



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА  
ПУЛЮЯ

Кафедра електричної інженерії



**Методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт**

З КУРСУ

**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

для здобувачів вищої освіти  
за ОПП Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка  
першого рівня вищої освіти

ID 963

Тернопіль 2021

Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Енергозбереження» для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Уклад.: В.П.Коваль – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 119 с.

**Укладач**                      Вадим Коваль  
Завідувач кафедру електричної інженерії

**Рецензент**

Методичні вказівки розглянуто і затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії  
Протокол № 8 від 06.04.2021р.

Схвалено методичною радою ФПТ Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.  
Протокол № 8 від 04.05.2021 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Лабораторна робота № 1 КОНТАКТНИЙ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	8
1. Теоретичні відомості.....	8
2. Хід роботи .....	24
3. Опрацювання експериментальних даних .....	25
3. Контрольні запитання .....	25
Лабораторна робота № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПЕКТРУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ .....	26
1. Теоретичні відомості.....	26
2. Хід роботи .....	38
3. Контрольні запитання .....	42
Лабораторна робота № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА .....	43
1. Теоретичні відомості.....	43
2. Хід роботи .....	55
3. Контрольні запитання .....	55
Лабораторна робота № 4 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАМІНИ ЛАМП РОЗЖАРЮВАННЯ НА КЛЛ ТА СД ЛАМПИ .....	56
1. Теоретичні відомості.....	56
2. Хід роботи .....	67
3. Контрольні запитання .....	69
Лабораторна робота № 5 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА СВІЛОТЕХНІЧНИЙ АУДИТ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ ІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ СВІТЛА .....	71
1. Теоретичні відомості.....	71
2. Хід роботи .....	76
3. Контрольні запитання .....	77
Рекомендована література .....	78

## ВСТУП

Виконуючи лабораторну роботу з курсу «Енергозбереження», студенти отримують відповідні навички роботи з вимірювальними приладами і технічним устаткуванням, розвивають спостережливість, привчаються глибше аналізувати фізичні процеси.

Враховуючи істотне значення лабораторних робіт, особливо для вивчення предмета «Енергозбереження», необхідно повністю виконувати всі роботи, передбачені програмою. Для цього слід дотримуватися прийнятої організації занять у лабораторії.

Як правило, лабораторні роботи виконують безпосередньо після вивчення одного або кількох розділів теоретичного курсу, оскільки вони є практичним підтвердженням теоретичних положень і висновків.

На початку першого заняття в лабораторії студенти повинні ознайомитися з технікою безпеки в лабораторії і порядком виконання лабораторних робіт, звертаючи увагу на їх загальні особливості. Після цього студенти приступають до роботи. Вказівки до виконання заданої роботи вони отримують від викладача під час бесіди або інструктажу біля кожного робочого місця.

Головне при виконанні роботи – повна самостійність. Виконуючи лабораторну роботу, студенти повинні проявляти ініціативу в подоланні труднощів. Звертатися до викладача слід лише тоді, коли вичерпані всі можливі вирішення питань про структуру тієї або іншої схеми, методику виконання окремих етапів лабораторної роботи.

Якщо лабораторну роботу виконують одночасно три-чотири студенти, потрібно аби кожен з них мав певні завдання і виконував їх по черзі.

Можна скористатися і іншим методом, при якому схему збирає один студент, а інші стежать за роботою і весь час контролюють його. Зібрану схему перевіряють, також дотримуючись черговості.

**Підготовка та допуск до лабораторних робіт.** Для того, щоб студенти змогли свідомо виконувати практичні завдання в лабораторії, вони заздалегідь повинні до них підготуватися, не тільки вивчаючи теоретичну частину курсу, але і ознайомитись із методичними вказівками до виконання кожної лабораторної роботи.

Облік лабораторних робіт викладач веде в журналі на відведених для цього сторінках. У журналі він проставляє допуск до виконання роботи, відробку та захист, враховуючи якість виконання, отримання найхарактерніших результатів, відношення студента до роботи в процесі її виконання, уміння

самостійно узагальнювати результати, а також якість звіту. В звіті повинні бути схеми (рисунок панелей приладів для відповідних робіт), графіки, чітко виконані таблиці результатів, зрозуміло і лаконічно висловлений короткий опис виконання роботи й особливо висновків, що узагальнюють її результати.

Готуючись до лабораторної роботи, потрібно повторити теоретичний матеріал, користуючись рекомендованою літературою, вказаною в кінці даних методичних вказівок.

Потім студентам необхідно детально ознайомитися зі змістом роботи, переліком приладів і устаткування, з'ясувати поставлену мету, розглянути схеми з'єднання приладів, з'ясувати найприйнятніші номінали вимірювальних приладів і технічні дані устаткування, уважно прочитати розділ «Хід роботи», звернути увагу на рекомендовані електричні режими, методику виконання вимірювань і необхідних обчислень, ознайомитися з формами таблиць, в які вони записуватимуть результати вимірювань.

*У результаті попередньої підготовки слід оформити звіт, в якому повинні бути:*

1. Назва та мета роботи.
2. Перелік приладів і обладнання, які використовуються під час виконання лабораторної роботи.
3. Схема установки та її короткий опис.
4. Хід роботи із таблицями результатів вимірювань і розрахунків для подальшого виконання лабораторної роботи.

На всі питання, що виникли під час підготовки, треба знайти відповідь, користуючись рекомендованою літературою. Незрозумілі питання слід обговорити з викладачем.

*Під час отримання допуску до виконання лабораторної роботи потрібно представити викладачу звіт про попередню підготовку, оформлений згідно з чинними нормами та правилами, сказати назву та мету, хід роботи, описати схему установки, дати відповіді на запитання про принцип дії та будову вимірювальних приладів, які використовуються.*

**Виконання лабораторних робіт.** Для успішного виконання лабораторних робіт у відведений за розкладом час студенти повинні точно дотримуватися основних положень, що визначають порядок і методичну послідовність дій під час лабораторних занять:

1. Кожен студент зобов'язаний виконувати вимоги внутрішнього розпорядку, встановленого в лабораторії навчального закладу, і строго дотримуватися правил техніки безпеки під час роботи з електричними установками.
2. Лабораторні роботи студенти виконують бригадами (по 2 – 3

людини). Кожен член бригади повинен оформити звіт.

3. Лабораторні роботи проводяться за розкладом відповідно до графіка, складеного викладачем. Робочі місця в лабораторії можна міняти лише з дозволу і за вказівкою викладача.

4. Кожну лабораторну роботу виконують на певному столі, біля якого прикріплена табличка з її номером відповідно до тематики, складеної викладачем. Переставляти технічні системи й устаткування зі столу на стіл без дозволу викладача забороняється.

5. Перед виконанням завдання перш за все потрібно ознайомитися з устаткуванням і його технічними характеристиками, відповідно до вказівок, наведених в описі виконуваної роботи. Записують технічні характеристики тих деталей, приладів і устаткування, які фактично використовувалися, оскільки залежно від місцевих умов лабораторії деякі технічні системи можуть відрізнятися від вказаних в описі.

6. Перед складанням схеми кожної вимірювальної установки треба ознайомитися зі схемами вмикання приладів, чітко представляти відповідність затискачів тим або іншим точкам схеми. З'єднуючи технічні системи й апаратуру, необхідно прагнути, аби кола виходили простими й наочними, щоб контакти були щільно затиснені, а сполучні провідники були якомога коротші, але не натягнуті.

7. Після складання схеми студентам потрібно звернутись до викладача або лаборанта з проханням перевірити, чи правильно складена схема.

8. Джерела живлення вмикають тільки після дозволу викладача і в останню чергу, перед виконанням роботи, а вимикають їх після закінчення роботи в першу чергу. Якщо потрібно провести перемикання в схемі, обов'язково вимикають джерела живлення. Знову вмикати їх можна лише з дозволу викладача.

9. Забороняється залишати під напругою навчальну схему і технічні системи.

10. Про виявленні несправності приладів і апаратури повідомляють викладача. Самостійно усувати несправності забороняється.

11. Під час виконання лабораторних робіт треба дбайливо поводитися з приладами, деталями, апаратурою й устаткуванням, маючи на увазі, що ними користуватимуться й інші студенти.

12. Результати вимірювань слід показати викладачу, після чого схему можна розібрати. Технічні системи й апаратуру треба розмістити на столі в такому порядку, в якому вони були до початку роботи.

**Оформлення звіту про виконання лабораторних робіт.** За кожною виконаною лабораторною роботою студент оформляє звіт. На титульній

сторінці звіту треба вказати міністерство, якому підлеглий навчальний заклад, назву навчального закладу, назву кафедри, в межах якої проводиться навчання студентів, номер лабораторної роботи, тему, групу, своє прізвище, ім'я, по батькові; в окремому місці повинна бути відмітка про допуск, виконання та захист звіту.

На решті сторінках повинні бути такі дані: схеми вимірювальних установок, перелік приладів і устаткування, хід роботи; таблиці із результатами виконання роботи, графіки і діаграми; висновки за результатами вимірювань і спостережень.

Складений звіт із дотриманням вимог оформлення, студент повинен здати викладачу на наступному лабораторному занятті й бути готовим відповісти на кожне з контрольних запитань, що відносяться до виконаної роботи.

# Лабораторна робота № 1

## КОНТАКТНИЙ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

**Мета роботи.** Навчитись вимірювати температуру контактним та безконтактним методом, а також ознайомитись з технічними характеристиками, будовою та принципами роботи приладів для вимірювання температури.

### 1. Теоретичні відомості

#### 1.1. Контактне вимірювання температури

Найчастіше для вимірювання температури застосовують контактні методи, що передбачають використання як чутливих елементів *перетворювачів електричного опору* (далі "*термоперетворювачі опору*") чи термопар.

Дія термоперетворювачів опору основана на зміні електричного опору металів, чи напівпровідників, при зміні температури.

Найбільш поширені у промисловості *платинові* та *мідні термоперетворювачі опору*. Платинові термоперетворювачі здатні вимірювати температуру від  $-260$  до  $750$  °С; мідні — від  $-200$  до  $200$  °С.

Найпростішим вторинним приладом, тобто приладом, що показує величину температури згідно зі зміною величини опору термоперетворювача опору, є *логометр магнітоелектричної системи*. Шкала логометра градуйована в градусах. Розрахований він на використання з термоперетворювачем опору саме того типу, що вказано на шкалі приладу.

Принципова електрична схема логометра з термоперетворювачем опору зображена на рис. 1. Завдяки нерівномірному повітряному проміжку у вимірювальному механізмі постійний магніт  $M$  створює нерівномірне магнітне поле, у якому є дві перехрещені рамки  $P_1$  і  $P_2$ . Послідовно з першою рамою увімкнено перетворювач опору  $R_{TO}$ , а послідовно з другою — резистор, виконаний з манганіну.

При температурі, що відповідає початку шкали логометра, величина опору перетворювача  $R_{TO}$  буде найменшою, а струм у рамці, яка увімкнена послідовно з цим опором, буде найбільшим. Завдяки цьому рамка створюватиме найбільший обертовий момент, що буде врівноважений найбільшим моментом, створюваним другою рамкою, яка перебуває у положенні, де щілина між полюсами магніта  $M$  і центральним осердям буде близькою до мінімальної.



При збільшенні величини контрольованої температури величина опору перетворювача  $R_{TO}$  збільшуватиметься, а струм у ньому і у рамці, що ввімкнена послідовно з ним, а також і обертовий момент, створюваний цією рамкою, зменшуватимуться. При цьому врівноваження її моменту має відбутися при такому куті відхилення стрілки, при якому друга рамка потрапить у місце щілини між полюсами магніту і центральним осердям, де ширина щілини буде більшою, ніж у попередньому випадку, оскільки ця рамка повинна створювати меншу величину обертового моменту, при незмінній величині струму в ній, зумовленій опором манганінового резистора незмінної величини. У другому положенні врівноваженості обертових моментів рамок приладу стрілка покаже величину температури, до якої було нагріто термперетворювач.

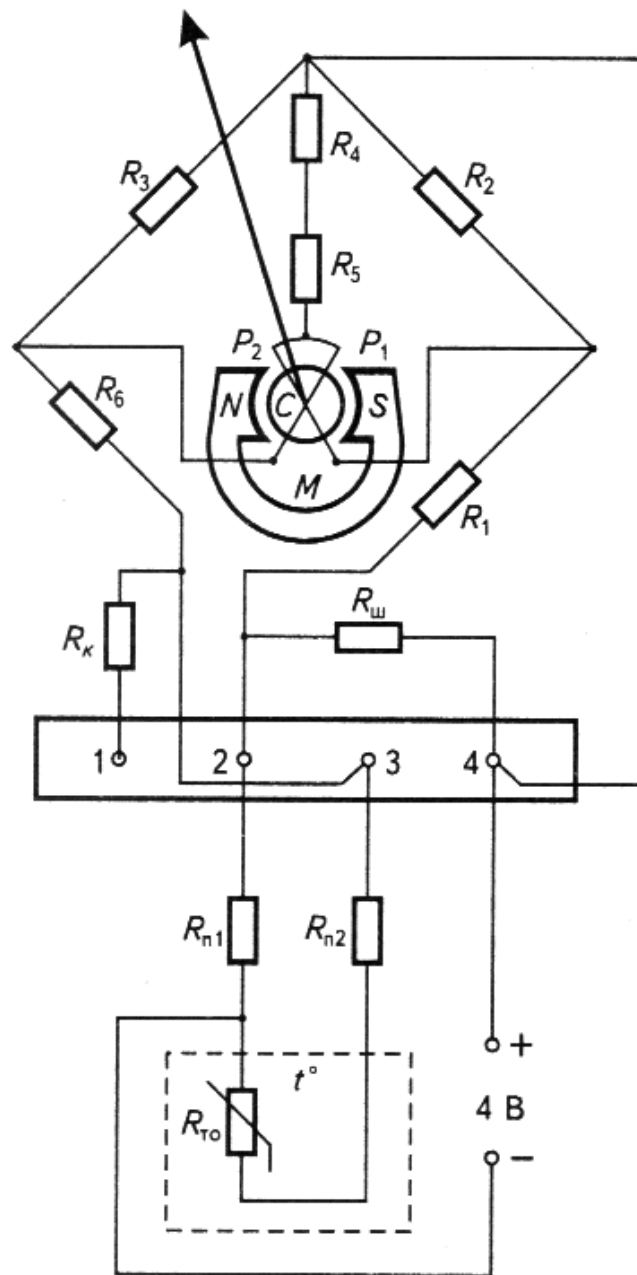


Рис. 1. Принципова електрична схема логометра з термперетворювачем опору

Коливання величини напруги живлення практично не впливатимуть на показання логометра, бо вони однаковою мірою змінюватимуть величини струмів обох рамок, тобто однаковою мірою змінюватимуть і величини обертових моментів, що створюються обома рамками. При цьому рівновага не порушується і рухома частина приладу не змінить свого положення. Таким чином, питання про доцільність точної стабілізації величини напруги, що живить схему, тут не виникає.

Опори  $R_{П1}$  та  $R_{П2}$  призначені для початкового підрегулювання величини опору лінії між термоперетворювачем і логометром до тієї величини, на яку розраховано логометр. Це, звичайно, 5 чи 15 Ом (уточнюється згідно з технічним описом приладу).

Логометри дуже часто використовують у схемах вимірювання температури. Але за необхідності проведення вимірювань з похибками, що не перевищували б одного відсотка, або реєстрації температури, термоперетворювачі опору використовують разом з автоматичними мостами, які забезпечують вимірювання з похибками, що не перевищують 0,25...0,5%. Але схеми з автоматичними мостами значно складніші за схеми з логометрами, та й вартість цих мостів набагато більша за вартість логометрів. На це слід зважити, вирішуючи питання про застосування схем вимірювання температури.

Спрощену принципову схему автоматичного врівноваженого мосту, що застосовується при вимірюванні температури за допомогою термоперетворювача опору, зображено на рис. 2. У цій схемі термоперетворювач  $R_{ТО}$  ввімкнено в одне з плечей вимірювального мосту. При цьому термоперетворювач приєднано за трипровідною схемою, де джерело живлення приєднане до мосту коло самого перетворювача так, що проводи лінії з'єднання перетворювача з мостом і  $R_{П}$  опиняються у різних плечах мосту. Це дає можливість суттєво зменшити похибку вимірювань, спричинену зміною опорів мідних з'єднувальних проводів у залежності від збільшення або зменшення температури довкілля. Зміна ця може бути істотною при значній відстані між перетворювачем і мостом. Автоматично міст балансується пересуванням рухомого контакту реохорда  $R_p$ , механічно з'єданого з асинхронним реверсивним двигуном РД, керованим напругою підсилювача П, вхідні затискачі якого ввімкнено у вимірювальну діагональ мосту.

Якщо міст не збалансовано, то наявна на вимірювальній діагоналі напруга підсилюється цим електронним підсилювачем і сприймається реверсивним двигуном як напруга на обмотці управління двигуна. Ротор двигуна починає обертатись у бік зменшення розбалансування мосту. При цьому рухомий контакт реохорда  $R_p$  переміщується до положення, у якому міст буде

збалансовано, тобто напруга на його вимірювальній діагоналі дорівнюватиме нулю. У цьому разі напруга, прикладена до обмотки управління двигуном, також дорівнюватиме нулю. Це призведе до зупинки двигуна рухомого контакту реохорда і покажчика температури, який показуватиме саме ту величину температури, яка діє на термоперетворювач  $R_{TO}$ . Подальший рух контакту реохорда і покажчика по шкалі відбуватиметься в разі зміни величини температури, контрольованої термоперетворювачем  $R_{TO}$ .

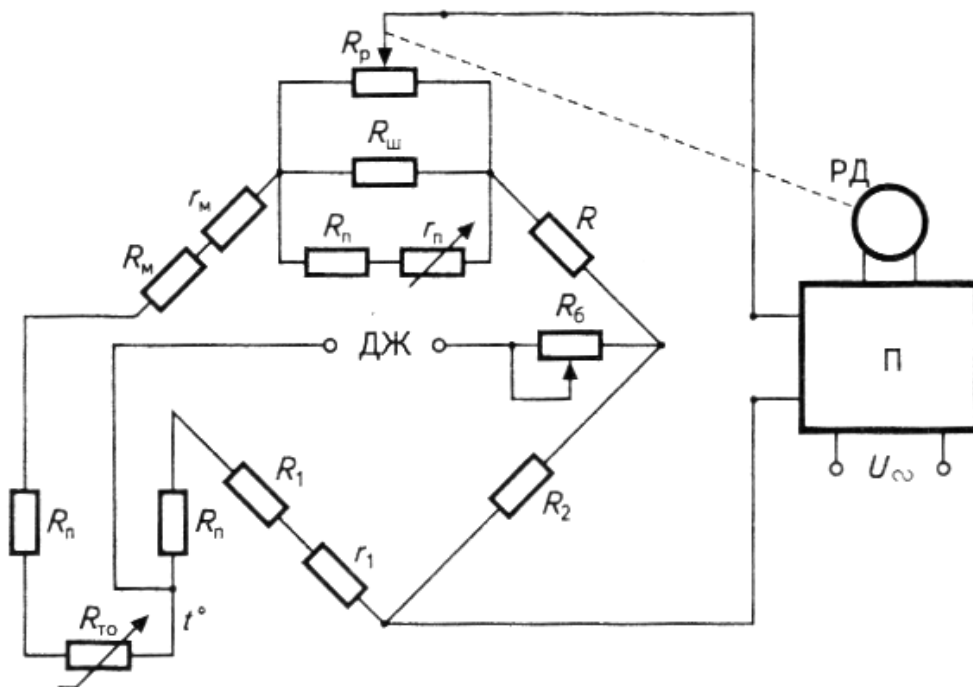


Рис. 2. Принципова схема автоматичного врівноваженого мосту

Схема автоматичного мосту має два підгінні резистори  $R_{п}$ , за допомогою яких опори кіл проводів лінії, що з'єднує термоперетворювач опору з мостом, підганяються до величин, обумовлених технічним описом.

Якщо за перетворювач температури прийнято термопару, яка перетворює температуру на термоелектрорушійну силу, то вторинними приладами, які вимірюють цю ЕРС, можуть бути мілівольтметр або автоматичний потенціометр.

Треба зазначити, що застосування для вимірювання температури термопар породжує дещо більше проблем, ніж застосування термоперетворювачів опору. Справа в тому, що у перетворювача опору величина опору однозначно пов'язана з його температурою і від сторонніх причин майже не залежить (дуже малою мірою залежить від температури, де проходить лінія, що з'єднує термометр опору з вимірювальним приладом). При застосуванні термопар її ЕРС залежить від різниці температури місця

з'єднання різнорідних проводів, що створюють її, й температури інших її кінців, що перебувають за межами об'єкта, температуру якого вимірюють. Ці проводи приєднано до приладу, що вимірює ЕРС термопари. Тобто величина вимірюваної ЕРС залежить від температури приміщення, куди заведено вільні (холодні) кінці термопари.

У більшості випадків температура у приміщенні залежить від температури зовнішньої атмосфери, а то й від зовсім не передбачуваних причин (наприклад, від наявності або відсутності протягів у приміщенні). Звичайно, при наявності постійно ввімкненого кондиціонера, що, незалежно від пори року, підтримує незмінну температуру у приміщенні, куди заведено холодні кінці термопар, вказаний недолік можна суттєво зменшити. Але у реальних умовах, за наявності розкиданих на значних відстанях місцях встановлення вимірювальних кінців термопар, виготовити ці термопари з нерозривними лініями однорідних проводів неможливо. Тому користуються кількома засобами зменшення впливу коливань зовнішньої температури на результати вимірювань. До цих засобів відносять: укладання місць з'єднання холодних кінців термопар у посудини з танучим льодом; розміщення місць з'єднання у посудині Дюара; розміщення місць з'єднання у термостат з автоматичним регулюванням температури на рівні вищій, ніж можна очікувати у експериментальних випадках; розміщення місць з'єднання глибоко у землю, де практично відсутні сезонні коливання температури; розміщення місць з'єднання у масивних металевих коробах; автоматичне введення поправок до показань вимірювальних приладів, залежно від величини температури у приміщенні, де зібрано місця з'єднань.

Для перенесення місць з'єднання термопари з приладами, розміщеними у місці зі стабільнішою температурою, ніж та, що є біля кінців термопари, які виходять з контрольованого об'єкта, застосовують термоелектродні проводи. Часто їх називають "компенсаційними проводами", хоча насправді ніякої компенсації температурної похибки вимірювань вони не здійснюють, а лише переносять можливе місце з'єднання далі від місця вимірювання.

Термоелектродні проводи з одного боку приєднують до вивідних кінців термопари, а з іншого — безпосередньо до вимірювального приладу.

