальним опором, що робить тунельний діод унікальним у порівнянні з іншими напівпровідниковими приладами.

Аналітичний вираз для ВАХ тунельного діода при прямому зміщенні записується у вигляді:

$$I = A' \frac{qV}{4kT} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - qV)^2 \quad (1)$$

де  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  – відстані від рівня Фермі до дна зони провідності або вершини валентної зони відповідно.

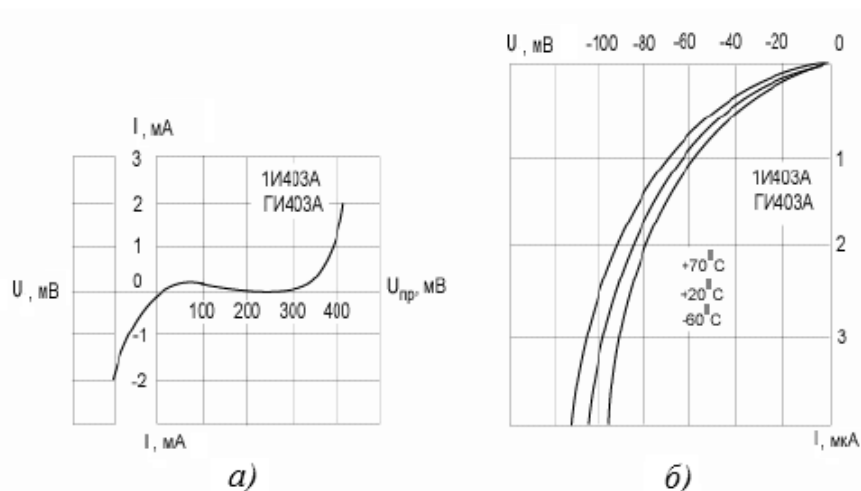
Розрахунок вольт-амперної характеристики (ВАХ) тунельного діода за рівнянням (1) добре співпадає з експериментальними даними. На рис. 5 показано температурні залежності прямого струму від напруги для тунельних діодів, виготовлених з германію (Ge) і арсеніду галію (GaAs). Видно, що у діода з матеріалу GaAs, який має ширшу заборонену зону, мінімум струму спостерігається при більшій прямій напрузі порівняно з германієвим діодом.



**Рис. 5.** Температурні залежності прямого струму від напруги в тунельних діодах: а) германієвий діод 1И403; б) арсенід галієвий діод 3И202.

Тунельний діод має високу максимальну граничну частоту  $f_{\max} \sim 10^9$  Гц, що обумовлено коротким часом тунелювання носіїв ( $\tau_{\min} \sim 10^{-9}$  с). Завдяки цим характеристикам тунельні діоди широко використовуються у техніці надвисоких частот (НВЧ).

Розглянемо випадок, коли в р-п-переході енергія Фермі для електронного і діркового напівпровідників збігається або знаходиться на відстані  $+kT/q$  від дна зони провідності або вершини валентної зони. У цьому сценарії ВАХ діода при зворотному зміщенні буде подібною до ВАХ тунельного діода: при зростанні зворотної напруги струм швидко збільшується. Однак при прямій напрузі тунельний струм відсутній, оскільки у зоні провідності немає повністю заповнених станів. Таким чином, струм при прямому зміщенні виникає лише при напрузі, що перевищує половину ширини забороненої зони. У такому діоді ВАХ має інверсний вигляд: висока провідність при зворотному зміщенні та низька при прямому. Ці діоди називають оберненими діодами. ВАХ оберненого діода зображено на рис. 6.



**Рис. 6.** Вольт-амперна характеристика германієвого оберненого діода ГИ403: а) повна ВАХ; б) зворотна ділянка ВАХ при різних температурах.

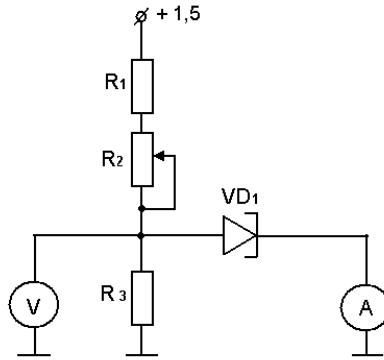
Обернений діод фактично є тунельним діодом, але без ділянки з негативним диференціальним опором. Завдяки високій нелінійності ВАХ поблизу нульової напруги (порядку мікрвольт) такі діоди застосовують для детектування слабких сигналів у НВЧ-діапазоні.

### Порядок виконання роботи

#### 1. Вимірювання прямої вітки ВАХ тунельного діода.

1.1. Переведіть макет у режим вимірювання вольт-амперної характеристики (ВАХ) за допомогою перемикача S.

1.2. Підключіть вимірювальні прилади відповідно до схеми на рис. 7:



**Рис. 7.** Схема для дослідження ВАХ тунельного діода.

- амперметр увімкніть у режим вимірювання постійного струму з межею 20 мА;
- вольтметр налаштуйте на режим вимірювання постійної напруги з межею 1 В.

1.3. Увімкніть живлення тунельного діода.

1.4. Плавно змінюючи опір змінного резистора  $R_2$ , вимірюйте напругу на діоді з кроком 30–40 мВ, одночасно записуючи покази амперметра до таблиці.

$U$ , мВ	0	30	60	90	120	150	....
$I$ , мА							

1.5. Побудуйте графік прямої ділянки ВАХ тунельного діода.

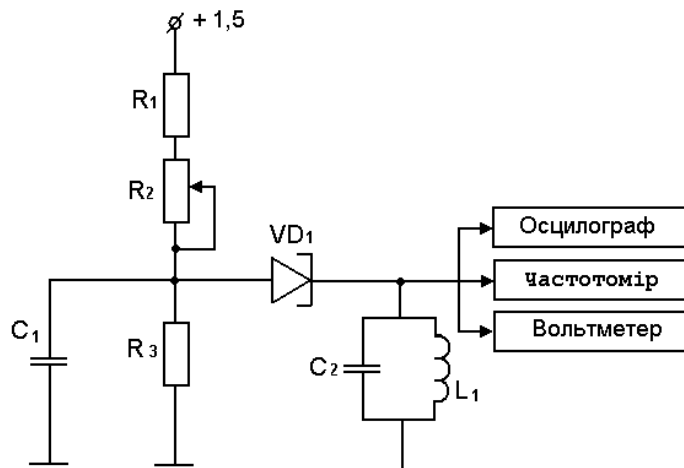
1.6. Оцініть значення від'ємного диференціального опору на ділянці спаду прямої частини ВАХ.

