

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

І. І. Гуцуляк

ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ ТА ОПТИКА

Методичні вказівки до фізичного практикуму



Чернівці
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

2022

УДК 537, 535
Г 93

*Друкується за ухвалою Вченої ради
Навчально-наукового інституту фізико-технічних
та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
(протокол № 5 від 09.06.2022)*

Г 93 **Гуцуляк І. І.** Електромагнетизм та оптика : метод. вказівки до фіз. практик. Чернівці : Чернівецьк. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2022. 72 с.

Методичні вказівки містять рекомендації до виконання лабораторних робіт з розділів фізики «Електромагнетизм» та «Оптика». Контрольні запитання та завдання до кожної лабораторної роботи рекомендовані для поглибленого вивчення теми.

Для студентів першого курсу інженерних спеціальностей, зокрема галузі знань 12 «Інформаційні технології та інших галузей».

© Гуцуляк І. І., 2022

© Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, 2022

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1 Перевірка законів Ома для електричного кола постійного струму	4
Лабораторна робота №2 Аналіз параметрів гармонічних сигналів з допомогою осцилографа	9
Лабораторна робота №3 Вивчення характеристик напівпровідникового діода	14
Лабораторна робота № 4 Схеми випрямлення електричного струму	21
Лабораторна робота №5 Визначення характеристик біполярного транзистора	28
Лабораторна робота №6 Резонанс напруг у послідовному контурі	34
Лабораторна робота №7 Елементи комп'ютерної логіки	39
Лабораторна робота №8 Сонячна енергія та сонячні елементи	45
Лабораторна робота №9 Визначення параметрів лінз та оптичних систем	51
Лабораторна робота №10 Визначення параметрів сферичних дзеркал	59
Лабораторна робота №11 Визначення довжини хвилі за допомогою явища дифракції	64
Список літератури	71

Лабораторна робота №1

Перевірка законів Ома для електричного кола постійного струму

Мета роботи: перевірити справедливість співвідношень законів Ома для частини кола і для повного кола та рівнянь для визначення еквівалентного опору з'єднання резисторів; навчитися використовувати лабораторні амперметр, вольтметр, мультиметр.

Обладнання: джерело змінної напруги 36 В, набірне поле «Електроніка», мультиметр.

Теоретичні відомості

Німецький фізик Георг Ом експериментально встановив закон, згідно з яким сила струму, який тече по однорідному металевому провіднику, пропорційна до напруги на цьому провіднику:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1)$$

де R – електричний опір, $[R] = \text{Ом}$.

Електричний опір (R) – скалярна фізична величина, котра характеризує властивість провідника протидіяти пропусканню електричного струму. Опір провідників, наявність електричного струму в яких приводить до виділення тепла, називається омичним, або активним. Опір провідника залежить від матеріалу провідника і його геометричних розмірів.

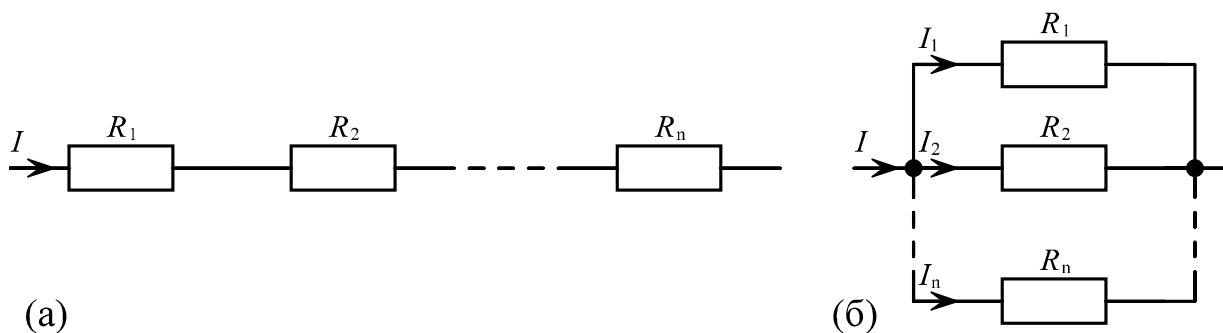


Рис. 1. Послідовне (а) та паралельне (б) з'єднання провідників

У разі **послідовного** з'єднання провідників кінець попереднього провідника з'єднується з початком подальшого і між провідниками

струм не розгалужується (рис. 1 а). Якщо n провідників опором R_1, R_2, \dots, R_n з'єднані між собою послідовно, то крізь провідники тече однаковий струм і напруга на кінцях з'єднання дорівнює сумі напруг на окремих провідниках.

Струм, який протікає через таке з'єднання, однаковий для кожного провідника у з'єднанні, а спад напруги дорівнює сумі спадів напруг на всіх елементах:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n ,$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n .$$

Тоді, враховуючи (1), опір такого з'єднання

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n . \quad (2)$$

Якщо початки провідників сполучені в одній точці (вузлі), а кінці – в іншій, то з'єднання називають *паралельним* (рис. 1 б). В такому разі сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів, котрі течуть у розгалужених ділянках кола, напруга на паралельно з'єднаних ділянках кола однакова.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n ,$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n .$$

Отже, опір такого з'єднання з урахуванням (1) можна визначити з рівняння

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} . \quad (3)$$

Змішаним з'єднанням елементів називають сукупність послідовно-паралельних з'єднань елементів або ділянок кола.

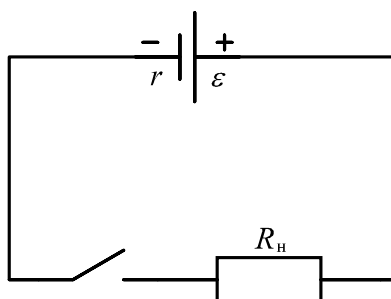


Рис. 2. Просте електричне коло

Якщо електричне коло замкнене і містить джерело е.р.с. ε , то для такого кола (рис. 2) закон Ома набуде вигляду:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (4)$$

де r – внутрішній опір джерела струму; R – опір навантаження.

Для вимірювання середніх значень струмів (від одиниць міліампер до десятків ампер) і напруг (від одиниць мілівольт до сотень вольт) використовують вимірювальні прилади безпосередньої оцінки – *амперметри* і *вольтметри* (рис. 3 а, б). За принципом дії ці прилади поділяються на електромеханічні, електромеханічні з вимірювальними перетворювачами, електронні аналогові, цифрові.

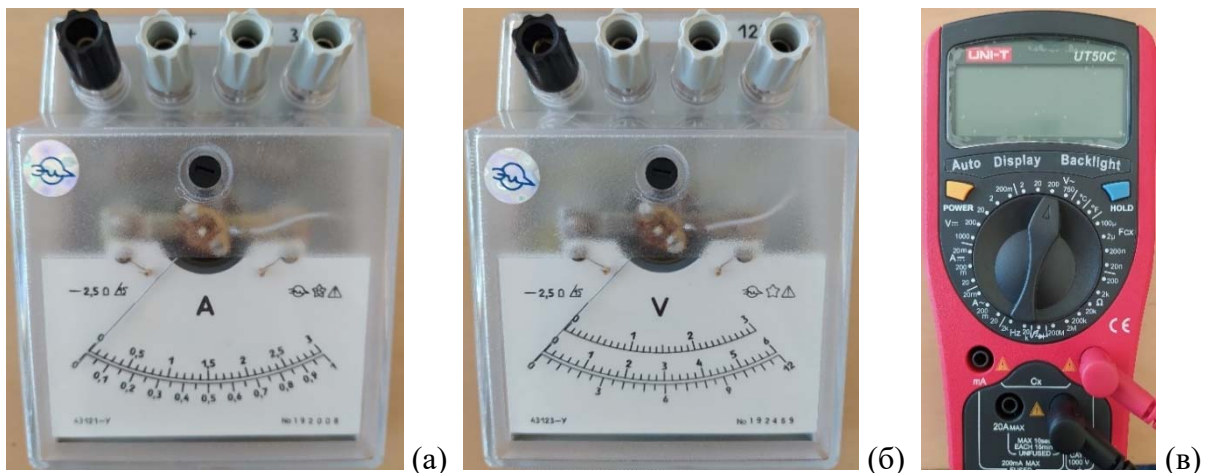


Рис. 3. Лабораторні амперметр (а) та вольтметр (б), цифровий мультиметр (в)

Електромеханічні вольтметри та амперметри, порівняно з електронними і цифровими, мають такі недоліки: невисока точність і швидкодія, незначний діапазон вимірювання, великі габарити і маса, значне споживання енергії, складна технологія виготовлення, низька надійність. Проте в експлуатації перебуває ще значна кількість електромеханічних приладів, зокрема через їхню простоту у використанні та наочність. Помітна перевага цифрових мультиметрів – їх універсальність, тобто можливість вимірювати чимало електричних та інших величин з допомогою одного приладу, клас точності якого зазначається в технічному паспорті.

Амперметри вмикають у коло послідовно зі споживачем (рис. 4 а), а вольтметри – паралельно (рис. 4 б).

Вимірювання струмів і напруг амперметрами та вольтметрами мають методичну похибку, спричинену взаємодією вимірювального пристрою із об'єктом вимірювання.

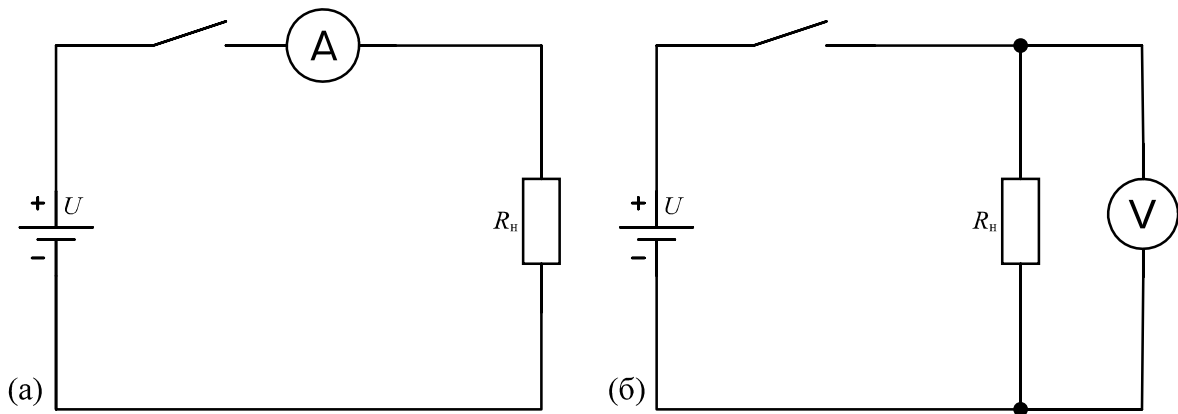


Рис. 4. Включення в електричне коло амперметра (а) та вольтметра (б)

Значення похибки вольтметра залежить від відношення його опору R_V до опору навантаження R_H , а також від відношення його опору R_V до внутрішнього опору R_i джерела ЕРС. Для зменшення похибки впливу вольтметра на роботу електричного кола потрібно збільшувати його опір відносно опору споживача і внутрішнього опору джерела ЕРС. Похибка впливу амперметра, навпаки, залежить від відношення опору навантаження R_H до опору амперметра R_A , тому для її зменшення потрібно зменшувати опір амперметра.

Щоб розширити діапазон вимірювання струмів амперметрами для більших струмів, застосовуються шунти. **Шунт** – це низькоомний високостабільний резистор (рис. 5 а), який вмикається паралельно до амперметра. З погляду метрології, шунт – це вимірювальний масштабний перетворювач струму. Для зменшення похибки, зумовленої впливом температури, шунт виготовляється з манганіну, який має незначний температурний коефіцієнт опору.

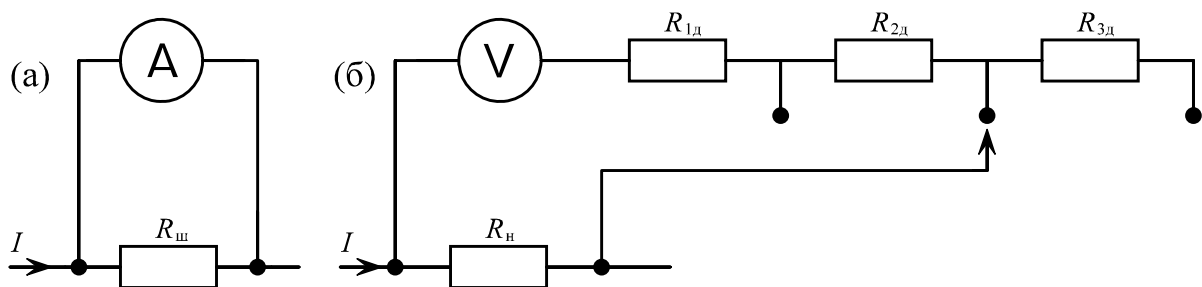


Рис. 5. Застосування шунтів (а) та додаткових опорів (б)

Розширення діапазону вимірювання напруг вольтметром для більших напруг реалізується за допомогою **додаткових** високоомних і високостабільних **резисторів**, які вмикаються послідовно з вольтметром (рис. 5 б). Додаткові резистори теж

виготовляються з манганіну для зменшення температурної похибки вимірювання.

У рамках роботи студенту пропонується використання спеціалізованого набору елементів кіл та лабораторних вимірювальних пристроїв «Електроніка», який дає змогу збирати та досліджувати електричні кола з різними з'єднаннями провідників (рис. 6).

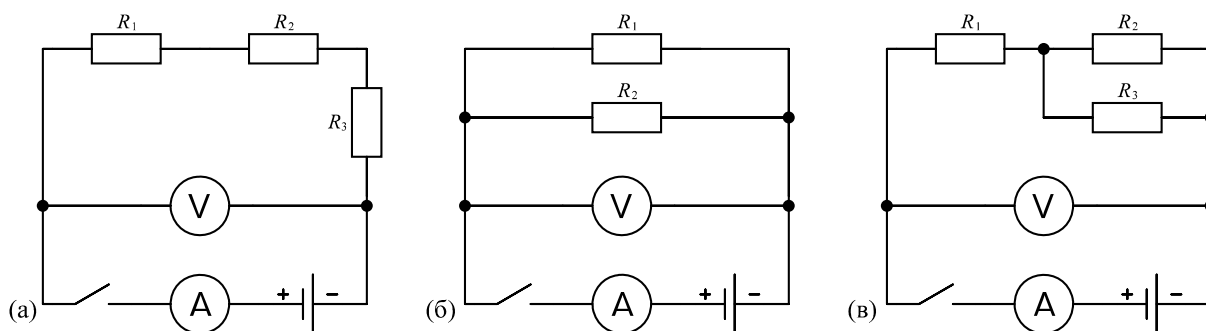


Рис. 6. Дослідні схеми з прикладами послідовного (а), паралельного (б) та змішаного (в) з'єднань провідників

Хід роботи

Вправа 1. Закони Ома

1. Зберіть схему з послідовним з'єднанням резисторів (рис. 5 а).
2. Увімкніть живлення, зніміть покази амперметра I_1 та вольтметра U_1 . Обчисліть похибки прямих вимірювань I_1 та U_1 .
3. Розрахуйте значення опору послідовного з'єднання $R_{\text{посл}}$ за формулами (1) і (2). Порівняйте отримані значення.
4. Замініть лабораторний вольтметр на цифровий мультиметр.
5. Зніміть покази цифрового вольтметра U_c тричі, перед кожним вимірюванням повторно під'єднуючи щупи мультиметра до схеми. Обчисліть похибки прямих вимірювань U_c .
6. Враховуючи, що е.р.с. джерела живлення без навантаження становить $\varepsilon = 5.19$ В, його внутрішній опір $R_0 = 2$ Ом, а опір амперметра $R_A = 7.8$ Ом, визначіть силу струму в колі I_2 за формулою (4). Порівняйте значення сили струму I_2 та I_1 .

Вправа 2. З'єднання провідників

1. Зберіть схему з паралельним з'єднанням резисторів (рис. 5 б).
2. Увімкніть схему, зніміть покази амперметра I_3 та вольтметра U_3 .

3. Обчисліть значення опору паралельного з'єднання $R_{\text{пар}}$ за формулами (1) і (3). Порівняйте отримані значення.
4. Зберіть схему зі змішаним з'єднанням резисторів (рис. 5 в).
5. Увімкніть схему, зніміть покази амперметра I_4 та вольтметра U_4 .
6. Визначте значення опору змішаного з'єднання $R_{\text{зм}}$, використовуючи формули (1) – (3). Порівняйте отримані значення.

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Закони Ома для кіл постійного струму. Послідовне, паралельне та змішане з'єднання провідників.
3. Опір. Механізм провідності провідників. Питомий опір. Опір циліндричного провідника.
4. Чому при обчисленні еквівалентного опору схеми можна знехтувати опором вольтметра чи амперметра?
5. Амперметри та вольтметри в лабораторній роботі мають кілька діапазонів вимірювань. Завдяки чому це досягається?
6. З'єднання елементів схеми зірочкою та трикутником.
7. Реальне та ідеальне джерело живлення. Як на практиці реалізують ідеальне джерело живлення?

Лабораторна робота №2

Аналіз параметрів гармонічних сигналів з допомогою осцилографа

Мета роботи: навчитися використовувати осцилограф для побудови фігур Ліссажу та для визначення характеристик невідомих сигналів.

Обладнання: генератор сигналів, осцилограф.

Теоретичні відомості

Довільний електричний сигнал складної форми можна зареєструвати та візуалізувати з допомогою осцилографа. Для знаходження параметрів невідомих сигналів, зокрема частоти та

фази, користуються методом порівняння досліджуваного сигналу з відомим.

Нехай матеріальна точка C одночасно бере участь у двох гармонічних коливаннях з однаковою частотою у двох взаємно перпендикулярних напрямках – уздовж осей X та Y (рис. 1 а). Якщо збудити обидва коливання, матеріальна точка буде рухатися вздовж деякої криволінійної траєкторії, форма якої залежить від різниці фаз обох коливань.

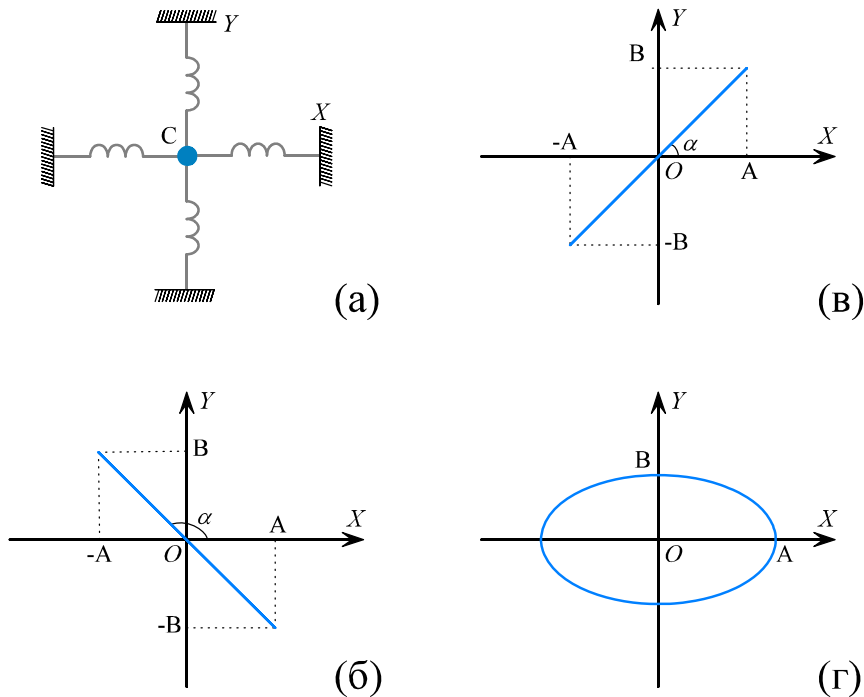


Рис 1. Модель системи, яка коливається у двох взаємно перпендикулярних напрямках (а), та форма траєкторії точки C цієї системи у разі, якщо зсув фаз φ рівний 0 (б), π (в) чи $\pi/2$ (г)

Виберемо початок відліку часу так, щоб початкова фаза першого коливання дорівнювала нулю. Тоді рівняння коливань матимуть такий вигляд:

$$x = A \cos(\omega_0 t), \quad y = B \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1)$$

де A, B – амплітуди, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – власна циклічна частота, f_0 – власна частота, φ – різниця фаз обох коливань.

Вирази (1) – параметрична форма рівняння траєкторії точки C , оскільки вони записані через параметр t . Щоб отримати рівняння траєкторії у звичайному вигляді, треба усунути цей параметр. У результаті перетворень отримаємо рівняння

$$\frac{x^2}{A^2} - 2\frac{xy}{AB}\cos\varphi + \frac{y^2}{B^2} = \sin^2\varphi. \quad (2)$$

Це рівняння еліпса, осі якого повернені на певний кут відносно координат OX та OY . Довжина осей та їх орієнтація залежать від амплітуд A і B та різниці фаз φ .

У разі, якщо зсув фаз дорівнює 0 або 2π , рівняння (2) матиме вигляд

$$\left(\frac{x}{A} - \frac{y}{B}\right)^2 = 0, \quad \text{або} \quad y = \frac{B}{A}x, \quad (3)$$

тобто це рівняння прямої лінії. Коливання вздовж цієї лінії відбуваються за гармонічним законом з частотою ω_0 (рис 1 б).

Якщо зсув фаз дорівнює π , отримаємо віддзеркалену траєкторію, інші параметри коливання не змінюються (рис. 1 в):

$$\left(\frac{x}{A} + \frac{y}{B}\right)^2 = 0, \quad \text{або} \quad y = -\frac{B}{A}x. \quad (4)$$

За умови, що φ дорівнює $\pi/2$ чи $3\pi/2$, отримаємо

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1. \quad (5)$$

Це рівняння еліпса, осі якого збігаються з осями координат, а його півосі дорівнюють амплітудам. При $A = B$ еліпс вироджується в коло.

Якщо частоти коливань x та y різні, то замкнена траєкторія точки C буде мати складну, переважно хаотичну, форму. Симетричні замкнені траєкторії точки, яка здійснює одночасно два взаємно перпендикулярні коливання, називаються **фігурами Ліссажу**. Форма цих кривих залежить від амплітуд, частот і різниці фаз коливань, котрі додаються (рис. 2).