Мілівольтметри, що застосовують для вимірювань ЕРС термопар, являють собою магнітоелектричні прилади, які приєднують або до вивідних кінців термопар, або до кінців термоелектродних проводів. Шкали цих мілівольтметрів, розрахованих на приєднання до певних термоперетворювачів, градуують безпосередньо у градусах температури, Принципова схема з'єднання термопари ТП з мілівольтметром наведена на рис.3. Крім вимірювального механізму ВМ, у схемі мілівольтметра присутні: резистор  $r_d$ , за

допомогою якого загальний опір мілівольтметра ВМ налаштовується на величину напруги термопарі ТП, що відповідає величині температури, вказаній на останній позначці шкали. Паралельно між собою з'єднані терморезистор  $r_{\text{ТР}}$ , що має негативний температурний коефіцієнт опору, та резистор  $r_{\text{М}}$ , виготовлений з манганінового дроту. Ці два резистори призначені для компенсації впливу температури, що є довкола приладу, на показання мілівольтметра. Резистор  $r_{\text{П}}$ , встановлений поряд з мілівольтметром, використовують для того, щоб підігнати величину зовнішнього опору до величини, вказаної на шкалі мілівольтметра (звичайно це 5 чи 15 Ом).

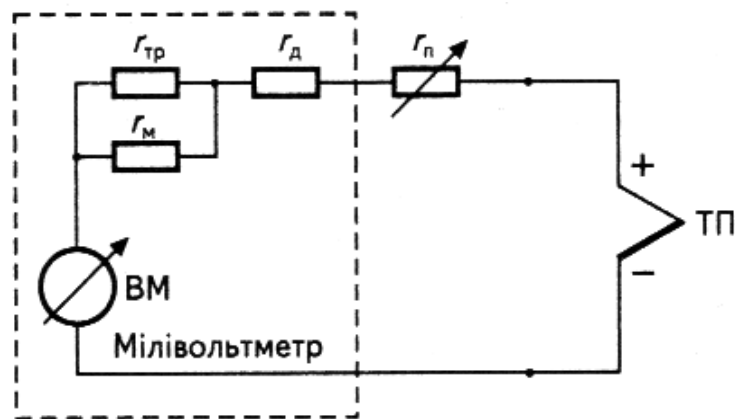


Рис. 3. Принципова схема з'єднання термопарі з мілівольтметром

Зауважимо, що поряд з нескладністю і надійністю схем вимірювання напруги термопар мілівольтметрами, ці прилади інколи не забезпечують достатньої точності вимірювань. Так, стаціонарні мілівольтметри звичайно мають клас точності, не вищий за 1...1,5. Вимірювання з більшою точністю забезпечуються при використанні автоматичних потенціометрів, що мають клас точності 0,25 або 0,5.

Схему, призначену для вимірювання ЕРС термопарі автоматичним потенціометром, показано на рис. 4. У потенціометрі використано мостову потенціометричну схему. У цій схемі ЕРС термопарі компенсується падінням напруги на резисторі  $R_{\text{Р}}$ , з рухомим контактом, що переміщується за допомогою реверсивного двигуна РД, обмотка управління якого  $W_{\text{У}}$  живиться від електронного підсилювача П. Двигун РД разом з рухомим контактом  $A$  резистора  $R_{\text{Р}}$  пересуває вздовж шкали механічно з'єднаний з ним покажчик температури, а разом і каретку з пристроєм для писання, що на рухомій паперовій стрічці або на паперовому диску викреслює залежність температури від часу.

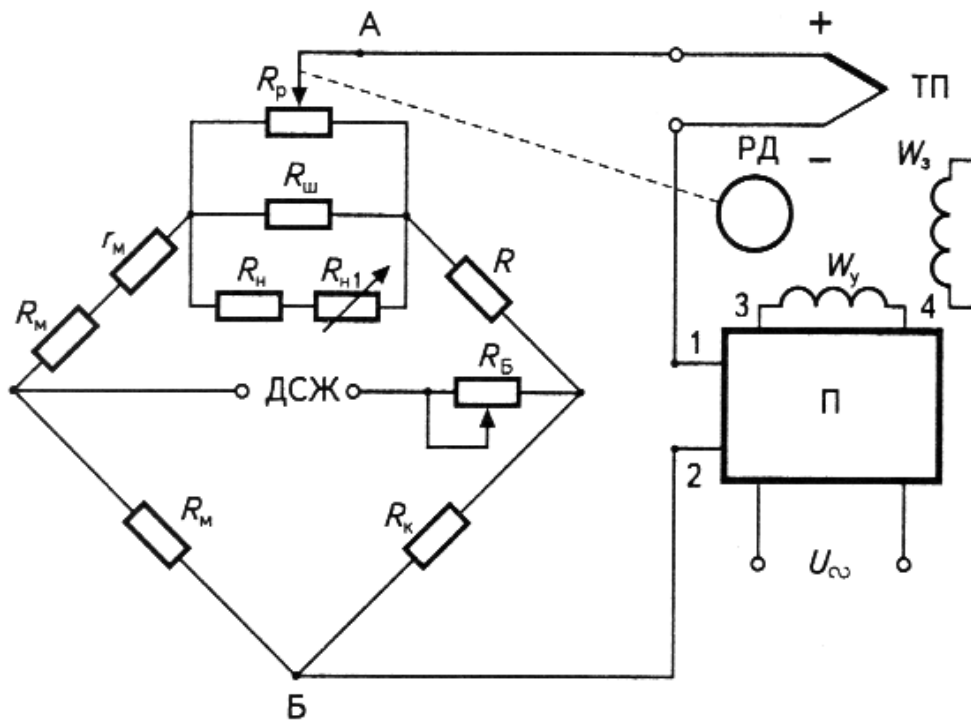


Рис. 4. Принципова схема для вимірювання ЕРС термопар автоматичним потенціометром

Якщо між точками  $A$  та  $B$  цієї схеми напруга дорівнює ЕРС термопарі ТП, то напруги на входних затискачах  $1$  і  $2$  електронного підсилювача П немає. А так немає напруги і на його вихідних затискачах  $3$  і  $4$ . Двигун РД при цьому перебуває у спокої, хоча напруга на його обмотці збудження  $W_3$  є завжди. Треба пам'ятати, що двигун РД — це двофазний асинхронний двигун, ротор якого починає обертатися лише за наявності напруг на обох його обмотках, та ще й зсунутих за фазою одна відносно іншої.

Якщо ж ЕРС термопарі не повністю врівноважена падінням напруги, що є між точками  $A$  та  $B$ , то напруга з'явиться на затискачах  $1$  і  $2$  підсилювача П.

У підсилювачі П ця напруга постійного струму перетвориться у напругу змінного струму (для цього там є вібраційний перетворювач) і, після підсилювання у фазочутливому блоці цього підсилювача, з'явиться на затискачах  $3$  і  $4$  підсилювача П. Ротор двигуна РД прийде до руху й почне переміщувати рухомий контакт резистора  $R_P$  у бік зменшення напруги між точками  $1$  та  $2$  підсилювача П. Після зменшення цієї напруги до нуля, напруга на обмотці управління  $W_y$  зникне і двигун РД зупиниться, пересунувши рухомий контакт резистора  $R_P$ , а з ним і показчик температури, і пристрій для писання у положення, що відповідає новому значенню вимірюваної температури.

Наявність у схемі резистора  $R_M$ , виконаного з мідного ізолюваного дроту, дає можливість частково компенсувати похибку вимірювань, спричинену зміною величини температури у приміщенні, де встановлено автоматичний потенціометр і водночас розміщено зовнішні кінці термопари, або кінці термоелектродних (компенсаційних) проводів.

Зміна величини температури у приміщенні призводить до деякої зміни величини опору резистора  $R_M$  (бо у міді досить значна величина температурного коефіцієнта електричного опору), завдяки чому величина напруги між точкою  $B$  схеми і точкою  $A$  зміниться саме настільки, наскільки зміниться величина ЕРС термопари ТП завдяки зміні температури її зовнішніх кінців.

Резистори  $R_{Ш}$ ,  $R_H$  та  $R_{Н1}$  призначені для початкового встановлення меж вимірювання температури;  $R_H$  та  $R_{Н1}$  — для встановлення температури, що відповідає початку шкали потенціометра;  $R_B$  — резистор початкового регулювання величини напруги, що надходить на мостову потенціометричну схему від джерела стабільного живлення ДСЖ.

Автоматичний потенціометр живиться від мережі змінного струму напругою 220 В, 50 Гц, але вимірювальна частина схеми (самий потенціометричний міст) живиться постійним струмом від внутрішнього джерела стабільного живлення ДСЖ.

Більшість автоматичних потенціометрів мають сигнальний пристрій, що подає світловий чи акустичний сигнал після переходу вимірюваної температури через задалегідь задані величини. Крім того, потенціометри мають контакти, що здатні керувати електричними апаратами автоматичного керування процесом нагріву контрольованого об'єкта, наприклад електротермічної печі.

## 1.2. Безконтактні методи вимірювання температури

Вимірювання надзвичайно високих температур, або помірних температур в умовах, несприятливих для розміщення в об'ємі з контрольованою температурою термоперетворювачів (наприклад, через наявність агресивного середовища), виконується за допомогою *пірометрів*, які можуть визначати величину температури через випромінювання.

Найбільш простими є *яскравісні пірометри*, де яскравість випромінюючого предмета (наприклад, деталі, що проходить термічну обробку у печі, яка має невеликий отвір у дверцях чи у стінці) порівнюється з яскравістю зразкового випромінювача — *ниткою розжарювання фотометричної лампи*. Для такої лампи задалегідь визначається залежність

між температурою розжарюваної металевої нитки і величиною електричного струму, що проходить через неї.

Будова оптичного пірометра, що визначає температуру на основі порівняння яскравостей, показано на рис. 5, а, де 1 — міліамперметр; 2 — реостат; 3 — окуляр; 4 — фотометрична лампа; 5 — корпус пірометра; 6 — об'єктив; 7 — джерело живлення кола лампи.

При вимірюванні температури об'єктив 6 спрямовують на розжарене тіло, температура якого вимірюється. За допомогою пересування об'єктива 6 і окуляра 3 досягають суміщення у одній площині зображення ділянки поверхні, що випромінює, й нитки розжарювання лампи 4. Далі за допомогою реостата 2 змінюють величину струму, споживаного ниткою лампи від джерела живлення 7. За малого струму нитка лампи лишається темною на фоні зображення розжареної поверхні (рис. 5, б, поз. 7), а при занадто великому струмі розжарена нитка виглядає яскравішою, ніж зображення розжареної поверхні (рис. 5, б, поз. 3), і лише при правильно вибраній величині струму, коли яскравості розжареної поверхні та нитки стають однаковими, нитка зникає з поля зору (рис. 5, б, поз. 2). Необхідно міліамперметром 1 точно виміряти струм, за якого нитка зникла з поля зору, а далі, виходячи з відомої залежності величини температури нитки розжарювання від величини струму, що її розжарює (рис. 5, в), визначають величину температури нитки, а також і температуру випромінювальної поверхні.

Більш зручними у користуванні є оптичні пірометри з міліамперметром і батареєю живлення, що конструктивно розміщені у корпусі пірометра. Звичайно, розміри і маса таких пірометрів бувають значно більшими.

Тепер вважають за доцільніше мати заздалегідь визначену залежність між температурою нитки розжарювання фотометричної лампи і напругою, що прикладена до неї. У цьому разі слід використовувати не міліамперметр, а вольтметр.

У радіаційних пірометрах потужність теплового випромінювання сприймається термобатареею, що складається з кількох термоперетворювачів (термопар), увімкнених послідовно. На плоскі місця зварювання електродів (проводів) термопар, розташованих поряд, чи зіркою, як показано на рис. 6, напрямляють сфокусований об'єктивом промінь від випромінювальної поверхні, температуру якої необхідно визначити. Плоскі зварені кінці термопар 1 мають бути зачорнені шляхом оксидування (не блискучого), для одержання поверхні, що якнайбільше поглинає сфокусований об'єктивом промінь. "Холодні" кінці термоперетворювачів 2 слід захистити від випадкового попадання, хоч на деякі з них, частини сфокусованої світлової плями, бо це сприятиме зменшенню ЕРС термобатарей  $E_{ТБ}$ .



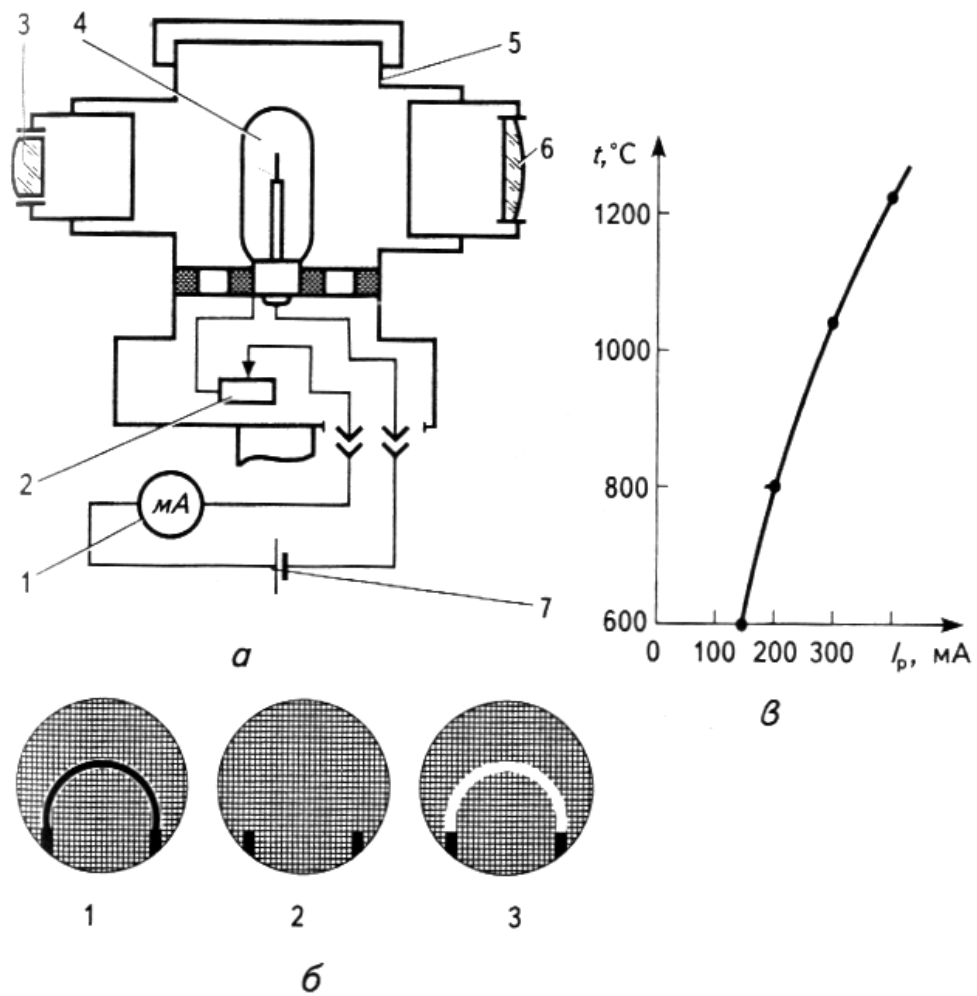


Рис. 5. Оптичний пірометр: а — будова; б — можливі зображення нитки фотометричної лампи при різних величинах струму в нитці; в — залежність температури нитки від величини струму розжарювання

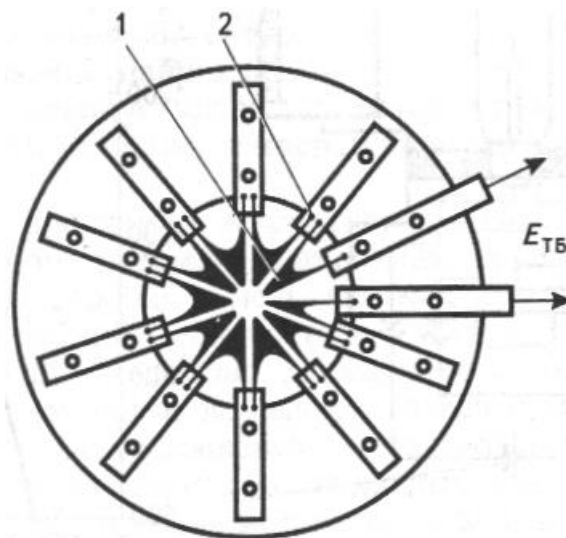


Рис. 6. Термобатарей радіаційного пірометра

Найчастіше ЕРС термобатарей вимірюють за допомогою автоматичного потенціометра, хоча можна застосовувати для цього і мілівольтметр.

Радіаційні пірометри здатні вимірювати температуру від 400 до 2500 °С.

Ефективність подібних пірометрів знижується поглинанням енергії випромінювання у об'єктивах. Тому їх бажано виконувати з кварцового скла з причини малого поглинання ним інфрачервоного випромінювання.

За необхідності вимірювання радіаційними пірометрами відносно невисоких температур (у межах 100...500 °С), за яких потужність світлового випромінювання зовсім мала, бо випромінювання у них в основному інфрачервоне, користуватись об'єктивами зовсім недоцільно через значне поглинання ними енергії випромінювання. Для концентрації променя на термобатарей доцільніше використовувати увігнуте дзеркало, поперед якого встановлюють термобатарей.

Згідно з літературними джерелами, такі пірометри здатні вимірювати температури навіть значно менші за 100 °С (електронні підсилювачі для цього не потрібні).

Радіаційні пірометри менш точні порівняно з яск-равісними, але вони не потребують ручного регулювання струму, що проходить ниткою розжарювання, а на вихідних затискачах термобатарей дають напругу, величина якої пропорційна потужності випромінювання. Цими пірометрами зручно користуватись разом з автоматичними потенціометрами для безперервного вимірювання температури та її реєстрації, а також для автоматичного регулювання температури.

*Фотоелектричні пірометри* сприймають випромінювання світлого тіла фотоелементами і перетворюють енергію випромінювання в електричний струм, величина якого функціонально пов'язана з яскравістю джерела випромінювання.

Найпростішими з цих пірометрів слід визнати *переносні*, виготовлені на основі напівпровідникових фотоелементів і здатні до роботи з чутливими магнітоелектричними приладами без будь-яких проміжних електронних підсилювачів.

Щодо більшості стаціонарних фотоелектричних пірометрів, виконаних на вакуумних або газонаповнених фотоелементах, то вони, звичайно, мають електронні підсилювачі, що використовуються для підсилення дуже слабких струмів фотоелементів.

### 1.3. Основні характеристики пірометрів

Портативні пірометри використовуються:

- для виміру температури важкодоступних об'єктів;
- для виміру температури частин об'єктів, що рухаються;
- при обстеженнях частин об'єктів, які перебувають під напругою;
- при контролі високотемпературних процесів;
- для реєстрації температур, які швидко змінюються;
- для виміру температури тонкого поверхневого шару об'єктів;
- під час обстеження частин об'єктів, що не допускають дотиків;
- при обстеженнях матеріалів з низькою теплопровідністю чи теплоємністю:
- для експрес-вимірів.

Сфера застосування портативних пірометрів при проведенні енергетичних обстежень:

- теплоенергетика (казани, турбіни, бойлери, теплотраси, паропроводи);
- електроенергетика (трансформатори, кабелі, контакти, шини, що перебувають під напругою);
- металургія і металообробка (печі, стани, преси);
- електроніка;
- діагностика двигунів внутрішнього згорання;
- електродвигуни і підшипники;
- контроль температури виробничих процесів;
- обстеження будинків і споруджень;
- системи опалення, вентиляції і кондиціонування;
- обстеження холодильної техніки.

В залежності від природної вхідної величини пірометри поділяються на:

- пірометри повного випромінювання (радіаційні пірометри), що сприймають повну енергію випромінювання об'єкта;
- пірометри часткового випромінювання (яскравісні пірометри), засновані на залежності від температури енергетичної яскравості випромінювання об'єкта в обмеженому діапазоні довжин хвиль;
- пірометри спектрального відношення (кольорові пірометри), в яких використовується залежність від температури спектральних енергетичних яскравостей об'єкта на двох або декількох довжинах хвиль.

Пірометри прямого перетворення складаються з оптичної системи, приймач випромінювання та вимірювального кола з вторинним вимірювачем на

базі мікропроцесорного обчислювального пристрою. Пірометри врівноважуючого перетворення, окрім цього, мають у своєму складі ще й взірцеве джерело випромінювання.

В залежності від типу оптичної системи, за допомогою якої випромінювання об'єкта передається на приймач випромінювання приладу, пірометри розподіляються на рефракторні зі збиральною лінзою, рефлекторні зі збиральним дзеркалом, світловодні та комбіновані.

Теорія пірометричних методів вимірювання температури заснована на законах, що встановлюють зв'язок між випромінюванням абсолютно чорного тіла (АЧТ) та його температурою. Під визначенням АЧТ розуміється тіло, яке поглинає все випромінювання, що падає на нього, та відповідно може при даній температурі випромінювати максимальну енергію. Близьким наближенням до АЧТ є зачинена з усіх боків порожнина з малим отвором, площа якого нехтовно мала у порівнянні із загальною площею поверхні порожнини.

Первинний перетворювач пірометра забезпечує перетворення енергії, яку випромінює об'єкт, що досліджується, у електричний сигнал. Надалі цей сигнал надходить до вимірювального перетворювача, який забезпечує перетворення електричного сигналу<sup>1</sup> у форму, зручну для відліку чи реєстрації на дисплеї пірометра. Степенева функція перетворення інфрачервоного випромінювання об'єкта у електричний сигнал оптоелектронного тракту пірометра описується формулою

$$U = U_0 + (1 - \varepsilon) \times k \times T_{\phi}^n + \varepsilon \times k_{\varepsilon} \times T^n .$$

де  $U_0$  - постійна складова від зміщення куля операційного підсилювача пірометра, а також від впливу на пірометр температури навколишнього середовища:

$\varepsilon$  - значення випромінювальної здатності об'єкта, температура якого вимірюється (для АЧТ  $\varepsilon = 1$ ):

$k_{\varepsilon}$  - коефіцієнт перетворення інфрачервоного випромінювання об'єкта в електричний сигнал оптоелектронного тракту пірометра, значення якого залежить від ширини робочого спектрального діапазону приймача випромінювання і температурного діапазону пірометра:

$T_{\phi}$  - температура фонового випромінювання, яку необхідно

враховувати при малих значеннях випромінювальної здатності об'єкта:

$T$  - температура об'єкта.

Портативні пірометри характеризуються такими технічними показниками.