1.7. Зареєструйте значення напруги зміщення та струму діода в точках максимуму і мінімуму прямої вітки ВАХ.

## 2. Дослідження резонансного генератора на тунельному діоді.

2.1. Переведіть макет у режим вивчення характеристик генератора за допомогою перемикача **S**.

2.2. Підключіть вимірювальні прилади за схемою на рис. 8.



**Рис. 8.** Схема вимірювання характеристик генератора на тунельному діоді.

2.3. Увімкніть живлення тунельного діода.

2.4. Плавно збільшуйте напругу на діоді за допомогою змінного резистора  $R_2$  доки на екрані осцилографа не з'являться періодичні коливання.

2.5. Перемалуйте форму коливань з осцилографа в зошит.

2.6. Поступово збільшуйте напругу зміщення та записуйте значення:

- вольтметра змінного струму;
- частотоміра;
- вольтметра постійного струму.

2.7. Дані запишіть до таблиці.

$U_D$ , мВ				
$U_{вих}$ , мВ				
$F_{вих}$ , кГц				

2.8. Продовжуйте збільшувати напругу зміщення, доки коливання не зникнуть.

2.9. Побудуйте графіки залежності амплітуди та частоти коливань від напруги зміщення тунельного діода.

### Контрольні запитання

- 1) У чому полягає відмінність тунельного діода від звичайного випрямного діода?
- 2) Які особливості має ВАХ тунельного діода?
- 3) Позначте на ВАХ тунельного діода ділянку з від'ємним диференціальним опором.
- 4) Чому ВАХ тунельного діода при прямому зміщенні має N-подібну форму?
- 5) У яких сферах застосовуються тунельні діоди?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

### Амплітудно-частотні характеристики електричних фільтрів

Мета роботи: вивчення найпростіших електричних фільтрів та зняти АЧХ фільтрів.

#### Прилади і матеріали

1. Панель з набором радіоелементів.
2. Генератор сигналів низькочастотний ГЗ-118.
3. Вольтметр В7-35.
4. З'єднувальні проводи.

#### Теоретичні відомості

Електричний фільтр – це частотно-вибірковий пристрій, який пропускає сигнали певних частот і затримує або послаблює сигнали інших частот. Електричні фільтри класифікують за такими ознаками: по амплітудно-частотній характеристиці (АЧХ) вони поділяються на фільтри нижніх частот (ФНЧ); фільтри верхніх частот (ФВЧ); смугові фільтри (СФ); режекторні (загороджувальні) фільтри (РЖ); резонансні фільтри (РЗ). В окрему групу можна виділити фазові фільтри (ФФ); в залежності від поліномів, які використовуються при апроксимації функції передачі, розрізняють фільтри критичного затухання, Бесселя, Баттерворта, Чебишева; по елементній базі вони поділяються на пасивні і активні. Активні фільтри містять в  $RLC$  схемі активні елементи, в якості яких використовуються операційні підсилювачі. Основні характеристики і параметри фільтрів.

До характеристик фільтрів відносяться *функція передачі, коефіцієнт передачі, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), фазо-частотна характеристика (ФЧХ), частота зрізу  $\omega_{зр}(f_{зр})$ , стала часу  $\tau$ , смуга пропускання (загородження)  $\Delta\omega(\Delta f)$ , резонансна частота, добротність.*

Основною характеристикою фільтра є комплексний коефіцієнт передачі напруги:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1},$$

де  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  – комплексні значення напруги на виході та вході фільтра. Записавши останній вираз в показниковій формі, отримаємо:

$$\dot{K} = |\dot{K}| \cdot e^{j\varphi} = K \cdot e^{j\varphi},$$

де  $K$  – модуль коефіцієнта передачі, показує, в скільки разів вихідна напруга відрізняється від вхідної, а  $\varphi$  – його аргумент, показує фазовий зсув вихідної напруги відносно вхідної.

*Функція передачі* – це відношення величини вихідної напруги до величини вхідної напруги фільтра:

$$K(p) = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}.$$

У загальному випадку електричний фільтр можна розглядати як чотириполюсник з функцією передачі:

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0},$$

де  $U_1(p)$  і  $U_2(p)$  – вхідна і вихідна напруги чотириполюсника в операторній формі;  $a$  і  $b$  – дійсні сталі величини;  $m, n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $n$  – визначає порядок фільтра. Для сталої частоти  $p=j\omega$ , функцію передачі можна звести до виразу:

$$K(p) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{a_m(j\omega^m) + a_{m-1}(j\omega^{m-1}) + \dots + a_1(j\omega) + a_0}{b_n(j\omega^n) + b_{n-1}(j\omega^{n-1}) + \dots + b_1(j\omega) + b_0} = A(\omega) + jB(\omega).$$

Залежність модуля коефіцієнта передачі (або функції передачі) від частоти називається *амплітудно-частотною характеристикою*:

$$|K(j\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}.$$

Фазо-частотна характеристика також може бути знайдена з виразу:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)}.$$

Діапазон  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  або смуги частот, в яких проходять сигнали, називаються *смугами пропускання*. У смузі пропускання значення коефіцієнта передачі фільтра відносно велике і в ідеальному випадку залишається сталим. Для смугового фільтра частоти  $\omega_1$  та  $\omega_2$  визначаються при спаді коефіцієнта передачі на 3 дБ (або по абсолютній величині в разі).

Діапазон частот  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ , при яких сигнали послаблюються, утворюють загороджувальну смугу. У ній коефіцієнт передачі фільтра відносно малий і в ідеальному випадку дорівнює нулю. Для загороджувального фільтра частоти  $\omega_1$  та  $\omega_2$  визначаються при спаді коефіцієнта передачі на 3 дБ (або у  $1/\sqrt{2}$  по абсолютній величині в разів).

Частота зрізу  $\omega_{zp}(f_{zp})$  – частота, на якій спостерігається спад коефіцієнта передачі на 3 дБ у порівнянні з коефіцієнтом передачі на нульовій (для ФНЧ) або нескінченній (для ФВЧ) частоті.

Резонансна частота  $f_p$  – частота, на якій коефіцієнт передачі фільтра має максимальне значення (для смугового фільтра) або мінімальне значення (для загороджувального фільтра).

Добротність  $Q$  – добротність смугового фільтра визначається як відношення резонансної частоти до смуги пропускання:

$$Q = \frac{f_{рез}}{\omega_2 - \omega_1}.$$

## 2. Фільтри нижніх частот

### 2.1. Пасивні фільтри нижніх частот (ФНЧ) першого порядку

Фільтр нижніх частот пропускає сигнали низьких частот без спотворень, тоді як на високих частотах значно послаблює їхню інтенсивність у порівнянні з вхідними сигналами.