Отже, якщо частоти коливань відносяться як деякі цілі числа, то фігури мають складну, але стійку форму (рис. 2). В такому разі їх можна використати для порівняння частот і визначення зсуву фаз коливань. Для загального випадку запишемо рівняння

$$\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{f_x}{f_y} = \frac{n_y}{n_x},$$

де f_x, f_y – частоти коливань уздовж відповідних осей, ω_x, ω_y – відповідні їм циклічні частоти, n_x, n_y – цілі числа.

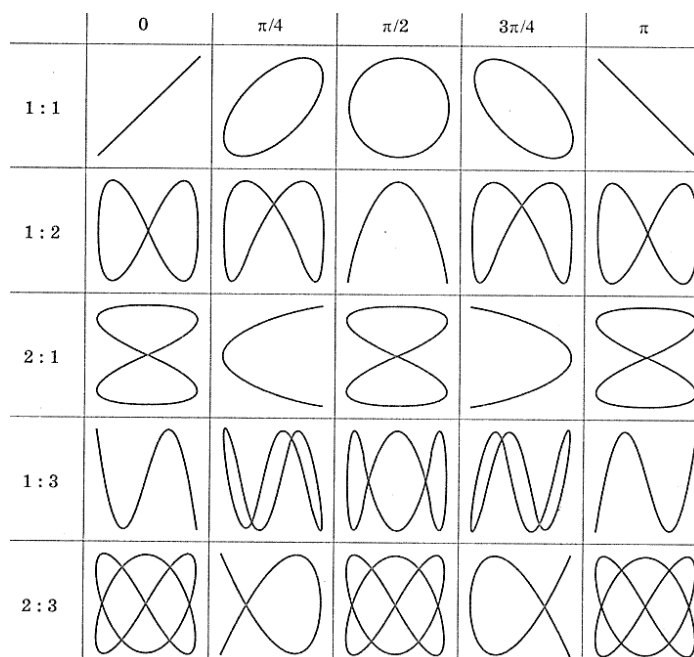


Рис. 2. Приклад фігур Ліссажу для коливань з однаковими амплітудами, але різним співвідношенням частот і зсувом фаз

Тоді, якщо відома частота f_x , то частоту невідомого коливання визначають як

$$f_y = \frac{n_x}{n_y} f_x. \quad (6)$$

Для обчислення невідомої частоти гармонічного сигналу за рівністю (6) можна скористатися осцилографом, подаючи на два його канали напруги з відомою частотою f_x та невідомою f_y . Осцилограф потрібно перевести в режим відображення $Y(X)$. Тоді кількість точок, в яких траєкторія фігури Ліссажу перетинається з осями X та Y , дорівнює n_x та n_y відповідно. Якщо на вісь потрапляє точка перетину двох ліній кривої, то її враховують двічі. Наприклад, для рис. 1 $n_x = n_y = 2$.

Можливий випадок, коли частоти коливань близькі, але дещо відрізняються. Тоді фігура буде рухатися, циклічно змінюючись із деяким періодом T . Величина цього періоду обернено пропорційна до відмінності частоти коливань від кратного значення:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (7)$$

Вираз (7) справедливий, якщо Δf визначається для коливання з меншою частотою. Для знаходження Δf більшої частоти період потрібно помножити на відношення меншої частоти до більшої.

Хід роботи

Вправа 1. Отримання фігур Ліссажу

1. Під'єднайте до входів цифрового осцилографа виходи генератора сигналів. При цьому на вхід першого каналу буде подаватися сигнал відомої частоти, а на вхід другого – невідомої.
2. Переведіть осцилограф у режим відображення $Y(X)$.
3. Встановіть на обох каналах осцилографа сигнали однакової частоти, амплітуди та фази. Перевірте відповідність отриманої фігури зображенням на рис. 2.
4. Поступово змініть фазу першого сигналу з 0 до $\pi/2$, зображення на екрані плавно змінюватиметься. Порівняйте з рис. 2.
5. Змінюючи частоти, отримайте на осцилографі зображення для співвідношень частот 1:2, 1:3, 2:3, 2:1, 4:5. Порівняйте з рис. 2.

Вправа 2. Визначення частоти та фази гармонічних коливань

1. Встановіть на другому каналі осцилографа невідому частоту (задається викладачем).
2. Змінюючи частоту на першому каналі, отримайте чітку статичну фігуру Ліссажу на екрані. Визначте на екрані кількість точок, у яких траєкторія перетинає осі X та Y , запишіть значення n_x та n_y .
3. За формулою (6) визначте невідому частоту.
4. Пункти 1 – 3 виконайте для трьох невідомих частот.
5. Встановіть на другому каналі осцилографа невідому частоту з початковою фазою, відмінною від 0 (задається викладачем).
6. Змінюючи частоту на першому каналі, отримайте на екрані фігуру у формі еліпса чи кола. Тепер змініть фазу сигналу першого каналу так, щоб фігура набула форми прямої лінії (рис. 1 б). Запишіть значення фази φ та частоти f_φ .
7. Перевірте вираз (7). Для цього встановіть на каналах осцилографа дві частоти зі співвідношенням 1:2. Дещо змініть частоту сигналу з меншою частотою. Фігура почне плавно «обертатися».

8. Тричі виміряйте секундоміром час T одного повного «оберту» фігури. Обчисліть похибки серії прямих вимірювань.
9. Визначте Δf_x за формулою (7).

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Які коливання називають гармонічними? Запишіть рівняння гармонічних коливань та поясніть їх.
3. Чи можна отримати фігури Ліссажу для інших видів коливань (негармонічних)?
4. Чи залежить форма фігур Ліссажу від зсуву фаз більшої та меншої частот? Чому?
5. Поясніть принцип роботи та опишіть можливості застосування осцилографів.
6. * Чому для визначення Δf іноді потрібно вводити коефіцієнт пропорційності?

Лабораторна робота №3

Вивчення характеристик напівпровідникового діода

Мета роботи: навчитися будувати вольт-амперну характеристику діода, визначити основні характеристики діода.

Обладнання: джерело змінної напруги 36 В, поле набірне «Електроніка», мультиметри, генератор сигналів, осцилограф.

Теоретичні відомості

Напівпровідникові діоди – це напівпровідникові (НП) прилади, виготовлені на основі двошарових НП структур, і які використовують властивості p - n переходу.

p - n переходом називається вузька зона на межі між шарами НП p - і n -типу, як зображено на рис. 1 а. Фізичні процеси, котрі відбуваються у p - n переході, визначають параметри та характеристики більшості НП приладів.

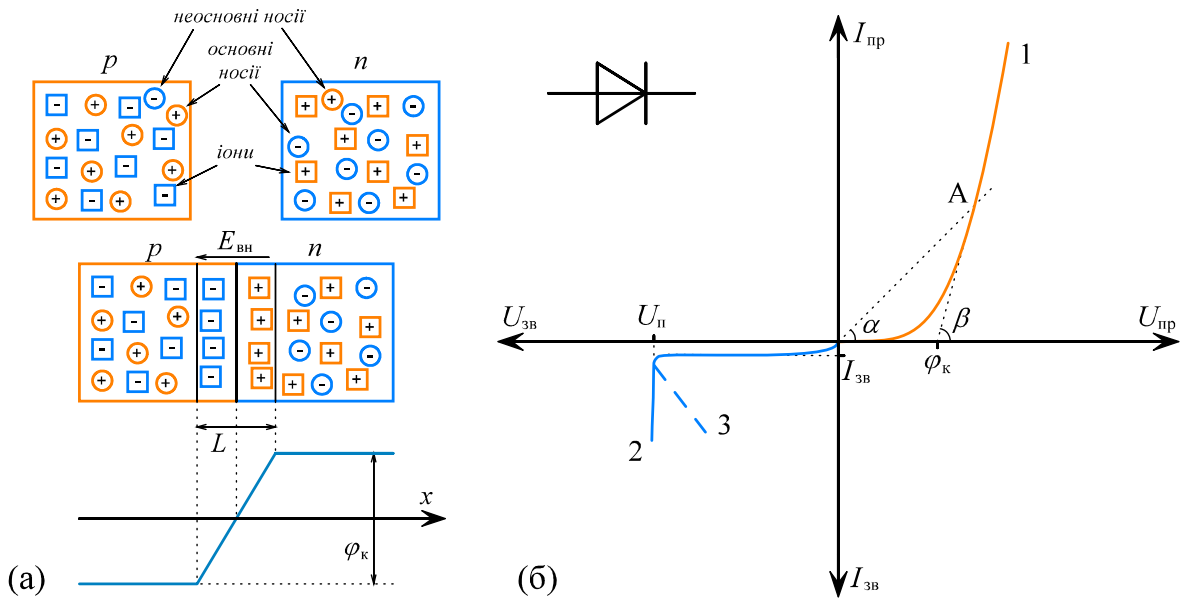


Рис. 1. Утворення p - n -переходу на межі двох шарів НП (а) та типова ВАХ діода і його позначення на схемах (б)

Припустімо, що концентрація основних носіїв у обидвох шарах НП однакова. При об'єднанні двох НП виникає взаємна дифузія (яку можна вважати за дифузійний струм $i_{диф}$) електронів із n -шару у p -шар (вони заповнюють вільні ковалентні зв'язки), а дірок – у протилежному напрямку. Внаслідок цього у приконтактній зоні НП p -типу (завдяки іонам акцепторної домішки) з'являється негативний заряд, а у приконтактній зоні n -типу (завдяки іонам донорної домішки) – позитивний заряд. Між цими зарядами виникає внутрішнє електричне поле з напруженістю $E_{вн}$, що гальмує рух основних носіїв зарядів. З іншого боку, це поле виявляється прискорювальним для неосновних рухомих носіїв зарядів (теплових), унаслідок чого через межу між НП виникає дрейфова складова струму $i_{др}$, протилежна дифузійній складовій $i_{диф}$, зумовленій рухом основних носіїв зарядів (унаслідок протікання $i_{диф}$ відбувається рекомбінація рухомих основних носіїв зарядів). У сталому становищі

$$i_{диф} + i_{др} = 0.$$

Ця рівновага настає за певної контактної різниці потенціалів, яка визначається величиною об'ємного заряду і називається *потенціальним бар'єром*. Величина φ_k називається *висотою потенціального бар'єру* та залежить від матеріалу НП і його температури. Типові значення φ_k для германію 0.4...0.6 В, для кремнію – 0.6...0.8 В.

Зона об'ємного заряду – це і є *електронно-дірковий перехід (p-n перехід)*. Ширина його, позначена як L , вимірюється десятками мікронів. Оскільки у $p-n$ переході немає рухомих носіїв зарядів (він заповнений нерухомими йонами), то його електричний опір дуже великий.

Оскільки у $p-n$ переходу явно виражені нелінійні властивості, то залежність струму, який через нього протікає, від прикладеної напруги ілюструють за допомогою ***вольт-амперної характеристики (ВАХ)***.

Теоретична ВАХ $p-n$ переходу показана на рис. 1 б. Вона має пряму (1) та зворотну (2, 3) гілки.

Якщо напруга прямого вмикання $U_{\text{пр}} < \varphi_k$, через перехід, опір якого великий, тече малий струм. Тільки-но $U_{\text{пр}}$ досягне значення висоти потенціального бар'єру $U_{\text{пр}} = \varphi_k$, заірні властивості переходу зникають і струм через нього визначається лише провідністю p - і n -шарів.

Отже, $p-n$ перехід має *вентильні властивості* (від німецького слова *ventil* – клапан), тобто при прямому вмиканні його опір малий, а при зворотному – значний.

При зростанні від нуля зворотної напруги $U_{\text{зв}}$ швидкість руху неосновних носіїв через перехід зростає. При $U_{\text{зв}} = U_{\text{п}}$ швидкість рухомих носіїв така, що їх енергії вистачає для виникнення в матеріалі ударної іонізації – вибивання додаткових носіїв заряду. Внаслідок цього відбувається лавиноподібне зростання зворотного струму. Це явище називається *електричним пробоем p-n переходу*, а $U_{\text{п}}$ – напругою пробую. Якщо при цьому $p-n$ перехід ефективно охолоджується, різке зростання потужності, яка в ньому виділяється ($U_{\text{зв}} \cdot I_{\text{зв}}$), не призводить до суттєвих змін структури і електричний пробій протікає при незмінній нарузі. Це явище має зворотний характер – при зниженні $U_{\text{зв}}$ заірні властивості $p-n$ переходу відновлюються (гілка 2 ВАХ).

При неефективному тепловідведенні температура структури зростає (кількість рухомих носіїв при цьому збільшується також за рахунок теплової генерації), доки електричний пробій не переходить у *тепловий*, коли матеріал плавиться і $p-n$ перехід руйнується. Тепловий пробій незворотний (гілка 3 ВАХ).

Для отримання експериментальної ВАХ діода найчастіше використовують два методи. Перший полягає у вимірюванні ряду значень спадів напруг на діоді та відповідних їм сил струмів через діод, які потім використовують для побудови графічної залежності $I(U)$. Переваги цього методу – в простоті та доступності, недоліки – низька точність при малій кількості емпіричних значень та затратність зусиль при великій кількості. Також він потребує побудови двох окремих схем для прямої (рис. 2 а) та зворотної (рис. 2 б) гілок ВАХ.

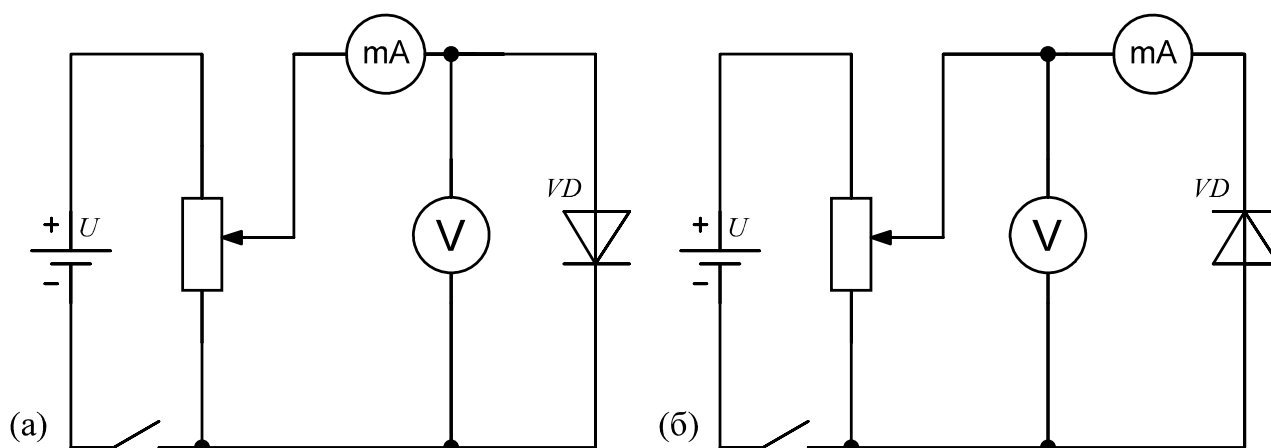


Рис 2. Схеми для аналізу залежності $I(U)$ при прямому (а) та зворотному (б) увімкненні діода

Для другого методу використовується джерело змінної напруги, яке забезпечує можливість одночасного аналізу обох гілок ВАХ. Найкраще для цього годиться генератор сигналів, який дає змогу змінювати параметри вхідного струму в широкому діапазоні. Залежність $I(U)$ реєструється двоканальним осцилографом (рис. 3).

На перший канал осцилографа подають значення спаду напруги на осцилографі. Другим каналом потрібно зареєструвати силу струму, котра протікає через діод. Для цього послідовно з діодом під'єднують резистор R , спад напруги на якому $U_R = I_d \cdot R$. У разі, якщо $R = 1$ Ом, спад напруги на резисторі $U_R = I_d$. Саме це значення і реєструється другим каналом осцилографа. Якщо ж опір резистора відрізняється від одиниці, це враховують при аналізі ВАХ.

У наведеній на рис. 3 схемі на перший канал осцилографа подається не спад напруги на діоді, а сума спадів напруг на діоді та резисторі R . Похибка від цього буде незначна, оскільки спад напруги на діоді значно більший і нею можна знехтувати. Для

точнішого виміру напруги прийнято вимірювати силу струму за допомогою датчика струму.

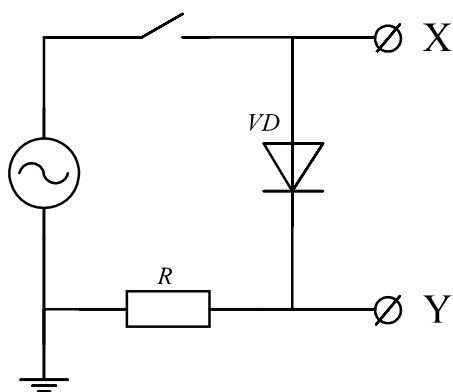


Рис. 3. Схема підключення каналів X та Y осцилографа до діода в колі змінного струму

При побудові електронних НП приладів найважливіші такі властивості $p-n$ переходу:

- одностороння провідність (вентильні властивості);
- дуже великий опір зони $p-n$ переходу як зони, де немає вільних носіїв заряду (запінні властивості);
- зміна ширини $p-n$ переходу при зміні величини зворотної напруги (як результат – зміна ємності $p-n$ переходу);
- стабільність напруги на $p-n$ переході у режимі електричного пробую;
- наявність неосновних носіїв (які виникають унаслідок теплової генерації) в шарах p - і n -типу.

Широко застосовуються *випрямні діоди*, дія яких базується на використанні вентильних властивостей $p-n$ переходу. Випрямні діоди призначені для випрямлення змінного струму низької частоти. Вмикають діод послідовно зі споживачем R_n , при цьому його опір буде співмірним чи значно меншим за опір R_n у випадку прямого зміщення, або ж значно більшим у випадку зворотного. Без побудови ВАХ опір відкритого діода можна оцінити за формулою

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_d}{I_3} = \frac{U - U_n}{I_3} = \frac{U - R_n I_3}{I_3}, \quad (1)$$

де U_d – спад напруги на діоді у з'єднанні, U – напруга джерела живлення, I_3 – сила струму через споживача.

Утім, на практиці для оцінки властивостей діода використовують статичний та динамічний опори, які визначаються з експериментальної ВАХ.

Диференціальний опір R_d чисельно дорівнює відношенню нескінченно малого збільшення напруги $dU_{\text{пр}}$ до відповідного збільшення струму $dI_{\text{пр}}$ в заданому режимі роботи діода і може бути визначене графічно як котангенс кута β між дотичною до кривої в розглянутій робочій точці ВАХ діода і віссю абсцис (рис. 1 б):

$$R_d = \frac{dU_{\text{пр}}}{dI_{\text{пр}}} \approx \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}} = \left(\frac{m_U}{m_I} \right) \text{ctg } \beta, \quad (2)$$

де $\Delta U_{\text{пр}}$ і $\Delta I_{\text{пр}}$ – значення зміни напруги і струму поблизу деякої робочої точки А; m_U та m_I – масштаби осей напруги і струму.

Статичний опір $R_{\text{ст}}$ чисельно дорівнює відношенню напруги на елементі $U_{\text{пр}}$ до сили струму $I_{\text{пр}}$, котрий протікає через нього. Цей опір дорівнює котангенсу кута α нахилу прямої, проведеної з початку координат через задану робочу точку А до осі абсцис (рис. 1б):

$$R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \left(\frac{m_U}{m_I} \right) \text{ctg } \alpha. \quad (3)$$

Залежно від того, на якій ділянці ВАХ розташована задана робоча точка, значення $R_{\text{ст}}$ може бути меншим або більшим R_d .

Зворотний опір $R_{\text{зв}}$ діода зазвичай вимірюється в мегаомах і також поділяється на статичний та динамічний. Проте для достатньо великого значення $\Delta U_{\text{зв}}$ при малій зміні $\Delta I_{\text{зв}}$ (полога ділянка зворотної ВАХ) можна вважати $R_{\text{зв}} = R_{d \text{ зв}} \approx R_{\text{ст зв}}$. Тоді

$$R_{\text{зв}} = \frac{\Delta U_{\text{зв}}}{\Delta I_{\text{зв}}}. \quad (4)$$

Коефіцієнт випрямлення струму k для діода визначається як відношення сил прямого робочого струму $I_{\text{пр}}$ до небажаного зворотного струму $I_{\text{зв}}$. Чим більше значення k , тим краще діод випрямляє струм:

$$k = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{зв}}}. \quad (5)$$

Основні параметри випрямних діодів такі:

- граничний прямий струм діода $I_{\text{пр}}$ – максимально допустиме середнє значення струму через діод у прямому напрямку за визначених умов охолодження, у сучасних діодів $I_{\text{пр}} = (0,1 \dots 3200)$ А;
- максимально допустимий прямий струм діода (імпульсний) $I_{\text{пр max}}$, становить $(10 \dots 50) \cdot I_{\text{пр}}$;
- прямий спад напруги $U_{\text{пр}}$, тобто середнє значення напруги на діоді при граничному прямому струмі $I_{\text{пр}}$, для діодів з кремнію становить $(0,6 \dots 1,0)$ В;
- максимально допустима зворотна напруга $U_{\text{зв max}}$, яка дорівнює максимально допустимому амплітудному значенню зворотної напруги, котре не призводить до виходу з ладу приладу за визначених умов охолодження, $U_{\text{зв max}} = (50 \dots 10000)$ В.

Хід роботи

1. Зберіть схему з прямим включенням діода VD Ge (рис. 2 а).
2. Плавно змінюючи напругу потенціометром, запишіть ряд значень сили струму $I_{\text{пр}}$ та напруги $U_{\text{пр}}$. Рекомендовано за можливості змінювати напругу з кроком 0,05 В, а після 0,25 В – з кроком 0,02 В. Максимальний дозволений спад напруги на діоді – 0,55 В.
3. Додайте в схему біля діода опір навантаження $R_{\text{н}}$. Встановіть ручку потенціометра в положення з напругою на з'єднанні $U = 0,48$ В. Визначте струм $I_{\text{з}}$. Виміри проведіть 3 рази. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
4. Обчисліть значення прямого опору діода $R_{\text{пр}}$ за формулою (1).
5. Зберіть схему зі зворотним підключенням діода VD Ge (рис. 2 б).
6. Плавно змінюючи напругу потенціометром, зніміть ряд значень сили струму $I_{\text{зв}}$ та напруги $U_{\text{зв}}$. Рекомендовано змінювати напругу так, щоб сила струму зростала з кроком 0,02 $\mu\text{А}$.
7. На основі вимірних значень $I_{\text{пр}}$, $U_{\text{пр}}$, $I_{\text{зв}}$ та $U_{\text{зв}}$ побудуйте ВАХ діода. Вибирайте оптимальний масштаб для кожної з осей.
8. Із графіка ВАХ діода визначте висоту потенціального бар'єра $\phi_{\text{к}}$. Для цього проведіть дотичну до перетину з віссю напруги, як це показано на рис. 1 б. Порівняйте отримане значення з типовим для даного діода.