### *Діапазон температур, які вимірюються*

Робочий діапазон температур залежить від довжини хвилі електромагнітного випромінювання, на яку реагує детектор пірометра. Спектр випромінювання з підвищенням температури зміщується у бік коротких хвиль. Тому високо температурні пірометри сприймають хвилі з меншою довжиною. Теоретично верхня межа виміру температури пірометрами не обмежена.

### *Швидкодія*

Пірометри застосовуються у випадках швидкої зміни температури об'єкта, тому швидкодія є для них важливою характеристикою. Кількісно швидкодія пірометра зазвичай оцінюється часом досягнення 95% сталого показання приладу (часом встановлення показання).

### *Коефіцієнт випромінювання та можливість його коригування*

Для того щоб забезпечити точне визначення температури об'єкта за електромагнітним випромінюванням, необхідно знати коефіцієнт випромінювання об'єкта (ступінь чорноти). Більшість з поверхонь за характером випромінювання близька до чорного тіла. Однак деякі, наприклад поліровані метали, істотно відрізняються від нього. В простих пірометрах закладено фіксоване значення коефіцієнта випромінювання об'єкта (найчастіше  $\epsilon = 0,95$ ) тому при вимірюванні температури поверхні, вони можуть давати похибку у декілька градусів. У більш складних пірометрах можна кожного разу встановлювати інше значення коефіцієнта випромінювання об'єкта, компенсуючи цю похибку. Високоточні пірометри мають вбудовані таблиці коефіцієнтів випромінювання для багатьох найпоширеніших матеріалів, що рятує користувача від необхідності їх запам'ятовування.

### *Оптичне розділення*

Пірометри вимірюють середню температуру поверхні, що перебуває у сфері чутливості приладу, яку, в свою чергу, у першому наближенні можна представити конусом, вершина якого спирається на об'єктив пірометра, а основа розміщується на поверхні об'єкта. Відношення висоти конуса до його діаметра  $L : D$  має назву оптичного розділення (рис. 7). Чим більше оптичне розділення пірометра, тим більш дрібні предмети він може розрізнити на відстані. Найпростіші пірометри мають оптичне розділення 6:1, а найбільш складні - 180:1 і вище.

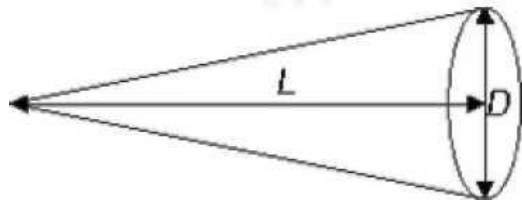


Рис. 7. Графічна інтерпретація терміна "оптичне розділення пірометра"

### Розмір чутливості

Сферу чутливості пірометра можна вважати кінцевою величиною тільки на достатній відстані від об'єктива приладу. Поблизу об'єктива вона має більш складну форм. Існують короткофокусні пірометри, у яких юна чутливості спочатку звужується до мінімуму, а потім починає розширюватися у формі конуса. Відстань  $F$ , на якій досягається мінімальний діаметр зони чутливості  $d$ , називається фокусною відстанню (рис. 7).

Для короткофокусних пірометрів параметри  $Fid$  зазначаються в документації на прилад. Для кращих моделей короткофокусних пірометрів  $d = 5 - 8$  мм на відстані  $F = 300 - 600$  мм.

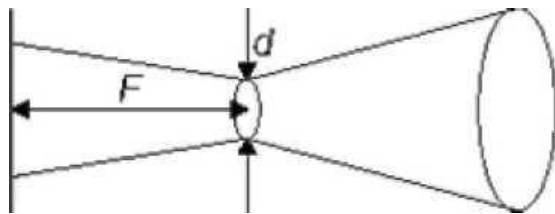


Рис. 7. Графічна інтерпретація терміна "фокусна відстань пірометра"

### Спосіб прицілювання

Найпростіші пірометри не мають механізму прицілювання і можуть застосовуватися тільки на близьких відстанях від об'єкта, температура якого вимірюється.

Для прицілювання на недосяжні об'єкти найчастіше застосовується промінь лазера. За допомогою одиночного лазерного променя можна визначити тільки точку поблизу центра зони чутливості пірометра. У такого прицілу промінь лазера не збігається з оптичною віссю об'єктива (рис. 8,а), тому центр зони чутливості приладу зміщений відносно лазерного показника на фіксовану відстань, яка зазвичай складає 1-2 сантиметри (так звана помилка паралакса). В удосконаленому коаксіальному прицілі промінь лазера виходить з центра об'єктива і завжди спрямовується у центр зони виміру (рис. 8, б). Подвійний лазерний приціл говорить не тільки про місце розташування, але і про розмір зони виміру (рис. 8,в). Однак на близькій відстані об'єкта від пірометра розмір

може бути сильно завищений. Різновид подвійного прицілу з перетинаючими променями називається кросом-лазером (рис. 8, г) та зазвичай застосовується в короткофокусних пірометрах. Цей різновид лазера зручний для визначення розміщення фокуса об'єктива. Круговий лазерний приціл, утворений декількома променями, наочно позначає зону виміру.

Простому круговому прицілу (рис. 1.3, д) властиві вже згадані недоліки - паралакс і завищений розмір зони виміру на близькій відстані об'єкта від пірометра. Найбільш вдосконалений приціл, позбавлений цих недоліків, створюється декількома лазерними променями, що розмішені навколо об'єктива і утворюють гіперболоїд обертання (рис. 1.3,є). Такий приціл дуже точно позначає зону виміру на будь-якій відстані від пірометра і називається точним круговим лазером. Лазерний промінь погано видно на яскраво освітленій чи розпеченій поверхні.

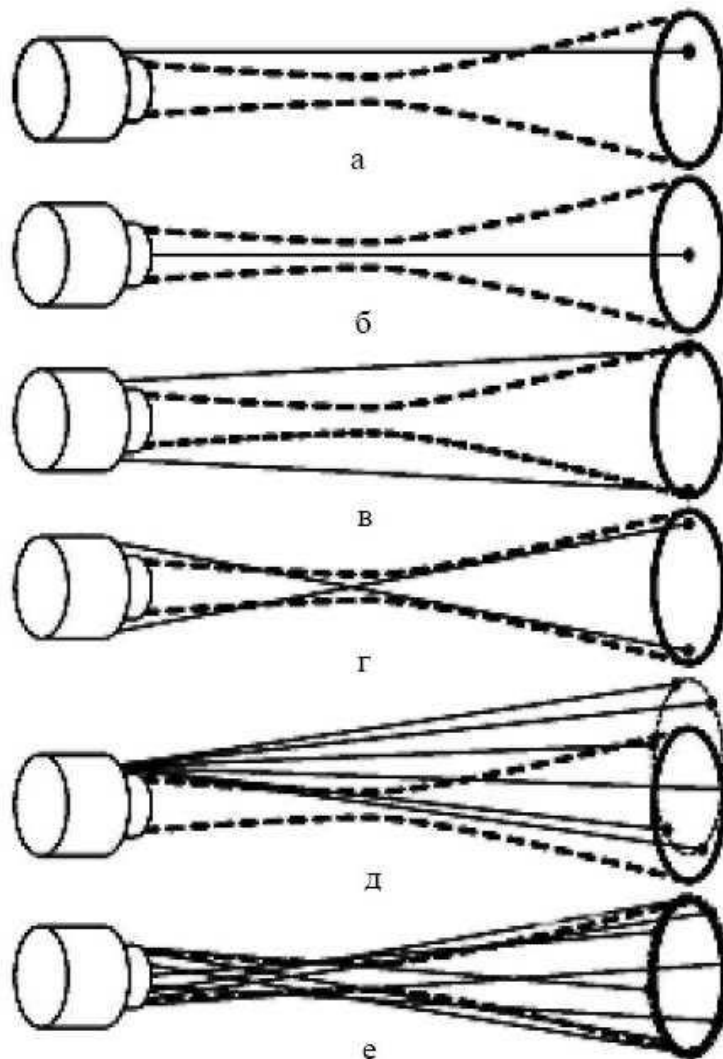


Рис. 8. Способи лазерного прицілювання, що використовуються у пірометрах: а - одиночний; б - коаксіальний; в - подвійний; г - крос-лазер; д - коловий; е - точний коловий

## 2. Хід роботи

1. Підготувати багатоканальний термоелектричний термометр. Ознайомитися з характеристиками.
2. Підготувати до роботи пірометр. Ознайомитися з характеристиками.
3. Ознайомитися із конструкцією лабораторної установки.  
Лабораторна установка складається із багатоканального термоелектричного термометра, ємностей, які покриті ззовні різними утеплюючими матеріалами.
4. Підготувати воду. Нагріти її до температури 90 °С.
5. Наповнити гарячою водою ємності. Та змонтувати датчі температури у передбачені для цього отвори.
6. Зафіксувати початкові покази температури води у кожній ємності. Занести дані у таблицю 1.

Час проведення вимірів, хв	Температура ємності № 1, °С		Температура ємності № 2, °С		Температура ємності № 3, °С		Температура ємності № 4, °С	
	Води	Поверхні	Води	Поверхні	Води	Поверхні	Води	Поверхні
0								
5								
10								
15								
20								
25								
30								
35								
40								

7. Використовуючи пірометр, зафіксувати початкові покази температури поверхні кожної ємності. Занести дані у таблицю 1.
8. Переконалися в тому, що пірометр не вимірює температуру ємності із дзеркальною поверхнею. В цьому випадку слід спрямувати пірометр на перерву наклейку на ємності.



### ***3. Опрацювання експериментальних даних***

1. Після проведення досліду із отриманих даних побудувати графіки залежності температури від часу. Графіки будується для кожного зразка.
2. Зробити висновки щодо точності використання даних приладів та якості теплоізоляції на зразках.

### ***3. Контрольні запитання***

1. На основі якого явища діють металеві термометри опору?
2. Які матеріали застосовують для виготовлення чутливих елементів термометрів опору?
3. Які матеріали застосовують у термопарах?
4. Від чого залежить ЕРС термопари?
5. Які вторинні прилади застосовують при вимірюваннях температури за допомогою термометрів опору?
6. Які електровимірювальні прилади застосовують при вимірюваннях температури за допомогою термопар?
7. Назвіть та поясніть засоби, що зменшують похибки вимірювань температури за допомогою термопар залежно від величини температури у місці розташування "холодних" кінців термопар.
8. Для чого застосовують пірометри?
9. Яке явище покладено в основу дії яскравісного пірометра?
10. На основі якого явища діють радіаційні пірометри?
11. Чому у радіаційних пірометрах, розрахованих на вимірювання температур, нижчих за 400...500 °С, для концентрації променів доцільніше використовувати увігнуте дзеркало, ніж скляну лінзу?
12. Що являють собою фотоелектричні пірометри?
13. Які основні характеристики пірометрів?
14. Як поділяються пірометри в залежності від природної вхідної величини?
15. Що таке оптичне розділення пірометра?
16. Які є способи прицілювання пірометрів?
17. Які основні технічні характеристики пірометрів необхідно знати при їх виборі для вимірювань?

## Лабораторна робота № 2

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПЕКТРУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

**Мета роботи.** Виявить залежність енергоефективності сонячних батарей від таких зовнішніх експлуатаційних факторів як рівня освітленості, наявності чорної плями та терміну експлуатації – теоретично, а від температури сонячних батарей та довжини хвилі падаючого випромінювання - практично

### 1. Теоретичні відомості

#### 1.1. Сонячні батареї

Сонячна енергія в останній час використовується всюди: в природному освітленні приміщень, нагрівання води, сушіння і іноді навіть в приготуванні їжі. Однак найважливішим використанням енергії сонця є, мабуть, генерація електроенергії. І головний елемент такої генерації - сонячна батарея!

##### 1.1.1. Будова сонячних батарей

Сонячна батарея складається з фотоелементів, сполучених послідовно і паралельно. Всі фотоелементи розташовуються на каркасі з непровідних матеріалів. така конфігурація дозволяє збирати сонячні батареї необхідних характеристик (струму і напруги) (рис. 1). Крім того, це дозволяє замінювати фотоелементи, які вийшли з ладу простою заміною



Рис. 1. Будова сонячної батареї

##### 1.1.2. Принцип роботи

Принцип роботи фотоелементів з яких складається сонячна батарея заснований на фотогальванічному ефекті. Цей ефект спостерігав ще Олександр Едмонд Беккерель в 1839 році. Згодом роботи Ейнштейна в області фотоелефекту дозволили описати явище кількісно. Досліди Беккереля показали, що

променисту енергію сонця можна трансформувати в електрику за допомогою спеціальних напівпровідників, які пізніше отримали назву фотоелементи.

Взагалі такий спосіб отримання електроенергії повинен бути найбільш ефективним, тому що є одноступінчастим. У порівнянні з іншою технологією перетворення сонячної енергії через термодинамічний перехід (Промені -> Нагрівання води -> Пар -> Обертання турбіни -> Електроенергія), менше енергії втрачається на переходи.

### 1.1.3. Будова фотоелементу

Фотоелемент на основі напівпровідників складається з двох шарів з різною провідністю. До них підпаюють контакти, які використовуються для підключення до зовнішнього кола. Роль катода відіграє шар з n-провідністю (електронна провідність), роль анода - р-шар (діркова провідність) (рис. 2).

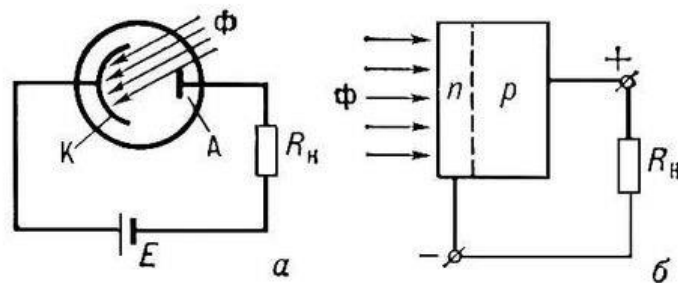


Рис. 2. Будова найпростішого фотоелементу

Струм в n-шару створюється рух електронів, які «вибиваються» при попаданні на них світла за рахунок фотоэффекту. Струм в р-шарі створюється «рухом дірок». «Дірка» - атом, який втратив електрон, відповідно, перескакування електронів з «дірки» на «дірку» створює «рух» дірок, хоча в просторі самі «Дірки» звичайно не рухаються.

На стику шарів з n-і р-провідністю створюється рп-перехід. Виходить свого роду діод, які може створювати різницю потенціалів за рахунок потрапляння променів світла.

### 1.1.4. Фізичний механізм дії

Коли промені світла потрапляють на n-шар, за рахунок фотоэффекту утворюються вільні електрони. Крім цього, вони отримують додаткову енергію і здатні «перестрибнути» через потенційний бар'єр р-n-переходу. Концентрація електронів і дірок змінюється і утворюється різниця потенціалів. Якщо замкнути зовнішнє коло через нього почне текти струм.

Різниця потенціалів (а відповідно і ЕРС) яку може створювати фотоелемент залежить від багатьох факторів: інтенсивності сонячного

випромінювання, площі фотоелемента, ККД конструкції, температури (при нагріванні провідність падає).

### 1.1.5. Особливості конструювання сонячних батарей

Різниця потенціалів, створювана одним фотоелементом, мала для промислового застосування. Щоб мати можливість використовувати сонячні елементи для електроживлення пристроїв, їх з'єднують разом. Тим самим виходять сонячні батареї (сонячні збірки, сонячні модулі). Крім того, фотоелементи покривають різними захисними шарами зі скла, пластмаси, різних плівок. Це роблять для того, щоб захистити крихкий елемент.

Основною робочою характеристикою сонячної батареї є пікова потужність, яку виражають у Ватах (Вт, W) (рис. 3). Ця характеристика показує вихідну потужність батареї в оптимальних умовах: сонячному випромінюванні  $1 \text{ кВт/м}^2$ , температурі навколишнього середовища  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , сонячному спектрі шириною 450 (AM1, 5). У звичайних умовах досягти таких показників вдається вкрай рідко, освітленість нижче, а модуль нагрівається вище (до 60-70 градусів).

Поєднуючи фотоелементи послідовно ми підвищуємо різниця потенціалів, поєднуючи паралельно - струм. Таким чином комбінуючи з'єднання можна домогтися необхідних параметрів по струму і напрузі, а отже і по потужності. Крім того, послідовно або паралельно можна з'єднувати не тільки фотоелементи в рамках однієї сонячної батареї, але і сонячні батареї в цілому.



Рис. 3. Зовнішній вигляд сонячних батарей різної потужності

### 1.2. ККД плоских сонячних батарей

Під ККД  $\eta$  на практиці мається на увазі відношення максимальної потужності  $P_{\text{макс}}$ , яку можна зняти з одиниці площі перетворювача, до

загальної потужності сонячного випромінювання  $W$  падаючого перпендикулярно на одиницю робочої поверхні перетворювача, виражене у відсотках:

$$\eta = \frac{P_{\text{макс}}}{W} \cdot 100\% \approx \frac{0,8U_{\text{ХХ}} \cdot I_{\text{КЗ}}}{W} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Для створення фотонем в напівпровіднику пари електрон-дірка потрібна енергія. В кремнію вона становить 1,12 еВ, що відповідає довжині хвилі 1,2 мкм. Фотони з більшою довжиною хвилі (поза інфрачервоної області спектру) мають меншу енергію і тому непотрібні. Фотони з меншою довжиною хвилі також можуть генерувати пари електрон - дірка, але, як показують розрахунки, ККД в цьому випадку зменшується, так як надлишок енергії фотона над величиною 1,12 еВ розсіюється у вигляді тепла. Доведено, що теоретичний ККД кремнієвого елемента для сонячного спектра складає приблизно 22 % - 23 %. При цьому нехтують внутрішніми втратами і вважають, що використовуються всі пари електрон - дірка, які утворюються в матеріалі під дією світла. Реальні фотоперетворювачі володіють значно меншим ККД і так як деякі фактори знижують цю цифру. Ці фактори досить численні, і їх можна розділити на дві групи. До однієї з них можна віднести чинники, що обумовлюються недосконалістю приладів, а до іншої - ті що залежать від умов експлуатації.

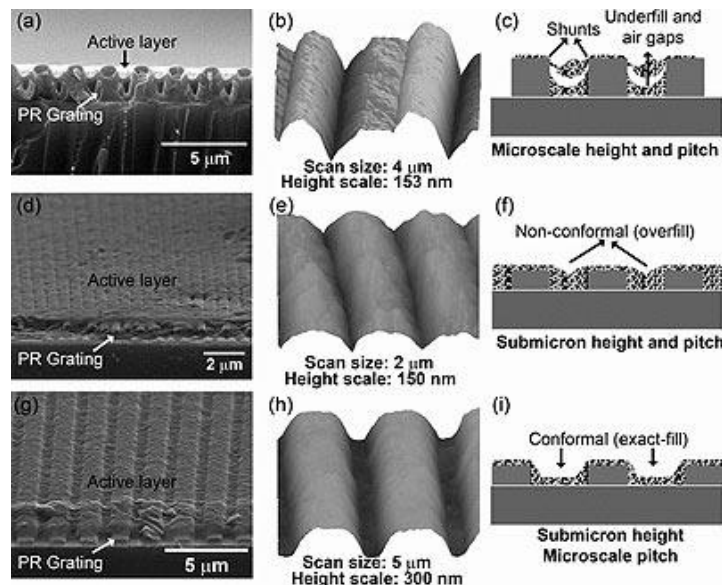


Рис. 4. Поверхня СБ з текстурованою підкладкою та без неї

У фотоелектричних перетворювачах падаюча на нього енергія випромінювання частково перетворюється в потенційну енергію носіїв струму. Ця потенційна енергія і є тією ЕРС перетворювача, яка викликає струм при підключенні до перетворювача зовнішнього навантаження. Внаслідок

недосконалості приладу одночасно з корисним перетворенням енергії йдуть процеси, що супроводжуються марним розсіюванням енергії в просторі у вигляді тепла.

У кожному фотоелектричному перетворювачі мають місце в тій чи іншій мірі такі види втрат енергії (рис. 5): 1) світлові втрати і 2) втрати енергії електронів і дірок при русі їх усередині перетворювача.

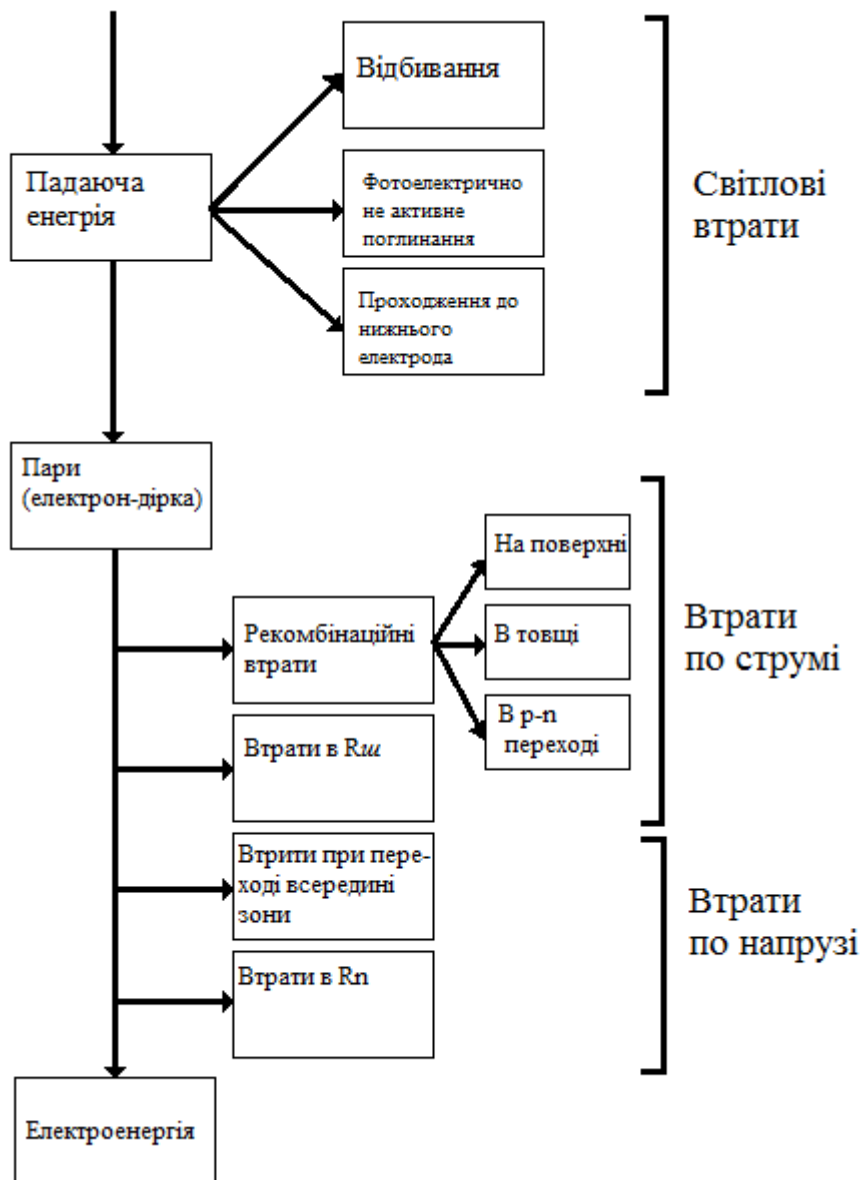


Рис. 5. Схема розподілу втрат енергії кремнієвому фотоперетворювачі

Світлові втрати утворюються через: 1) відбиття падаючого випромінювання від поверхні перетворювача; 2) фотоелектрично неактивного поглинання фотонів в робочій речовині перетворювача, тобто поглинання фотонів без створення в напівпровіднику пари електрон - дірка; 3) проходження деякої кількості фотонів до заднього (тильного) електрода і поглинання в ньому.