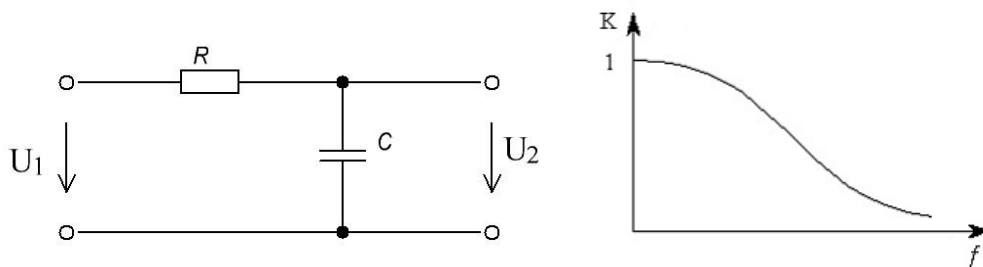


Рис. 1. RC-фільтр нижніх частот.

На рис. 1. зображена схема найпростішого RC-фільтра нижніх частот першого порядку та його АЧХ. Комплексне значення вихідної напруги:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

Таким чином, комплексний коефіцієнт передачі можна подати у вигляді наступної формули:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Отже, формула для АЧХ набуде вигляду:

$$K = |\dot{K}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

Враховуючи, що  $K = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_{зр} RC)^2}}$ , запишемо вираз для  $\omega_{зр}$ :

$$\omega_{зр} = \frac{1}{RC}; f_{зр} = \frac{1}{2\pi RC}$$

## 2.2. Пасивні фільтри верхніх частот (ФВЧ) першого порядку

На рис. 2 зображено схему найпростішого пасивного фільтра верхніх частот (ФВЧ) першого порядку. Цей фільтр пропускає сигнали високих частот без спотворень, тоді як на низьких частотах він значно послаблює їх амплітуду та створює фазовий зсув вихідного сигналу щодо вхідного.

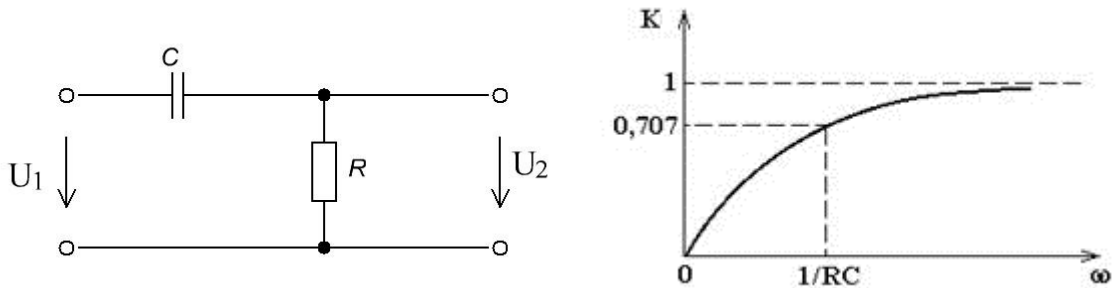


Рис. 2. RC-фільтр верхніх частот.

Вихідна напруга у комплексній формі записується як:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

Таким чином, у комплексному вигляді коефіцієнт передачі описується за допомогою формули:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

Запишемо вирази для частоти зрізу, АЧХ та ФЧХ:



$$K = |\dot{K}| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega RC)^2}}},$$

$$\varphi = \arctg \frac{1}{\omega RC}; \quad \omega_{3p} = \frac{1}{RC}.$$

З останнього виразу бачимо, що при  $\omega \rightarrow 0$ ,  $K \rightarrow 0$ , та  $\omega \rightarrow 1$ ,  $K \rightarrow 1$  (рис. 2.), а при  $f=f_{3p}$  маємо:

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} = -3\text{Дб}.$$

Коли є послідовно з'єднані декілька ФВЧ, то:

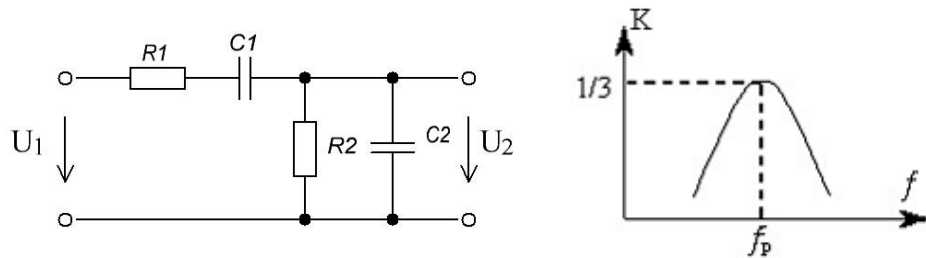
$$\omega_{3p} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_{3pi}^2}.$$

При умові, що всі фільтри мають однакові частоти зрізу, то:

$$\omega_{3p} = \omega_{3pi} \sqrt{n}$$

### 2.3. Пасивний смуговий RC-фільтр.

Смуговий (вибірковий) RC-фільтр отримують завдяки послідовному з'єднанню ФВЧ і ФНЧ (рис. 3.). При цьому на високих та низьких частотах його вихідна напруга близька до 0.



**Рис. 3.** Пасивний смуговий RC-фільтр та його АЧХ.

При умові, що  $R_1=R_2=R$ , та  $C_1=C_2=C$ , то:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \cdot \frac{j\omega RC}{(1 + j\omega RC)^2 + j\omega RCR}.$$

У комплексному вигляді коефіцієнт передачі запишеться так:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{j\omega RC}{1 + 3j\omega RC + \omega^2 R^2 C^2}.$$

Тоді знаходимо вирази для АЧХ, ФЧХ:

$$K = |\dot{K}| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega RC} - \omega RC\right)^2 + 9}}; \quad \varphi = \arctg \frac{1 - \omega^2 R^2 C^2}{3\omega RC}.$$

Вихідна напруга максимальна при  $\omega RC=1$ , відповідно,  $f_p$  рівна:

$$f_p = \frac{1}{2\pi RC}.$$

На резонансній частоті фазовий зсув рівний нулю, а коефіцієнт підсилення  $K_p=1/3$  (рис. 3.).