9. Визначте коефіцієнт випрямлення струму k за формулою (5). При цьому доцільно вибрати однакове значення напруг $U_{\text{пр}} > \varphi_k$, а $U_{\text{зв}}$ – посередині горизонтальної ділянки.
10. За формулою (4) визначте зворотний опір $R_{\text{зв}}$.
11. Використовуючи графік, визначте динамічний $R_{\text{д}}$ (2) та статичний $R_{\text{ст}}$ (3) опори діода. Визначати їх потрібно як відношення змін напруг ΔU до змін струмів ΔI . Порівняйте отримані значення з прямим опором $R_{\text{пр}}$.
12. Зберіть схему дослідження роботи діода з осцилографом (рис. 3). У режимі роботи осцилографа $Y(X)$ отримайте ВАХ діода. Перерисуйте графік, оцініть значення $R_{\text{д.о.}}$ за котангенсом кута β нахилу прямої гілки ВАХ до осі абсцис (3). При цьому важливо правильно вибрати значення m_U та m_I . Порівняйте $R_{\text{д.о.}}$ та $R_{\text{д}}$.

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Природа провідності напівпровідників. Основи зонної теорії твердого тіла.
3. Пряме та зворотне включення НП n - p -переходу.
4. Залежність характеристик діода від температури.
5. Класифікація НП діодів.
6. В роботі отримано три значення опору діода при прямому включенні. Чи значно вони відрізняються? Чому? Яке з них доцільно використовувати на практиці?
7. Порівняйте ВАХ діода, отримані з осцилографа, та залежності $I(U)$. У яких випадках їх можна використовувати?
8. * Чим відрізняються схеми для дослідження прямого та зворотного режимів роботи діода? Чому?

Лабораторна робота №4

Схеми випрямлення електричного струму

Мета роботи: проаналізувати роботу різних схем випрямлення струму; дослідити вплив пасивних фільтрів на випрямлений струм.

Обладнання: поле набірне «Електроніка», діодний міст, мультиметри, осцилограф.

Теоретичні відомості

З практичної позиції електричний струм можна поділити на два види: *змінний струм*, параметри I , U , ε якого змінюються з часом за гармонічним законом, та *постійний струм*, параметри якого не змінюються з часом. Змінний струм має значну перевагу над постійним, оскільки його легше генерувати і передавати на значні відстані без утрат. Втім, хоча електричні мережі й забезпечують користувачів змінним струмом, але багато електроприладів для своєї роботи потребують саме постійного струму. В такому разі застосовуються схеми випрямлення, фільтрації та стабілізації змінного струму.

Випрямлячі – це електротехнічні пристрої, призначені для перетворення енергії джерела напруги змінного струму на енергію напруги постійного струму. Найважливіший вузол випрямляча – вентильна схема (схема випрямлення). Один із найпоширеніших способів створення випрямляча – застосування в схемах діодів (рис. 1).

Найпростішим є **однонапівперіодний випрямляч**, який працює у такий спосіб (рис. 1 а): під час одного напівперіоду напруги мережі діод відкритий, і через опір навантаження тече електричний струм, натомість під час другого напівперіоду діод закритий, і струм практично не тече. Для такого випрямляча постійна складова випрямленого струму I_0 дорівнює

$$I_0 = \frac{I_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_d}{\pi} = 0.45 \cdot I_d, \quad (1)$$

де I_m – максимальне (амплітудне) значення сили струму, I_d – діюче значення сили струму (яке мав би постійний електричний струм такої ж потужності).

Постійна складова випрямленої напруги

$$U_0 = \frac{U_m}{\pi} = R_H \cdot I_0 = R_H \frac{\sqrt{2} \cdot I_d}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi} = 0.45 \cdot U_d. \quad (2)$$

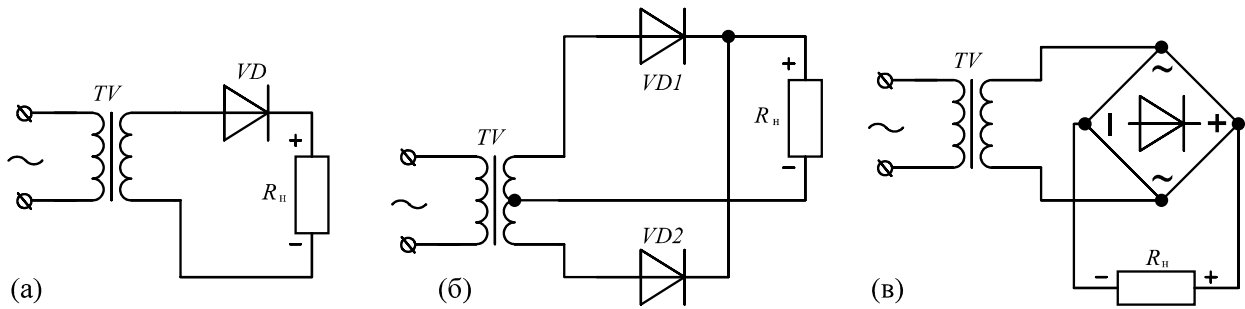


Рис. 1. Типові схеми однонапівперіодного (а), двонапівперіодного зі середньою точкою (б) та двонапівперіодного мостового (в) однофазних випрямлячів

Тоді ефективність випрямляча можна охарактеризувати відношенням постійної складової випрямленої напруги U_0 до її діючого значення. Для однонапівперіодного випрямляча частка постійної напруги від діючого значення складає $U_0 = 0.45 U_d$.

Наближеність випрямленої пульсуючої напруги до постійної оцінюють *коефіцієнтом пульсацій*, який визначають як відношення амплітуди змінної складової напруги до величини постійної складової:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{pp}}{U_0}. \quad (3)$$

Для даного випрямляча $K_{\Pi} \approx 1.57$.

Схема однонапівперіодного випрямляча максимально проста, але має погані параметри вихідних напруги та струму і тому майже не застосовується. Розглянемо детальніше іншу схему.

Мостовий однофазний випрямляч складається з чотирьох випрямних діодів, з'єднаних у мостову схему та під'єднаних до вторинної обмотки трансформатора чи електричної мережі змінного струму (рис. 2). Діоди VD1, VD3 формують катодну групу, VD2, VD4 – анодну, відповідно до з'єднаних між собою електродів. У відкритому стані завжди перебувають два діоди. За один напівперіод (полярність на схемі без дужок) діоди VD1 та VD4 відкриті, і крізь них струм тече через навантаження. Діоди VD2 та VD3 при цьому закриті. За наступний напівперіод полярність трансформатора змінюється (знаки в дужках), відкривається інша пара діодів (VD2 та VD3), і через навантаження знову тече струм у тому ж напрямку.

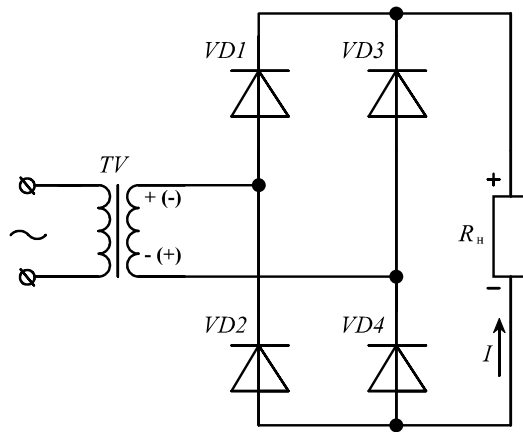


Рис. 2. Схема двонапівперіодного мостового однофазного випрямляча

Співвідношення (1) – (3) для мостової схеми матимуть вигляд

$$I_0 = \frac{2 \cdot I_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot I_D}{\pi} = 0.9 \cdot I_D, \quad (4)$$

$$U_0 = \frac{2 \cdot U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_D}{\pi} = 0.9 \cdot U_D.$$

Для мостової схеми $K_{\pi} \approx 0.67$.

Незначний недолік мостової схеми хіба що те, що використовують 4 діоди, але це несуттєво завдяки малим габаритам та відносно низькій вартості.

Оскільки елементи електричних кіл не ідеальні, вихідна напруга U_0 залежить від сили струму:

$$U_0 = U_{0m} - (r_{\text{тр}} + kr_d + r_{\pi}) \cdot I_0 = U_{0m} - r_{\text{вн}} \cdot I_0, \quad (5)$$

де U_{0m} – вихідна напруга в режимі холостого ходу ($R_{\text{н}} = \infty$), $r_{\text{тр}}$, r_d та r_{π} – активний опір трансформатора, диференційний опір діода та активний опір проводів, відповідно, $r_{\text{вн}}$ – внутрішній опір всього випрямляча. Цю залежність називають *зовнішньою (навантажувальною) характеристикою* $U_0 = f(I_0)$ (рис. 3). Якщо відоме допустиме відхилення напруги споживача від деякої оптимальної величини $U_{0\text{опт}}$, така залежність дає змогу визначити діапазон допустимої зміни струму I_0 , тобто робочу потужність навантаження.

Часто застосування лише випрямляча недостатнє, оскільки прилади мають строгі вимоги до стабільності напруги живлення. Наприклад, допустиме значення пульсацій вихідних напруг

комп'ютерних БЖ – 5 %, підсилювачів сигналів – 0.01...0.1 %, мікрофонних підсилювачів – 0.00005 %.

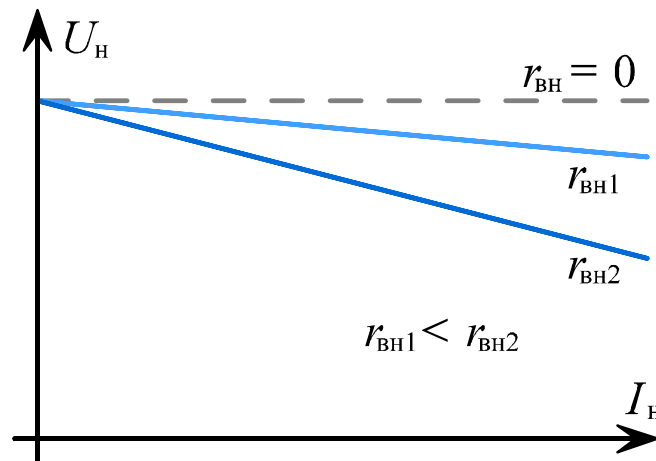


Рис. 3. Загальний вигляд зовнішньої характеристики випрямляча

Для зменшення амплітуди змінної складової випрямленої напруги живлення використовують **згладжувальні фільтри** (рис. 4). Фільтри залежно від принципу роботи бувають *пасивними* (згладжування реалізується резисторами, конденсаторами та котушками індуктивності) та *активними*. Основна характеристика фільтра – коефіцієнт згладження пульсацій – відношення коефіцієнта пульсацій на вході фільтра до коефіцієнта пульсацій на виході:

$$K_{зп} = \frac{K_{пвх}}{K_{пвих}}. \quad (6)$$

В індуктивному фільтрі котушку індуктивності вмикають послідовно до навантаження. Котушка вільно пропускає постійний електричний струм, але чинить опір його зміні, намагаючись нівелювати пульсації випрямленої напруги. Для ефективної роботи фільтра потрібно, щоб активний опір дроселя був мінімальний $R_H \gg R_L$, а реактивний вибирають з умови

$$X_L = \omega L \gg R_H. \quad (7)$$

Ємнісний фільтр використовує конденсатор, під'єднаний паралельно до R_H . Його опір підбирають так, щоб

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \ll R_H. \quad (8)$$

Тоді відбувається шунтування навантаження за змінним струмом, а постійну складову струму конденсатор не пропускає. На

практиці часто достатньо, щоб $X_C \approx R_H / 10$, $X_L \approx 10 \cdot R_H$. Для одержання кращого згладження використовують Г-, П-подібні та багатоланкові фільтри.

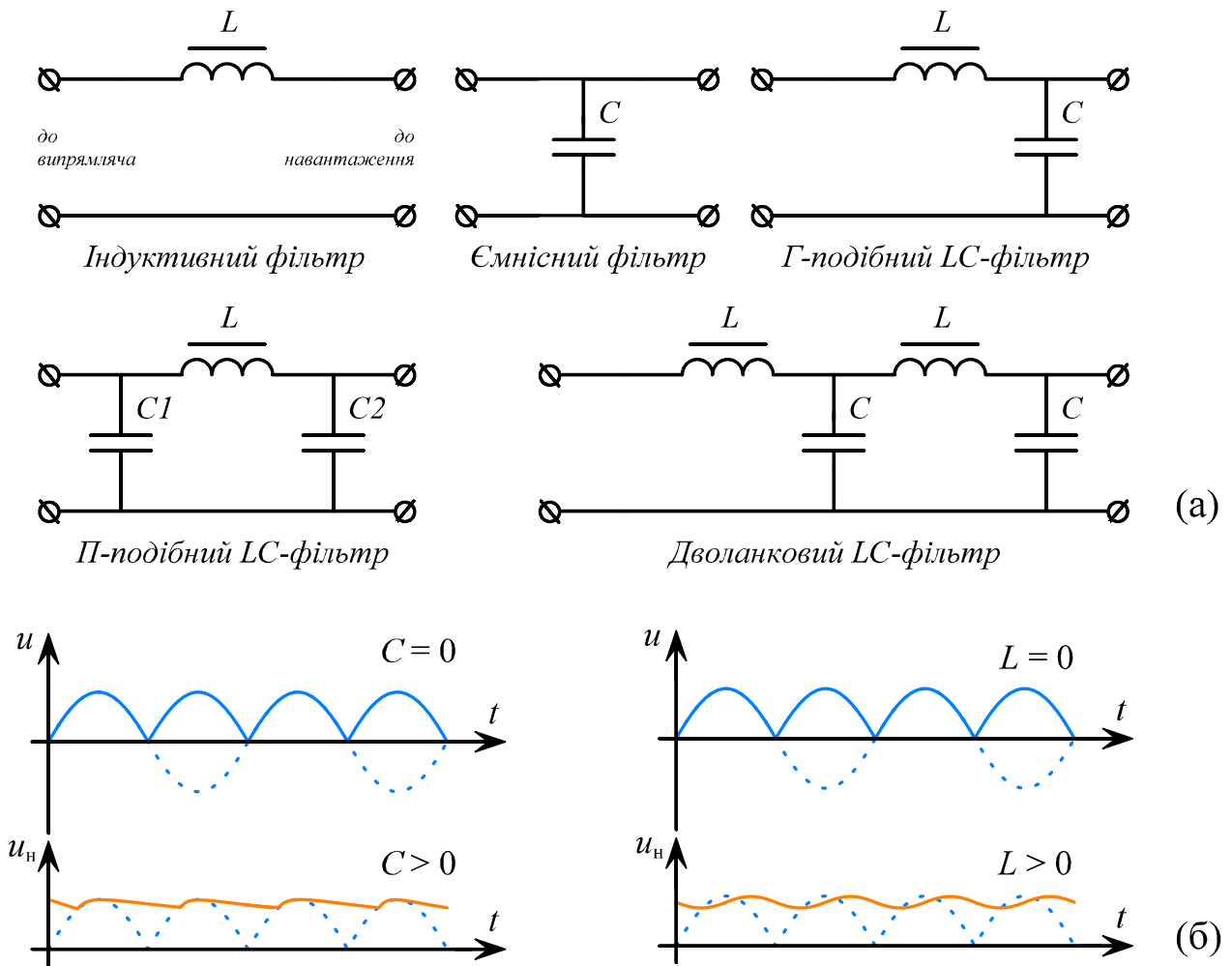


Рис. 4. Типові схеми пасивних згладжувальних фільтрів (а) та часові діаграми роботи деяких з них (б)

Хід роботи

Вправа 1. Вивчення роботи випрямлячів

1. Зберіть схему однонапівперіодного випрямляча (рис. 1 а). Під'єднайте перший канал осцилографа до входу випрямляча, другий – до навантаження.
2. Додайте в електричне коло послідовно з навантаженням між діодом та щупом осцилографа мультиметр в режимі міліамперметра.
3. Визначте за показами осцилографа амплітудне U_m та діюче U_d значення випрямленої напруги.

4. Обчисліть значення постійної складової напруги U_0 за відповідним виразом (2) або (4).
5. Під'єднайте до схеми замість другого каналу осцилографа мультиметр у режимі вимірювання постійної напруги. Визначте з його допомогою значення $U_{0\text{мульт}}$ та порівняйте з U_0 із попереднього пункту.
6. Змінюючи опір навантаження, отримайте ряд значень залежності $U_0 = f(I_0)$.
7. Обчисліть похибки вимірювання U_0 та I_0 при найбільшому I_0 .
8. Повторіть пункти 1 – 6 для мостового випрямляча (рис 2) без та з C -фільтром (рис. 4). Для останнього визначте за показами осцилографа U_{pp} та обчисліть $K_{\text{п}}$ за формулою (3).
9. Побудуйте графіки зовнішньої характеристики для отриманих залежностей $U_0 = f(I_0)$.

Вправа 2. Вивчення параметрів пасивних фільтрів

1. Зберіть схему мостового випрямляча з C -фільтром.
2. Під'єднайте другий канал осцилографа до навантаження. Зверніть увагу на зміну форми кривої $u(t)$.
3. Визначте із показів осцилографа U_{pp} та U_0 згладженого струму.
4. Використовуючи рівняння (3) та (6), визначте коефіцієнт згладження пульсацій фільтра $K_{\text{зпС}}$.
5. Повторіть пункти 1 – 4 для схеми з L -фільтром. При цьому значення $R_{\text{н}}$ треба плавно зменшувати, паралельно спостерігаючи за змінами показів осцилографа, щоб отримати найкраще значення $K_{\text{пвих}}$.
6. Повторіть пункти 1 – 4 для схеми з LC -фільтром.
7. Порівняйте значення $K_{\text{зп}}$ для різних фільтрів.

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Схеми випрямлення трифазного струму.
3. ККД діодних випрямлячів. Способи визначення.
4. Проаналізуйте отримані в роботі зовнішні характеристики та поясніть їх. Як вони застосовуються?
5. Запропонуйте спосіб визначення допустимого відхилення напруги навантаження за допомогою зовнішньої характеристики випрямляча.

6. У пункті 5 вправи 2 значення R_H потрібно змінювати. Чому? Як можна заздалегідь обчислити оптимальне значення R_H ?
7. * Співвідношення з теоретичної частини, зокрема (2) та (4), не враховують спад напруги на відкритих діодах U_{VD} випрямляча. Перепишіть їх з урахуванням U_{VD} . Поясніть на прикладі, в яких випадках цим спадом можна знехтувати, а в яких – ні.

Лабораторна робота №5

Визначення характеристик біполярного транзистора

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи біполярного транзистора як підсилювального елемента; дослідити схему ввімкнення та визначити основні характеристики транзистора.

Обладнання: поле набірне «Електроніка», мультиметри, генератор сигналів.

Теоретичні відомості

Транзистором (від *transfer resistor* – такий, який перетворює опір) називається електроперетворювальний НП прилад, який має один або кілька *p-n* переходів, три або більше контактів і здатний підсилювати потужність електричного сигналу.

Розглянемо процес підсилення електричного сигналу на прикладі елементарної схеми на рис. 1 а. Вона складається з навантаження, джерела живлення та деякого гіпотетичного підсилювального елемента (ПЕ).

Малопотужна вхідна дія змінює параметри ПЕ так, що пропорційно до неї змінюється потужність, яка виділяється в R_H за рахунок $\varepsilon_{дж}$. Як ПЕ добре було б мати, наприклад, електронний прилад із ВАХ, які наведені на рис. 1 б, в.

Залежність $I_{вх} = f(U_{вх})$ на рис. 1 б – пряма лінія, тож змінам вхідної напруги (вхідної дії) відповідають пропорційні зміни вхідного струму. Це повинно забезпечувати точне реагування ПЕ на зміни вхідної дії. Із залежності $I_{пе} = f(U_{пе})$ (рис. 1 в) бачимо, що фіксованій величині вхідної дії, яка проявляється у вигляді

фіксованої величини $I_{ВХ}$, відповідає фіксована реакція в силовому колі ПЕ, а саме – фіксоване значення струму через ПЕ $I_{ПЕ}$, що не залежить від величини напруги на ньому $U_{ПЕ}$.

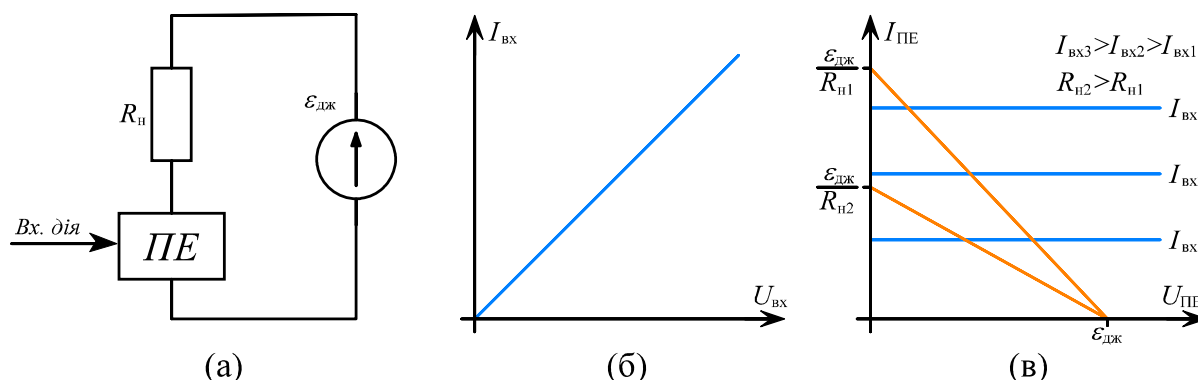


Рис. 1 Елементарна схема підсилення (а), вхідна (б) та вихідні (в) ВАХ гіпотетичного ідеального підсилювального елемента

Якщо $U_{ПЕ}$ та $I_{ПЕ}$ перевищують за величиною $U_{ВХ}$ та $I_{ВХ}$, маємо підсилювач, який відтворює в $R_{н}$ всі зміни вхідної дії. У цій лабораторній роботі зможемо перевірити, чи поводить ся транзистор в електричному колі так, як ПЕ з рис. 1.