Втрати енергії електронів і дірок при їх русі всередині перетворювача відбуваються за рахунок наступних процесів: 1) рекомбінації створених світлом пар, яка супроводжується передачею енергії решітці; 2) втрати фотоелектронів і фотодірок через шунтуючий опір  $R_m$ ; 3) втрати енергії фотоелектронів або фотодірок при їх зіткненні з атомами решітки (перехід в межах однієї зони на нижчі рівні); 4) проходження фотоелектронів і фотодірок через послідовний опір перетворювача  $R_n$ .

Рекомбінація створених світлом пар і витік через шунтуючий опір становлять втрати по струмі і визначають, яка частина створених світлом носіїв доходить до  $p - n$  - переходу, створюючи струм через опір навантаження.

Втрата енергії фотоелектронів (або фотодірок) при зіткненні з атомами решітки та проходження їх через послідовний опір дають втрати по напрузі. Втрати по напрузі показують, яка частина (в середньому) енергії, передана електрону (дірці) від фотона, втрачається.

На рис. 5 показано розподіл втрат для кремнієвого фотоелемента, працюючого в оптимальних умовах. Зупинимося на кожному з перерахованих вище видів втрат.

**Світлові втрати.** Коефіцієнт відбиття кремнію досить високий і приблизно дорівнює 30 %. Втрати на відбиття можна зменшити, застосовуючи різного роду просвітлюючі шари, подібні шарам на об'єктивах фотоапаратів. Це дозволяє зменшити відбиття у видимій частині спектру до 6-9 %.

Також зменшити світлові втрати можливо ще одним способом: Вчені з університету в м. Еймс, штат Айова, США, запропонували використовувати в сонячних батареях текстуровану підкладку poly(3-hexylthiophene): [6,6]-phenyl-Sb1-butyric acid methyl ester (PЗНТ:PCBM). Активний шар наноситься методом spin-coating (центрифугування). В результаті підвищується EQE (квантова ефективність), зростає струм короткого замикання. Результат пояснюється в основному багатократним віддзеркаленням світла від поверхні сформованих ґраток.

Суть всього цього полягає в тому, щоб від сонячної батареї відбивалось менше світла і таким чином енергія світла, яка подається на сонячну батарею захоплювалась в максимальній кількості. На рисунку вище можна побачити якою саме є структура сонячної батареї з текстурованою підкладкою.

Також частина енергії випромінювання, що падає на фотоперетворювач, втрачається за рахунок поглинання в тілі напівпровідника, не пов'язаного з утворенням пар носіїв струму, тобто перетворюється в тепло. Енергія всієї довгохвильової (неактивної) частини сонячного спектра, відповідної квантам з енергією, меншою 1,12 eV, в спектрі сонячного випромінювання складає 12-20

%. З урахуванням втрат на відбиття активної частини спектру світлові втрати складуть не менше 26-30% падаючої енергії.

Кількість енергії, що втрачається за рахунок поглинання в тильному електроді, визначається товщиною шару робочої речовини. Зазвичай до тильного електрода доходить дуже невелика частка випромінювання довгохвильової області активної частини спектру.

**Рекомбінаційні втрати.** Не всі неосновні носії струму, створені світлом у товщі напівпровідника, будуть брати участь в утворенні струму в навантаженні. Частина з них рекомбінує з основними носіями в об'ємі або на поверхні. Ця обставина враховується введенням коефіцієнта  $\alpha$ , який характеризує ефективність поділу пар.

Величина  $\alpha$  являє собою відношення експериментально виміряного струму короткого замикання (тобто загального числа носіїв струму, що проходять в зовнішнє коло) до повного числа носіїв струму, що генеруються за одиницю часу в напівпровіднику

Ефективність поділу пар залежить від ряду факторів:

- 1) коефіцієнта поглинання світла в напівпровіднику;
- 2) співвідношення між глибиною залягання  $p - n$  - переходу і розміром області, в якій відбувається утворення пар;
- 3) ширини самого  $p - n$  - переходу;
- 4) довжини дифузійного зміщення носіїв струму  $l$ ;
- 5) швидкості поверхневої рекомбінації, яка залежить від стану робочої поверхні.

Для зниження втрат на рекомбінацію необхідно, щоб перехід відставав від області, де утворюються пари, на відстані, меншій, ніж довжина дифузійного зсуву. Крім того, потрібно звести до мінімуму швидкість поверхневої рекомбінації, яка може помітно знизити ККД фотоелемента.

Вплив усіх перерахованих факторів на величину ефективності розділення пар  $\alpha$  призводить до того, що положення максимуму кривої  $\alpha$  і, відповідно, максимуму кривої спектральної чутливості може у різних екземплярів одного типу елемента досить сильно відрізнятися.

На рис. 6 приведена експериментально знята залежність коефіцієнта  $\alpha$  від довжини хвилі  $\lambda$  для двох фотоперетворювачів, отриманих дифузійною фосфору в  $p$ -кремній, що розрізняються глибиною залягання  $p - n$  - переходу. Максимум  $\alpha$  у фотоперетворювача з більшою глибиною залягання переходу має місце при більшій довжині хвилі.



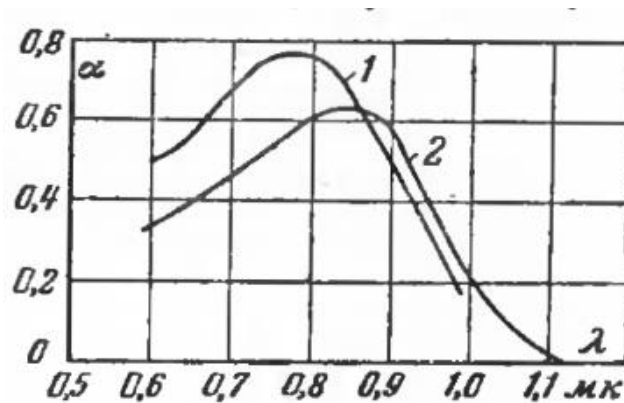


Рис. 6. Залежність коефіцієнта  $\alpha$  від довжини хвилі для двох фотоперетворювачів з різною глибиною залягання  $p - n$  - переходу  
1 – глибина переходу 9 мк; 2 – глибина переходу 15 мк

### 1.3. Фактори, які впливають на ефективність роботи сонячних батарей

Сучасні сонячні фотоелементи і панелі з них, сонячні енергетичні установки, сонячні електростанції задовольняють комплексу вимог:

- висока надійність при терміні експлуатації до 30 років;
- доступність сировини і можливість організації масового виробництва;
- прийнятні терміни окупності інвестицій на створення сонячних електростанцій;
- мінімальні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування геліоенергетичних потужностей;
- висока ефективність роботи.

Але на ефективність фотоелементів і сонячних панелей з них впливають цілий ряд факторів. У числі основних можна назвати наступні:

- погодні та кліматичні умови
- зміна дня і ночі
- нерівномірність освітлення
- зростання температури
- забруднення
- незворотні втрати.

Розглянемо деякі з цих факторів більш докладно:

**Сонячна радіація.** Перетворення енергії в СБ засноване на фотоелектричному ефекті в неоднорідних напівпровідникових структурах при впливі на них сонячного випромінювання. На відміну від інших джерел струму характеристики сонячного елемента залежать від кількості падаючого на його поверхню світла (рис. 7). Наприклад, набігла хмара може знизити вихідну потужність більше ніж на 50 %. При частковому затіненні одиночного елемента

або їх групи зниження вихідної потужності відбувається внаслідок зменшення надходження в елемент світлової енергії і збільшення внутрішніх втрат енергії в неосвітленій частині елемента. На вихідні параметри СБ буде впливати не тільки сумарна сонячна радіація, але й положення сонця на небі. Чим ближче положення сонця до зенітного положення, тим більший струм буде виробляти СБ, але при цьому буде мати місце і більш сильний розігрів робочої поверхні СБ (рис. 8)

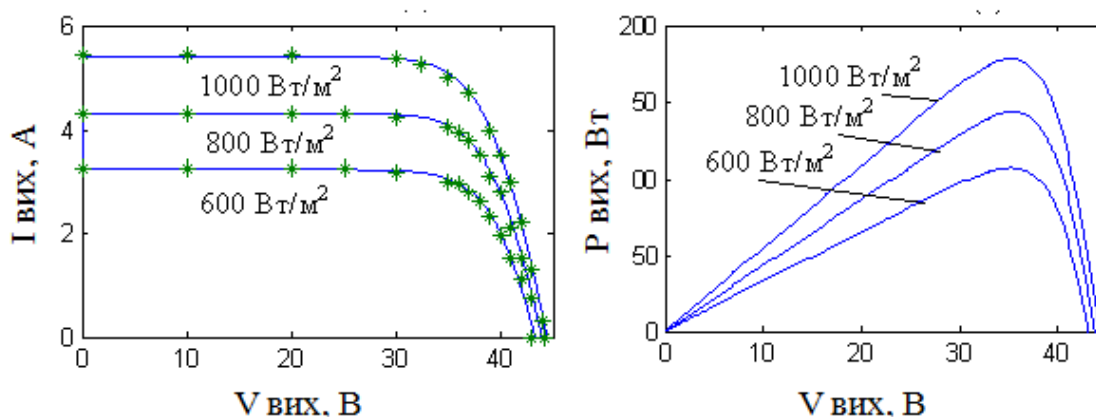


Рис. 7. Вплив рівня освітленості на вихідні характеристики СБ

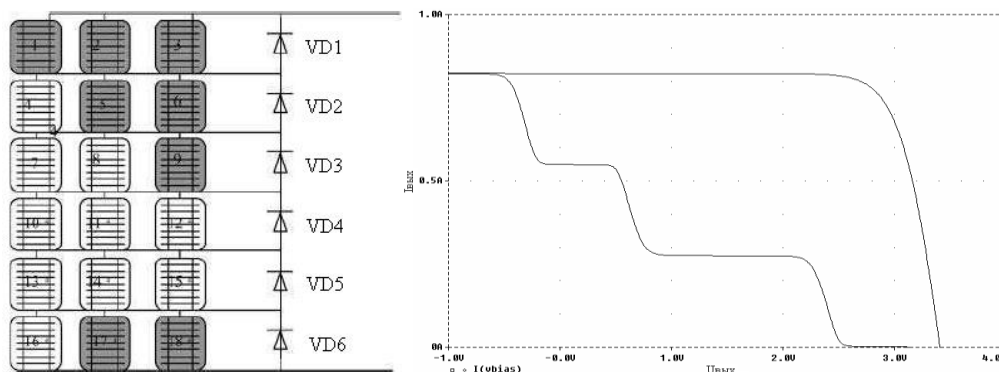


Рис. 8. Моделювання затемнення сонячної батареї

**Температура повітря. і швидкість вітру** При роботі СБ в ній виділяється дуже багато теплової енергії і робоча температура зростає. Значне зростання температури впливає на концентрацію носіїв заряду, а також на процес поглинання світла, в результаті чого змінюються вихідні характеристики СБ.

Зрозуміло, що робоча температура СБ буде залежати від температури навколишнього повітря (рис. 9). Для запобігання перегріву СБ слід встановлювати на світловідбиваючих поверхнях, а також при необхідності

встановити систему охолодження. Слід зазначити, що вплив вітру на СБ також може бути значним. Він може слугувати для природної конвекції і охолодження установки. При сильних поривах вітер може змінити кут орієнтації СБ, що впливає на енергетичну ефективність установки, або навіть пошкодити конструкцію. Це потрібно враховувати при проектуванні.

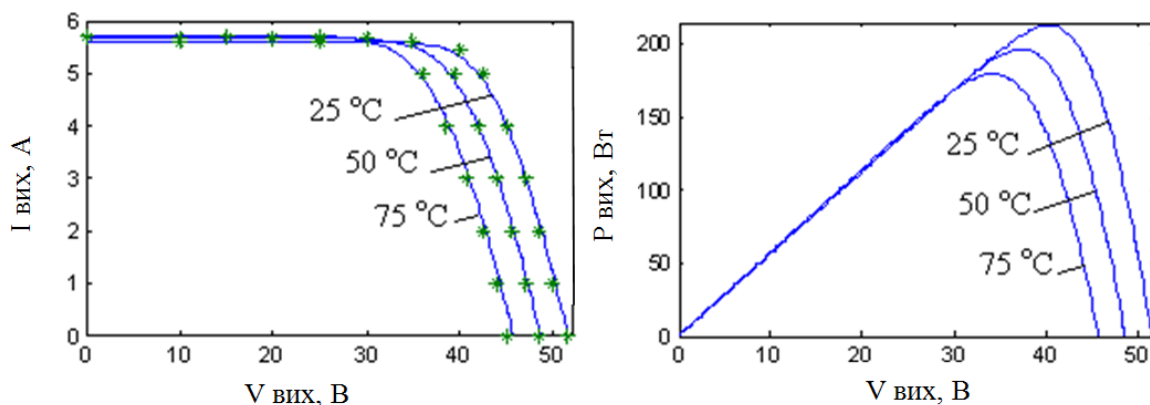


Рис.9. Вплив температури СБ на її вихідні характеристики

**Вологість і тиск повітря.** Також на параметри СБ впливає вологість повітря, по-перше, тому що одна з смуг поглинання водяної пари лежить в спектральній області роботи СБ, по-друге, вологість може впливати на процеси теплообміну між СБ і навколишнім середовищем.

При недостатній ізоляції установки чи при її пошкодженні волога може проникати всередину і викликати несправності в роботі електричних схем: короткі замикання, окислення елементів кола.

**Зниження ефективності з плином часу.** Дані по надійності і деградації характеристик СБ з плином часу в інформації виробників не наводяться. Погіршення характеристик СБ з плином часу не має стихійного характеру. Процес старіння проходить в дві стадії: протягом першого року експлуатації СБ піддаються швидкої деградації характеристик (1-3 %), а далі йде повільне лінійне старіння (0,5-1 % на рік) (рис. 10.). Для обліку старіння СЕ визначається час експлуатації, конфігурація батареї і відповідний коефіцієнт деградації.

**Механічне забруднення.** З часом на поверхні СБ збирається пил, бруд, послід птахів, що спричиняє затемнення фотоелементів і відповідно знижує їх ефективність. Для запобігання втрат вихідної потужності потрібно час від часу проводити чищення поверхні установки сухою ганчіркою або пилососом з м'якою щіткою - насадкою. Також щоб зберігати СБ чистішою впродовж довшого проміжку часу можна застосовувати різні чистячі антистатичні засоби.

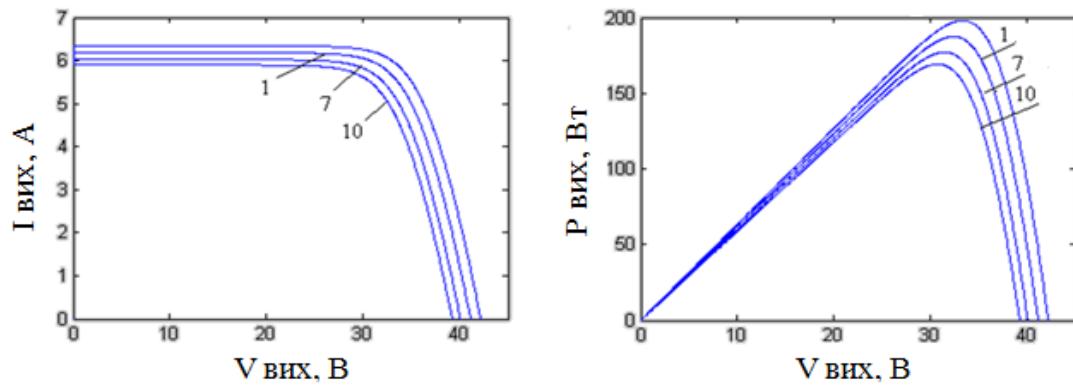


Рис. 10. Деградація ВАХ і ВВХ через рік, 7 і 10 років відносно ідеальних вихідних характеристик

**Навантаження СБ.** Залежність вихідної потужності одного з фотоперетворювачів від вихідної напруги при освітленні сонячним світлом інтенсивністю  $1000 \text{ Вт/м}^2$  наведена на рис.11. Як видно з цього малюнка, оптимальним навантаженням, що забезпечує максимальну віддачу і, отже, максимальний ККД, є навантаження, яке відповідає вихідній напрузі  $0,45 \text{ В}$ . При цьому елемент віддає  $11 \text{ мВт}$  з кожного квадратного сантиметра.

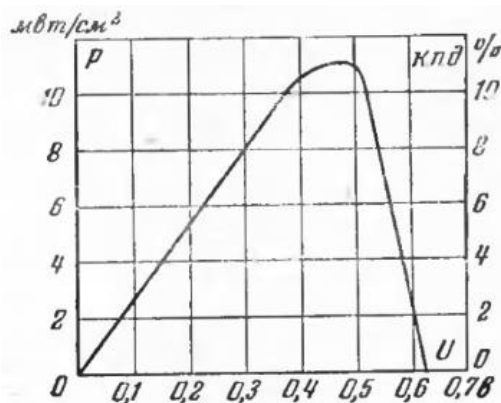


Рис. 11. Залежність вихідної потужності від напруги на навантаженні.

Слід зауважити, що при постійній освітленості оптимальне навантаження залежить від температури. Так, Наприклад, навантаження, що було оптимальним при температурі  $25^\circ \text{ C}$ , уже не є таким для більш високих і більш низьких температур. Тому при фіксованому навантаженні потужність, що виділяється на опорі навантаження, зменшується як при збільшенні, так і при зменшенні температури в порівнянні з точкою яка відповідає оптимальному опорі.

#### 1.4. Структура установки по дослідженню характеристик СБ

Для вимірювання зміни електричних та світлотехнічних характеристик СБ процесів розроблено та виготовлено вимірювальний лабораторний стенд (ВЛС) на основі персонального комп'ютера із вмонтованим модулем аналого-цифрового перетворювача. Підключення до персонального комп'ютера аналого-цифрового перетворювача, який виконано у вигляді плати розширення, із необхідною кількістю вхідних каналів, дозволяє не лише створювати сигнали вимірювальної інформації про декілька вимірювальних фізичних величин одночасно в довільних часових межах, а і зберігати їх на жорсткий диск для подальшого перегляду та обробки .

Для перетворення досліджуваних фізичних величин, які мають місце при роботі СБ, у сигнали вимірювальної інформації, які сприйматиметься аналого-цифровим перетворювачем, розроблено та виготовлено вимірювальні перетворювачі напруги, струму та освітленості.

Комутація досліджуваних електричних кіл та їх віток здійснюється електронними комутуючими пристроями, які під'єднані до паралельного порту комп'ютера. Їх кількість може змінюватись в залежності від потреб експерименту. Для одного паралельного порту може бути підключено до восьми електронних комутуючих пристроїв. Цієї кількості достатньо для того, щоб не лише комутувати всю схему, а і окремі її вітки .

Інформація про стан досліджуваної системи в аналоговому вигляді надходить від вимірювальних перетворювачів до аналого-цифрового перетворювача і зберігається у цифровому вигляді на жорсткому диску персонального комп'ютера. В залежності від стану досліджуваної системи та заданого алгоритму проведення експерименту, ВЛС комутує електричне коло та його вітки. Таким чином ВЛС комплексно керує початком перехідних процесів та фіксує і зберігає у цифровому вигляді дані про поведінку вимірювальних фізичних величин у електричних колах довільної конфігурації.

Значною перевагою ВЛС перед класичними засобам вимірювань є те, що він побудований на базі персонального комп'ютера із програмним забезпеченням, яке здійснює керування, згідно наперед заданого алгоритму, електронними комутуючими пристроями одночасно з вимірюванням фізичних величин. Гнучкість програмного забезпечення дозволяє швидко налаштовувати ВЛС для вимірювання електричних та світлотехнічних характеристик СБ під час перехідних процесів у електричних колах СБ.

У ВЛС, для забезпечення необхідної точності і швидкості вимірювань, згідно із вище зазначеними вимогами, використано серійний модуль аналого-цифрового перетворювача SDI-ADC12-128H, який монтується в ISA роз'єм персонального комп'ютера. Модуль SDI-ADC16-32H забезпечує велику точність 0,005 % в діапазоні напруг  $\pm 5 \text{ В} - \pm 0,05 \text{ В}$  завдяки використанню 16-ти

розрядного аналого-цифрового перетворювача, із кроком квантування 0,076 мВ та частотою дискретизації 80 кГц (80 вимірів за 1 мс). Такої швидкодії та кроку квантування вибраного модуля аналого-цифрового перетворювача цілком достатньо для дослідження електричних кіл.

ВЛС включає в себе дві основні складові: апаратне та програмне забезпечення. До апаратного забезпечення належать (рис. 12):

- персональний комп'ютер з пристроями вводу-виводу та вмонтованим модулем аналого-цифрового перетворювача;
- вимірювальні перетворювачі напруги (ВПН), струму (ВПС) та освітленості (ВПО);
- електронні комутуючі пристрої; (КП)
- інформаційні кабелі.

На персональний комп'ютер встановлено операційну систему Windows XP. Це пов'язано з тим, що в ній реалізовано безпосередній доступ до портів без використання мови програмування Asembler, що значно спрощує написання програм на мовах програмування вищих рівнів.