### 2.4. Смуговий (двоконтурний вибірковий) LC-фільтр.

Якщо в схемі, показаній на рис. 3, замінити резистор на котушку індуктивності, то отримаємо конструкцію пасивного смугового LC-фільтра (рис. 4). У разі, коли частоти, на

яких відбувається резонанс напруг у послідовному контурі  $L_1C_1$ , збігаються з частотами резонансу струмів у паралельному контурі  $L_2C_2$ , опір послідовного контуру  $L_1C_1$  стає мінімальним, а опір паралельного контуру  $L_2C_2$  – максимальним. За таких умов коефіцієнт передачі фільтра досягає свого максимуму. При відхиленні частоти вхідного сигналу від резонансної частоти  $f_0$  коефіцієнт передачі зменшується.

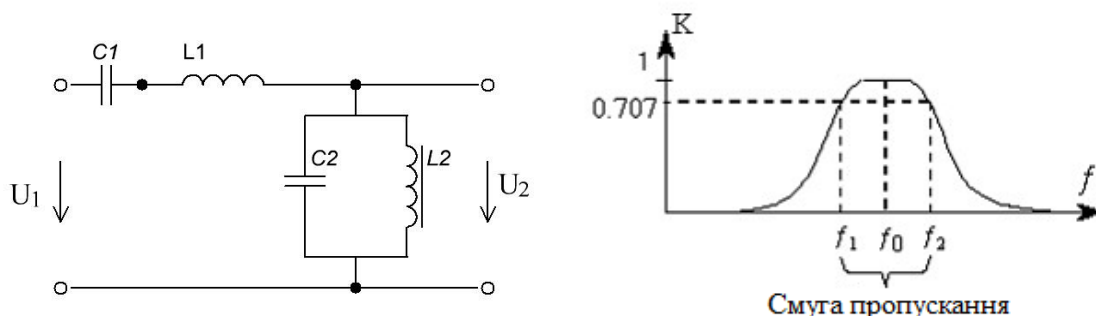


Рис. 4. Схема пасивного смугового LC-фільтра (а) та його АЧХ (б)

## 2.5. Пасивний фільтр нижніх частот другого порядку.

Функція передачі ФНЧ другого порядку у загальному вигляді має вигляд:

$$K(p) = \frac{K_0}{(1 + a_1p + b_1p^2)}$$

Цю функцію передачі неможливо реалізувати за допомогою пасивних RC-кіл. Однак подібний фільтр можна створити, використовуючи індуктивність. На рис. 5 наведено схему пасивного ФНЧ другого порядку.

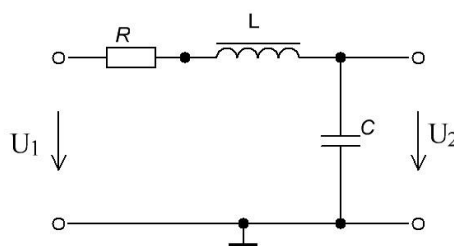


Рис. 5. Пасивний ФНЧ другого порядку.

Його функція передачі описується відповідною формулою:

$$K(p) = \frac{1}{(1 + \omega_{zp}RCp + \omega_{zp}^2LCp^2)}$$

Розрахунок параметрів фільтра можна виконати, застосовуючи визначені формули:

$$R = \left(\frac{a_1}{\omega_{zp}C}\right); \quad L = \left(\frac{b_1}{\omega_{zp}^2C}\right)$$

Наприклад, для ФНЧ другого порядку типу Баттерворта з коефіцієнтами  $a_1=1,414$  і  $b_1=1,000$ , якщо частота зрізу  $f_{zp}=10$  Гц і ємність  $C=10$  мкФ, із цих даних можна обчислити:  $R=2,25$  кОм і  $L=25,3$  Гн.

Однак такі фільтри складно реалізувати через велику величину індуктивності. Для вирішення цієї проблеми функцію передачі можна реалізувати з використанням операційного підсилювача та відповідних RC-елементів, що дозволяє уникнути застосування індуктивності.

## 2.6. Загороджувальні смугові фільтри.

Амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) загороджувального фільтра можна визначити, використовуючи частотну характеристику ФНЧ, замінивши змінну  $P$  на вираз  $\Delta\Omega/(P+1/P)$ . У цьому випадку  $\Delta\Omega=1/Q$  – нормована смуга частот. Добротність  $Q$

визначається як  $Q=f_p/(f_{max}-f_{min})=f_p/\Delta f$ , де  $\Delta f$  – смуга частот, на краях якої коефіцієнт передачі знижується на 3 дБ ( $Q$  характеризує ефективність заглушення сигналу).

Як і для смугових фільтрів, у процесі перетворення порядок фільтра зростає вдвічі. Наприклад, перетворення функції передачі ФНЧ першого порядку призводить до отримання загороджувального фільтра другого порядку з відповідною функцією передачі:

$$K(p) = \frac{K_0(1+p^2)}{1+\Delta\Omega p+p^2} = \frac{K_0(1+p^2)}{1+(\frac{1}{Q})p+p^2}$$

На основі цього можна записати вирази для АЧХ і ФЧХ фільтра:

$$|K| = \frac{K_0|1-\Omega^2|}{\sqrt{1+\Omega^2}} = \frac{K_0(1+p^2)}{1+(\frac{1}{Q})p+p^2}; \quad \varphi = \text{arctg} \frac{\Omega}{\Omega(\Omega^2-1)}$$

### 2.7. Пасивний загороджувальний RLC-фільтр.

На рис. 6 представлений приклад пасивного загороджувального фільтра.

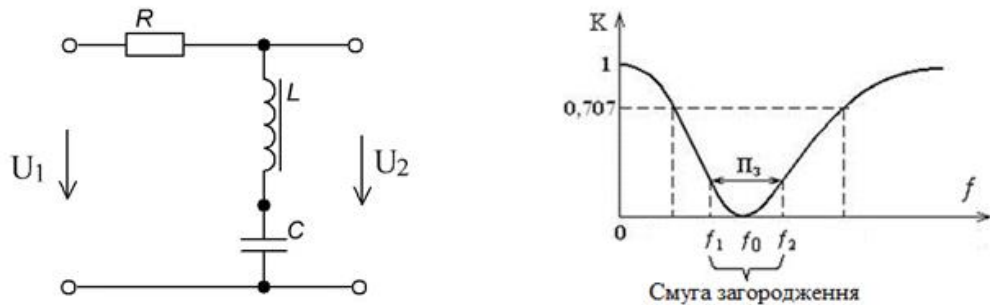


Рис. 6. Схема загороджувального RLC-фільтра.