Широко розповсюджені транзистори з двома $p-n$ переходами, котрі мають назву **біполярних**. Термін «біполярний» підкреслює, що процеси в цих транзисторах пов'язані зі взаємодією носіїв заряду двох типів: електронів і дірок. Для виготовлення транзисторів використовують здебільшого кремній та германій. Два $p-n$ переходи створюють за допомогою тришарової структури, що дає змогу отримати два типи приладів: $n-p-n$ і $p-n-p$ (рис. 2).

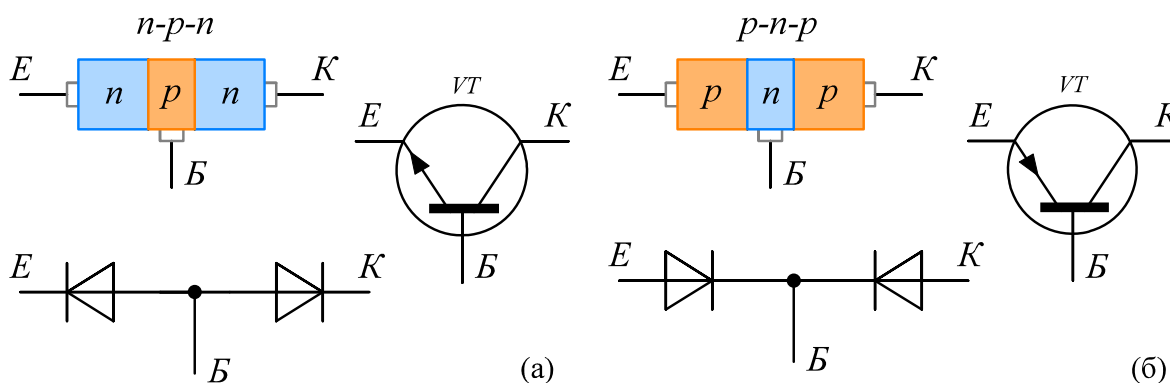


Рис. 2. Схематична будова та умовне позначення транзисторів $n-p-n$ (а) та $p-n-p$ (б) типів

Центральний шар біполярних транзисторів має назву «база». Зовнішній лівий, який є джерелом носіїв заряду (електронів чи

дірок) і, головню, створює струм приладу, називається *емітером* (рис. 2). Правий зовнішній шар, котрий приймає заряди від емітера, називається *колектором*. На перехід емітер-база напруга подається у прямому напрямку, тому навіть при незначній напрузі через перехід тече великий струм. На перехід колектор-база напруга подається у зворотному напрямку. Зазвичай її значення на кілька порядків перевищує значення напруги на переході емітер-база.

Підсилювальні властивості біполярного транзистора пов'язані з тим, що *p-n* переходи в ньому взаємодіють один з одним, що забезпечується технологічними особливостями виконання тришарової структури: емітер виготовлено з великою кількістю домішки – він має найбільшу кількість вільних носіїв заряду; база тонка і з малою кількістю основних носіїв заряду; колектор – масивний, як і емітер, але з трохи меншою, ніж у емітера, кількістю вільних носіїв.

Розглянемо роботу транзистора типу *n-p-n*. Для початку припустімо, що увімкнено лише перехід колектор-база: до нього прикладено напругу джерела колекторного живлення E_K , як показано на рис. 3 а. Емітерний струм I_E дорівнює нулю, у транзисторі протікає лише незначний зворотний струм через колекторний перехід, бо через нього рухаються неосновні носії заряду, котрі зумовлюють початковий струм I_{K0} .

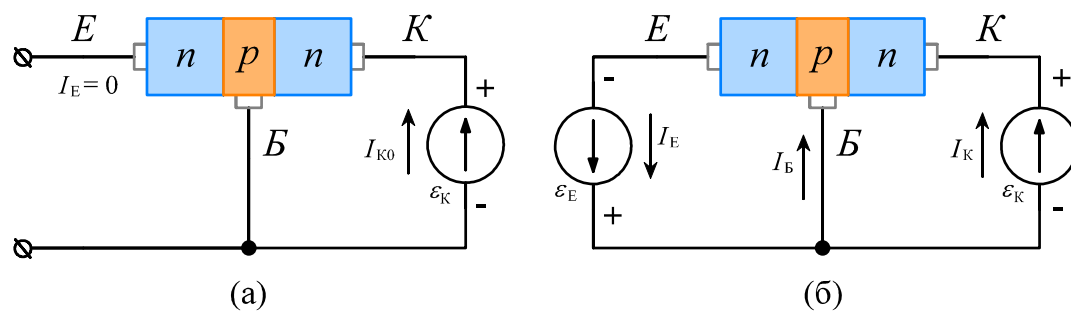


Рис. 3. Схеми вмикання *n-p-n* транзистора без вхідного сигналу (а) та з ним (б)

Якщо під'єднати емітерне джерело живлення ϵ_E , як показано на рис. 3 б, емітерний перехід зміщується у прямому напрямку, через нього тече струм I_E певної величини.

Оскільки зовнішню напругу прикладено до емітерного переходу в прямому напрямку, електрони долають перехід і потрапляють у зону бази, де частково рекомбінують з її дірками,

утворюючи струм бази I_B . Більшість електронів, котрі є неосновними носіями для бази, завдяки дрейфу досягають зони колектора, де вони стають основними носіями, і, потрапляючи під дію поля E_K , утворюють колекторний струм I_K . Струм I_K практично дорівнює I_E .

Рівняння струмів транзистора в усталеному режимі має вигляд:

$$I_E = I_B + I_K.$$

Зв'язок між струмом емітера і струмом колектора характеризується *коефіцієнтом передачі струму*, який вказує, яка частка повного струму через емітерний перехід досягає колектора:

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}.$$

Для сучасних транзисторів $\alpha = 0,9 \dots 0,995$.

Транзистор *p-n-p*-типу діє аналогічно, тільки струм утворюється переважно дірками, а полярність під'єднання протилежна.

Як елемент електричного кола транзистор зазвичай використовується так, що один із його електродів вхідний, другий вихідний, а третій – спільний для входу та виходу. У коло вхідного електрода вмикається джерело вхідного змінного сигналу, який треба підсилити за потужністю, а у коло вихідного – навантаження, у якому виділяється підсилена потужність. Залежно від того, який електрод спільний для вхідного і вихідного кіл, як це показано на рис. 4, розрізняють три схеми вмикання транзисторів: зі спільною базою (СБ), емітером (СЕ) або колектором (СК).

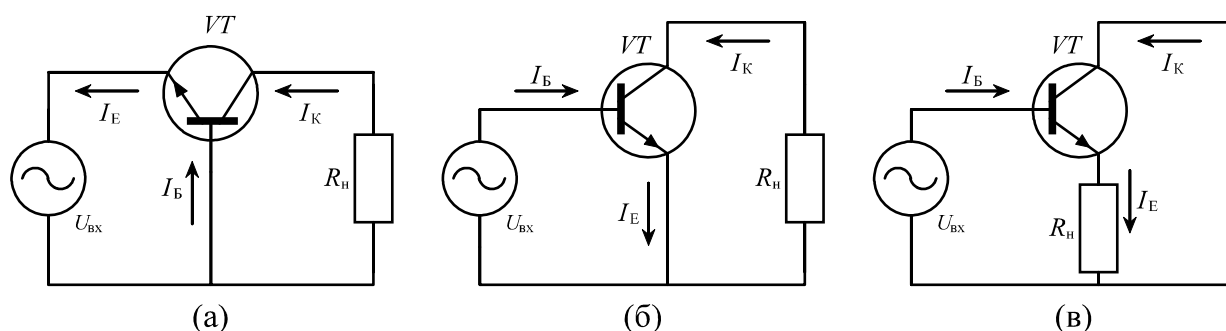


Рис. 4. Схеми вмикання транзистора з СБ (а), СЕ (б) та СК (в)

На практиці найчастіше використовується підключення з СЕ як таке, котре має найбільший коефіцієнт підсилення за потужністю. При ньому I_B – вхідний струм, I_K – вихідний (рис. 5).

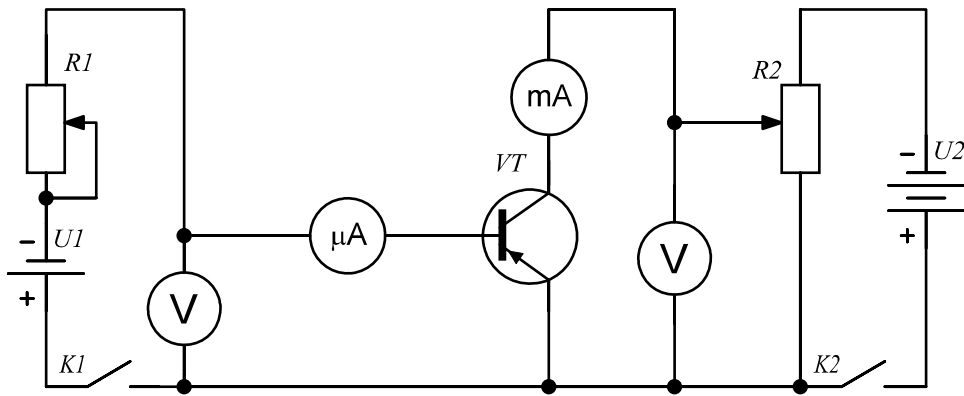


Рис. 5. Типова схема для дослідження біполярного транзистора

Для електричних схем на біполярних транзисторах існує чотири сім'ї *статичних вольт-амперних характеристик* (статичних, оскільки залежність між двома параметрами електричного кола визначається при фіксованому третьому): сім'я вхідних, вихідних, перехідних (зворотного зв'язку) та характеристик керування (прямої передачі). Для кожної схеми вмикання з чотирьох сімей статичних ВАХ незалежні лише дві. Для аналізу роботи транзистора та визначення його параметрів частіше використовують перші дві.

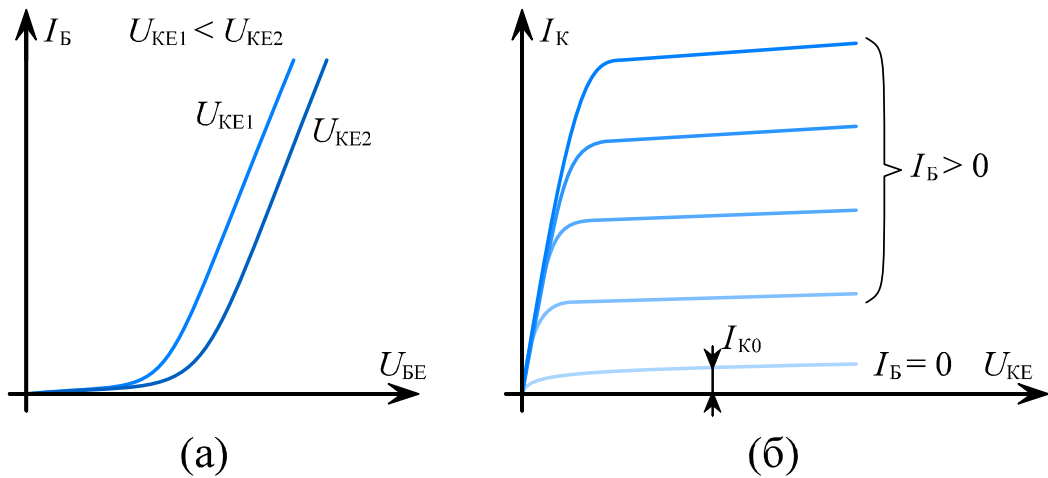


Рис. 6. Статичні вхідні (а) та вихідні (б) ВАХ біполярного транзистора, увімкненого за схемою з СЕ

Для схеми з СЕ статичні характеристики, наведені на рис. 6 – це залежності:

$$\text{вхідні} - I_B = f(U_{BE})|_{U_{KE}=\text{const}};$$

$$\text{вихідні} - I_K = f(U_{KE})|_{I_B=\text{const}}.$$

Отримавши залежності, визначають такі параметри транзистора, як вхідний опір $R_{вх}$, вихідний опір $R_{вих}$ та коефіцієнт підсилення за струмом β :

$$R_{вх} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=const} \quad (1)$$

$$R_{вих} = \left. \frac{\Delta U_{KE}}{\Delta I_K} \right|_{I_B=const} \quad (2)$$

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=const} \quad (3)$$

Порівняння статичних характеристик біполярних транзисторів з характеристиками гіпотетичного підсилюючого елемента (рис. 1) демонструє, що транзистор – далеко не ідеальний елемент. Тим не менше, ці електронні прилади широко використовуються для реалізації конкретних підсилювачів, а їхні недоліки компенсуються відповідними схемотехнічними прийомами.

Хід роботи

Вправа 1. Вивчення переходів біполярного транзистора

1. Під'єднайте до транзистора на монтажній панелі модулі з контактами для вимірювання опорів переходів транзистора.
2. Переведіть мультиметр у режим перевірки діодів. З'ясуйте, чи справді переходи колектор-база та емітер-база мають односторонню провідність, а між емітером і колектором не протікає струм при $I_B = 0$.
3. Переведіть мультиметр у режим вимірювання опору. Визначте прямі $R_{КБП}$, $R_{ЕБП}$ та зворотні $R_{КБЗ}$, $R_{ЕБЗ}$ опори переходів колектор-база та емітер-база. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
4. Виміряйте силу зворотного струму колектора $I_{КБЗ}$. Для цього до переходу колектор-база прикладіть зворотну напругу джерела живлення 100 В. Порівняйте отримане значення з типовим для такого транзистора.

Вправа 2. Визначення параметрів біполярного транзистора

1. Зберіть схему для дослідження характеристик біполярного $p-n-p$ транзистора (рис. 5).
2. Встановіть потенціометром R_2 напругу $U_K = 3$ В. Змінюючи значення напруги переходу емітер-база, простежте та запишіть

- ряд значень залежності $I_B(U_{BE})$. Напруга U_K має залишатися постійною, а колекторний струм – **не більший за 200 мА**.
3. Побудуйте вхідну характеристику транзистора. За формулою (1) визначте вхідний опір транзистора $R_{вх}$.
 4. Встановіть значення сили струму на базі $I_B = 20 \mu\text{А}$. Змінюючи значення напруги U_K , простежте та запишіть ряд значень залежності $I_K(U_{KE})$. Сила струму бази має залишатися постійною.
 5. Повторіть попередній пункт для $I_B = 40 \mu\text{А}$.
 6. Побудуйте сім'ю вихідних характеристик транзистора.
 7. Визначте вихідний опір транзистора $R_{вих}$ за формулою (2).
 8. Обчисліть коефіцієнт підсилення струму β згідно з (3).

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Порівняйте роботу схем включення транзистора з рис. 4.
3. Режими роботи транзистора.
4. Коефіцієнт підсилення транзистора.
5. Чи підпорядкована сила струму колектора закону Ома? Чому?
6. Чи можна розглядати транзистор як два діоди, з'єднані разом? Чи можна використовувати таке увімкнення у схемах?
7. * Чи залежить статичний коефіцієнт β від спаду напруги між колектором та емітером? Поясніть.

Лабораторна робота №6

Резонанс напруг у послідовному контурі

Мета роботи: дослідити явище резонансу напруг в електричному коливальному контурі.

Обладнання: поле набірне «Електроніка», мультиметри, генератор сигналів, осцилограф.

Теоретичні відомості

В електричному колі, яке складається з послідовно з'єднаних резистора з опором R , конденсатора ємністю C та котушки з

індуктивністю L , електричний струм протікати не буде, оскільки конденсатор не проводить постійний струм. Проте змінний струм у такому колі встановлюється, і сила струму визначається за законом Ома для кола змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (1)$$

де Z – повний опір ділянки кола, або імпеданс, що визначається як

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (2)$$

Тут R – активний, а X , X_L та X_C – відповідно повний реактивний, реактивний індуктивний та реактивний ємнісний опори кола:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}, \quad (3)$$

де $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота коливань змінного струму, f – частота.

Унаслідок того, що реактивні індуктивні та ємнісні опори (а також реактивні індуктивні та ємнісні провідності) за певної частоти можуть взаємно компенсуватися, трапляються випадки, коли в колі, яке має реактивні елементи, повний реактивний опір (чи повна реактивна провідність) дорівнює нулеві. У такому колі струм збігається за фазою з напругою, прикладеною до цього кола. Як наслідок, коло загалом поводить себе як активний опір. При цьому значення сили струму в послідовному контурі зростає, оскільки $R < Z$, і виникає *резонанс*.

Явище, в якому струм у колі, за наявності у ньому реактивних елементів (індуктивностей та ємностей), збігається за фазою з напругою, прикладеною до цього кола, називають *резонансом*. Під час резонансу електричного кола із мережі надходить тільки активна енергія, а реактивна енергія циркулює (коливається) всередині схеми між котушкою індуктивності та конденсатором.

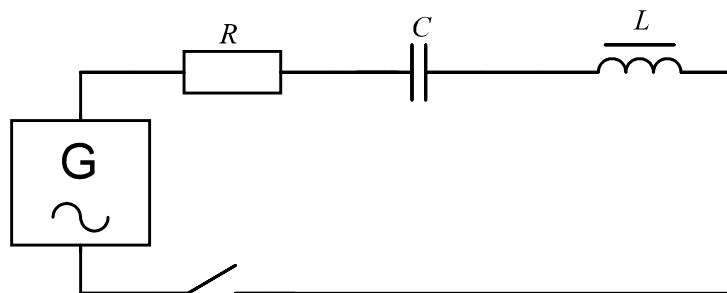


Рис. 1. Послідовне з'єднання R , L та C

Необхідною умовою **резонансу напруг** є послідовне з'єднання елементів з індуктивністю та ємністю.

Повний опір кола, зображеного на рис. 1, визначається згідно з (2). Резонанс настає, якщо виконується умова:

$$X = X_L - X_C = 0, \quad \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

або ж

$$\omega^2 LC = 1. \quad (4)$$

Явище, яке виникає при послідовному з'єднанні індуктивних і ємнісних елементів за умови $\omega L = 1/\omega C$, називається **резонансом напруг**.

Як впливає з рівняння (4), резонансу в колі можна досягнути, змінюючи частоту, індуктивність або ємність. Значення кутової частоти, індуктивності та ємності, за яких настає резонанс, визначаються з рівняння

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}, \quad C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (5)$$

Частоти $\omega_0 = 2\pi f_0$ та f_0 називають резонансними, вони – власні частоти контуру. За таких частот у замкненому контурі RLC при відімкненні джерела напруги U і закороченні решти схеми (рис. 1) відбувається вільне колювання енергії між індуктивністю і ємністю.

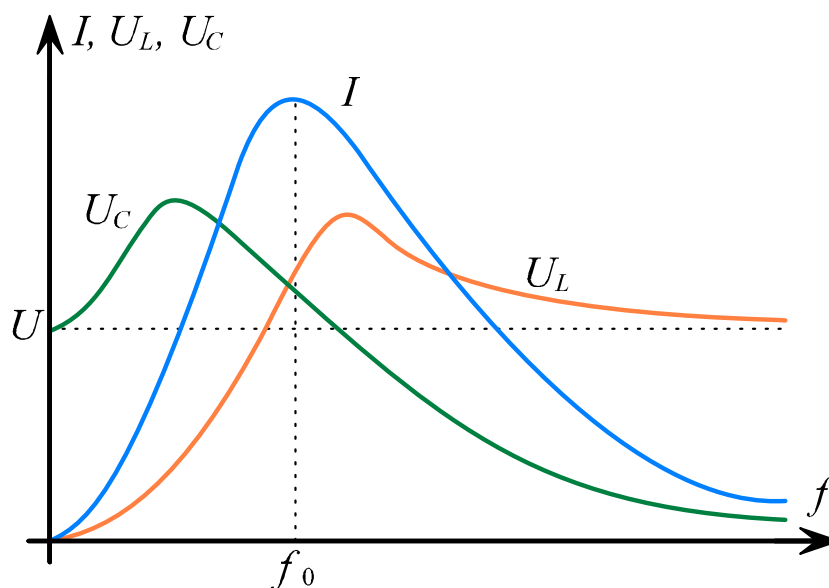


Рис. 2. Залежність напруг і струму в послідовному RLC -контурі від частоти

Оскільки під час резонансу повний опір Z гілки має найменше значення $Z = R$, то струм у гілці при резонансі має найбільше значення (рис. 2). Напруги U_L і U_C під час резонансу майже однакові за величиною, але різні за знаком, і прикладена до кола напруга дорівнює $U = U_R = RI$. Під час резонансу може виявитися (у разі великих значень X_L та X_C і порівняно малого $R \ll X_L, X_C$), що значення напруг U_L і U_C будуть значно більші, ніж значення прикладеної напруги U :

$$U_L = X_L I, \quad U_C = X_C I \quad (6)$$

Отже, під час резонансу або в режимах, близьких до резонансу, напруги на котушці та конденсаторі можуть значно перевищувати прикладену до схеми напругу джерела. Це явище широко використовують у радіоелектронних пристроях, зокрема для передавання та реєстрування сигналів, та в заводських промислових установках. Одна з основних характеристик коливного контуру – його **добротність** Q , безрозмірна величина, що пропорційна відношенню кількості енергії, що коливається в контурі, до частини енергії, яка розсіюється в колі за один період:

$$Q = \frac{R_0}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \frac{U_L}{U_{\text{вх}}}, \quad (7)$$

де $R_0 = \sqrt{L/C}$ – характерний (хвильовий) опір кола за умови резонансу, U_L та $U_{\text{вх}}$ – спад напруги на індуктивності та на вході контуру відповідно.

Хід роботи

Вправа 1. Вивчення параметрів коливного LC -контуру

1. Складіть послідовний LC -контур з генератором (рис. 1).
2. Зніміть залежність сили струму в колі від частоти при постійній напрузі на виході генератора.
3. Побудуйте графік залежності $I(f)$.
4. З допомогою графіка визначте резонансну частоту f_0 .
5. Обчисліть індуктивність L_0 з рівняння умови резонансу (5).
6. Виміряйте індуктивність мультиметром-індуктометром, позначте її L_m . Порівняйте отримані значення L . Обчисліть похибки вимірювання індуктивності.