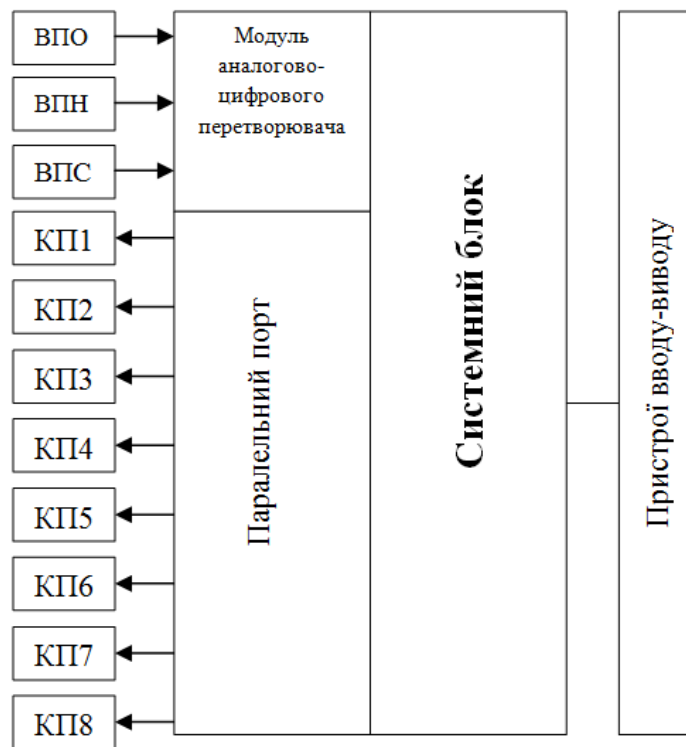


Рис 12. Структурна схема вимірювального інформаційного комплексу

До програмного забезпечення належить набір стандартних та спеціально створених нами програм для проведення експериментальних досліджень перехідних процесів у СБ в електричних колах довільної конфігурації.

## 2. Хід роботи



3. Переконатися, що у прожекторі знаходиться прозоре скло. Якщо так, то подати живлення на стенд.
4. Зафіксувати температуру навколишнього середовища та сонячної батареї.
5. Розмістити вимірювальну головку сонячного ватметра безпосередньо над сонячною батареєю, так щоб світлочувлива поверхня була в одній площині із поверхнею сонячної батареї.
6. Увімкнути прожектор вимикачем 11 і ре регулюючи напругу на ньому добитися потужності сонячного випромінювання  $1000 \text{ Вт/м}^2$ . Вимкнути прожектор та почекати, доки температура сонячної батареї не стане така ж як і навколишнього середовища.
7. Розпочати вимірювання залежності ККД сонячних батарей від їх температури. Для цього увімкнути прожектор і запустити програму на виконання. Дочекавшись завершення вимірювань записати файл із даними вимірювань у папку із назвою температури сонячної батареї.
8. Попередній пункт повторити для температур до  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  із кроком  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .
9. Розпочати вимірювання залежності ККД сонячних батарей від спектру випромінювання. Для цього змінити скло прожектора на жовтий світлофільтр і повторити п. 5 і 6. Потім увімкнути прожектор і запустити програму на виконання. Дочекавшись завершення вимірювань записати файл із даними вимірювань у папку із назвою кольору світлофільтру.
10. Попередній пункт повторити для світлофільтрів червоного зеленого та синього кольорів.
11. За даними вимірювань побудувати вольт-амперні та ват-амперні характеристики аналогічні тим, що знаходяться на рис. 14-18.

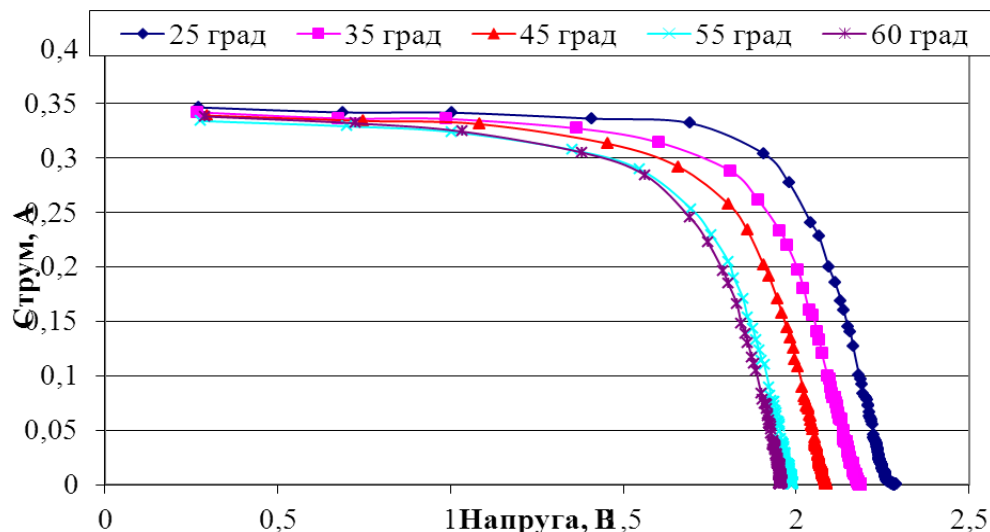


Рис. 14. Зміна ВАХ при зростанні температури СБ



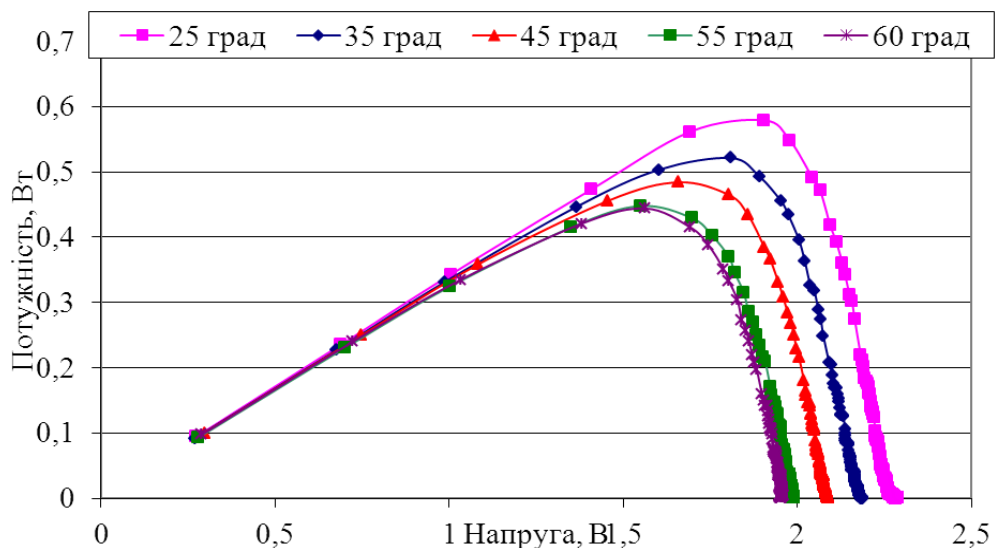


Рис. 15. Зміна ВВХ при зростанні температури СБ

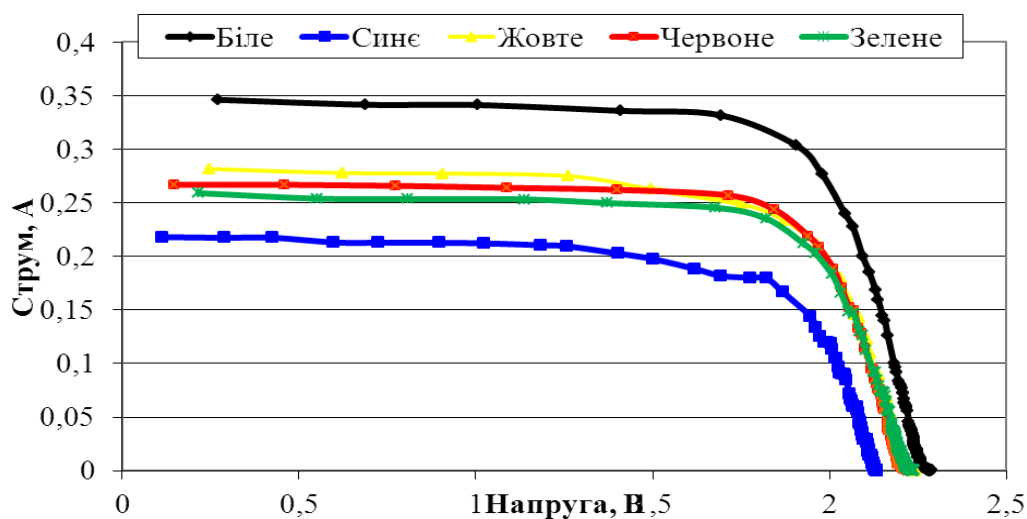


Рис. 16. Зміна ВАХ при зміні кольору світлофільтра

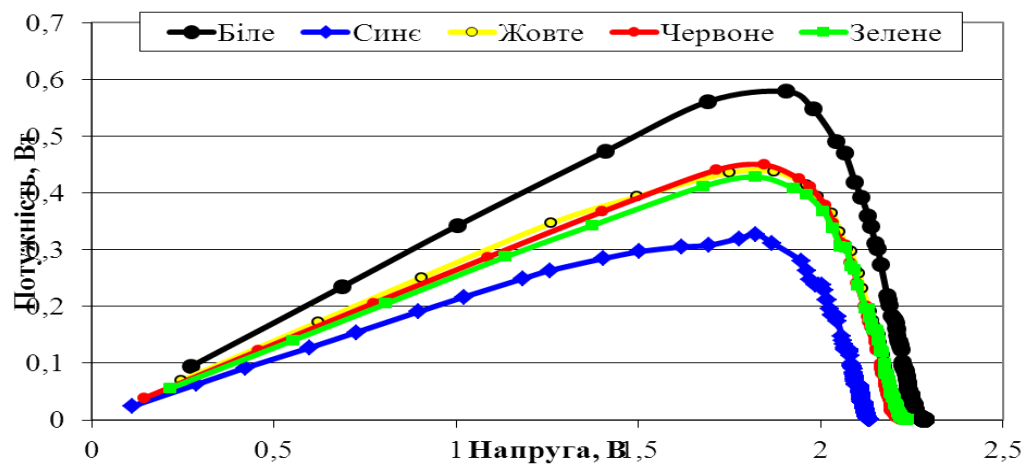


Рис. 17. Зміна ВВХ при зростанні температури СБ

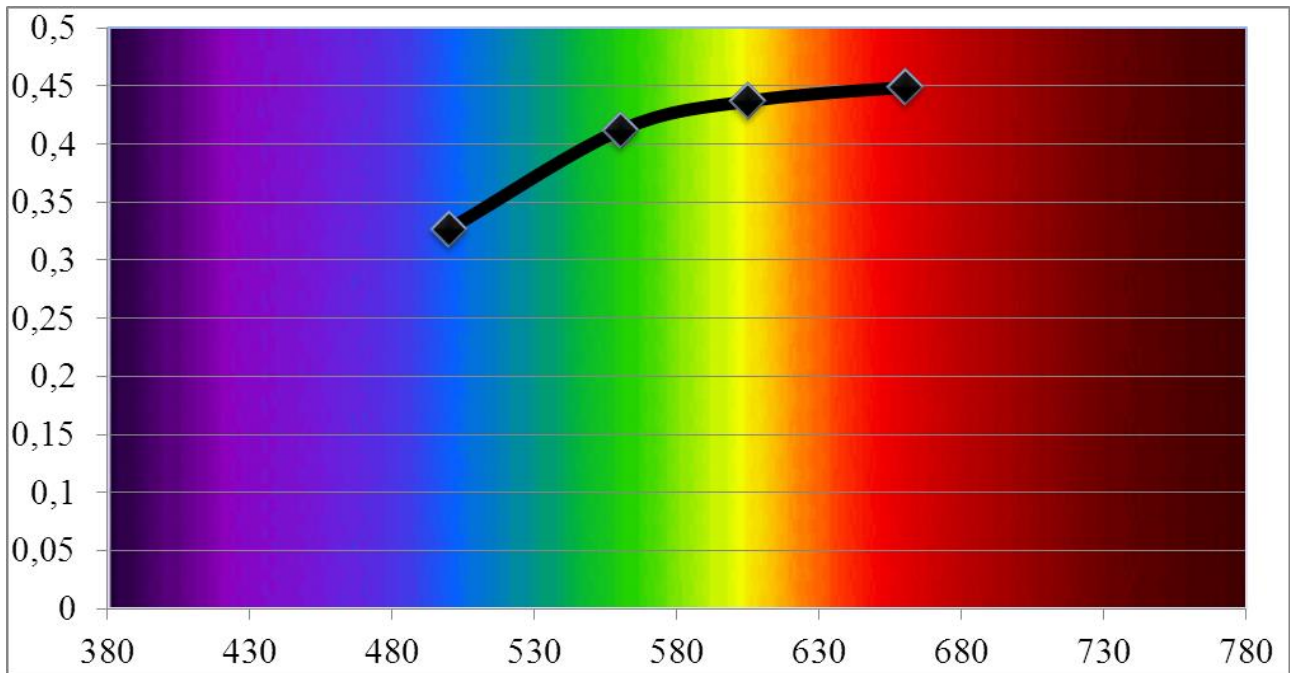


Рис. 18. Залежність максимальної потужності від довжини хвилі випромінювання

### 3. Контрольні запитання

1. Яка будова сонячних батарей?
2. Який принцип роботи сонячних батарей?
3. Яка будова фотоелементу?
4. Який фізичний механізм дії фотоелементу?
5. Які особливості конструювання сонячних батарей?
6. Що таке ККД сонячних батарей?
7. Які є втрати енергії у кремнієвому фотоперетворювачі?
8. Суть світлових втрат у кремнієвому фотоперетворювачі.
9. Суть рекомбінаційних втрат у кремнієвому фотоперетворювачі.
10. Які фактори впливають на ефективність роботи сонячних батарей?
11. Вплив рівня освітленості на вихідні характеристики СБ.
12. Вплив затіненості на вихідні характеристики СБ.
13. Вплив температури СБ на її вихідні характеристики.
14. Вплив вологості та тиску повітря на вихідні характеристики СБ.
15. Вплив часу експлуатації на вихідні характеристики СБ.
16. Вплив механічного забруднення на вихідні характеристики СБ.
17. Вплив навантаження на вихідні характеристики СБ.
18. Яка структура установки по дослідженню характеристик СБ?

# Лабораторна робота № 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА

**Мета роботи.** Вивчення процесу перетворення енергії випромінювання Сонця у теплову із використанням плоского сонячного колектора

### 1. Теоретичні відомості

#### 1.1. Нагрівання води сонячним випромінюванням

Сьогодні в усьому світі активно розвивається виробництво сонячних водонагрівачів (сонячних колекторів). Річне виробництво їх перевищує 1,7 млн. кв. м. Країни - лідери: Японія - 7 млн. кв. м., США - 4 млн. кв. м, Ізраїль - 2,8 млн. кв. м. Використання сонячних водонагрівачів дає значну економію енергії, наприклад, в Австралії на нагрівання рідин до температур менших ніж 100 °С, витрачають приблизно 20 % спожитої енергії.

На рис. 1 показані накопичувачі сонячного випромінювання з метою використання їх для нагрівання рідин (води).

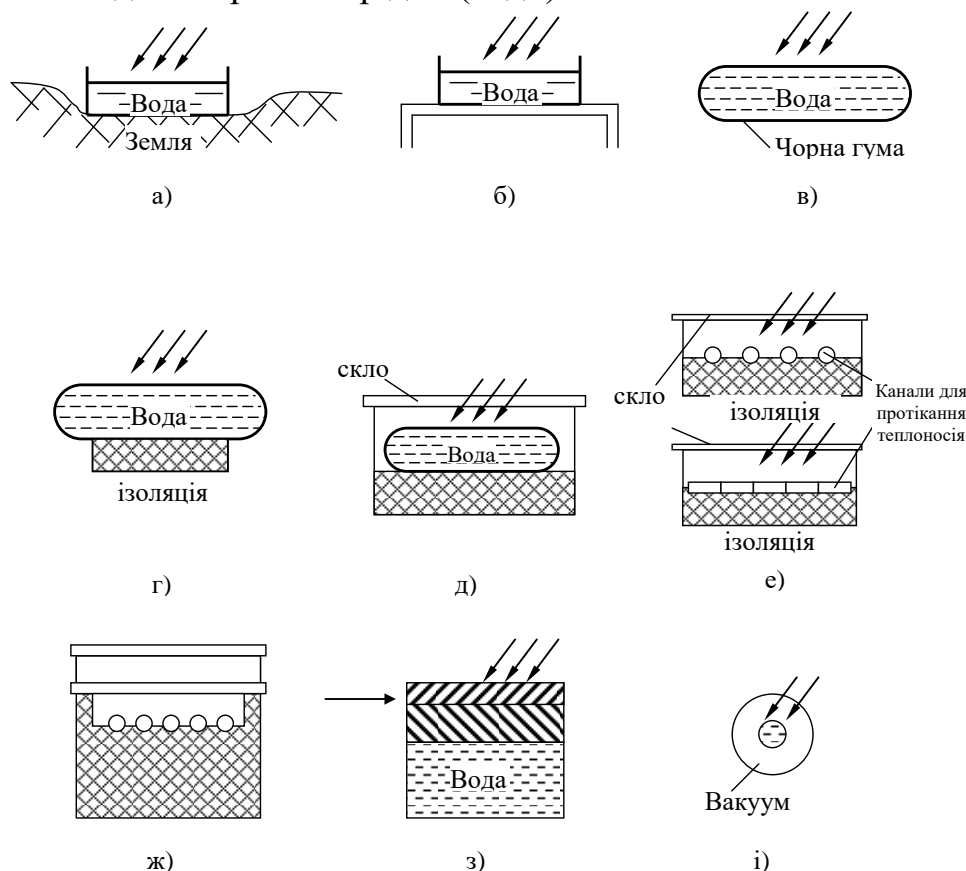


Рис. 1. Накопичувачі (акумулятори) сонячного випромінювання для нагрівання води (а, б, в, г - відкриті водонагрівачі; д, е, ж, з - закриті; і - вакуумовані нагрівані)

Для нагрівання рідин до 100 °С використовуються показані на рисунку плоскі накопичувачі, які безпосередньо поглинають падаючий потік променевої енергії. На відміну від них фокусуючі нагромаджені мають концентратори сонячної енергії; що дає можливість отримати температури вище 100°С.

Нагромаджені (рис. 1, а - д) вміщують весь об'єм рідини, яку нагрівають. Більш складні нагромаджені (рис. 1, є - і) нагрівають меншу кількість рідини, яка пізніше акумулюється в резервуарі, що зменшує теплові втрати.

## 1.2. Плоскі сонячні колектори

Основним конструктивним елементом сонячної установки є колектор, в якому відбувається уловлювання сонячної енергії, її перетворення в теплоту, нагріваючи воду, повітря або який-небудь інший теплоносій. Серед багатьох типів сонячних колекторів найбільшого поширення набули плоскі і фокусуючі. У плоских колекторах сонячна енергія поглинається без концентрації, а в тих, що фокусують - з концентрацією, тобто із збільшенням густини потоку радіації, що поступає. Фокусуючі приймачі (концентратори сонячної енергії) можуть нагрівати воду до 500 °С (інколи до 2000 °С), що використовується для виробництва електроенергії, виготовлення і очищення матеріалів.

Найчастіше такі температури не потрібні, наприклад для обслуговування комунально-побутового господарства досить буває температур до 100 °С.

Плоскі сонячні колектори (див. рис. 2) є найбільш поширеним типом сонячних колекторів. Слід зазначити, що в результаті тривалого вдосконалення колектори даного типу практично досягли найбільш оптимальних показників ефективності терміну експлуатації та вартості.

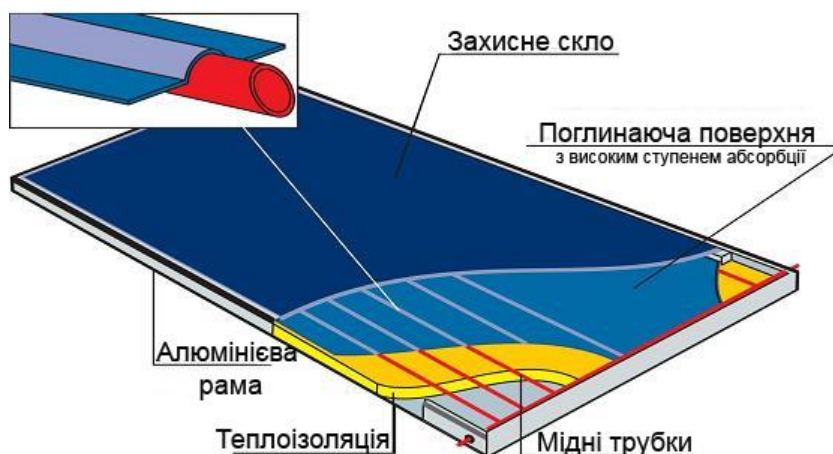


Рис. 2. Будова плоского сонячного колектора

Конструкція і схема роботи плоского сонячного колектора представлені на рисунках 2 і 3, відповідно.

Плоскі сонячні колектори працюють на основі парникового ефекту. Цей ефект заснований на тому, що сонячне випромінювання, що падає на поверхню сонячного колектора, практично повністю пропускається склом.

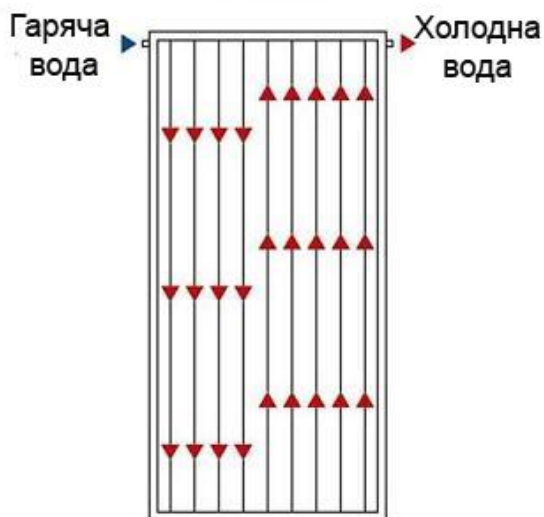


Рис. 3. Хід теплоносія в колекторі

Так як основна інтенсивність сонячного випромінювання в наземних умовах знаходиться в спектральному інтервалі 0.4 мкм-1.8мкм (рис. 4 а), то в якості прозорого верхнього шару використовується звичайне або загартоване скло, що має коефіцієнт пропускання в цьому спектральному діапазоні до 95% (рис. 4 б). Розташоване в нижній частині колектора теплопоглинаюче покриття має коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання до 90%. Нагріваючись, покриття випромінює теплову енергію, основна потужність якої знаходиться в інфрачервоному діапазоні (рис. 4 с). Даний спектр випромінювання вже практично не пропускається склом.

Таким чином, досягається акумуляція сонячної енергії всередині колектора. Передача теплоти до теплоносія здійснюється за допомогою конструктивних елементів, виконаних, як правило, з алюмінію або міді. Відведення теплоти здійснюється теплоносієм - водою або розчином незамерзаючої рідини.