Функція передачі цього фільтра описується відповідною формулою:

$$K(p) = \frac{1+p^2}{1+R\sqrt{C/L}p+p^2}$$

Резонансна частота та добротність затухання визначаються за наведеними співвідношеннями:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \quad Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

До прикладів пасивних загороджувальних фільтрів також належать місток Віна-Робінсона (рис. 7) і подвійний Т-подібний місток (рис. 8).

### 2.8. Місток Віна-Робінсона.

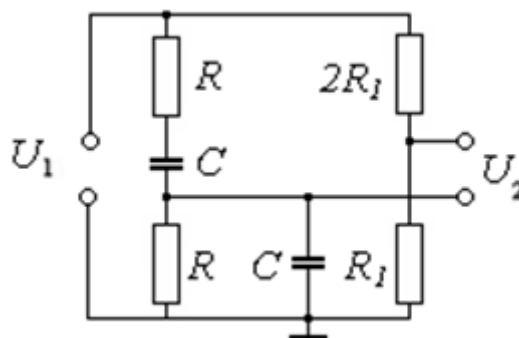


Рис. 7. Схема фільтра Місток Віна-Робінсона.

Омічний подільник напруги створює частотно-незалежну напругу, що становить  $1/3U_{вх}$ . При резонансній частоті вихідна напруга дорівнює нулю. На відміну від смугового фільтра, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) має мінімум на резонансній частоті. Ця схема може застосовуватися для ослаблення сигналів у певному діапазоні частот. Коефіцієнт передачі описується відповідним виразом:

$$|K| = \frac{1 - \Omega^2}{3\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 9\Omega^2}}$$

Фазовий зсув:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{3\Omega}{\Omega^2 - 1}; \quad \Omega \neq 1.$$

### 2.9. Подвійний Т-подібний фільтр (загороджувальний RC-фільтр).

Подвійний Т-подібний фільтр має частотну характеристику, подібну до характеристик містка Віна-Робінсона. Однак, на відміну від містка Віна-Робінсона, вихідна напруга вимірюється відносно спільної точки.

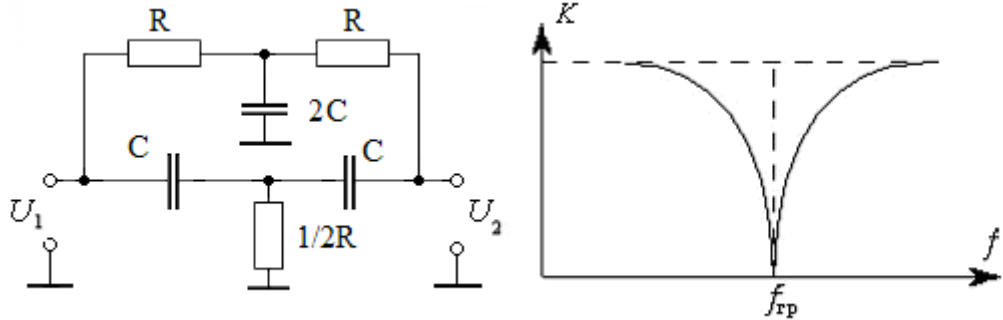


Рис. 8. Подвійний Т-подібний фільтр (а) і його АЧХ (б).

Для високих і низьких частот виконується умова  $U_{вих} = U_{вх}$ . Сигнали високих частот повністю проходять через два конденсатори С, тоді як сигнали низьких частот передаються через резистори R.

Коефіцієнт передачі та фазовий зсув можна визначити за формулами:

$$|K| = \frac{1 - \Omega^2}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 16\Omega^2}}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{4\Omega}{\Omega^2 - 1}.$$

Добротність таких фільтрів є невисокою, але її можна збільшити, якщо підключити фільтр у контур зворотного зв'язку операційного підсилювача.

### 3. Порядок виконання роботи.

- 1) Ознайомитися з обладнанням, необхідним для виконання лабораторної роботи.
- 2) Зібрати схему, наведену на рис. 9, і дослідити паралельний контур у ролі вибіркового фільтра. Записати результати експерименту до таблиці 1.

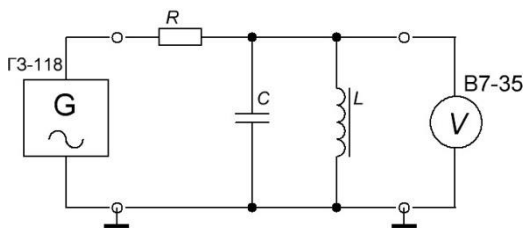


Рис. 9.

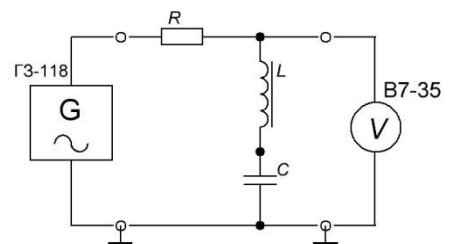


Рис. 11.10.

- 3) Зібрати схему згідно з рис. 10 і провести дослідження пасивного загороджувального RLC-фільтра. Отримані результати занести до таблиці 2.
- 4) Зібрати схему за рис. 11 і вивчити роботу пасивного фільтра нижніх частот другого порядку. Результати дослідження занести до таблиці 3.

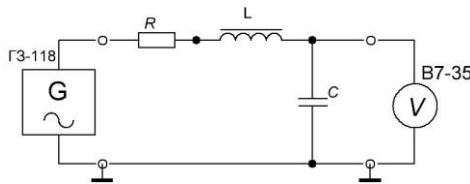


Рис. 11.11.

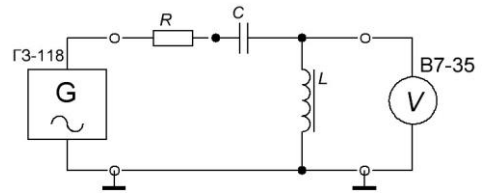


Рис. 11.12.

5) Зібрати схему, показану на рис. 12, і дослідити пасивний фільтр верхніх частот другого порядку. Записати результати до таблиці 4.

6) Використовуючи отримані дані, побудувати амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) фільтрів. Визначити резонансну частоту та модуль коефіцієнта передачі.

### Контрольні запитання

1. Що таке електричний фільтр?
2. Які існують види класифікації електричних фільтрів?
3. Які основні параметри та характеристики електричних фільтрів?
4. Чим відрізняються фільтри першого порядку від фільтрів вищих порядків?
5. Які типи фільтрів нижніх частот вам відомі?
6. Які приклади фільтрів верхніх частот ви знаєте?
7. Що таке загороджувальні та смугові фільтри, і яка їхня функція?