Вправа 2. Вивчення добротності коливного RLC -контуру

1. Виміряйте активний опір контуру з вправи 1 з допомогою омметра, для цього приберіть з контуру конденсатор.
2. Обчисліть значення добротності контуру за формулою (7).
3. Додайте в коло резистор для утворення RLC -контур.
4. Виконайте пункти 2 та 3 попередньої вправи, при цьому графік $I_2(f)$ побудуйте разом із попереднім.
5. Виміряйте активний опір контуру. Розрахуйте добротність.
6. Зробіть активний опір контуру мінімальним. Для цього замість міліамперметра підключіть у контур резистор з опором 1 Ом та вимірюйте на ньому спад напруги, який буде дорівнювати силі струму в колі. Зніміть залежність $I_3(f)$.
7. Побудуйте третій графік $I_3(f)$ разом із попередніми. Виміряйте активний опір. Визначте добротність.
8. Проаналізуйте характер залежності добротності від активного опору. Для цього побудуйте графік $Q(R)$.
9. Підключіть у коло осцилограф каналом X до джерела, а Y – до активного опору. Зауважте, що резонанс настає за умови рівності фаз напруги та струму, запишіть значення $f_{0\text{осц}}$. Порівняйте його з частотою f_0 .
10. Визначте $L_{0\text{осц}}$, використовуючи частоту $f_{0\text{осц}}$. Порівняйте отримане значення з L_m .

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Резонанс у послідовному контурі. Причини виникнення. Застосування.
3. Резонанс у паралельному контурі. Причини виникнення. Застосування.
4. Проаналізуйте вплив на явище резонансу активного опору в контурі.
5. Що таке добротність контуру? Про що вона свідчить?
6. Чому при послідовному з'єднанні елементів кола зручно використовувати імпеданс, а при паралельному – адмітанс?
7. * При резонансі в послідовному контурі спад напруги на індуктивності L дещо більший за спад напруги на ємності C , що також видно з рис. 2. Чому так відбувається?

Лабораторна робота №7

Елементи комп'ютерної логіки

Мета роботи: дослідити принципи роботи логічних елементів.

Обладнання: макети логічних елементів, джерело живлення 5 В, макетна плата, мультиметри, двоканальний осцилограф.

Теоретичні відомості

Основа сучасної комп'ютерної схемотехніки – потенціальна логіка, яка при проєктуванні схем використовує логічні елементи. Побудовані з напівпровідникових діодів та транзисторів, вони реалізують логічні дії булевої алгебри.

На входах і виходах логічних елементів діють тільки потенціальні сигнали. На шляху такого сигналу не можна вмикати конденсатори чи обмотки трансформаторів, що сприяє спрощенню технології виготовлення мікросхем. Потенціальна логіка реалізує чимало булевих функцій (серед яких як прості НЕ, ЧИ, І, так і складніші НЕ ЧИ, НЕ І, виключальне ЧИ та інші), що полегшує застосування автоматизованих методів проєктування. Окрема категорія логіки – запам'ятовувальні елементи, такі як тригери, регістри та лічильники.

Залежно від елементів електроніки логіку потенціальних елементів поділяють на діодну (ДЛ), діодно-транзисторну (ДТЛ), транзисторну (ТЛ), транзисторно-транзисторну (ТТЛ) тощо. Діодні елементи не посилюють вхідних сигналів і не можуть виконувати операцію НЕ, тому нині не використовуються.

При роботі логічних елементів за замовчуванням вважають, що високий рівень напруги U відображає логічну 1, а низький – логічний 0.

Логічна дія **ЧИ**, або *диз'юнкція* – це булева функція $F = X_1 \vee X_2$, (X_1 чи X_2), результатом якої є нуль лише в тому разі, якщо обидва вхідні операнди мають значення нуль. Логіка роботи логічного елемента ЧИ на два входи подана в таблиці істинності на рис. 1 г.

Високий рівень напруги U_{oh} на виході елемента ЧИ встановлюється при подачі на один або обидва входи високих рівнів

напруги U_{ih} , при яких відкриваються відповідні кремнієві діоди. В резисторі навантаження R_H тече вихідний струм I_H , визначений за формулою

$$I_{oh} = \frac{U_{oh}}{R_H}. \quad (1)$$

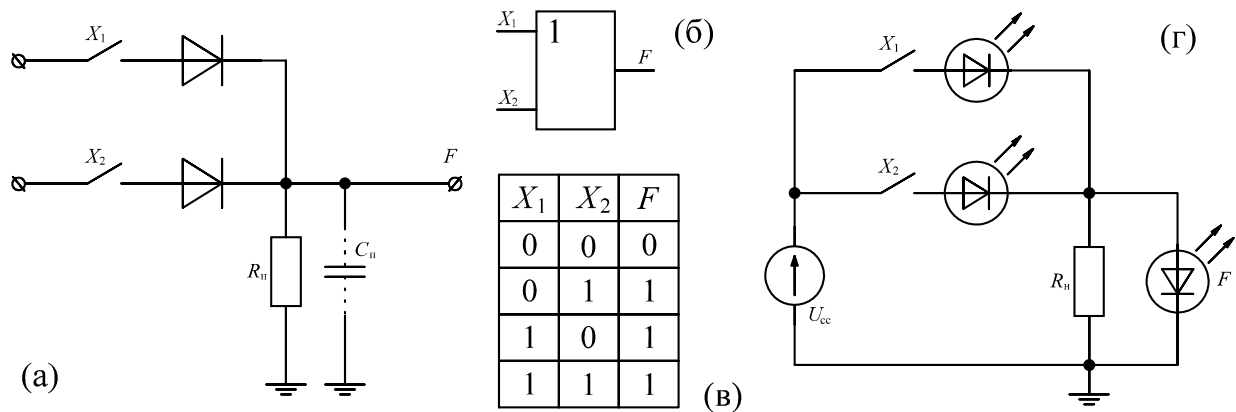


Рис. 1. Загальна схема (а), умовне графічне позначення (б), таблиця істинності (в) та схема дослідження (г) діодного елемента ЧИ

Значення вихідного високого рівня U_{oh} залежить від вхідних напруг:

$$U_{oh} = U_{ih} - U_{д}, \quad (2)$$

де $U_{д} = 0.6 \dots 0.8$ В – пряме падіння напруги на кремнієвому діоді.

Якщо на обох входах низькі рівні напруги $U_{il} < 0.4$ В, діоди закриті, струм у колі навантаження не протікає і вихідна напруга U_{ol} майже дорівнює нулю. На виході елементів зазвичай є паразитна ємність C_H , яка негативно впливає на швидкодію.

Логічна дія **I**, або **кон'юнкція** – це булева функція $F = X_1 \cdot X_2$, (X_1 і X_2), результат якої одиниця лише в тому разі, якщо обидва вхідні операнди мають значення один (рис. 2).

Високе значення напруги U_{oh} на виході схеми отримується лише за умови, якщо на бази обох транзисторів подається високий вхідний сигнал $U_{ih} = 5$ В. Тоді обидва транзистори відкриваються, і через опір навантаження протікає максимальний струм (опір транзисторів дуже малий):

$$U_{oh} = U_{cc} - 2U_{KE} = I_H R_H, \quad (3)$$

де $U_{KE} = U_{ol} < 0.4 \text{ В}$ – спад напруги на переході колектор-емітер відкритого транзистора, U_{cc} – напруга джерела живлення схеми.

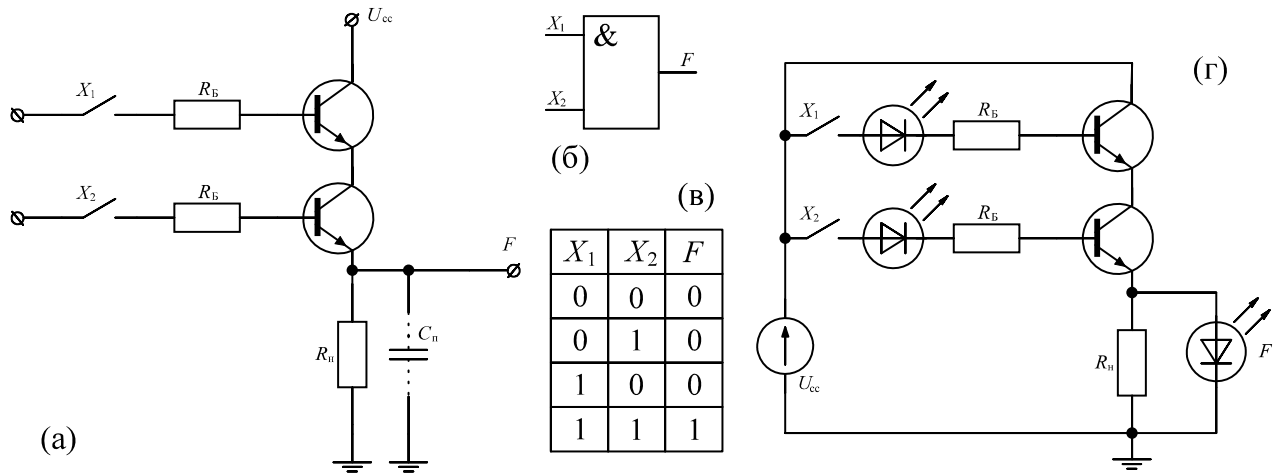


Рис. 2. Загальна схема (а), умовне графічне позначення (б), таблиця істинності (в) та схема дослідження (г) транзисторного елемента І

Значення опору резистора R_B вибирають у кілька разів більшим за R_H і таке, щоби встановити робочу точку транзистора у відкритому режимі. У такий спосіб обмежується максимальна сила струму в схемі та регулюється значення потужності, яка розсіюється логічним елементом.

Логічна дія **НЕ**, або *заперечення* – це булева функція $F = \bar{X}$ (не X), результат якої значення, протилежне до значення операнда (рис. 3).

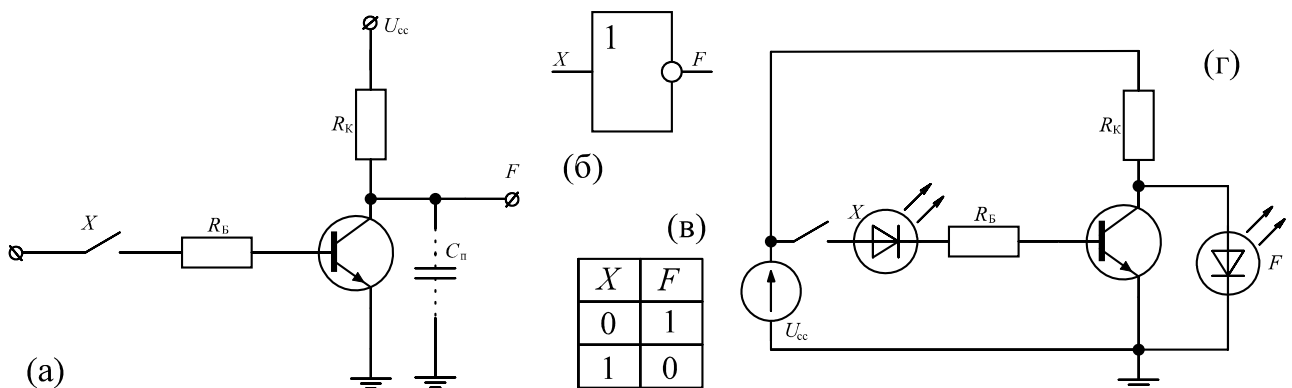


Рис. 3. Загальна схема (а), умовне графічне позначення (б), таблиця істинності (в) та схема дослідження (г) транзисторного елемента НЕ

Елемент НЕ (інвертор) не можна реалізувати з використанням лише діодів.

Якщо на вхід елемента подається низьке значення напруги $U_{ih} < 0.4$ В, колекторний і базовий переходи транзистора закриті. Тоді в колі колектора тече тільки малий обернений струм колекторного переходу $I_{K0} < 1$ мкА, а рівень напруги на виході

$$U_{oh} = U_{cc} - I_{K0}R_K \approx U_{cc}. \quad (4)$$

Щоб забезпечити низький рівень напруги на виході U_{ol} , потрібно на вхід подати $U_{ih} \approx 5$ В. У такому разі транзистор перебуватиме у відкритому стані, а колектором проходитиме струм високого значення I_K :

$$I_K = \frac{U_{cc} - U_{KE}}{R_K}. \quad (5)$$

Для встановлення такого струму потрібний певний струм бази

$$I_B = \frac{SI_K}{\beta}, \quad (6)$$

де β – коефіцієнт передачі базового струму (коефіцієнт підсилення) в транзисторі, увімкненому за схемою зі спільним емітером, S – коефіцієнт насичення біполярного транзистора, який працює в ключовому режимі.

Значення опору резистора бази R_B можна обчислити за співвідношенням

$$R_B = \frac{U_{ih} - U_{BE}}{I_B}, \quad (7)$$

де $U_{BE} \approx 0.6 \dots 0.8$ В – спад напруги на відкритому переході база-емітер.

Кожен із логічних елементів розсіює певну кількість електричної потужності. Величину розсіяної потужності для описаного елемента НЕ можна оцінити зі співвідношення

$$P_d = P_{dT} + P_{dR_K} + P_{dR_B} = U_{KE}I_K + I_K^2R_K + \frac{U_B^2}{R_B}. \quad (8)$$

Тригер – це запам'ятовувальний елемент із двома стійкими станами, зміна яких відбувається під дією вхідних сигналів. Як елемент комп'ютера, він призначений для зберігання одного біту

інформації, тобто логічних 0 або 1. Існує кілька видів тригерів – RS , JK , T , D -тригери тощо.

Схему тригера (рис. 4) проєктують так, що на одному з її виходів завжди був високий рівень сигналу (відповідає логічній одиниці), а на іншому – низький (відповідає логічному нулю). Керуючий сигнал, який подають на один із входів тригера, зумовлює зміну станів виходів на протилежні. Така зміна відповідає запису чи стиранню біту інформації в комірці пам'яті.

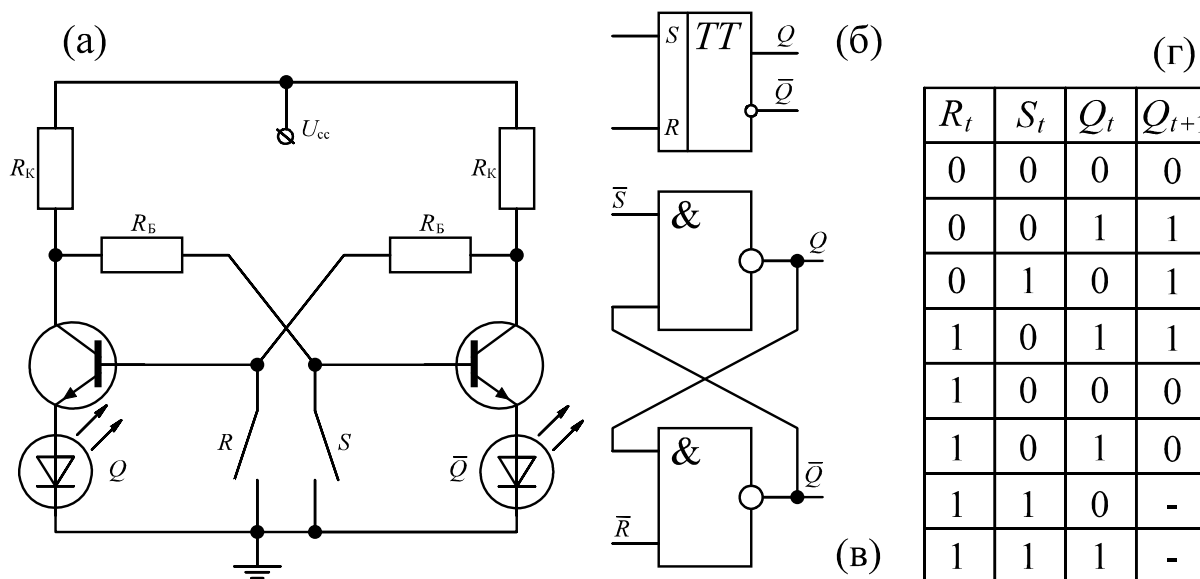


Рис. 4. Спрощена схема реалізації (а), умовне графічне позначення (б), логічна схема (в) і таблиця істинності (г) та RS -тригера

RS -тригером називають запам'ятовувальний елемент з окремими інформаційними входами для перемикання його в стан 0 (R -вхід, RESET) і в стан 1 (S -вхід, SET). Величина рівня сигналу на виході Q визначає, який саме стан в тригера на певний момент часу. У таблиці переходів RS -тригера (рис. 4) R_t , S_t , Q_t – значення змінних у момент часу t ; Q_{t+1} – стан тригера після перемикання.

Хід роботи

Вправа 1. Вивчення роботи логічних елементів

1. Проаналізуйте макет логічного елемента ЧИ, зібраного на монтажній платі. Порівняйте його зі схемою на рис. 1 а.
2. Під'єднайте макет до джерела живлення напругою $U_{cc} = 5$ В.
3. Заповніть таблицю істинності для елемента. Порівняйте отриману таблицю з теоретичною.

4. Повторіть пункти 1 – 3 для елементів І, НЕ та для *RS*-тригера.
5. Під'єднайте виходи елементів ЧИ та НЕ до входів елемента І, напругу U_{cc} змініть на 5.5 В. Накресліть і заповніть таблицю істинності для всіх можливих комбінацій вхідних сигналів X_1 , X_2 та X_3 .

Вправа 2. Розрахунок параметрів простого елемента НЕ

1. Складіть схему елемента НЕ (рис. 3 а), використовуючи макетну плату та набір елементів.
2. Підведіть до схеми постійну напругу живлення $U_{cc} = 5$ В.
3. Під'єднайте до входу та виходу схеми перший і другий канали осцилографа.
4. Подайте високу напругу U_{in} на вхід елемента, спостерігаючи за зміною показів осцилографа.
5. Визначте з даних осцилографа спад напруги U_{ol} на виході елемента. За формулою (5) обчисліть силу струму I_K .
6. За формулою (6) визначте силу струму бази I_B при заданих коефіцієнтах підсилення β та насичення S .
7. Обчисліть опір R_B за формулою (7). Для цього значення U_{BE} визначте мультиметром між базою та емітером, а U_{in} – за осцилографом. Порівняйте розраховане значення з реальним опором резистора бази R_B .
8. За формулою (8) оцініть значення потужності, яка розсіюється елементом.

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. На макеті діодного елемента ЧИ немає діодів. Чому? Чи правильно функціонує схема?
3. На макеті транзисторного елемента І є додаткові резистори. Яке їх призначення? Як вони впливають на роботу елемента?
4. Поясніть роботу транзистора в ключовому режимі. Яка природа коефіцієнта насичення біполярного транзистора?
5. Дайте оцінку кількості тепла, яке б виділяв процесор, виготовлений із відповідної кількості (кількість виберіть на основі існуючих рішень) лише описаних у роботі елементів НЕ. Наскільки отримане значення відрізняється від реальних? Чому?
6. * Поясніть принцип роботи схеми, зображеної на рисунку 4 а.

7. * Співвідношення (8) дає можливість оцінити розсіяну потужність схеми, коли транзистор відкритий. Як можна визначити цей параметр для інших режимів роботи? Який режим матиме найбільше значення?

Лабораторна робота №8

Сонячна енергія та сонячні елементи

Мета роботи: дослідити енергетичні параметри сонячного випромінювання, особливості перетворення сонячної енергії на електричну та електричні характеристики сонячних елементів.

Обладнання: набір для дослідження сонячної енергії, люксметр, опори навантаження, мультиметри, пірометр, лабораторний штатив, штангенциркуль.

Теоретичні відомості

Сонце – безмежне з практичного погляду джерело енергії. Використання сонячної енергії людством почалося ще з 50-х років минулого століття при освоєнні космосу: батареї сонячних елементів розміщували на штучних супутниках Землі, у такий спосіб забезпечуючи їх незалежним джерелом енергії на тривалий час. В основі роботи *сонячного елемента*, або ж *фотоелектричного перетворювача* (ФЕП), який є структурною одиницею сонячної батареї, лежить різновид *внутрішнього фотоефекту* – *вентильний фотоефект*.

Вентильний фотоефект – явище виникнення електрорушійної сили (е.р.с., або фото-е.р.с.) при освітленні області контакту двох речовин, зазвичай металів чи напівпровідників (НП). Залежно від типу матеріалів така структура може формувати контакт Шотткі (метал + НП), *p-n-перехід* (*p*-НП + *n*-НП) або ж гетероструктуру (два різні НП). Широкого застосування набули два останні, оскільки ККД для контактів Шотткі незначний.

В основі роботи вентильного фотоефекту – явище *внутрішнього фотоефекту*, тобто збільшення електропровідності

НП чи діелектриків шляхом утворенням вільних носіїв заряду в речовині під впливом електромагнітного випромінювання. Опромінення фотонами певних довжин хвиль у НП спричинює генерацію пар носіїв заряду, які потім завдяки наявності *p-n*-переходу розділюються в просторі і забезпечують виникнення фото-е.р.с. φ (рис. 1 а), а висота потенціального бар'єра при цьому знижується на величину, рівну φ . Саме комбінація впливів опромінення та роботи потенціального бар'єра дає змогу перетворювати променеву енергію на електричну.

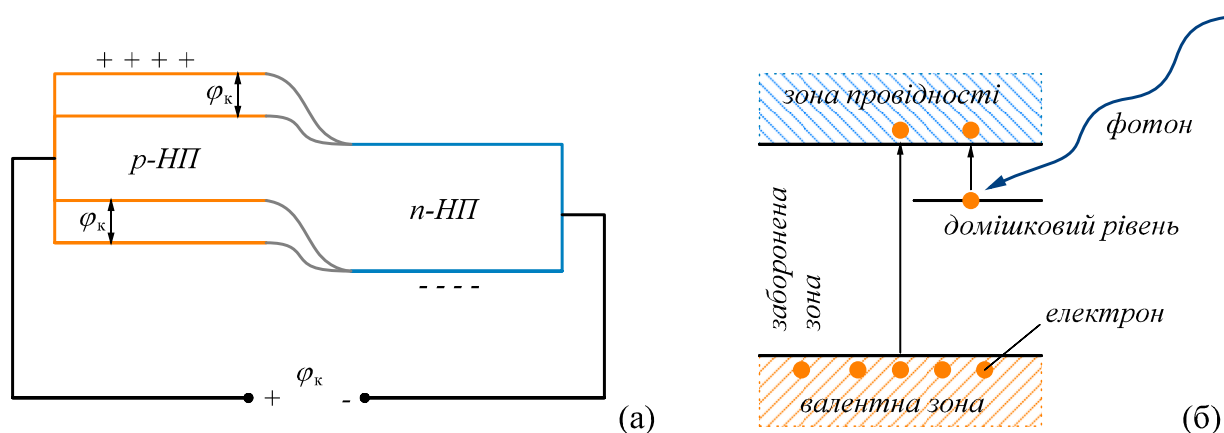


Рис. 1. Зменшення висоти потенціального бар'єра для електронів і дірок (а) та генерація носіїв заряду (б) в напівпровідниках під впливом освітлення

Для виникнення внутрішнього фотоефекту енергія квантів світла має відповідати умові *червоної межі фотоефекту*, тобто її має бути достатньо, щоб перевести електрон із валентної зони чи рівня у зону провідності (рис. 1 б):

$$h\nu \geq \varepsilon_{\text{ч.ф.}}$$

де $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

Як матеріал для створення ФЕП використовують напівпровідники та їх поєднання, найчастіше це Si, Ge, InSe, GaAs та гетероструктури, виготовлені на їх основі. Втім, ефективність роботи комірок залежить від багатьох параметрів, зокрема від спектральної чутливості матеріалів (рис. 2 а). **Спектральна чутливість** визначається відношенням фотоструму до величини потоку світлової енергії монохроматичного випромінювання певної довжини хвилі. По суті, вона визначає ефективність використання

матеріалу. З іншого боку, сонячні панелі проєктуються для перетворення сонячного випромінювання.