Крім звичайного скла, в плоских сонячних колекторах також може використовуватися полікарбонат, скло з низьким вмістом заліза, яке добре пропускає сонячні промені, ударостійке скло.

Більш наочно схема парникового ефекту і втрат, які мають місце в плоскому колекторі, представлена на рис 5.

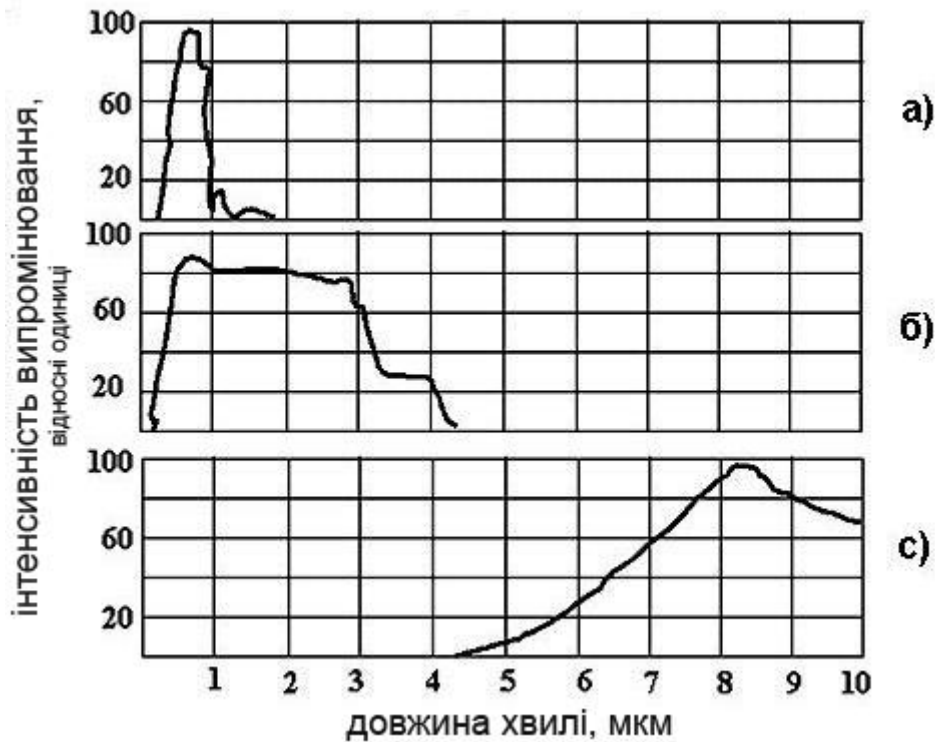


Рис. 4. Селективність колекторів

Важливою характеристикою сонячних колекторів є виробництво гарячої води з 1 м<sup>2</sup> поверхні. Для України, в літній сонячний день продуктивність плоских колекторів може досягати 50 літрів води, нагрітої до 50 - 60 °С з 1 м<sup>2</sup> у день.

*Переваги:*

- висока ефективність;
- відносна простота конструкції;
- надійність;
- можливість ефективної експлуатації на протязі всього року;
- тривалий термін експлуатації.

*Недоліки:*

- більш низький ККД у порівнянні з вакуумними колекторами в періоди з низьким рівнем сонячного випромінювання і в холодну пору року.

Плоский сонячний колектор є технічно досить простим пристроєм. Найбільш високотехнологічним елементом у його конструкції є поглинаюче покриття. Очевидно, що для підвищення ефективності роботи конвектора необхідно, щоб покриття поглинало більшу частину енергії падаючих сонячних променів, а при нагріванні випромінювало як можна меншу частину поглиненої енергії в інфрачервоному спектрі.

Для оцінки ефективності поглинаючих покриттів застосовуються наступні показники:

- **коефіцієнт поглинання** (абсорбації),  $\alpha$  - зазвичай знаходиться в межах 0,8-0,98. Даний коефіцієнт представляє собою відношення поглиненої енергії до падаючої;

- **коефіцієнт випромінювання** (емісії),  $\epsilon$  - зазвичай у межах 0,95 - 0,02 для різних типів покриттів. Даний коефіцієнт представляє собою відношення випромінювань енергії до поглиненої;

- **коефіцієнт селективності**, застосовується для порівняння характеристик різних видів поглинаючих поверхонь. Чим вище значення цього коефіцієнта, тим кращими характеристиками володіє поглинаюча поверхня.

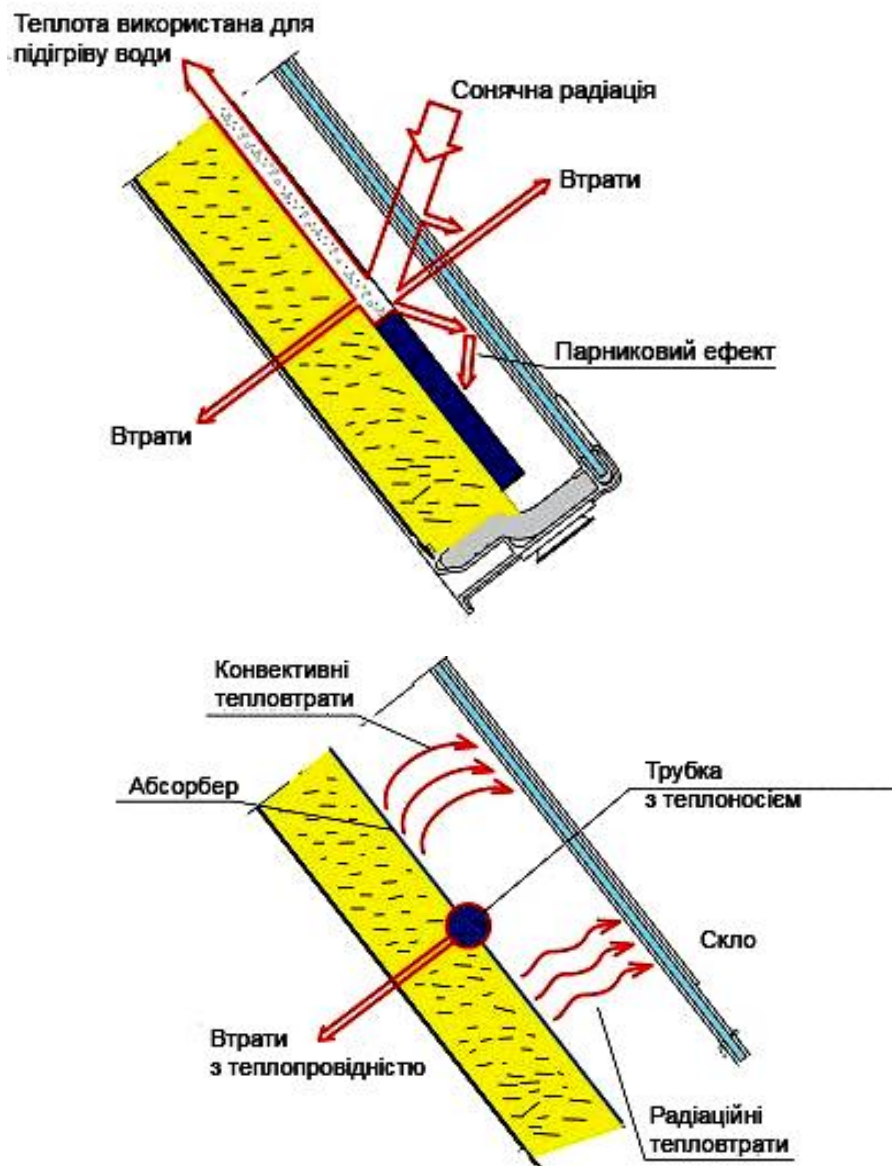


Рис 5. Тепловий баланс плоского сонячного колектора

Сучасні високоселективним покриття мають дуже високими значеннями коефіцієнта селективності, значно підвищуючи тим самим ККД сонячних колекторів. До того ж, практично лише колектори оснащені покриттями такого типу можуть ефективно працювати в холодний період року внаслідок набагато меншої залежності ККД від різниці температур.

### 1.3. Використання сонячної енергії колекторами

Проходячи через атмосферу Землі, сонячне випромінювання ослабляється за рахунок відбивання, розсіяння і поглинання частками пилу і молекулами газу. Ту частину випромінювання, яка безперешкодно проходить через атмосферу і потрапляє безпосередньо на поверхню Землі, називають прямим сонячним випромінюванням. Частина сонячного випромінювання, яка відбивається або поглинається частками пилу і молекулами газу, потім знов випромінюється і потрапляє на поверхню Землі, не маючи певного напрямку, називають розсіяним сонячним випромінюванням.

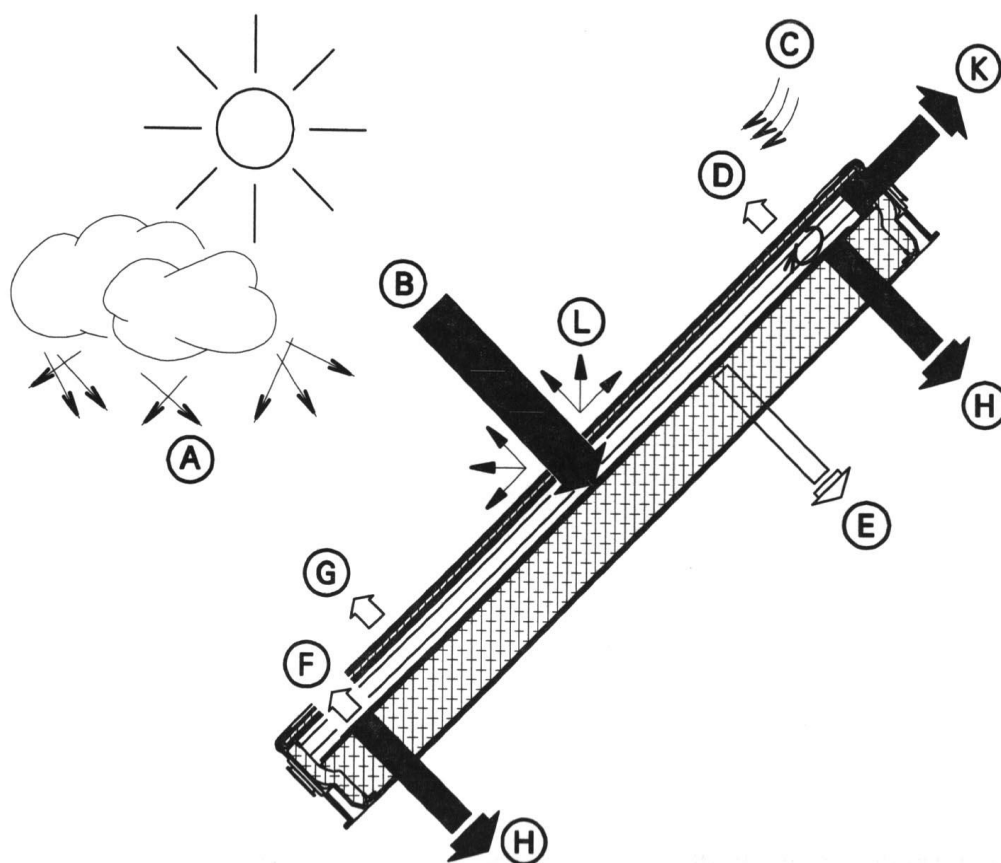


Рис. 6. Енергетичний баланс плоского сонячного колектора

A - розсіяне випромінювання;

B – пряме сонячне випромінювання;



- C – вітер, дощ, сніг, конвекція;
- D – втрати на конвекцію;
- E – втрати на провідність;
- F – теплове випромінювання поглинача;
- G – теплове випромінювання скляного покриття;
- H – корисна потужність колектора;
- K – конвекція;
- L – відбивання.

Сумарне випромінювання, що потрапляє на поверхню Землі, - це сумарне сонячне випромінювання  $E_0$ : сумарне випромінювання = пряме випромінювання + розсіяне випромінювання

У наших широтах сумарне випромінювання в оптимальних умовах (безхмарне ясне піднебіння, середина дня) складає макс. 1 000 Вт/м<sup>2</sup>. Сонячні колектори, залежно від їх типу, дозволяють використовувати до 75 % сумарного випромінювання.

Кількість корисної енергії, що виробляється колектором, залежить від цілого ряду факторів. До істотних факторів впливу відноситься загальна кількість доступної сонячної енергії (рис. 7).

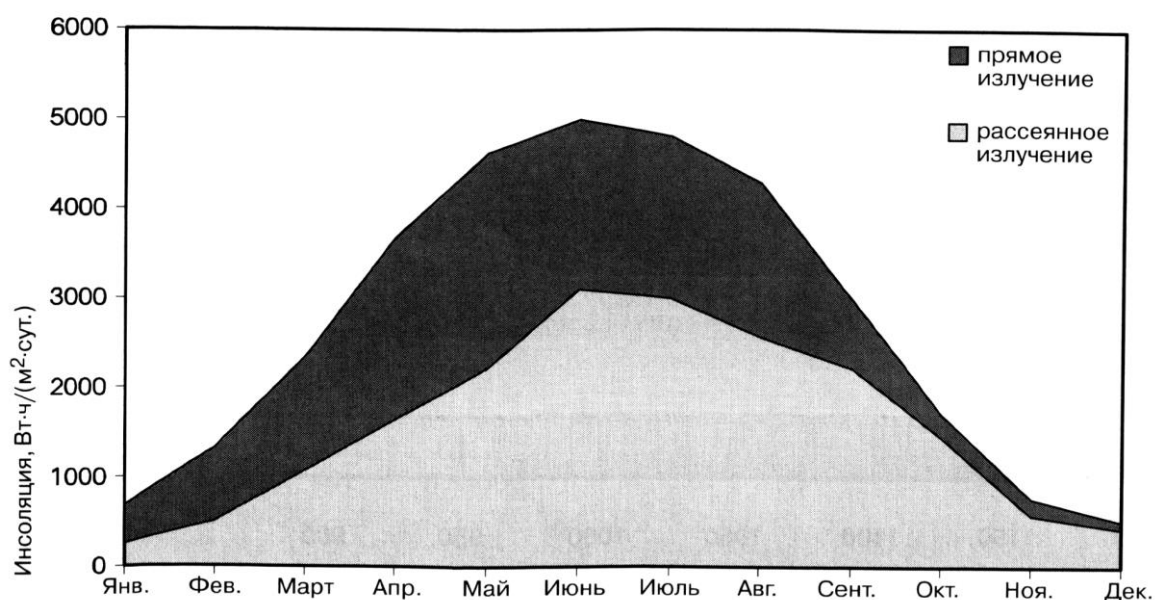


Рис. 7. Річне сумарне сонячне випромінювання

#### 1.4. ККД колектора

Розглянемо поняття сонячна установка (геліоустановка) – це пристрій для перетворення сонячної енергії в тепло. Але навіть самий високоякісний сонячний колектор сам по собі ще не гарантує оптимальної експлуатації сонячної енергії. Тут важливо реалізувати комплексне системне рішення.

Правильно розраховані сонячні установки з погодженими системними компонентами можуть покривати 50 – 60 % річної потреби в енергії для приготування гарячої води в одно- і двоквартирних житлових будинках.

Основна деталь колектора - це мідний поглинач, що забезпечує високу абсорбцію сонячного випромінювання і незначну емісію теплового випромінювання. На поглиначі встановлена меандроподібна мідна трубка, через яку протікає теплоносій, що відбирає від поглинача тепло через мідну трубку.

Поглинач знаходиться в корпусі колектора, із посиленою теплоізоляцією, що дозволяє мінімізувати тепловтрати колектора. Високоякісна теплоізоляція є температуростійкою і не виділяє газу. Вона може бути виконана з пінопласту на основі смоли меламіно-формальдегідної, або з мінерального волокна. Колектор закривається листом геліоскла, що відрізняється низьким вмістом заліза і дозволяє зменшити втрати на відбивання. Корпус колектора - рама з алюмінію, з куточками, в якій лист геліоскла герметично облямований профільним ущільненням безперервної вулканізації. З колекторів можна збирати панелі. Для цього поставляються гнучкі сполучні теплоізольовані трубки, ущільнені кільцями круглого перерізу. Існують також вакуумні колектори, в яких абсорбер з мідною трубкою поміщений в скляну вакуумну трубку, що забезпечує оптимальну теплоізоляцію.

Частина сонячного випромінювання, що потрапляє на колектори, „втрачається” в результаті відбивання і поглинання. Ці втрати враховуються оптичним Використання сонячної енергії колекторами  $\eta_0$ .

Максимальні втрати в колекторі виникають через конвекцію. По цьому ККД сильно залежить від різниці температур між колектором і температурою довкілля. При нагріві колекторів вони виділяють в довкілля тепло за рахунок теплопровідності, теплового випромінювання і конвекції. Ці втрати враховуються коефіцієнтами теплових втрат  $k_1$  і  $k_2$ .

Коефіцієнти теплових втрат і оптичний К.К.Д характеризують К.К.Д, який можна знайти за формулою:

$$\eta = \eta_0 \cdot k_1 \frac{\Delta T}{E_g} - k_2 \frac{T}{E_g} \quad (1.1)$$

Якщо різниця температури колектора і довкілля дорівнює нулю, колектор не віддає тепла в довкілля і ККД досягає свого максимуму (рис. 8); в цьому випадку говорять про оптичний ККД  $\eta_0$ . У таблиці 1. приведені порівняльні значення оптичного ККД і коефіцієнтів теплових втрат.

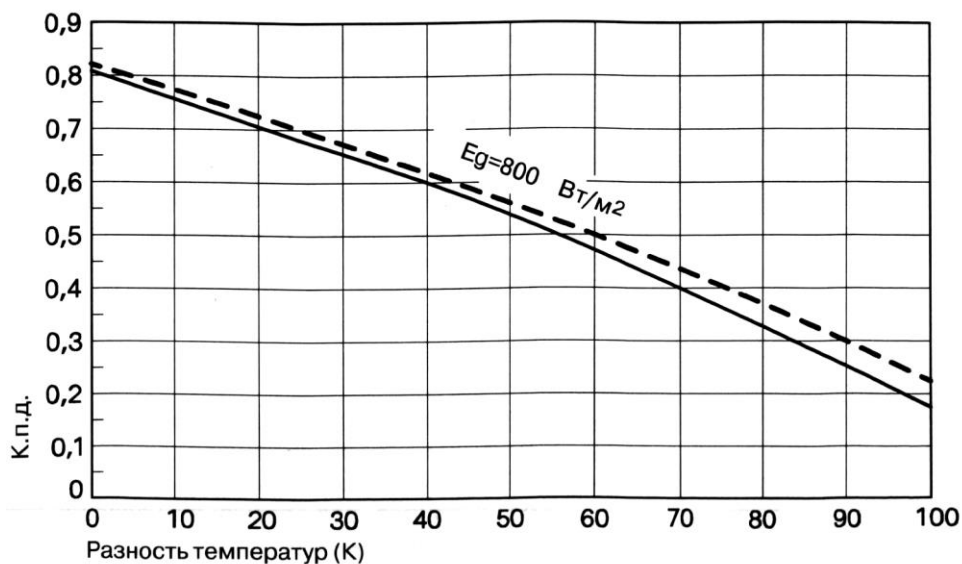


Рис. 8. Залежність ККД сонячного колектора від різниці температур його поверхні та навколишнього середовища

Таблиця 1

Тип колектора	Оптичний ККД $\eta_0$ , %	Коефіцієнти теплових втрат	
		$k_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$k_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>2</sup> )
Неселективни	62	6,54	0,067
Селективний	81	3,78	0,013
Вакуумний	83,7	1,75	0,008

### 1.5. Опис макету установки сонячного теплопостачання та колектора

Серед різних методів використання сонячної енергії одним з найбільш розвинених є її фототермічні перетворення для двох варіантів, використання теплової енергії: теплопостачання об'єктів, житлово-комунального та сільськогосподарського призначення, для отримання електроенергії за

термодинамічному циклом з застосуванням парових турбін (дана технологія використовується значно рідше).

Для того щоб оцінити ефективність роботи сонячного колектора, необхідно визначити яку кількість енергії він виробить за термін експлуатації, а для цього необхідно знати його характеристики. Предметом розробки є сонячний колектор плоского типу призначений для нагрівання рідкого теплоносія і складається з поглинаючої панелі сонячного колектора (ППСК) (рис. 9), забезпеченою штуцерами для підведення та відведення робочої рідини (9, 10). ППСК, розміщена в теплоізолювальній корпусі, одна з сторін якого закрита склом для пропускання сонячних променів на робочу поверхню ППСК.

Поглинаюча панель сонячного колектора виготовлена з корозійно-стійкого листа нержавіючої сталі. Габаритна площа ППСК складає  $0,06 \text{ м}^2$ , сумарний поперечний переріз півсферичних каналів для проходження теплоносія складає  $0,00077 \text{ м}^2$ . На робочу поверхню панелі нанесено поглинаюче покриття чорного кольору.

Між корпусом сонячного колектора і поглинаючою панеллю, з тильного неробочої її боку, знаходиться шар теплоізоляції з екструдованого пінополістиролу у якому вирізано півциліндричні канали для протікання теплоносія. До шару теплоізоляції герметично кріпиться світлопоглинаюча панель. У верхній та нижній частині колектора знаходяться штуцера (9, 10) для підведення та відведення теплоносія (рис. 9).

Для вимушеної циркуляції теплоносія в установці передбачено циркуляційний насос 5. Кількість теплоносія, який проходить через колектор регулюється циркуляційним вентилям 6. У випадку необхідності заміни теплоносія необхідно відкрити зливний вентиль 7.

Так як при нагріванні теплоносія в системі розширюється, для уникнення підвищення тиску із можливими непередбачуваними наслідками, в установці вмонтовано розширювальний бачок 8. Так як тиск теплоносія в системі атмосферний, то бачок встановлено відкритого типу.

У стенді для проведення теплотехнічних випробувань сонячний колектор 1 розташовувався під кутом:  $5^\circ$  до вертикальної поверхні, для забезпечення виходу повітря і запобігання утворенню повітряних пробок та можливості дослідження процесу вільної конвекції теплоносія. Кут нахилу моделюватись в межах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  відносно вертикалі. При відсутності сонця, для проведення лабораторних досліджень, перед поглинаючою панеллю сонячного колектора 1 можна встановити випромінювач теплового потоку - прожектор. Прожектор потрібно розташовувати таким чином, щоб його фокусна вісь була паралельна і рівновіддалена від більших сторін сонячного колектора. Потужність променевої енергії, яка потрапляє на сонячний колектор

заміряється радіометром DT-1307 з границею допустимої основної відносної похибки 5 %. Теплоносієм в контурі є вода.