Табл. 1.		
№	f, Гц	U <sub>2</sub> , мВ
1	100	
2	300	
3	500	
4	700	
5	800	
6	900	
7	950	
8	1000	
9	1020	
10	1040	
11	1060	
12	1080	
13	1100	
14	1130	
15	1160	
16	1200	
17	1250	
18	1300	
19	1350	
20	1400	
21	1600	
22	1800	
23	2000	
24	2200	
25	2500	
26	3000	
27	3500	

Табл. 2.		
№	f, Гц	U <sub>2</sub> , мВ
1	100	
2	200	
3	300	
4	400	
5	500	
6	600	
7	700	
8	800	
9	900	
10	1000	
11	1060	
12	1100	
13	1160	
14	1200	
15	1260	
16	1300	
17	1400	
18	1500	
19	1600	
20	1700	
21	1800	
22	1900	
23	2000	
24	2200	
25	2500	
26	3000	
27	3500	

## Лабораторна робота № 11

### Вивчення поширення електромагнітних хвиль у двопровідній лінії Лехера

Мета роботи: Визначити положення вузлів і пучностей електромагнітної хвилі, а також обчислити довжину електромагнітної хвилі та швидкість її поширення в повітрі.

#### Прилади і матеріали

1. Генератор електромагнітних хвиль.
2. Двопровідна лінія.
3. Неонова лампа.
4. Лампа розжарення.
5. Індикатор електромагнітних хвиль.
6. Випрямляч типу ВУП-2.
7. З'єднувальні проводи.

#### Теоретичні відомості

Електромагнітне поле – це форма матерії, яка забезпечує взаємодію між електрично зарядженими частинками. Ідею поля (електричного та магнітного) вперше запропонував М. Фарадей у 1830 році. За його концепцією, заряджені частинки або струми створюють у кожній точці простору навколо себе поле, яке впливає на інші заряджені частинки або струми, розташовані в цьому просторі. Таким чином, поле заряджених частинок або струмів охоплює весь простір, що їх оточує, і в кожній його точці характеризується енергією, імпульсом та іншими властивостями.

Електромагнітне поле може існувати не лише поблизу джерел, які його створюють, але й самостійно, у вигляді електромагнітних хвиль. У 1865 році Дж. Максвелл теоретично довів, що електромагнітні коливання можуть поширюватися у просторі зі швидкістю світла.

До середини 1860-х років, аналізуючи результати Фарадея щодо електромагнітної індукції, Максвелл дійшов висновку, що змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, і навпаки. Тобто магнітне поле може виникати не лише завдяки руху заряджених частинок (електричному струму), але й під дією змінного електричного поля, як показано на рис. 1.

Сукупність змінних електричних і магнітних полів, які взаємопов'язані й утворюють єдину систему, називають електромагнітним полем. У природі електричні й магнітні поля не існують окремо, а завжди утворюють електромагнітне поле – особливий вид матерії, який відповідає за електромагнітну взаємодію. Електромагнітне поле у вакуумі описується векторами напруженості електричного поля та магнітної індукції. У середовищах додаються ще два параметри: вектор індукції (зміщення) електричного поля та напруженості магнітного поля. Ці величини визначають сили, що діють на заряджені частинки, як рухомі, так і нерухомі, з боку електромагнітного поля.

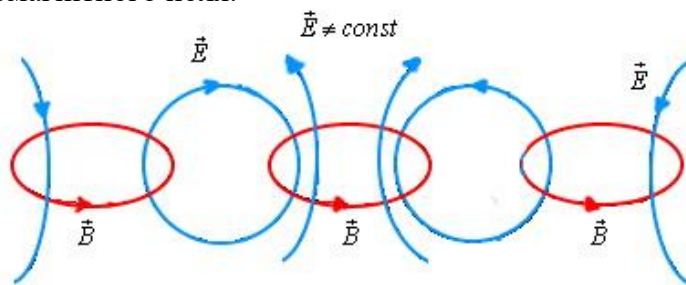


Рис. 1. Взаємозв'язок між змінним електричним та магнітним полем.

У середині 60-х років XIX століття Джеймс Клерк Максвелл, аналізуючи експериментальні результати Майкла Фарадея щодо явища електромагнітної індукції,

встановив, що в природі існує зворотний процес: змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, відоме як вихрове. Це відкриття показало, що магнітне поле може виникати не лише завдяки руху заряджених частинок (електричному струму), але й під дією змінного електричного поля, як це проілюстровано на рис. 1.

Сукупність змінних електричних і магнітних полів, які нерозривно пов'язані між собою, називається електромагнітним полем. У природі електричні та магнітні поля не існують окремо, вони завжди об'єднані у вигляді електромагнітного поля – особливого виду матерії, який є носієм електромагнітної взаємодії. У вакуумі електромагнітне поле описується векторами напруженості електричного поля  $\vec{E}$  і магнітної індукції  $\vec{B}$ . У середовищі для його характеристики додаються вектор індукції електричного поля та напруженість магнітного поля. Ці вектори визначають силу, яку електромагнітне поле чинить на заряджені частинки – як нерухомі, так і рухомі.

Поширення змінного електромагнітного поля в просторі називають електромагнітною хвилею. Такі хвилі є поперечними: у кожній точці простору вектори напруженості електричного поля, магнітної індукції та швидкість поширення хвилі взаємно перпендикулярні (рис. 2):

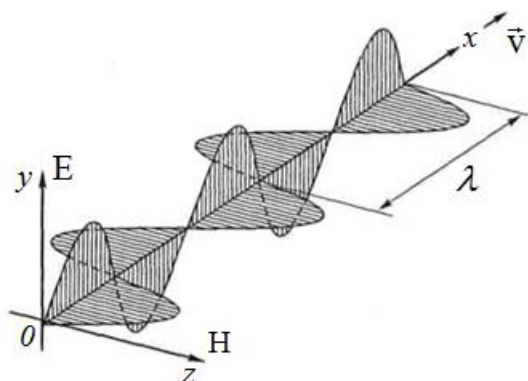


Рис. 2. Електромагнітна хвиля.

Згідно з теорією Максвелла, швидкість електромагнітної хвилі в середовищі визначається за формулою:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon \cdot \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}},$$

де  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$  – швидкість світла у вакуумі;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  – магнітна стала,

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$  – електрична стала,  $\epsilon$  – діелектрична проникність середовища,  $\mu$  – магнітна проникність середовища.