Спектр випромінювання Сонця дуже близький до спектра *абсолютно чорного тіла* з температурою ~ 5800 К (рис. 2 б). Його характеризують *енергетичними величинами* – опроміненістю та спектральною опроміненістю. **Опроміненість** E_e – енергія потоку випромінювання, що падає на одиницю площі, $\text{Вт}/\text{м}^2$. **Спектральна опроміненість** $E_{e,\lambda}$ – опроміненість, яка припадає на одиницю довжини спектра, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм})$. Частина променів поглинається атмосферою, тому інтегральна опроміненість усього спектра значно зменшується: якщо в космосі $E_e \approx 1353 \text{ Вт}/\text{м}^2$, то на рівні моря $\sim 925 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

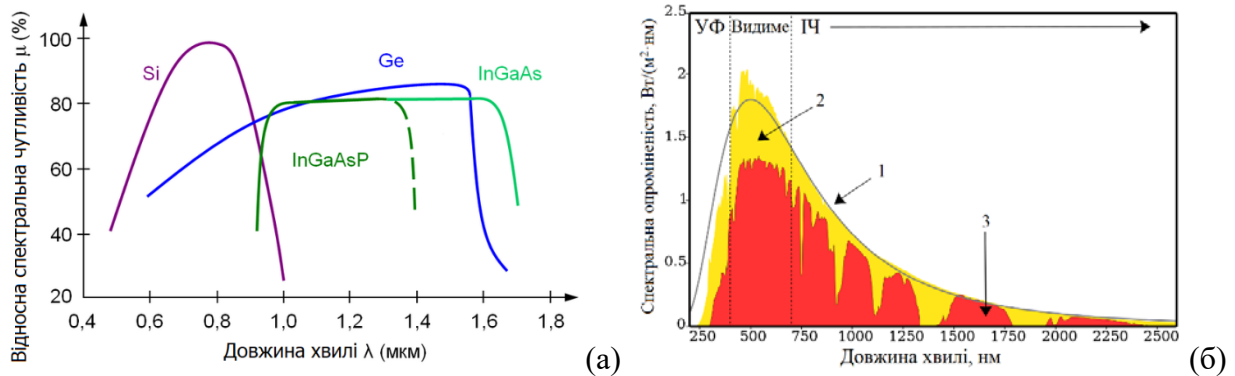


Рис 2. Відносна спектральна чутливість НП і гетероструктур (а) та спектральні графіки (б): 1 – абсолютно чорне тіло з $T = 5778$ К, 2, 3 – спектри випромінювання Сонця у відкритому космосі та на рівні моря відповідно

Спектр сонячного випромінювання, яке потрапляє на Землю, можна поділити на три основні області: ультрафіолетове випромінювання (УФ, ≈ 3 % від E_e), видиме світло (≈ 44 %) та інфрачервоне випромінювання (ІЧ, ≈ 53 %). УФ частину спектра умовно поділяють на три частини: А, В, та С. УФ-С – жорсткий ультрафіолет, повністю затримується озоновим шаром в атмосфері. УФ-В – середній, значно поглинається атмосферою, а та частина, яка потрапляє на поверхню Землі, на 97 % блокується склом. УФ-А – м'який (ближній) ультрафіолет, який мало затримується атмосферою, але на ~ 37 % блокується склом. ІЧ частина спектра теж частково блокується атмосферою (в основному, водою, O_2 та CO_2) і може бути заблокована склом на певних частинах спектра.

Отже, при проектуванні комірки сонячної батареї важливий вибір як матеріалів ФЕП, так і його покриття. Узагальнена структура комірки – металева підкладка, на якій шарами розміщено n -НП, p -НП, вузькі металеві контакти та захисте загартоване скло (рис. 1 а). Часто таку шарувату структуру поліпшують додаванням додаткових шарів, наприклад антивідбиваючих, які збільшують коефіцієнт поглинання світла.

Як уже зазначалося, така структура відповідає напівпровідниковому p - n -переходу. Якщо контакт не освітлений, то ВАХ такого переходу має звичайний вигляд (рис. 3 б). При освітленні крива зміщується по осі сили струму вниз, і виникає фото-е.р.с., здатна створювати фотострум, від’ємний щодо напруги прямого підключення. Саме цю частину характеристики, тобто $I_{зв}(U_{зв})$, використовують для визначення параметрів ФЕП.

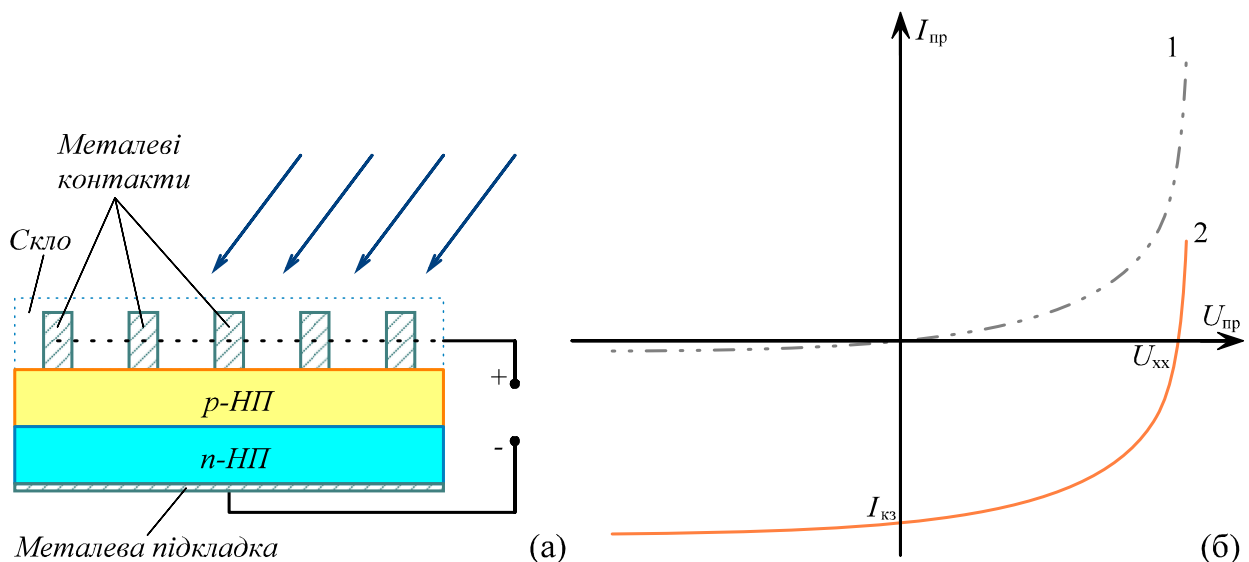


Рис 3. Типова структура ФЕП (а) та розширена ВАХ (б):
 1 – крива залежності $I(U)$ за відсутності освітленості,
 2 – крива ФЕП з освітленою поверхнею

На ефективність роботи комірки впливають також зовнішні параметри. Насамперед це рівень *освітленості* E_v , який залежить від величини *світлового потоку* Φ , котрий падає на поверхню комірки, кут падіння β світла відносно нормалі до поверхні та температура фотоелемента t (рис. 4 б). Остаточно ефективність можна подати у вигляді ККД ФЕП, який показує, яка частина енергії випромінювання Q_e перетворюється на енергію електричного струму Q :

$$\eta = \frac{Q}{Q_e}. \quad (1)$$

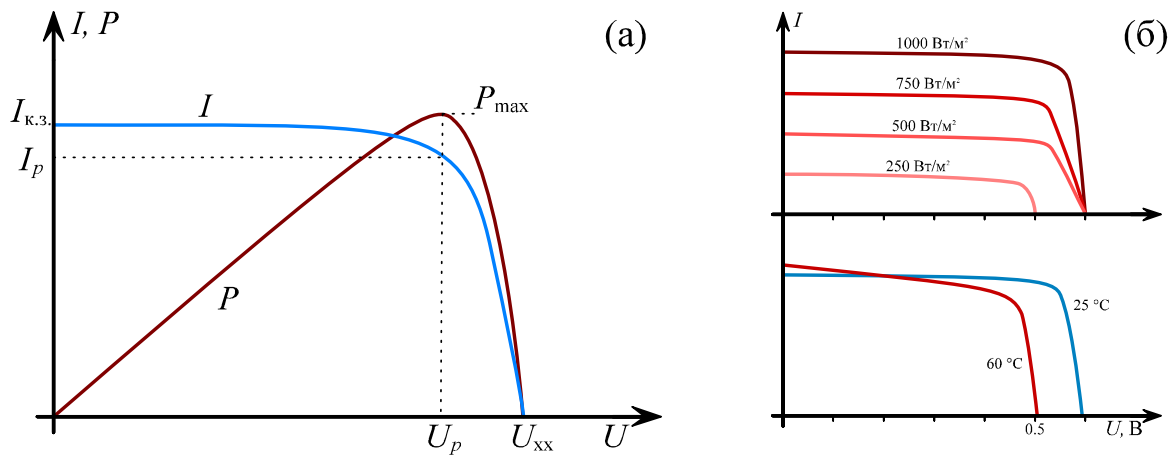


Рис 4. Залежності $I(U)$ та $P(U)$ елемента з позначенням точки максимальної потужності P_{\max} (а); залежність ВАХ елемента від опроміненості та температури (б)

Енергію електричного струму легко визначити, спираючись на закон Джоуля-Ленца:

$$Q = Pt = UIt = I^2Rt, \quad (2)$$

де

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R} \quad (3)$$

– потужність електричного струму.

Своєю чергою енергія випромінювання Q_e чисельно дорівнює величині потоку випромінювання Φ_e за одиницю часу, а потік випромінювання – опроміненості E_e всієї площі S сонячного елемента:

$$Q_e = \Phi_e t = E_e St. \quad (4)$$

Опроміненість вимірюють за допомогою піранометра – доволі дорогого приладу, який має обмежену здатність до вимірювання малих значень при поганому освітленні. Натомість у 5 – 10 разів доступніші люксметри, котрі вимірюють **освітленість** E_v – величину світлового потоку, який падає на одиницю поверхні предмета, $[E_v] = \text{лк (люкс)} = \text{лм (люмен)} / \text{м}^2$. Прямого алгебраїчного зв'язку між енергетичним параметром E_e та фотометричним

параметром E_v немає, втім є багато емпіричних досліджень, які встановлюють цю залежність як

$$E_v = kE_e, \quad (5)$$

де $k = 122 \pm 1$ лк/Вт – коефіцієнт пропорційності для природного сонячного світла.

Враховуючи вирази (2) – (5), ККД ФЕП запишемо як

$$\eta = \frac{Q}{Q_e} = \frac{kUIt}{E_v St} = \frac{kP}{E_v S}. \quad (6)$$

Форма кривої ВАХ ФЕП показує, що при зміні значення сили струму, який генерує елемент, напруга теж може змінюватися (рис. 4 а). В такому разі генерована потужність, ка визначається виразом (3), теж буде змінюватися.

Хід роботи

Вправа 1. Вплив параметрів сонячного випромінювання на роботу елемента

1. Виміряйте люксометром освітленість аудиторії сонячним світлом при зачиненому вікні E_v та пряму освітленість через відчинене вікно E_{v0} . Сенсор люксометра розміщуйте так, щоби промені світла падали безпосередньо на нього під прямим кутом. Визначте, на скільки відсотків E_v більше за E_{v0} .
2. Розмістіть сонячний елемент перпендикулярно до напрямку променів. Виміряйте кут α між елементом і горизонтом.
3. Люксометром виміряйте освітленість E_v поверхні сонячного елемента кілька разів – біля кутів елемента та в центрі.
4. Протягом 2 – 3 хвилин перевіряйте пірометром температуру поверхні елемента t . Продовжуйте роботу, коли t припинить змінюватися.
5. Під'єднайте до клем елемента постійний опір навантаження $R_{н0}$ та вольтметр. Виміряйте спад напруги U і, знаючи величину $R_{н0}$, за формулою (3) обчисліть потужність P , яку генерує сонячний елемент.
6. Повторіть пункти 3 – 5, змінюючи кут α на величину $\beta = 10, 30, 60$ та 90° . Побудуйте графіки залежності $P = f(\beta)$ та $\bar{E}_v = f(\beta)$.
7. Обчисліть похибки першої серії вимірювань E_v (при $\beta = 0$).

Вправа 2. Визначення робочих характеристик елемента

1. Під'єднайте до сонячного елемента реостат R_n , вольтметр і міліамперметр.
2. Увімкніть вольтметр. Знайдіть таке положення сонячного елемента відносно сонячного випромінювання, щоб напруга холостого ходу U_{xx} була максимальна. Протягом 3 – 5 хвилин перевіряйте пірометром температуру поверхні елемента t . Продовжуйте роботу, коли t припинить змінюватися.
3. Увімкніть міліамперметр. Змінюючи величину навантаження R_n , зніміть ряд значень I та U від $U_{max} = U_{xx}$ до $U_{min} \approx 0.05$ В.
4. Побудуйте залежність $I = f(U)$.
5. Для кожного значення U обчисліть P за формулою (3). Побудуйте залежність $P = f(U)$ разом із попередньою, додавши ще одну вертикальну вісь для P справа.
6. Визначте з графіка P_{max} , I_p та U_p . Позначте їх на графіку.
7. Штангенциркулем виміряйте розміри сонячного елемента та обчисліть його площу S .
8. Виміряйте освітленість E_v сонячного елемента. Визначте ККД за виразом (6) при $P = P_{max}$.
9. Повторіть вправу, розмістивши сонячний елемент у тіні. Порівняйте значення ККД в умовах тіні та прямого освітлення.

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Будова сучасних сонячних елементів. ККД сучасних сонячних елементів.
3. Запропонуйте способи збільшення ККД сонячної панелі.
4. Які сьогодні є перспективні матеріали сонячної енергетики?
5. У сонячних електростанціях є автоматичні пристрої відстеження точки максимальної потужності. Яке їхнє призначення та принцип роботи?
6. * Поясніть рисунок 3 б. Що відбувається з p - n -переходом при освітленні?

Лабораторна робота №9

Визначення параметрів лінз та оптичних систем

Мета роботи: навчитися будувати зображення в лінзах та визначати їх параметри; дослідити найпростіші оптичні схеми мікроскопа та телескопа.

Обладнання: оптична лава з лінійкою, набір лінз, джерело світла з набором отворів, матовий екран.

Теоретичні відомості

Для утворення різних зображень в оптичних приладах дуже часто використовують лінзи. **Лінза** – це прозоре тіло, обмежене двома гладенькими опуклими або увігнутими поверхнями (одна з них може бути пласкою). Найчастіше поверхні лінзи роблять сферичними з речовин із відповідним показником заломлення. Лінзи поділяють на **опуклі**, товщі до середини, і **увігнуті**, тонші до середини (рис. 1 а). Лінзу називають **тонкою**, якщо її товщина мала порівняно з радіусами сферичних поверхонь, котрі її обмежують.

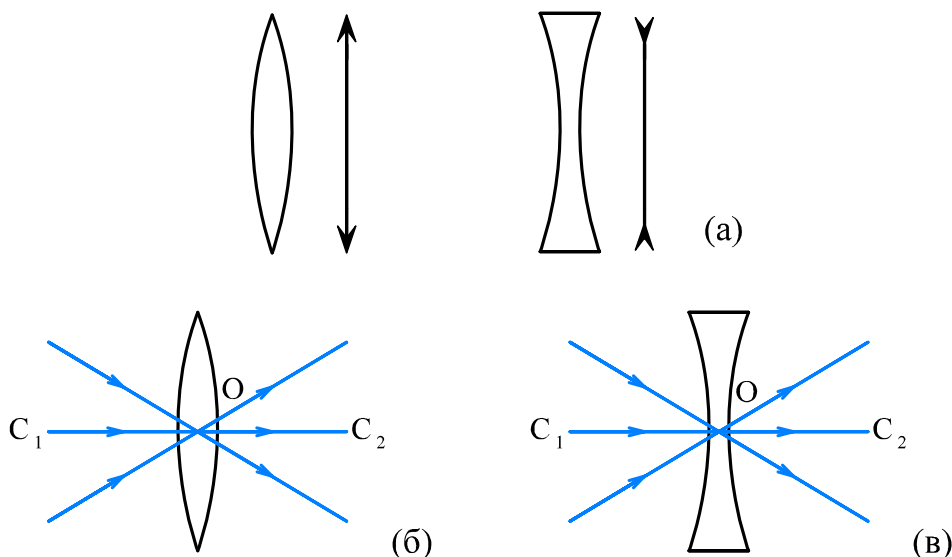


Рис. 1. Перерізи та умовні позначення (а), а також оптичні осі і центри збиральної (б) та розсіювальної (в) лінз

Опукла лінза має властивість збирати паралельні промені в одній точці. Тому опуклі лінзи називають **збиральними**. Увігнуті лінзи, навпаки, називають **розсіювальними**. Всередині кожної лінзи на головній оптичній осі є точка О, яку називають **оптичним**

центром лінзи (рис. 1 б, в): промінь, який проходить через неї, після виходу з лінзи йде в тому самому напрямі, що й до лінзи.

Пряму, яка проходить через сферичні центри кривизни поверхонь лінзи C_1 і C_2 , називають **головною оптичною віссю** лінзи. Світловий промінь, спрямований уздовж оптичної осі, проходить крізь лінзу, не заломлюючись. Будь-яку іншу пряму, яка проходить через оптичний центр лінзи O (крім головної оптичної осі), називають **побічною оптичною віссю**.

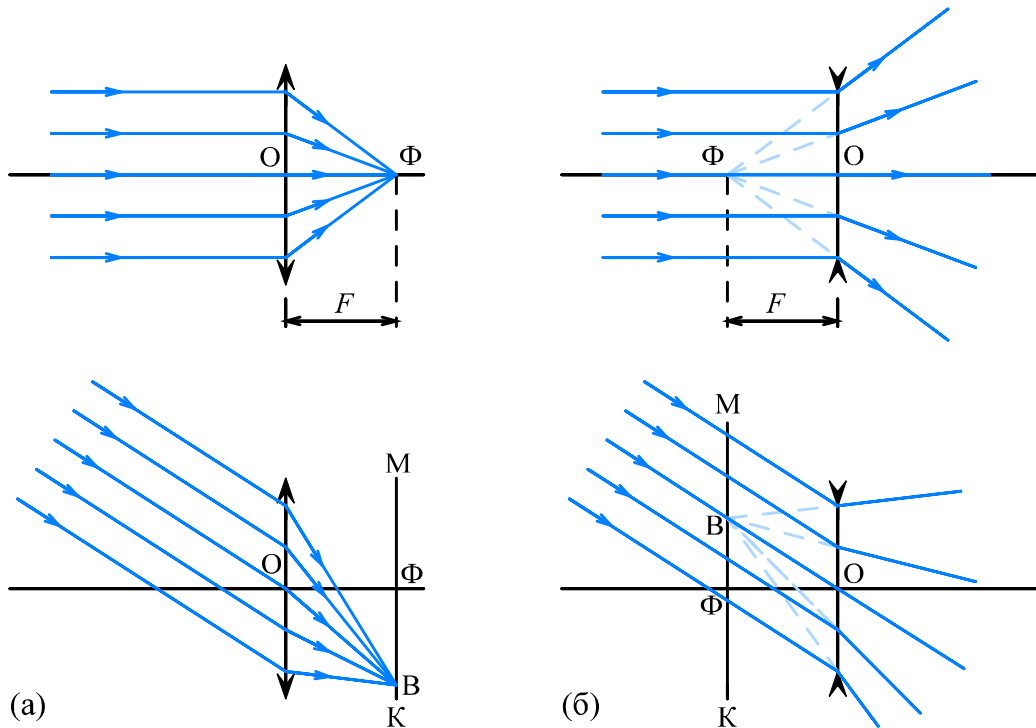


Рис. 2. Проходження пучка паралельних променів крізь збиральну (а) та розсіювальну (б) лінзи

Якщо на збиральну лінзу спрямувати пучок променів, паралельних до її головної оптичної осі, вони зберуться в точці Φ з іншого боку від лінзи (рис. 2 а). У розсіювальній лінзі такі промені після лінзи йдуть розбіжним пучком (рис. 2 б), але так, що їх продовження теж збігаються в одній точці Φ . Точку Φ на головній оптичній осі лінзи, в якій збігаються промені, котрі йдуть до заломлення в лінзі паралельно до її головної оптичної осі, називають **головним фокусом лінзи**. У збиральних лінзах головний фокус дійсний, а в розсіювальних – уявний. У кожній лінзі є два головні фокуси, розміщені симетрично відносно її оптичного центра O .

Відстань F між головним фокусом лінзи і її оптичним центром називають **головною фокусною відстанню**. Якщо головний фокус

дійсний, то F вважають додатною, а якщо уявний – від’ємною. Кожна лінза також має дві **фокальні площини** – площини МК, які перпендикулярні до головної оптичної осі лінзи і проходять через її головний фокус (рис. 2). У збиральній лінзі фокальні площини дійсні, а в розсіювальній – уявні.

Положення головного фокуса помітно впливає на розміри і вигляд зображень, утворених за допомогою лінзи. Величину D , яка характеризує оптичні властивості лінзи, котрі визначаються положенням її головного фокуса на оптичній осі, називають **оптичною силою** лінзи. Оптична сила лінзи вимірюється числом, оберненим головній фокусній відстані цієї лінзи F :

$$D = \frac{1}{F}. \quad (1)$$

У СІ за одиницю оптичної сили беруть **діоптрію** (дптр) – оптичну силу такої лінзи, головна фокусна відстань якої дорівнює одному метру. Оптичну силу збиральних лінз (як і фокусну відстань F) вважають додатною, а розсіювальних – від’ємною.