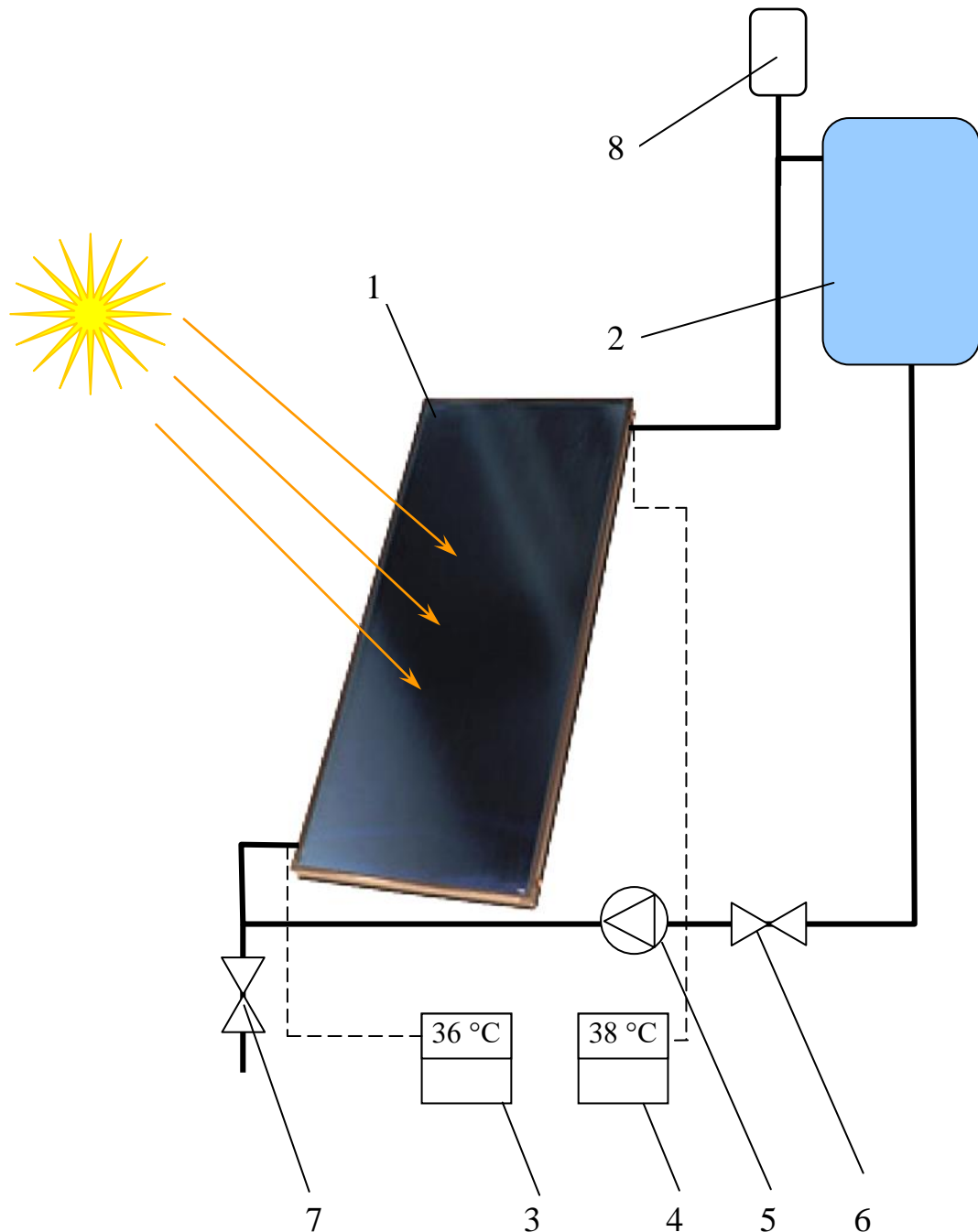
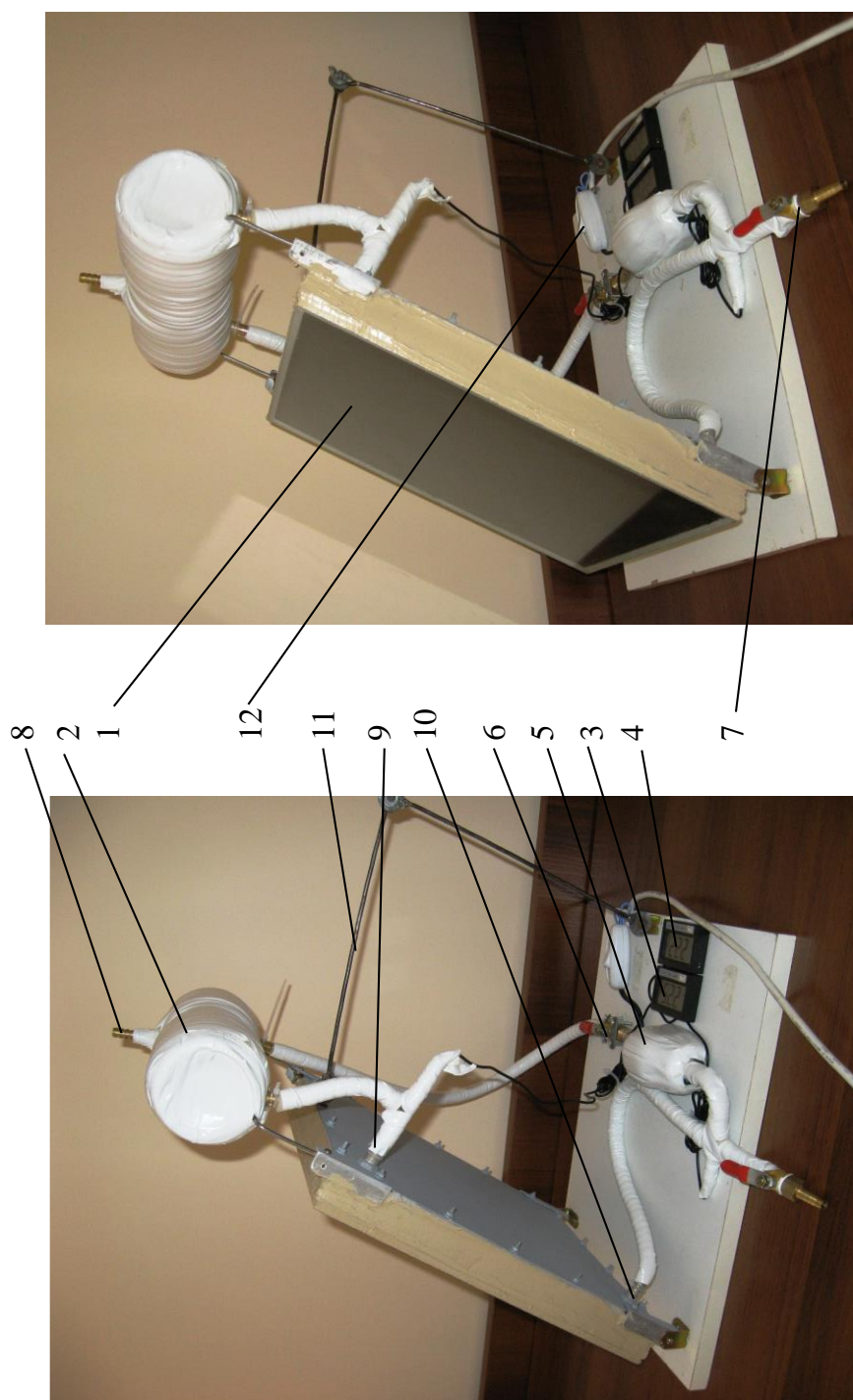


Рис. 9. Принципова схема роботи експериментальної установки сонячного теплопостачання на базі плоского колектора

- 1 – Колектор;
- 2 – Бак-акумулятор;
- 3 – Електронний термометр для вимірювання температури теплоносія на вході до колектора;
- 4 – Електронний термометр для вимірювання температури теплоносія на виході з колектора;
- 5 – Циркуляційний насос;

- 6 – Циркуляційний вентиль;
- 7 – Зливний вентиль;
- 8 – Розширювальний бачок;
- 9, 10 – штуцера для підведення та відведення теплоносія;

Зовнішній вигляд вимірювального стенду представлено на рис. 10



1 – Колектор; 2 – Бак-аккумулятор; 3 – Електронний термометр для вимірювання температури теплоносія на вході до колектора; 4 – Колектор; 5 – Електронний термометр для вимірювання температури теплоносія на виході з колектора; 6 – Циркуляційний насос; 7 – Циркуляційний вентиль; 8 – Розширювальний бачок; 9 – Розширювальний патрубок; 9, 10 – штуцера для підведення та відведення теплоносія; 11 – Тримач; 12 – Вмикач циркуляційного насосу

Рис. 10. Зовнішній вигляд установки для проведення експерименту

## 2. Хід роботи

1. У гідравлічний контур залити теплоносій (воду) об'ємом 1 л.
2. Зливний вентиль встановити у положення закрито.
3. Циркуляційний вентиль встановити у положення відкрито.
4. Термометрами 3,4 (рис. 2.8) виміряти температури теплоносія та оточуючого середовища.
5. Радіометром DT-1307 виміряти енергію прямого сонячного випромінювання.
6. Поверхню сонячного колектора розмістити перпендикулярно сонячним променям і зафіксувати тримачем 11.
7. Вмикачем 12 увімкнути циркуляційний насос.
8. Провести вимірювання температури теплоносія по мірі його нагрівання. Спочатку, коли температура теплоносія низька, а інтенсивність нагрівання велика, інтервал між замірами повинен становити 2 хв. Після 10 хв. роботи він становив 5 хв, а після 20 хв. – 10 хв.
9. Дані про зміну температури теплоносія з часом записати в таблицю 2.
10. Зробити висновки

Таблиця 1

Результати експерименту

t, хв	0	2	4	6	8	12	17	27	32	37	52	72	102	132
T <sub>вих</sub>														

## 3. Контрольні запитання

1. Які є накопичувачі (акумулятори) сонячного випромінювання для нагрівання води?
2. Будова та принцип дії плоских сонячних колекторів.
3. Залежність енергоефективності сонячного колектора від спектру випромінювання.
4. Переваги та недоліки плоских сонячних колекторів.
5. Що таке коефіцієнт поглинання, коефіцієнт випромінювання та коефіцієнт селективності?
6. Енергетичний баланс плоского сонячного колектора.ю
7. Сезонна залежність кількості сонячного випромінювання, що попадає на поверхню колектора. ККД колектора.
8. Залежність ККД сонячного колектора від різниці температур його поверхні та навколишнього середовища

## **Лабораторна робота № 4**

# **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАМІНИ ЛАМП РОЗЖАРЮВАННЯ НА КЛЛ ТА СД ЛАМПИ**

**Мета роботи.** Навчитися обґрунтовувати необхідність заміни джерела світла на більш енергоефективне в залежності від умов експлуатації .

### *1. Теоретичні відомості*

#### *1.1. Основні види джерел світла*

##### 1.1.1. Лампи розжарювання

Тривалість і масовість застосування ламп розжарювання обумовлені відносно низкою вартістю, зручністю в обігу, простотою в обслуговуванні, малими початковими витратами при обладнанні освітлювальних установок, розмаїтістю конструкцій, напруг і потужностей, високим рівнем механізації виробництва.

Принцип дії. Вольфрамова спіраль, що поміщається в колбу, з якої відкачане повітря, розігрівається під дією електричного струму.

Лампа розжарювання (рис. 1) складається зі скляної колби 1; тіла розжарення 2, виконаного з вольфрамового дроту; молибденових гачків 3, які надають певної форми тілу розжарення та перешкоджають його провисанню; електродів з нікелю 4, які служать для подачі напруги на тіло розжарення; скляного стрижня (штабика) 6, у верхній частині якого є стовщення (лінзочка) 5, куди впаяні гачки; порожнього циліндра 10 із спресованою верхньою частиною (лопаткою) 7, у якій з'єднані штабик, електроди та відкачувальна трубка 9 із отвором 8; цоколя, що складається з металевого стакана з різьбленням 12, до якого припаяний один з електродів, і контактної шайби 13 із припаяним другим електродом. Контактна шайба кріпиться до стакана скломасою 11, цоколь з'єднаний із колбою спеціальною мастикою.

Головною частиною лампи розжарювання є тіло розжарення, що може являти собою нитку, спіраль, біспіраль, триспіраль, має різноманітні розміри та форму.

Тіло розжарення виконують із вольфраму (температура плавлення  $3650 \pm 50^\circ\text{K}$ ). Для забезпечення нормальної роботи розпеченого вольфрамового тіла розжарення необхідно ізолювати його від кисню повітря. Для цього тіло розжарення розміщують або в безповітряному середовищі (вакуумні лампи), або в середовищі інертних газів, або їхніх сумішей, що не реагують із



матеріалом тіла розжарення (газонаповнені лампи). У вакуумних ламп повітря відкачане до тиску  $1,33 \times 10^{-3}$  Па, робоча температура тіла розжарення 2400-2600°K. У газонаповнених ламп колба заповнена сумішшю аргону або криптону з азотом (14-16%) до тиску 100 кПа.

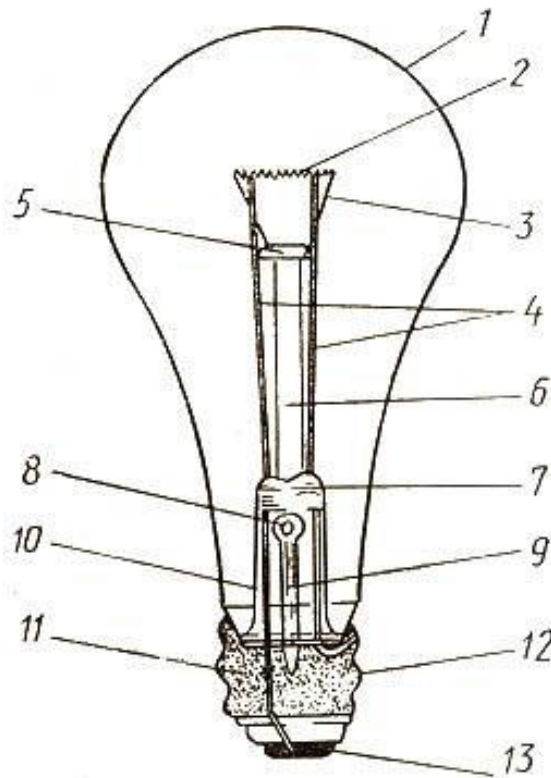


Рис. 1. Будова лампи розжарювання загального призначення

Наявність у колбі важких інертних газів і більш високий тиск дозволяють підвищити температуру тіла розжарення до 2700 (аргон)-2800 (криптон) °K без збільшення розпилу матеріалу тіла розжарення. Азот служить електричним ізолятором – виключає електричний пробій між витками спіралі, аргон – теплоізолятор, знижує втрати енергії на нагрівання газу та колби. Криптон і ксенон, як теплоізолятори ефективніші за аргон, але вони дорожчі.

### *1.1.2. Розрядні лампи*

Джерела, що перетворюють енергію електричного розряду в газах, парах металу або їхніх сумішах в оптичне випромінювання, називають газорозрядними джерелами.

Як газ використовують аргон, пари металів (ртуть, натрій).

Газорозрядні джерела класифікують за тиском, за принципом генерування випромінювання, за видом розряду.

Залежно від тиску суміші аргону із ртуттю в трубці лампи джерела поділяють на:

- лампи низького тиску (від 0,1 до  $10^4$  Па);
- лампи високого тиску (від  $3 \cdot 10^4$  до  $10^6$  Па);
- лампи надвисокого тиску ( $> 10^6$  Па).

У газорозрядних джерелах широко використовують ефект фотолюмінесценції – випромінювання речовини під впливом енергії оптичного випромінювання, що поглинається ним (при цьому довжина хвилі випромінювання завжди більша довжини оптичного випромінювання, що поглинається).

Газорозрядні джерела принципово побудовані, як показано на рис. 2.

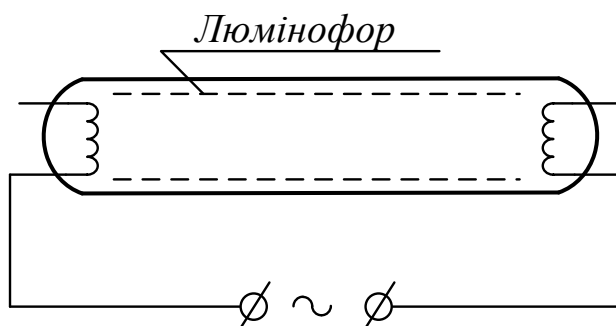


Рис.2. Будова газорозрядного фотолюмінесцентного джерела світла

Принцип дії фотолюмінесценції: під дією напруги, прикладеної до електродів, між ними проходить електричний струм. Електрони і іони, співаючись із атомами ртуті та аргону, збуджують їх. Аргон і ртуть (головним чином) випускають оптичне випромінювання, що поглинається люмінофором і перетворюється в більш довгохвильове оптичне випромінювання, зокрема видиме.

Люмінесцентні лампи являють собою розрядні джерела світла низького тиску, у яких ультрафіолетове випромінювання ртутного розряду перетворюється люмінофором у більш довгохвильове випромінювання. Конструктивно (рис. 3) вони являють собою циліндричну скляну колбу, закриту герметично увареними ніжками. Електроди – біспіральні, вольфрамові.

Удосконаленими люмінесцентними лампами є компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) (рис. 4).

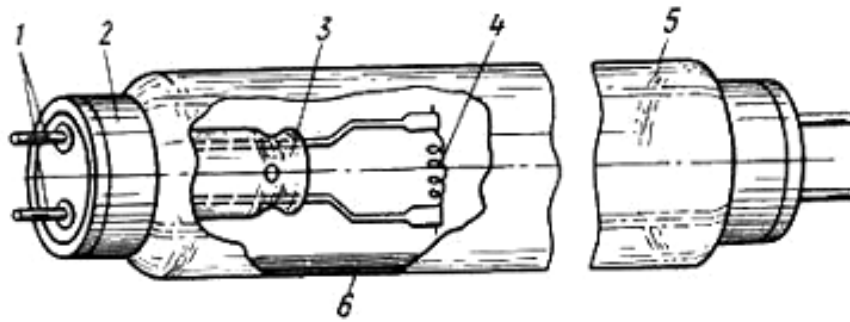


Рис.3. Будова люмінесцентної лампи:  
 1 – штирі; 2 – цоколь; 3 – скляна колба; 4 – біспіраль;  
 5 – колба; 6 – шар люмінофора



а)



б)

Рис. 4. Компактні люмінесцентні лампи

а) зовнішній вигляд

б) лампа в розібраному стані (зліва направо: колба – ЕПРА – цоколь)

Аналіз характеристик ламп розжарювання та люмінесцентних ламп дозволяє стверджувати наступне:

1. Значно більша світлова віддача люмінесцентних ламп порівняно зі світловою віддачею ламп розжарювання дозволяє створювати вищі рівні освітленості на робочих поверхнях при тій самій встановленій потужності, що сприяє підвищенню видимості.

2. Спектральний склад люмінесцентних ламп дозволяє забезпечити більш правильну передачу кольору, що в ряді випадків є вирішальним при виборі джерела світла.

3. Істотно більша середня тривалість горіння люмінесцентних ламп порівняно з лампами розжарювання полегшує експлуатацію освітлювальної установки, а саме заміну перегорілих ламп.

Поряд з переліченими позитивними якостями люмінесцентних ламп варто зазначити ряд їхніх недоліків:

1. Стійка робота люмінесцентних ламп забезпечується у приміщеннях при температурі навколишнього середовища від +5 до +50 °С, що не дозволяє використати їх (без спеціальних пристроїв) для освітлення поза приміщеннями.

2. Люмінесцентним лампам, як і будь-яким розрядним лампам, що живляться змінним струмом промислової частоти, властива пульсація світлового потоку, що вимагає для усунення стробоскопічного ефекту ускладнення електричних освітлювальних мереж або застосування спеціальних схем включення.

3. Для люмінесцентного освітлення характерне підвищення нижньої межі зони зорового комфорту, у межах якого освітлення сприймається як достатнє. Якщо ця межа для ламп розжарювання відповідає освітленості 30-50 лк, то для люмінесцентних ламп ЛБ вона зростає до 150-200 лк, а ламп ДРЛ – до 300 – 500 лк, що свідчить про недоцільність використання люмінесцентних ламп при низьких рівнях нормованої освітленості.

### *1.1.3. Джерела світла на основі напівпровідників*

Найперші світлодіоди давали лише інфрачервоне випромінювання ( RCA 1955р ), перший світлодіод видимого діапазону був червоного кольору, розробила його група Ніка Голоняка з GE у 1962 р. Детальніше про історію створення світлодіоду оповідає Вікіпедія, до речі, бачення російськомовної версії дещо відрізняється. Багато матеріалів присвячено О.В.Лосеву , першовідкривачеві ефекту люмінесценції на кристалах карбиду кремнію. Олега Володимировича навіть називають винахідником світлодіоду, незважаючи на те, що йому не вдалося ні створити діючий зразок, ні дати вичерпне пояснення самого ефекту, що не применшує вкладу цього видатного вченого. Про Ніка Голоняка російська версія мовчить, українська також не надто інформативна, а дарма, людина дуже цікава.

Світлодіод - це напівпровідниковий прилад, що здатен перетворювати електричну енергію безпосередньо у світлову. За своєю структурою, світлодіод

подібний до звичайного напівпровідникового діоду (рис. 5), так само як і будь який напівпровідниковий діод, світлодіод має властивість односторонньої електропровідності, але, при протіканні електричного струму у "прямому" напрямі, на кристалі, в зоні контакту напівпровідників різного типу провідності, виникає світіння. Довжина світлової хвилі, яку ми сприймаємо як колір, залежить лише від структурних та хімічних особливостей напівпровідників. Ніякі зміни характеристик струму живлення світлодіода ( сила струму, частота, напруга ) не можуть вплинути на довжину хвилі випромінюваного світла.

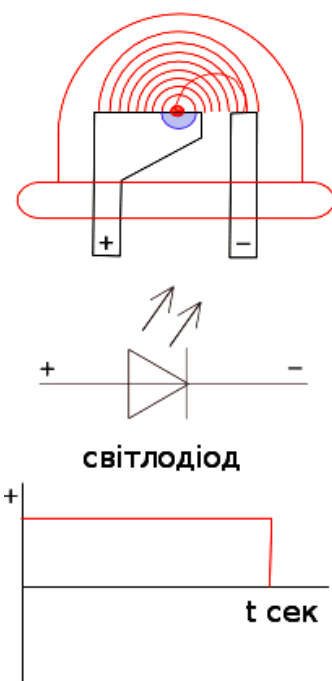


Рис. 5. Будова та струмо-часові характеристики світлодіоду

Та немає таких обмежень, які б не спробувала обійти конструкторська думка. Ніщо не заважає розмістити у одному корпусі кілька кристалів з різним кольором світіння. Першими були створені двокольорові світло діоди (рис. 6). Конструктори скористались тим, що світлодіод здатен проводити струм лише у одному напрямі, розмістивши на одній основі два кристали, під'єднані до виводів живлення зустрічно.