Довжина електромагнітної хвилі – це відстань, яку хвиля проходить за один період, або найкоротша відстань між точками хвилі, де коливання електричного і магнітного полів перебувають в однаковій фазі:

$$v = \lambda \cdot \nu = \lambda \cdot T,$$

де  $T$  – період коливань,  $\nu$  – частота хвилі. Максвелл також встановив, що прискорений рух заряду чи його коливання є джерелом випромінювання електромагнітних хвиль.

У вакуумі електромагнітні хвилі поширюються з максимальною швидкістю – швидкістю світла ( $c=3 \cdot 10^8$  м/с). Їх властивості можна вивчати за допомогою передавачів і приймачів, що працюють у сантиметровому діапазоні. Досліди Герца підтвердили, що електромагнітні хвилі:

- поширюються прямолінійно в однорідному середовищі;
- відбиваються діелектриками і провідниками відповідно до законів відбивання;

- заломлюються, фокусуються, проявляють дифракцію та інтерференцію;
- поляризуються.

Електромагнітні хвилі мають широкий спектр частот і довжин, які поділяють на діапазони.

- Радіохвилі включають довгі (понад 10 км), середні (сотні метрів) і короткі (десятки метрів), що використовуються для радіозв'язку.
- Ультракороткі хвилі (метрові, дециметрові, міліметрові) застосовуються в телебаченні та радіолокації.
- Інфрачервоне випромінювання широко використовується в техніці, зокрема для роботи лазерів, які забезпечують точну обробку матеріалів.

Електромагнітні хвилі мають універсальні властивості, спільні для хвиль будь-якої природи, і відіграють важливу роль у сучасних технологіях.

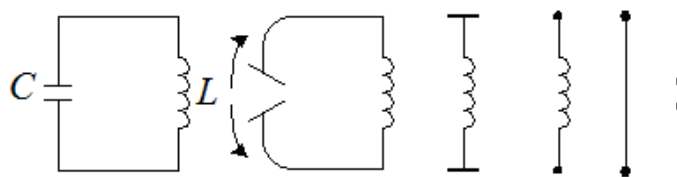
Ультрафіолетове випромінювання використовується для дезінфекції приміщень у лікарнях, стимуляції хімічних реакцій та інших цілей. Для людини ультрафіолетові промені є шкідливими, але поверхня Землі захищена від їх небезпечних компонентів озоновим шаром (O<sub>3</sub>). Збереження озонового шару є важливою екологічною проблемою.

Рентгенівське випромінювання виникає при гальмуванні електронів, що прискорюються напругою в десятки кіловольт. Воно має значно коротшу довжину хвилі порівняно з видимим світлом або ультрафіолетом. Чим більша енергія електронів, що бомбардують перешкоду, тим коротша довжина хвилі рентгенівського випромінювання. Рентгенівські промені відразу знайшли застосування в медицині. Їх довжина хвиль частково перекривається з γ-випромінюванням, яке утворюється під час розпаду нестійких атомних ядер. Завдяки здатності рентгенівських променів проникати крізь товсті шари металу, їх застосовують для перевірки якості великих металевих злитків, зварювальних швів тощо. γ-промені також використовуються в медицині, геології та інших галузях.

Електромагнітні хвилі високої частоти отримують за допомогою спеціальних пристроїв. Коливання високої частоти, значно вищі за частоту промислового струму (50 Гц), можна генерувати за допомогою коливального контуру. Частота власних коливань такого контуру зростає із зменшенням індуктивності котушки та ємності конденсатора:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL}}.$$

Герц створив простий пристрій – вібратор Герца (відкритий коливальний контур), який використовується для випромінювання електромагнітних хвиль (рис. 3). Він складався з антени, яка випромінює хвилі, викликані змінним електричним струмом.



**Рис. 3.** Поступовий перехід до відкритого коливального контуру.

Радіозв'язок ґрунтується на явищі, коли змінний струм високої частоти в антені передавача створює електромагнітні хвилі, які поширюються у просторі. Ці хвилі, досягаючи антени приймача, індукують у ній змінний струм тієї ж частоти. Важливим кроком у розвитку радіозв'язку стало створення у 1913 році генератора електромагнітних коливань, що дозволив передавати мову і музику через електромагнітні хвилі.

Радіохвилі поділяються на кілька діапазонів:

- довгі хвилі (10 000–1 000 м) завдяки дифракції поширюються далеко за горизонт, що забезпечує їх прийом на великих відстанях.
- середні хвилі (1 000–100 м) поширюються на менші відстані через слабшу дифракцію.



- короткі хвилі (100–10 м) здатні відбиватися від іоносфери, що дозволяє їх приймати в будь-якій точці Землі.
- ультракороткі хвилі (<10 м) поширюються лише в межах прямої видимості через відсутність дифракції.

Ультракороткі хвилі широко застосовуються у радіолокації, яка базується на властивості електромагнітних хвиль відбиватися від металевих об'єктів і провідників. Відстань до об'єкта визначається за часом проходження хвилі до нього і назад:

$$l = \frac{ct}{2},$$

де  $c$  – швидкість радіосигналу ( $3 \cdot 10^8$  м/с),  $t$  – час поширення хвилі в обох напрямках.

Телевізійні сигнали передаються у діапазоні 50–230 МГц, де електромагнітні хвилі поширюються в межах прямої видимості. Для покращення сигналу використовують високі антени, ретранслятори та штучні супутники.

### Лінія Лехера.

**Двопровідна лінія Лехера** – це система двох паралельних циліндричних провідників радіуса  $r$ , розташованих на відстані  $h$  один від одного ( $h > r$ ). Вона характеризується розподіленими параметрами  $L_0$  і  $C_0$  – індуктивністю та ємністю на одиницю довжини лінії. Лінія Лехера дозволяє вивчати електромагнітні хвилі, які поширюються строго вздовж провідників.