Для тонкої лінзи справедлива формула, яка пов’язує фокусну відстань F , відстань до предмета a та відстань до зображення b – рівняння тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}. \quad (2)$$

При цьому величини F та b записуються від’ємними, якщо вони розміщені з тієї ж сторони лінзи, що й предмет (тобто якщо фокус та зображення – уявні).

Оптичні схеми, які зручно використовувати для визначення F обох типів лінз, зображено на рис 3. Схема на рис. 3 б дещо складніша, оскільки не дає реального зображення. Вона спирається на принцип **оборотності ходу променів** та імітує утворення зображення (як це умовно показано на рис. 2 б) за умови руху променів світла у зворотному напрямку.

Для збиральної лінзи можливі різні способи утворення зображення. Якщо $a > 2F$, то предмет і його зображення лежать з різних боків лінзи, зображення між F та $2F$, перевернуте, зменшене та дійсне. При відстані до предмета $F < a < 2F$ зображення теж буде з іншого боку від лінзи, але далі, ніж $2F$, перевернуте, дійсне, але

збільшене. Якщо ж $a < F$, – зображення в збиральній лінзі буде уявним (лежатиме з тієї ж сторони, що й предмет), прямим і збільшеним, а відстань до зображення $b > a$.

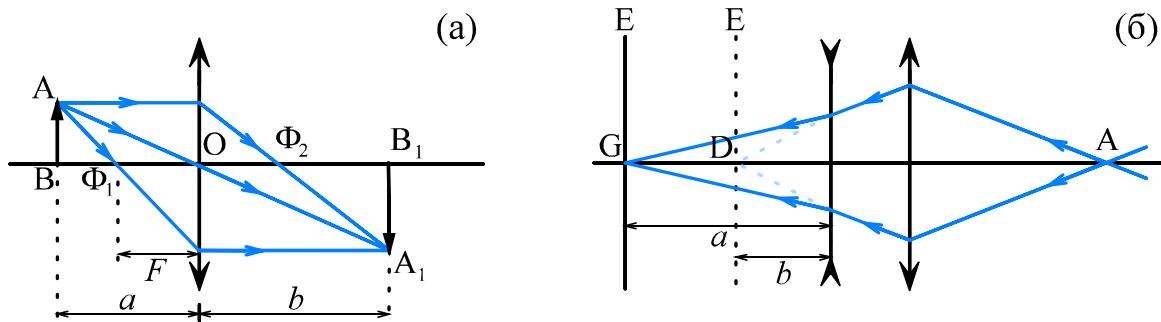


Рис. 3. Побудова зображення в збиральній лінзі (а) та схема для експериментального визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи (б)

Розсіювальна лінза завжди дає уявне, зменшене і пряме зображення предмета, яке лежить між головним фокусом і лінзою. Відстань b від цього зображення до лінзи завжди менша за відстань a від предмета до лінзи.

Лінійним збільшенням β називають відношення висоти (ширини) зображення предмета H до дійсної висоти (ширини) самого предмета h . Збільшення лінзи також можна визначити, використовуючи b та a :

$$\beta = \frac{H}{h} = \frac{b}{a}. \quad (3)$$

Збільшенням оптичного приладу Γ називають число, яке показує, у скільки разів кут φ , під яким око бачить зображення предмета через прилад, більший за кут зору φ_0 , під яким око бачить предмет без приладу:

$$\Gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0}. \quad (4)$$

Прилад, який дає змогу дістати велике збільшення під час розглядання малих предметів, називають **мікроскопом**. Він складається з двох збиральних лінз з великою оптичною силою (рис. 4) – об’єктива, перед яким розміщують предмет (об’єкт), і окуляра, в який дивляться.

Предмет АВ кладуть за головним фокусом об’єктива, майже в головному фокусі. Окуляр розміщується так, щоб перевернуте і

дійсне зображення предмета A_1B_1 було в його головному фокусі, і він діє, як лупа.

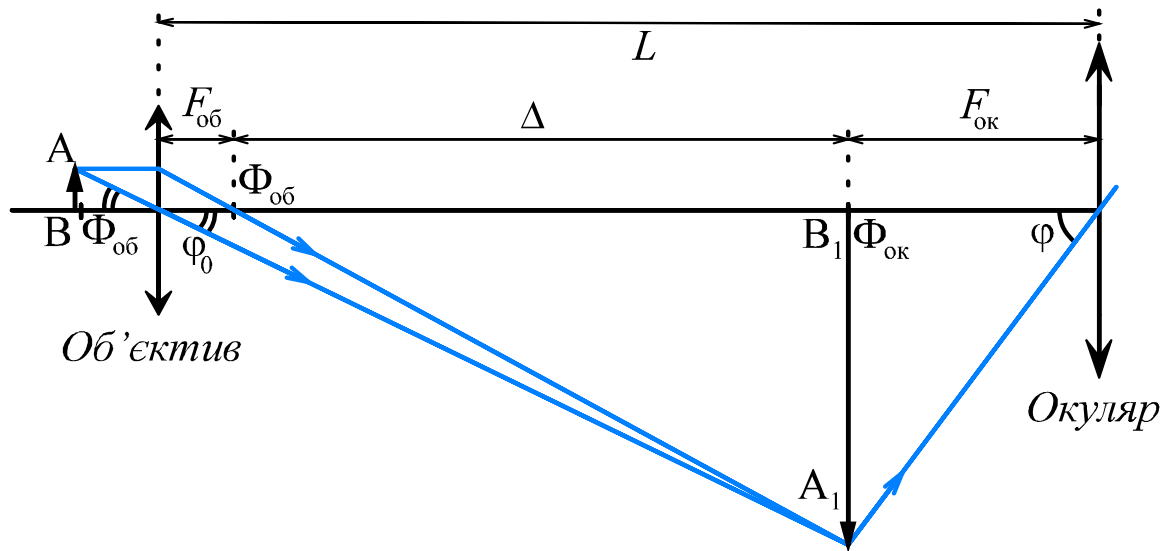


Рис. 4. Оптична схема мікроскопа

Тоді збільшення мікроскопа

$$G = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{(L - F_{\text{ок}})AB \cdot l}{F_{\text{ок}} \cdot F_{\text{об}} \cdot AB} = \frac{(L - F_{\text{ок}})l}{F_{\text{ок}} \cdot F_{\text{об}}}, \quad (5)$$

де $l = 25$ см – найменша відстань, на якій око може виразно бачити предмети без напруження і яку називають *відстанню найкращого зору*.

Людина бачить у мікроскопі уявне, перевернене і збільшене зображення розглядуваного предмета. Оптичні мікроскопи дають збільшення не більш ніж у 1500 разів.

Оптичний прилад, призначений для спостереження далеких об'єктів, називають *астрономічною трубою*. Перші астрономічні труби збудовані в 1609 р. італійським ученим Г. Галілеєм і німецьким ученим Й. Кеплером.

Труба Кеплера складається з двох збиральних лінз: об'єктива і окуляра (рис. 5 а). Об'єктив звичайно має великі розміри і маленьку оптичну силу, а окуляр діє як лупа, крізь яку розглядають зображення, створюване об'єктивом. Зображення об'єкта АВ практично утворюється в головному фокусі об'єктива $\Phi_{\text{об}}$, а окуляр розміщують так, що це зображення лежить і в його головному фокусі $\Phi_{\text{ок}}$. Отже, відстань між об'єктивом і окуляром у цьому

приладі дорівнює сумі фокусних відстаней $F_{об}$ і $F_{ок}$, тобто довжина труби Кеплера a дорівнює

$$a = F_{об} + F_{ок}. \quad (6)$$

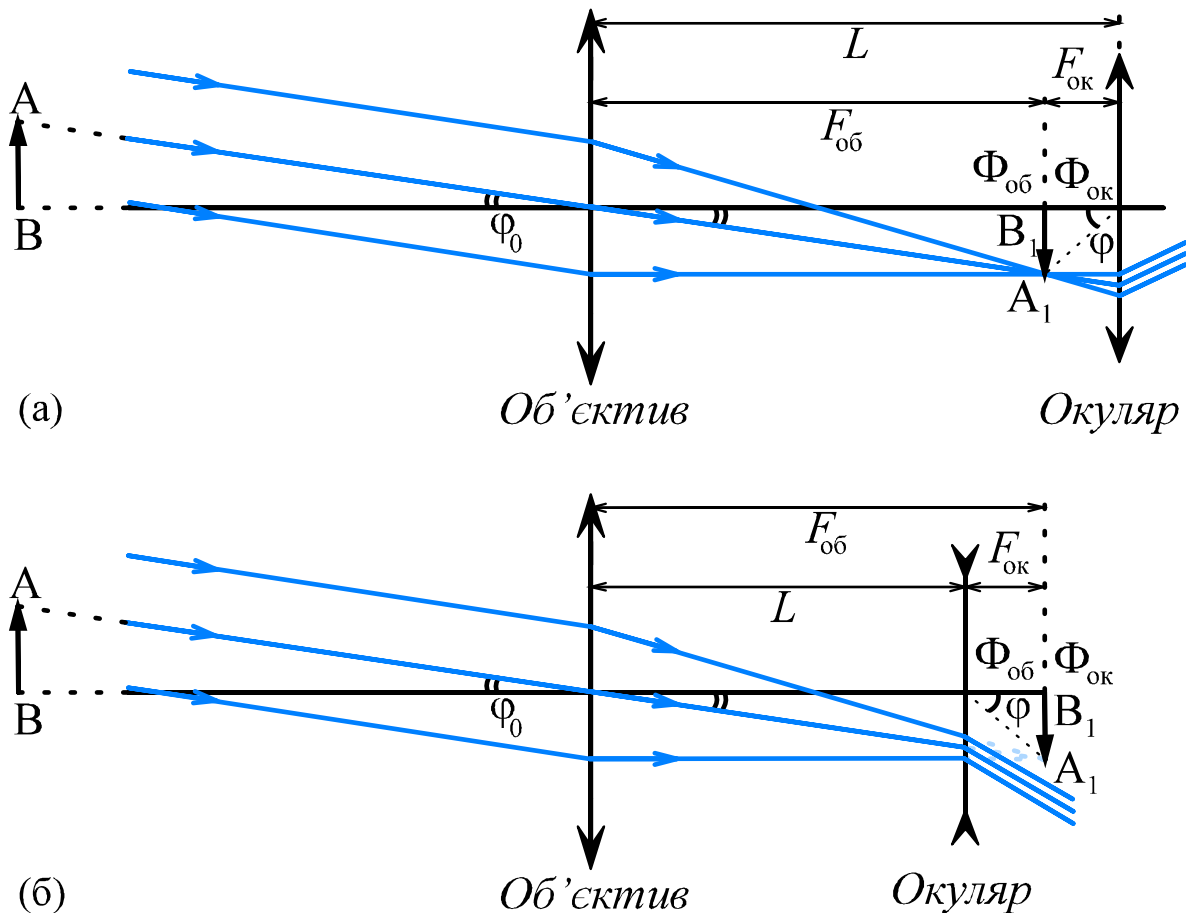


Рис. 5. Оптичні схеми труб Кеплера (а) та Галілея (б)

Збільшення, яке можна отримати за допомогою труби Кеплера, визначається як

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{A_1 B_1}{F_{ок}} : \frac{A_1 B_1}{F_{об}} = \frac{F_{об}}{F_{ок}}. \quad (7)$$

Труба Галілея складається зі збиральної (об'єктив) і розсіювальної (окуляр) лінз (рис. 5 б). Об'єктив і окуляр у ній розміщують так, що їх фокуси збігаються. Формула (6) при цьому буде справедливою з урахуванням від'ємного знаку в $F_{ок}$. Збільшення труби Галілея знаходять за формулою (7), воно порівняно менше, ніж у труби Кеплера.

Хід роботи

Вправа 1. Визначення фокусної відстані збиральної та розсіювальної лінз

1. Встановіть на оптичну лаву джерело світла, збиральну лінзу та матовий екран.
2. Розмістіть лінзу на певній відстані a від джерела світла. Переміщуючи матовий екран, отримайте чітке зображення джерела на екрані (рис. 3 а).
3. Виміряйте довжини a та b . Визначте фокусну відстань F за формулою (2).
4. Повторіть пункти 2 та 3 для іншого значення a .
5. Визначте двічі для поточної схеми збільшення β , використовуючи величини a , b , h та H . Значення h та H виміряйте штангенциркулем. Порівняйте отримані значення β .
6. Повторіть схему рис. 3 а так, щоб зображення на екрані було за розміром близьке до розміру отвору джерела світла.
7. Додайте між екраном та збиральною лінзою розсіювальну лінзу (рис. 3 б). При цьому зображення на екрані розфокусується. Переміщуючи екран, отримайте чітке зображення.
8. Виміряйте значення a та b . Визначте фокусну відстань F за формулою (2), враховуючи знаки.
9. Пункти 6 – 8 виконайте для іншого положення розсіювальної лінзи.

Вправа 2. Дослідження оптичних схем мікроскопа та телескопа

1. Зберіть на оптичній лаві схему мікроскопа (рис. 4).
2. Визначте збільшення мікроскопа за формулою (5).
3. Зберіть на оптичній лаві схему труби Кеплера (рис. 5 а).
4. Визначте збільшення труби Кеплера за формулою (7).
5. Зберіть на оптичній лаві схему труби Галілея (рис. 5 б).
6. Визначте збільшення труби Галілея за формулою (7).

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Максимальне збільшення оптичного мікроскопа досягає величини близько 1500. Чому? Як можна збільшити це значення?

3. Опишіть переваги та недоліки схем труб Галілея і Кеплера.
4. Проаналізуйте формули для визначення збільшення мікроскопа та телескопа. Як можна збільшити значення Γ ?
5. Які ще елементи, крім звичайних тонких лінз, використовуються в оптичних приладах? Опишіть їх призначення.
6. Спотворення та недоліки простих лінз. Способи усунення спотворень.
7. * Лінійне збільшення об'єкта β та кутове збільшення Γ не слід плутати. Поясніть, чому.

Лабораторна робота №10

Визначення параметрів сферичних дзеркал

Мета роботи: навчитися будувати зображення в опуклому та увігнутому дзеркалах і визначати їх параметри.

Обладнання: оптична лава з лінійкою, набір дзеркал, джерело світла з набором отворів, матовий екран.

Теоретичні відомості

Сферичні дзеркала як елементи оптичних систем широко застосовуються в приладах освітлення, проєкційній апаратурі, для виготовлення оглядових дзеркал, а також у телескопах та фотооб'єктивах рефлекторного типу. **Сферичне дзеркало** – це дзеркальна поверхня, яка за формою є сегментом сфери. Для його опису в оптиці використовуються такі ж терміни та підходи, що й для тонких лінз, проте є низка особливостей.

Якщо дзеркальна відбиваюча поверхня розташована на внутрішній стороні сферичного сегмента, дзеркало називають **увігнутим** (рис. 1а), якщо ж на зовнішній – **опуклим** (рис. 1 б). Точку O називають **оптичним центром** дзеркала, а відстань від неї до будь-якої точки сферичного сегмента R – радіус сфери. Точка C , розміщена на вершині поверхні, називається **полюсом**, або **центром дзеркала**.

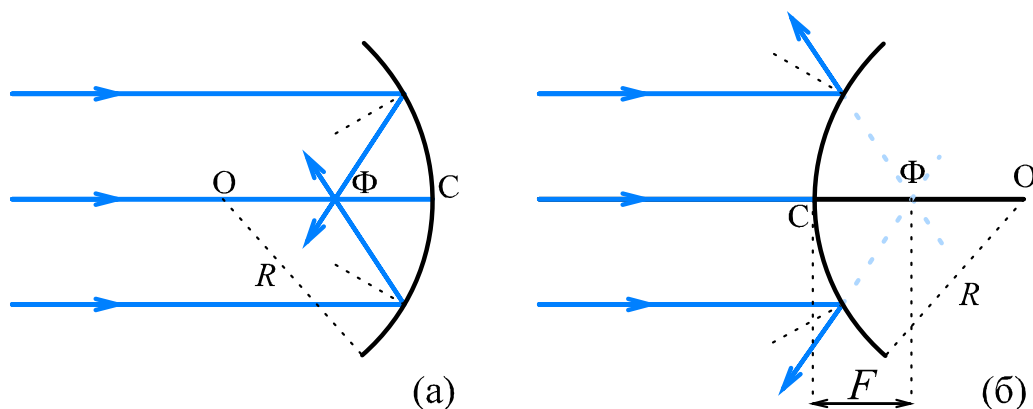


Рис. 1. Увігнуте (а) та опукле (б) сферичні дзеркала і хід променів у них

Пряму, яка проходить через точки O та C , називають **головною оптичною віссю** дзеркала. Якщо на увігнуте дзеркало спрямувати пучок променів, паралельних його головній оптичній осі, вони після відбивання сфокусуються разом і пройдуть через точку Φ – **головний фокус** дзеркала. Для опуклого дзеркала паралельний осі OC пучок променів, навпаки, розсіється, але так, що продовження розсіяних променів за дзеркалом теж зберуться в точці Φ . Отже, увігнуте дзеркало **збиральне**, і його фокус дійсний, натомість опукле – **розсіювальне**, його фокус – уявний.

Відстань F між вершиною дзеркала і його головним фокусом називають **головною фокусною відстанню**. Якщо головний фокус дійсний, то F вважають додатною, а якщо уявний – від’ємною. Для сферичного дзеркала відстань F дорівнює половині радіуса R сфери, сегмент якої утворює дзеркало:

$$F = \frac{R}{2}. \quad (1)$$

Положення головного фокуса помітно впливає на розміри і вигляд зображень, утворених дзеркалом. Величину D , яка характеризує оптичні властивості дзеркал, котрі визначаються положенням його головного фокуса на оптичній осі, називають **оптичною силою**. Оптична сила вимірюється числом, оберненим до головної фокусної відстані F :

$$D = \frac{1}{F}. \quad (2)$$

У СІ за одиницю оптичної сили беруть *діоптрію* (дптр) – оптичну силу такого дзеркала (лінзи), головна фокусна відстань

якого дорівнює одному метру. Оптичну силу збиральних дзеркал (як і фокусну відстань F) вважають додатною, а розсіювальних – від’ємною.

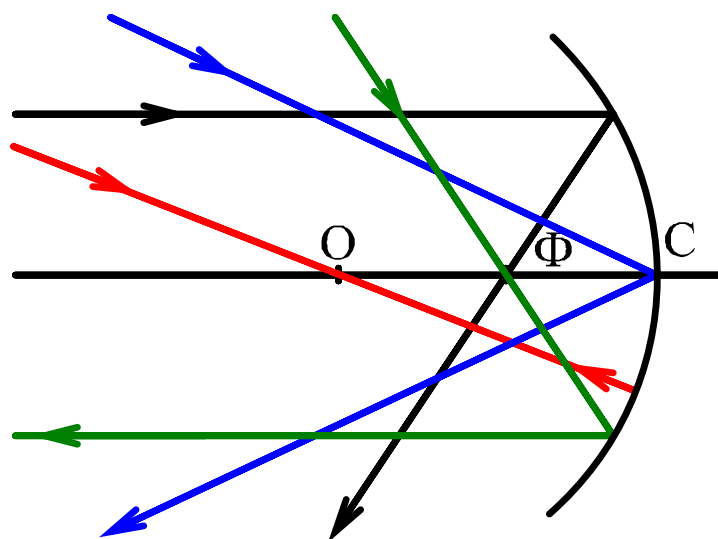


Рис. 2. Правила відбивання променів у сферичних дзеркалах

Для побудови зображень у сферичному дзеркалі можна скористатися такими правилами відбивання променів (рис. 2):

- промінь, який падає на дзеркало паралельно до осі CO , відбивається і проходить через фокус Φ ;
- промінь, котрий проходить через оптичний центр O , падає на дзеркало під прямим кутом, тому відбивається назад;
- для променя, який падає на дзеркало в точці C , кут падіння дорівнює куту відбивання;
- промінь, який проходить через фокус Φ , після відбивання поширюється паралельно до осі CO .

Для сферичного дзеркала (як і для тонкої лінзи) справедлива формула, що пов’язує фокусну відстань F , відстань від полюса дзеркала до предмета a та до зображення b – рівняння дзеркала:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}. \quad (3)$$

При цьому величини F та b записуються від’ємними, якщо вони розміщені «за» дзеркалом (тобто якщо фокус та зображення – уявні).

Для збирального дзеркала можливі різні випадки утворення зображення. Якщо $a > 2F$, то зображення знаходиться між O та Φ , воно перевернуте, зменшене та дійсне (рис. 3 а). При відстані до

предмета $F < a < 2F$ зображення буде далі, ніж O , перевернуте, дійсне, але збільшене (рис. 3 б). Якщо ж $a < F$, – зображення в збиральному дзеркалі буде уявним (знаходитиметься «за» дзеркалом), прямим і збільшеним.