Для напруги  $U$  між провідниками справедливе хвильове рівняння:

$$L_0 C_0 \frac{d^2 U}{dt^2} = \frac{d^2 U}{dz^2},$$

де  $z$  – координата вздовж лінії. Аналогічне рівняння описує силу струму  $I$ :

$$L_0 C_0 \frac{d^2 I}{dt^2} = \frac{d^2 I}{dz^2}.$$

Розв'язки цих рівнянь описують біжучі хвилі напруги та струму:

$$u = U_m \cdot \sin \omega \left( t - \frac{z}{v} \right),$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}},$$

$$i = I_m \cdot \sin \omega \left( t - \frac{z}{v} \right).$$

де  $\omega$  – циклічна частота,  $k$  – хвильове число. Значення  $U_m$  і  $I_m$  пов'язані через хвильовий опір лінії  $Z$ :

$$U_m = I_m \cdot Z,$$

де

$$Z = \sqrt{L_0 / C_0}.$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \ln((r+h)/r) \cong \frac{\mu_0}{\pi} \ln(h/r),$$

$$C_0 = \pi \varepsilon_0 \ln((r+h)/r) \cong \pi \varepsilon_0 \ln(h/r).$$

Швидкість електромагнітних хвиль у лінії Лехера обчислюється за формулою:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = c.$$

У повітрі швидкість хвиль у лінії збігається зі швидкістю світла у вакуумі. У діелектрику швидкість хвиль зменшується:

$$v' = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}},$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність,  $\mu$  – магнітна проникність. Для більшості діелектриків  $\mu \approx 1$ , тому:

$$v' = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}.$$

Якщо лінія Лехера замкнута на кінці, виникає відбита хвиля, і при інтерференції прямої та відбитої хвиль утворюються стоячі хвилі. У стоячій хвилі вузли напруги (електричного поля) відповідають пучностям струму (магнітного поля) і навпаки. Для утворення стоячої хвилі довжина лінії  $l$  має вмещувати ціле число півхвиль:

$$l = \frac{n\lambda}{2},$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі.

Оскільки  $v = \lambda \cdot \nu$ , де  $\nu$  – частота коливань, то можемо записати:

$$\nu_n = \frac{nv}{2l}.$$

Досліди виконуються за допомогою установки Лехера, яка складається з двопровідної лінії малого опору, з'єднаної з генератором високочастотних коливань через індуктивний зв'язок.

Для знаходження вузлів і пучностей використовуються містки з лампами розжарення та неонову лампою. Лампа розжарення яскраво світиться у пучностях струму (вузлах напруги). Неонова лампа світиться у пучностях напруги (вузлах струму).

Для налаштування лінії в резонанс довжина провідників може змінюватися за допомогою трубок на кінцях. У замкнутій лінії налаштування виконується переміщенням спеціального містка.

Довжина хвилі визначається через відстань між сусідніми вузлами або пучностями ( $\lambda/2$ ). Знаючи частоту генератора, можна розрахувати швидкість хвилі. Діелектрична проникність середовища обчислюється за формулою:

$$v = \lambda \nu.$$

Генератор електромагнітних коливань побудований на основі подвійного тріода 6Н15П. У повітрі довжина стоячої хвилі  $l = \lambda/2$  становить приблизно 30 см. Генератор підключається до лінії індуктивно. Амплітуду коливань у різних точках лінії можна оцінити за яскравістю світіння індикаторної лампи.

Для експериментів використовується установка Лехера, яка складається з двопровідної лінії малого опору, замкнутої на одному кінці витками, через які забезпечується індуктивний зв'язок із генератором високочастотних коливань (УКВ). Для визначення вузлів і пучностей електричного поля застосовують спеціальні містки з лампами розжарення та неоновими лампами. При цьому:

лампа розжарення: при замиканні лінії цим містком і його переміщенні до точки максимального розжарення визначаються пучності струму (вузли електричного поля); неонові лампи навпаки, яскраво світиться у пучностях електричного поля (вузлах струму) і гасне у вузлах напруги.

Для налаштування лінії в резонанс її довжина регулюється за допомогою трубок на кінцях. Це необхідно для роботи з розімкнутою лінією. У випадку замкнутої лінії налаштування здійснюється шляхом переміщення спеціального містка, який замикає лінію.

### Порядок виконання роботи

1. Увімкніть генератор УКВ і дайте йому прогрітися протягом 3 хвилин. На кінці лінії зніміть місток, щоб розімкнути її.
2. Визначте відстань  $\Delta x$  між вузлами електричного поля. Для цього пересувайте місток із лампою розжарення та фіксуйте координати точок на шкалі, де лампа світиться найяскравіше. Розрахуйте  $\Delta x$ , віднімаючи послідовні значення координат.
3. Усередніть отримані результати. Розрахуйте довжину хвилі  $\lambda=2\Delta x$  і швидкість хвилі  $c=\lambda\nu$  – частота генератора (вказана на ньому).
4. Повторіть експеримент з неоновією лампою. Знайдіть точки, де лампа гасне, попередньо встановивши її у положення, коли вона горить. Налаштуйте трубки на кінцях лінії, щоб досягти максимального свічення, після чого починайте вимірювання.
5. Проведіть експеримент із замкнутою на кінці лінією. Налаштуйте лінію в резонанс, пересуваючи замикаючий місток. Для кожного експерименту самостійно створіть таблиці для запису результатів вимірювань.

### Контрольні запитання

- 1) Що таке електромагнітна хвиля?
- 2) Як пов'язані довжина хвилі та її частота?
- 3) Як утворюється стояча електромагнітна хвиля?
- 4) Як середовище впливає на швидкість поширення електромагнітної хвилі?
- 5) Чим відрізняється поширення електромагнітних хвиль у лінії Лехера від їх поширення у вакуумі?
- 6) Який характер розподілу векторів електричного та магнітного полів у біжучій і стоячій хвилях?
- 7) Як вимірюють ємність  $C_0$  та індуктивність  $L_0$  лінії?
- 8) Чому електромагнітні хвилі поширюються стабільно уздовж ліній із різними значеннями  $C_0$  і  $L_0$ ?

## Література

1. Кевшин А. Г., Галян В. В. Електроніка : конспект лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2018. 87 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19595>).
2. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електроніка: задачі. 48 с. Рекомендовано НМР СНУ ім. Лесі Українки (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19584>).
3. Новосад О. В., Федосов С. А., Божко В. В., Кевшин А. Г. Електроніка : методичні рекомендації до лабораторних робіт. 87 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19584>).
4. Кевшин А. Г., Галян В. В. Фізика з основами радіоелектроніки: конспект лекцій. 113 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/20761>).
5. Новосад О. В., Федосов С. А., Кевшин А. Г. Лабораторний практикум з електрики і магнетизму : навч. посіб. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2023. 165 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/23304>).
6. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електротехніка : навчальний посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 127 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19575>).

Навчально-методичне видання

**Кевшин Андрій Григорович**

**Новосад Олексій Володимирович**

## **Основи електроніки**

методичні рекомендації

до виконання лабораторних робіт

Друкується в авторській редакції