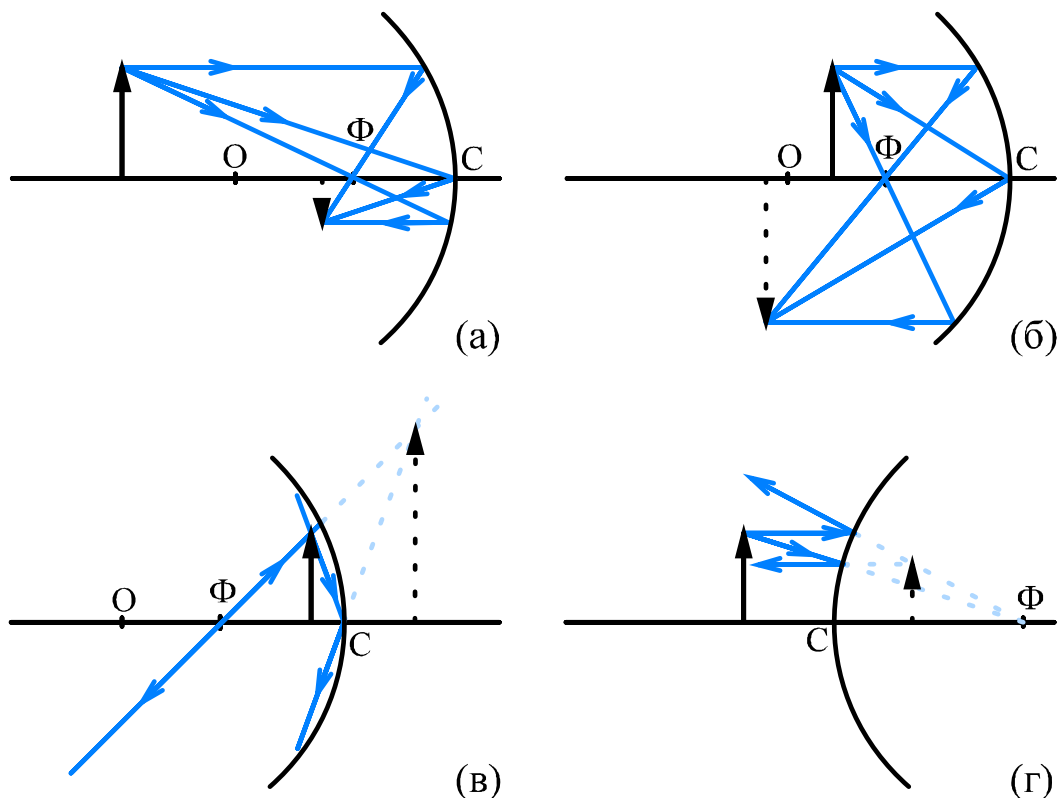


Рис. 3. Побудова зображення в увігнутому (а – в) та опуклому (г) дзеркалах

Розсіювальне дзеркало завжди дає уявне, зменшене і пряме зображення предмета, яке лежить між головним фокусом і полюсом. Відстань b від цього зображення до дзеркала завжди менша за відстань a від предмета до дзеркала.

Лінійним збільшенням β називають відношення висоти (ширини) зображення предмета H до дійсної висоти (ширини) самого предмета h . Збільшення дзеркала також можна визначити, використовуючи відстані b та a :

$$\beta = \frac{H}{h} = \frac{b}{a}. \quad (4)$$

Перевірити рівняння для збирального дзеркала легко, оскільки воно дає змогу отримати зображення предмета на екрані. Значно складніше визначити відстань до зображення для опуклого дзеркала, яке дає лише уявне зображення. В такому разі варто

скористатися явищем паралаксу, що дасть змогу зіставити зображення в дзеркалі з певним реальним об'єктом, розміщеним за дзеркалом. *Паралакс* – явище візуальної зміни положення об'єкта спостереження відносно віддаленого фону при зміні положення спостерігача.

Хід роботи

Вправа 1. Вивчення параметрів збирального дзеркала

1. Встановіть на оптичну лаву послідовно джерело світла, матовий напівекран та збиральне поворотне дзеркало.
2. Розмістіть дзеркало на певній відстані a від джерела світла. На поворотному диску джерела світла виберіть отвір у формі цифри 4.
3. Поверніть дзеркало так, щоб зображення цифри 4 було на матовій частині напівекрана. Переміщуючи напівекран, отримайте чітке сфокусоване зображення.
4. Виміряйте довжини a та b . Визначте фокусну відстань F за формулою (3).
5. Повторіть пункти 2 – 4 для іншого значення a .
6. Визначте для поточної схеми збільшення β за формулою (4), використовуючи величини a , b , h та H . Значення h та H виміряйте штангенциркулем.
7. Обчисліть похибки одного прямого виміру для b та h .

Вправа 2. Визначення фокусної відстані розсіювального дзеркала

1. Розмістіть на оптичній лаві послідовно напівекран, опукле дзеркало (дзеркальною поверхнею до напівекрана) та матовий екран. Напівекран тут слугуватиме об'єктом.
2. На цупкому папері розміром 10×20 см накресліть уздовж посередині пряму лінію. Встановіть листок з лінією на матовому екрані.
3. Задайте деяку відстань a між напівекраном і дзеркалом. Запишіть значення.
4. Перемістіть екран із вертикальною лінією безпосередньо за дзеркало.

5. Станьте так, щоб бачити поверх напівекрана його зображення в дзеркалі та вертикальну лінію над ним. Переміщуючись злегка вліво чи вправо, спостерігайте, як зміщується зображення краю напівекрана відносно вертикальної лінії за дзеркалом так, ніби зображення від спостерігача далі, ніж вертикальна лінія.
6. Перемістіть вертикальну лінію на кілька см від дзеркала. Перевірте, чи спостерігається паралакс.
7. Повторюйте пункт 6, доки паралакс не зникне. Виміряйте відстань від дзеркала до екрана. Запишіть її як значення b .
8. За формулою (3) визначте фокусну відстань F розсіювального дзеркала.

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Чому значення β , отримане в роботі, менше за 1? Як отримати $\beta > 1$? Опишіть, якою для цього має бути експериментальна установка.
3. Побудуйте на папері зображення в сферичних дзеркалах предмета, який умовно віддалений на безмежність від дзеркала та розміщений вище головної оптичної осі.
4. Які переваги мають дзеркала в оптичних приладах порівняно з лінзами? Опишіть їх.
5. Наведіть переваги та недоліки сферичних дзеркал порівняно з іншими типами, наприклад, параболічним чи гіперболічним.
6. Порівняйте рефлекторний і рефракторний телескопи. Які їх особливості, переваги та недоліки?
7. * Чи пов'язане явище паралакса та програмування? Якщо так, то як саме?

Лабораторна робота №11

Визначення довжини хвилі за допомогою явища дифракції

Мета роботи: дослідити явище дифракції електромагнітного випромінювання видимого діапазону; навчитися визначати параметри дифракційної системи за допомогою явища дифракції.

Обладнання: оптична лава з лінійкою, набір дифракційних щілин та ґраток, джерело світла, високочутливий позиційний оптичний детектор.

Теоретичні відомості

При дослідженні властивостей світла спостерігається низка явищ, які можна пояснити лише хвильовими властивостями випромінювання. До них належать інтерференція, дифракція і поляризація.

Явище **дифракції** виникає завжди, коли хвиля стикається з перешкодою або отвором. При цьому на краях та нерівностях об'єкта, на якому дифрагують хвилі, відбувається перерозсіювання хвильового фронту за принципом Гюйгенса-Френеля. В результаті хвилі поширюються у область геометричної тіні перешкоди чи отвору. Дифрагуючий об'єкт фактично стає вторинним джерелом поширення хвилі. Дифракція спостерігається для хвиль будь-якої природи.

Оскільки довжини хвиль світлового випромінювання дуже малі, дифракція світла помітна тільки на значній відстані від перешкоди або отвору. Дифракцію від вузької щілини можна побачити на такому досліді. На шляху паралельних монохроматичних променів ставлять непрозорий екран з вузькою щілиною, а на певній відстані від нього розміщують другий екран, на якому й спостерігають дифракційну картину (рис. 1 а). При цьому навпроти щілини видно світлу смугу, ширина якої тим більша, чим вужча щілина, а за світлою смугою чергуються темні і світлі смуги.

На практиці спостерігати дифракцію від однієї щілини (від одного отвору) важко, бо крізь вузьку щілину проникає мало світла. Щоб дифракційна картина була досить яскравою, треба пропускати світло через кілька паралельних щілин. У цьому разі, крім явища дифракції, відбуватиметься ще й явище інтерференції, оскільки всі щілини будуть джерелами когерентних променів. Яскравість монохроматичного світла на екрані найбільше посилюватиметься в тих місцях, куди від усіх щілин проходять промені в однаковій фазі. На рис. 1 зображено картину дифракції монохроматичного світла від п'яти (б) і двадцяти (в) щілин.

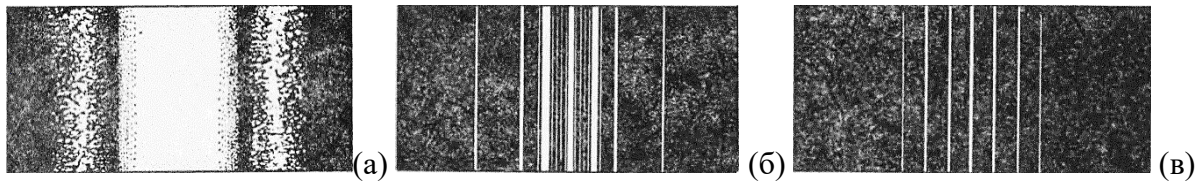


Рис. 1. Дифракційна картина від однієї (а), п'яти (б) і двадцяти (в) щілин

Велику кількість паралельних і дуже близько розміщених вузьких щілин, які пропускають або відбивають світло, називають **дифракційною ґраткою**. Сучасні ґратки виготовляють з понад тисячею штрихів на одному міліметрі, а загальна кількість штрихів у ґратці досягає сотень тисяч.

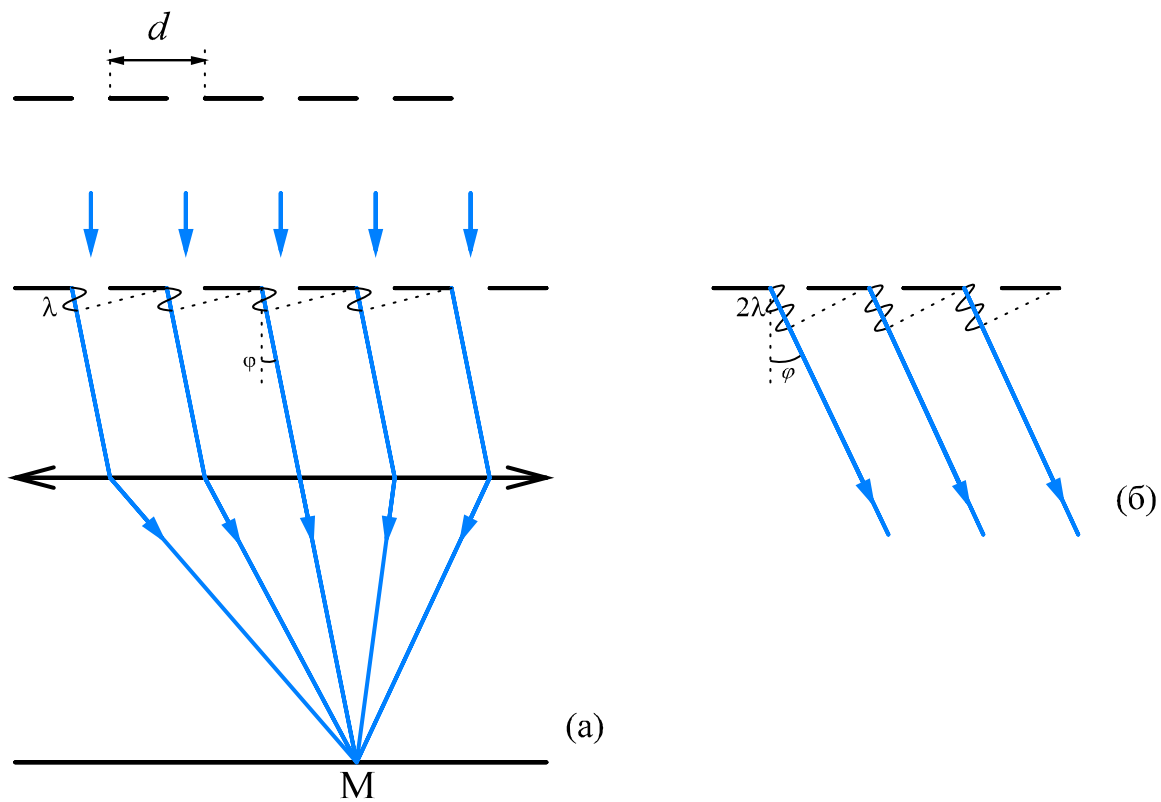


Рис. 2. Схема дифракції при різниці фаз, рівній λ (а) та 2λ (б)

Важлива характеристика ґратки – **стала ґратки**, або її період d – сума ширини щілини a і проміжку b , тобто відстань від початку однієї щілини до початку наступної щілини (рис. 2 а). Нехай на ґратку падає пучок паралельних монохроматичних променів з довжиною хвилі λ , перпендикулярних до площини ґратки. Тоді дифракція спричинить поширення світлових хвиль з другого боку ґратки в усіх напрямках, а інтерференція забезпечить підсилення цих хвиль тільки в певному напрямі, і на екрані утвориться ряд вузьких і яскравих ліній.

На рис. 2 а зображено промені, які утворюють кут φ з перпендикуляром до ґратки. Цей напрям вибрано так, що для нього в різниці ходу променів від сусідніх щілин укладається одна довжина хвилі. Усі промені, які йдуть у цьому напрямі, лінзою збираються в точці M_1 , де на екрані й утворюється світла лінія.

Наступні лінії буде видно тоді, коли в різниці ходу променів від сусідніх щілин укладеться дві довжини хвилі (рис. 2 б), три довжини хвилі тощо. Отже, напрями, в яких ідуть промені, що створюють світлі смуги на екрані, характеризуються тим, що в різниці ходу променів від сусідніх щілин завжди вкладається k довжин хвиль λ , де k – ціле число. Враховуючи кут φ між напрямком руху пучка променів і перпендикуляром до площини щілин та період ґратки d отримаємо формулу дифракційної ґратки:

$$k\lambda = d \sin \varphi \quad (1)$$

Кожну зі світлих ліній на екрані називають *максимумом*, а значення k , яке їй відповідає, – його *порядком*. Отже, навпроти центру ґратки на екрані видно найяскравіший максимум нульового порядку, з обох боків від нього на однакових відстанях – менш яскраві максимуми першого порядку, потім – ще менш яскраві максимуми другого порядку тощо.

Для дифракції на щілині аналогічний вираз має вигляд

$$k_1\lambda = a \sin \varphi, \quad (2)$$

де a – ширина щілини, а k_1 – положення темних смуг відносно середини дифракційної картини.

Дослід показує, що всі ці максимуми розміщені на однакових відстанях один від одного (рис. 3 а). Максимуми від монохроматичного світла з більшою довжиною хвилі розмістяться рідше (рис. 3 б), але нульовий максимум для обох λ буде на тому ж місці екрана. Отже, положення нульового максимуму не залежить від λ , тобто для всіх довжин хвиль він буде на тому самому місці екрана. На рис. 3 показано картину на екрані при освітленні дифракційної ґратки паралельними фіолетовими променями (а), синіми променями (б), одночасно синіми і фіолетовими променями (в). З формули (1) видно, що для вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки треба виміряти тільки кут φ , бо d і k завжди відомі.

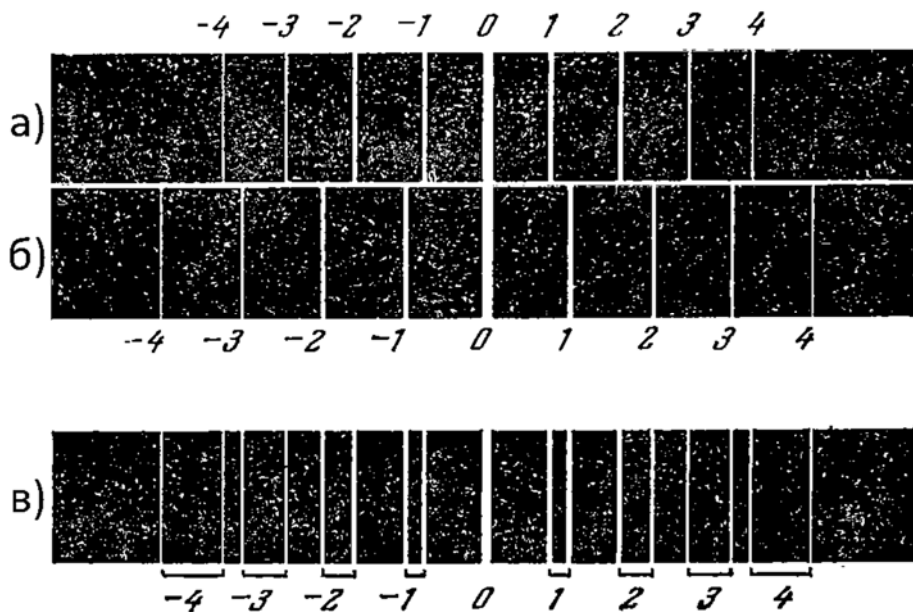


Рис. 3 Дифракційна картина від світла фіолетового (а) і синього (б) кольорів та картина від двох довжин світла разом (в)

На практиці значно зручніше замість значення кута φ визначати його синус. Позначимо відстань від дифракційної ґратки до екрана як L , а відстань між двома сусідніми максимумами – l . Тоді

$$\sin \varphi = \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}}. \quad (3)$$

Оскільки кут можна визначити з великою точністю, то велика точність буде забезпечена і при визначенні довжини хвилі. Чим менша стала ґратки d , тим точніший буде результат вимірювання λ .

Увага! В роботі як джерело світла використовується когерентне лазерне випромінювання. Забороняється спрямовувати лазерний промінь чи його відображення в очі.

Хід роботи

Підготовка дифракційної установки до вимірювань

1. Працювати з дифракційною системою можна **лише з дозволу та під наглядом викладача!**
2. Встановіть на оптичній лаві дифракційний лазер, набір дифракційних щілин та ґраток, а також високочутливий позиційний оптичний детектор. Положення модулів визначає викладач.

3. Встановіть на детекторі середнє значення чутливості ($10 \mu\text{W}$). Перемістіть детектор в крайнє праве (відносно напрямку лазерного променя) положення.
4. Під'єднайте до оптичного сенсора та позиційного датчика модуль для збору даних LabQuest 2. Під'єднайте LabQuest 2 до ПК та запустіть Graphical Analysis (вибірково).
5. Увімкніть дифракційний лазер. Позиційними гвинтами відрегулюйте напрямок лазерного променя так, щоб на білому прямокутному екрані детектора спостерігалася дифракційна картина на рівні вікна детектора.

Вправа 1. Визначення довжини хвилі монохроматичного світла

1. Встановіть одну з дифракційних ґраток навпроти лазера (встановлює викладач). Запишіть значення a та b дифракційної ґратки.
2. Виберіть апертуру детектора $0,1 \text{ мм}$.
3. Підготуйте новий файл для запису вимірів в LabQuest 2 / Graphical Analysis.
4. Одночасно запустіть запис даних і почніть плавно переміщувати детектор перпендикулярно до напрямку поширення променя. Час повного переміщення має бути близько 30 с . Припиніть запис даних.
5. Якщо інтенсивність дифракційної картини низька, змініть апертуру детектора на наступне значення та повторіть дослід.
6. Запишіть положення дифракційної щілини та вхідного вікна детектора. Визначте L . Обчисліть похибку одного прямого виміру.
7. Використовуючи отриману залежність інтенсивності світла від положення детектора, визначте відстань l між двома сусідніми максимумами. Зробіть це для чотирьох різних пар максимумів. Обчисліть похибки серії прямих вимірювань (роздільна здатність позиційного сенсора – 40 мкм).
8. Визначте довжину хвилі світла λ за формулою (1).
9. Повторіть пункти 1 – 8 для іншої дифракційної ґратки. Похибки повторно обчислювати не потрібно.

Контрольні запитання та завдання

1. Основні теоретичні відомості. Хід роботи.
2. Які параметри дифракційних ґраток впливають на дифракційну картину?
3. Сформулюйте принцип Гюйгенса-Френеля. Чим відрізняються дифракція Френеля та дифракція Фраунгофера?
4. Чи можна спостерігати дифракцію від двох ідентичних джерел випромінювання? Відповідь обґрунтуйте.
5. Наведіть приклади практичного застосування явища дифракції.
6. Чи можливо отримати дифракційну картину за допомогою електромагнітних хвиль не оптичного діапазону? Що для цього потрібно?
7. * В роботі проводиться експеримент з двома дифракційними ґратками. Як зміна ґратки впливає на дифракційну картину? У якому разі точність визначення λ більша? Чому?

Список літератури

1. Фізика для програмістів: навчальний посібник / Залуцька І. Є., Царик Т. О., Валь О. Д. Чернівці: Видавничий дім «Родовід». 2017. 320 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р. та ін. Фізика для інженерів. Львів: Видавництво «Львівська політехніка», 2009. 385 с.
3. Чолпан П.П. Фізика: підручник. К.: Вища школа, 2003. 567 с.
4. Бушок Г. Ф., Левандовський В. В., Півень Г. Ф. Курс фізики: навчальний посібник. Кн. І. Механіка. Електрика і магнетизм. К.: Либідь, 2001. 448 с.
5. Бабич М.П., Жуков І.А. Комп'ютерна схемотехніка: навч. посібник. К.: МК-Пресс, 2004. 412с.
6. Коруд В. І., Гамола О. Є., Малинівський С. М. Елетротехніка: підручник / за заг. ред. В. І. Коруда. 3-тє вид., переробл. і доп. Львів: Магнолія плюс; видавець СПД ФО В. М. Піча, 2005. 447 с.
7. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. 2-е вид. / за ред. А. Г. Соскова. К.: Каравела, 2009. 416 с.
8. Жданов Л. С., Жданов Г. А. Фізика для середніх спец. навч. Закладів. 3-тє вид. К: Вища шк. Головне вид-во, 1985. 494 с.
9. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики. Електрика і магнетизм: навч. посібник для вищих тех. закл. Т. 2 К.: Техніка, 1999. 452 с.
10. Волков О. Ф., Лумпієва Т. П. Курс фізики. У 2-х т. Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: навч. посібник для студ. інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Донецьк: ДонНТУ, 2009. 224 с.
11. Волков О. Ф., Лумпієва Т. П. Курс фізики. У 2-х т. Т.2: Коливання і хвилі. Хвильова і квантова оптика. Елементи квантової механіки. Основи фізики твердого тіла. Елементи фізики атомного ядра: навч. посібник для студ. інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Донецьк: ДонНТУ, 2009. 208 с.
12. Michael, Peter & Johnston, Danvers & Moreno, Wilfrido. (2020). A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*. 8. 10.21595/jme.2020.21667.
13. David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. *Fundamentals of Physics Extended*, 10th Edition. Wiley, Aug 28, 2013. Science. 1440 pages.

Навчальне видання

І. І. Гуцуляк

Електромагнетизм та оптика

Методичні вказівки до фізичного практикуму

Літературна редакторка

Ряднова В. П.

Технічна редакторка

Віщак Ю. С.

Підписано до друку 27.07.2022. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк різнографічний. Ум.-друк. арк. 4,0.
Обл.-вид. арк. 4,2. Зам. Н-082.

Видавництво Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича 58002, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2
e-mail: ruta@chnu.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №891 від 08.04.2002 р.