Зі зміною полярності живлення змінюється колір світіння з червоного на зелений. Здатність ока утримувати зорові образи, на якій побудована техніка кіно і телебачення, дозволила підбираючи співвідношення тривалостей імпульсів протилежної полярності змінювати пропорції червоного та зеленого отримуючи проміжні кольори як видно з діаграми кольорів (рис. 7), це всі відтінки жовтого.

Діаграма кольорів також показує, що отримати біле світло можна змішуючи світло червоного, зеленого та синього світлодіодів, проблема лише в тому, що сині світлодіоди до недавнього часу було неможливо виготовити.

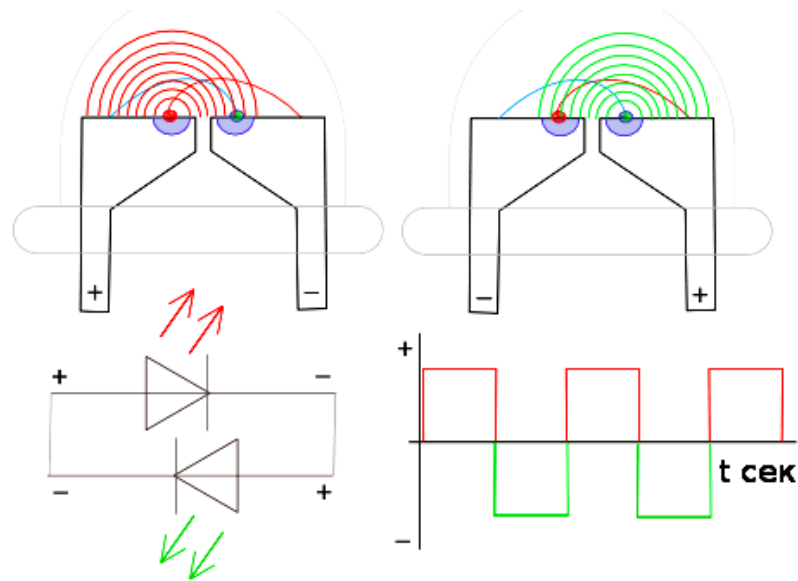


Рис. 6. Двокольоровий світлодіод

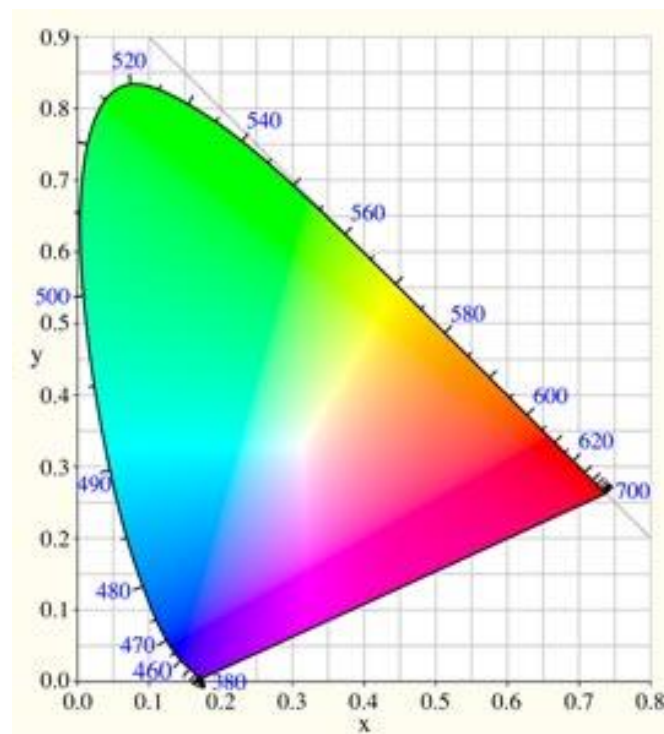


Рис. 7. Локус

Нині проблема вирішена, серійно виробляються світлодіодні RGB сборки, так звані RGB світлодіоди, але їх сфера використання в основному багатокольорові дисплеї та рекламні табло.

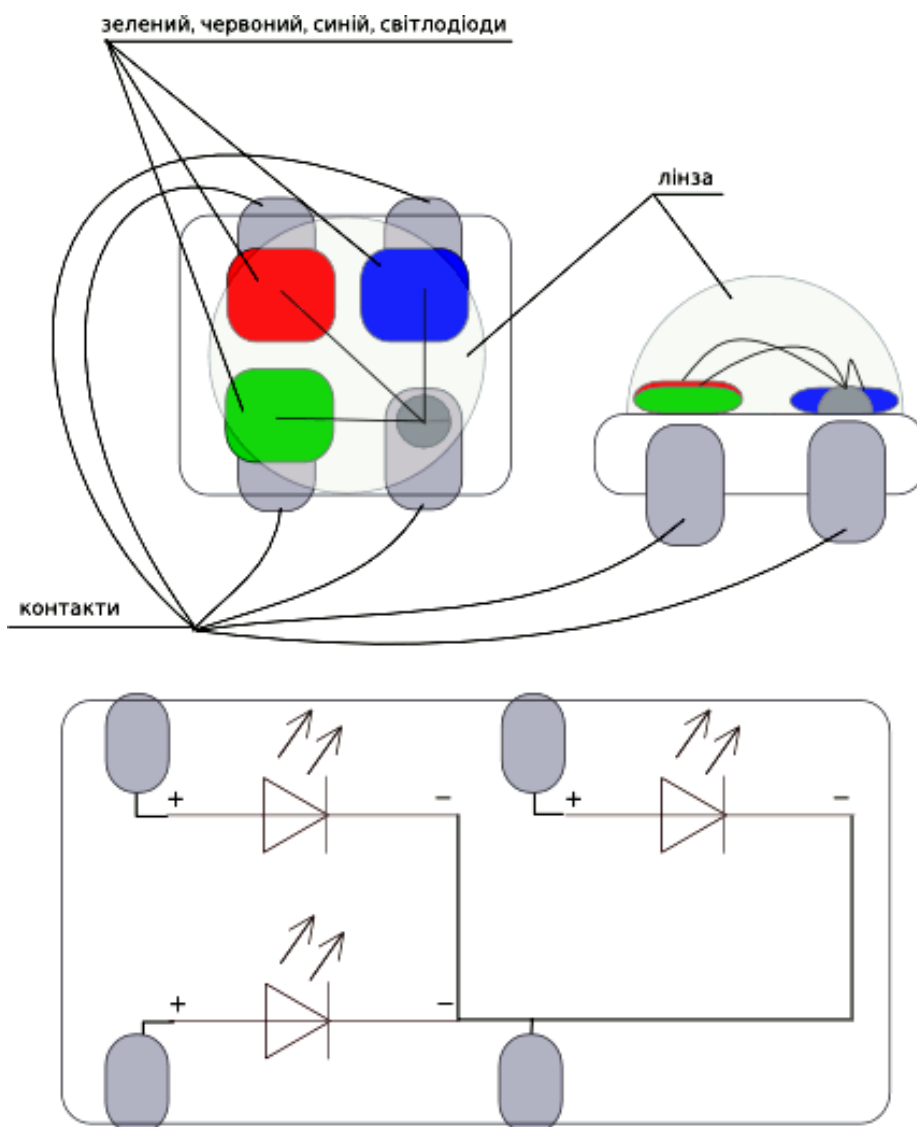


Рис. 8. RGB світлодіод

Технологічно виявилось можливим виготовити світлодіоди жовтого кольору світіння, діаграма кольорів підказує можливість отримання білого світла змішуючи жовте з синім.

Необхідність використання кількох кристалів суттєво здорожує технологію.

Тому найбільшого розповсюдження серед світлодіодів білого світіння набули світлодіоди з люмінофорним покриттям (рис. 9), саме вони стоять у всіх китайських ліхтариках, саме ці світлодіоди мають на увазі кажучи про "білі світлодіоди". Головна перевага світлодіодів з люмінофорами - їх дешевизна.

За принципом дії такі світлодіоди подібні до люмінесцентних ламп. На кристал фіолетового, або ультрафіолетового світлодіода наноситься покриття люмінофору, що під дією ультрафіолетового випромінення починає світитися сам, але вже білим світлом. Зрозуміло, так само як вигоряє люмінофор люмінесцентних ламп, зменшуючи світловіддачу, вигоряє і люмінофор світлодіода. Фактично, світлодіоди невисокої якості за 2 - 3 місяці зменшують світловіддачу вдвоє.

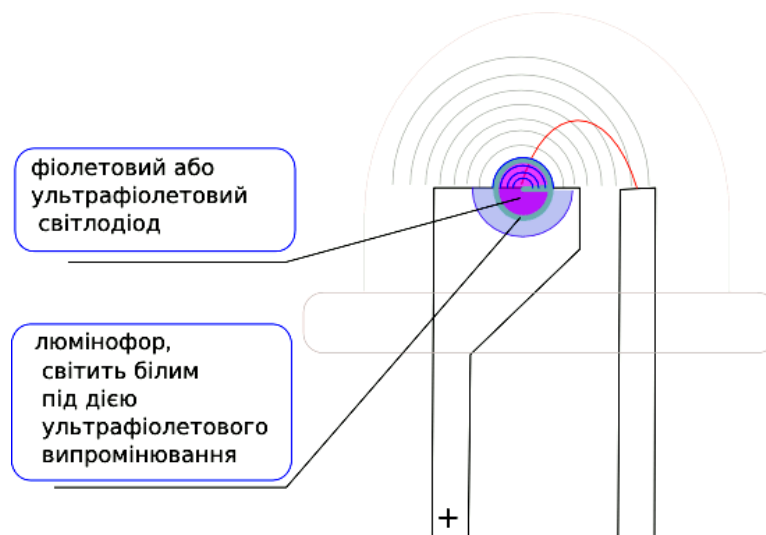


Рис. 9. Білий світлодіод із люмінофором

Ознакою гарної якості є рівномірність нанесення шару люмінофору та його хімічна чистота. Якщо з десятка вибраних світлодіодів половина відрізняється відтінками кольору, висока ймовірність того, що зв'язуватись з цією партією не варто.

Характеристики світло діодів із року в рік постійно змінюються у бік покращення .

Середня світлова віддача світлодіодів кращих фірм становить 70-90 лм/Вт Фірма Cree Lighting обіцяла за 2009-2010 роки досягти величини 150 лм/Вт і зробила це, але тільки для лабораторних зразків, що, втім, теж величезний прорив. Сьогодні вже є цілий ряд об'єктів, де світлодіоди застосовуються навіть для загального освітлення, хоча це дуже дорого. Наприклад, в будівлі Turning Torso в Мальме (Швеція), виконаному у вигляді 190-метрової гвинтовий вежі, навіть коридори освітлені світлодіодами (в карнизах).

Однак навряд чи можна очікувати великий внесок в енергозбереження від світлодіодів протягом найближчих 3-5 років, т. к. використовувати їх для загального освітлення поки занадто дорого.

Перерахуємо властивості світлодіодів, які в найближчому майбутньому зроблять їх найбільш економічними в порівнянні з іншими джерелами світла:



- висока світлова віддача (100-150 лм/Вт в перспективі);
- мале енергоспоживання;
- високий ККД світлових приладів і коефіцієнтів використання світлового потоку в освітлювальних установках;
- малі габарити (точкові або плоскі прилади);
- довговічність (більше 10 років безперервної роботи);
- відсутність пульсації світлового потоку;
- можливість випромінювання в різних частинах спектра;
- можливість зниження запасів освітлювальних установок завдяки стабільності характеристик і великому терміну служби;
- можливість використання для освітлення вицвітає об'єктів (творів мистецтв, продукції поліграфії, текстильного виробництва);
- висока стійкість до зовнішніх впливів (температурі, вібрації, ударів, вологості);
- електробезпека і вибухобезпечність;
- можливість створення необслуговуваних світильників;
- високий ступінь керованості (можливість побудови систем багатоуровневого управління освітленням);
- висока технологічність при масовому виробництві.

Економія електроенергії може бути досягнута вдосконаленням засобів освітлення:

- розширення виробництва і галузі застосування ефективних джерел світла - 14%;
- збільшення світлової віддачі джерел світла - 6%;
- підвищення стабільності характеристик джерел світла - 3%;
- підвищення ККД освітлювальних приладів - 6%;
- поліпшення експлуатаційних властивостей освітлювальних приладів - 3,5%;
- розширення виробництва освітлювальних приладів з ефективними кривими сили світла (КСС) - 3%;
- зниження енергоспоживання освітлювальних приладів, зокрема завдяки використанню електронної пускорегулювальної арматури (ЕПРА) - 1,5-2%.

Вдосконаленням способів освітлення теж можна досягти економії електроенергії:

- розширення області застосування системи загального локалізованого освітлення - 6,5%;
- застосування систем регулювання загального освітлення в залежності від рівня природної освітленості - 4,5-7,5%;
- розширення застосування системи комбінованого освітлення - 4%.

У сумі економія електроенергії може досягти 45-50%.

Поступовий перехід на світлові прилади зі світлодіодами повинен здійснюватися в приміщеннях і відкритих просторах з низькими рівнями нормованої освітленості, там, де освітлення повинно працювати більшу частину часу (понад 4-5 тис. год / рік) і де люди перебувають непостійно. В міру подорожчання електроенергії і поліпшення параметрів світлодіодів область їх ефективного застосування буде розширюватися. Окрема сфера застосування світлодіодів - архітектурне освітлення.

### 1.2. Порівняльні характеристики джерел світла

У табл. 1 представлені деякі характеристики основних груп джерел світла, головною з яких є показник питомої світлової енергії, що виробляється за термін служби. Якщо величину світлової енергії від лампи розжарювання прийняти за одиницю, то можна бачити, що всі інші типи ламп виробляють світлової енергії набагато більше.

Таблиця 1

Основні характеристики різних джерел світла

Тип джерела світла	Середній термін служби, тис.год	Світлова віддача, лм / Вт	Питома світлова енергія, що виробляється за термін служби (середнє значення)	
			млм * год / Вт	відн.од.
Лампи розжарювання (ЛН)	1	8-17	0,013	1
Люмінесцентні лампи (ЛЛ)	10-20	48-104	1,140	88
Компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ)	5-15	65-87	0,780	60

Тип джерела світла	Середній термін служби, тис.год	Світлова віддача, лм / Вт	Питома світлова енергія, що виробляється за термін служби (середнє значення)	
			млм * год / Вт	відн.од.
Дугові ртутні лампи (ДРЛ)	12-24	19-63	0,738	57
Натрієві лампи високого тиску (НЛВТ)	10-28	66-150	2,050	157
Металогалогенні лампи (МГЛ)	3,5-20	68-105	1,020	78
Світлодіоди	25	80-150	2,125	163

## 2. Хід роботи

2.1. Перед виконанням вимірювань підготувати робоче місце. Включити чергове освітлення за допомогою вимикача на стіні. Потім відкрити лабораторний щиток і відключити робоче освітлення автоматичним вимикачем. Перевірити, щоб перемикач знаходився в позиції «О», коли жодне джерело світла не підключене до мережі. Включити лабораторний комплекс відповідним автоматичним вимикачем.

2.2. Встановити перемикач на позицію «1» для дослідження першого джерела світла, який при цьому загориться. Вимкнути дежурне освітлення. Виміряти вольтметром напругу  $U$ , прикладену до джерела світла, амперметром - струм джерела, аттметром - активну потужність  $P$ , споживану джерелом світла. Визначити дві точки для вимірювання освітленості. Вони повинні знаходитися на рівні робочої поверхні 0,8 м від підлоги в горизонтальній площині. Точка 1 розташовується під джерелом світла в напрямку нормалі від джерела до робочої поверхні (рис. 11), точка 2 - під деяким кутом  $\alpha$  до нормалі у протилежній стіні. Висота стелі від підлоги в лабораторії становить 3,2 м. Для стельових світильників приймається розрахункова висота (висота підвісу світильника над робочою поверхнею)  $L = 3,2 - 0,8 = 2,4$  м. Для інших світильників необхідно враховувати звис.

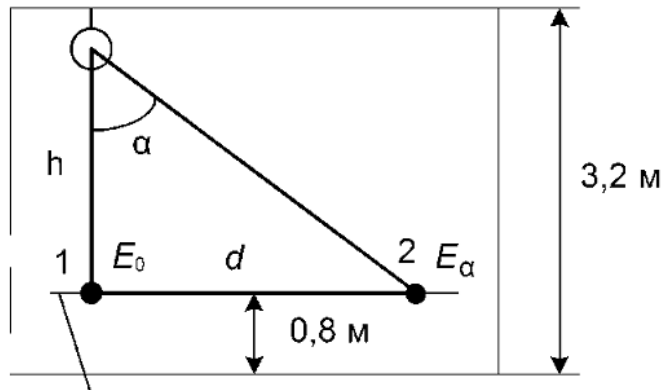


Рис. 10. Схема для вимірювання освітленості

Визначити розрахункову висоту  $h$  і відстань  $d$  між точками 1 і 2 (рис. 11) за допомогою метра, рулетки або лазерного далекоміра. Потім в точках 1 і 2 за допомогою люкметра виміряти освітленість, створювану даним джерелом світла, в гори зонтальної площині робочої поверхні під кутом  $0^\circ$  і під кутом  $\alpha$  до нормалі. Люкметр при вимірюванні розташовувати горизонтально.

4. Встановити перемикач на позицію «2» для дослідження наступного джерела світла. При цьому попередній джерело згасне, а наступний загориться. Повторити вимірювання згідно з пунктами 2 і 3 і. Аналогічно провести вимірювання для всіх джерел світла.

5. По закінченні вимірів для останнього джерела світла включити чергове освітлення, вимкнути лабораторний комплекс автоматичним вимикачем, при цьому джерело світла згасне. Встановити перемикач з позиції «10» в позицію «0». Включити робоче освітлення автоматичним вимикачем. Виключити чергове освітлення. Закрити кришку лабораторного щитка.

6. Виконати розрахунки і побудувати графіки. Результати розрахунків занести в табл. 2.

Таблиця 2. Результати обчислень

№ п / п	Джерело світла	$\cos \varphi$	$\alpha$	$I_0$ , кд	$I_\alpha$ , кд	$m$	$\Phi$ , лм	$\eta$ м/Вт
1	Лампа ЛОН 75 Вт E27							
2	Лампа Philips Refl NR63 60W 230V E27							
3	Лампа ESL-S 12 26W 2700 E 27 UNEL							
4	Лампа ESL-S 12 26W 4200 E27 UNEL							
5	Лампа світлодіодна біла ЛМС 36-1,8 Вт E27							

Визначити для кожного з десяти джерел світла:

- коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI};$$

- меридіональний кут

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{d}{h};$$

- силу світла в напрямку нормалі від джерела до горизонтальної робочої поверхні і силу світла під кутом  $\alpha$  до нормалі:

$$I_0 = E_0 h^2;$$

$$I_\alpha = \frac{E_\alpha h^2}{\cos^3 \alpha};$$

- емпіричний показник  $m$  з точністю до двох знаків після коми

$$m = \frac{\ln \left( \frac{I_\alpha}{I_0} \right)}{\ln (\cos \alpha)};$$

- світловий потік  $\Phi$  ;

$$\Phi = \frac{2\pi I_0}{m+1}.$$

- світлову віддачу джерел світла

$$\eta = \frac{\Phi}{P}.$$

7. За значенням світлової віддачі встановити найбільш і найменш енергоефективні джерела світла.

8. На міліметровому папері в масштабі побудувати КСС в полярній системі координатах для ламп розжарювання, КЛЛ та світлодіодної лампи, Світлорозподілення яких є кругло-симетричним. Побудова КСС виконувати по залежності

$$I_\alpha = f(\alpha) = I_0 \cos^m \alpha$$

при зміні кута  $\alpha$  від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  через  $10^\circ$ .

Графіки КСС додати до звіту по лабораторній роботі.

### 3. Контрольні запитання

1. Назвіть основні світлотехнічні величини і їх розмірності.
2. Які поверхні називаються дифузними?

3. Що таке крива сили світла? Опишіть способи представлення КСС: аналітичний, табличний і графічний.
4. Назвіть і продемонструйте основні типи КСС.
5. Назвіть основні види джерел світла.
6. Назвіть основні показники, що характеризують джерела світла.
7. Назвіть переваги і недоліки ламп розжарювання.
8. Назвіть переваги і недоліки люмінесцентних ламп.
9. Назвіть переваги і недоліки світлодіодних ламп.
10. Які запобіжні заходи необхідно дотримуватися при установці галогенних ламп?

## **Лабораторна робота № 5**

# **ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА СВІЛОТЕХНІЧНИЙ АУДИТ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ ІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ СВІТЛА**

**Мета роботи.** Навчитися вимірювати енергетичні та світлотехнічні показники системи освітлення

### ***1. Теоретичні відомості***

#### ***1.1. Штучне освітлення***

Штучне освітлення передбачається у приміщеннях, в яких відчувається нестача природного світла, а також для освітлення приміщення в ті години доби, коли природна освітленість відсутня.

За принципом організації штучне освітлення можна розділити на два види: загальне та комбіноване.

Загальне освітлення призначене для освітлення всього приміщення, воно може бути рівномірним чи локалізованим. Загальне рівномірне освітлення створює умови для виконання робіт в будь-якому місці освітлюваного простору. При загальному локалізованому освітленні світильники розміщують у відповідності з розташуванням обладнання, що дозволяє створювати підвищену освітленість на робочих місцях. Комбіноване освітлення складається із загального та місцевого. Його доцільно влаштовувати при роботах високої точності, а також при необхідності створення в процесі роботи певної спрямованості світлового потоку.

Місьцеве освітлення призначене для освітлення тільки робочих поверхонь і не створює необхідної освітленості навіть на прилеглих до них ділянках. Воно може бути стаціонарним і переносним. Застосування одного місцевого освітлення у виробничих приміщеннях забороняється, оскільки різкий контраст між яскраво освітленими і неосвітленими місцями стомлює зір, сповільнює швидкість роботи, і нерідко є причиною нещасних випадків.

За функціональним призначенням штучне освітлення поділяється на робоче, аварійне, евакуаційне та охоронне. Робоче освітлення передбачається для всіх приміщень виробничих будівель, а також ділянок відкритих просторів, призначених для роботи, проходу людей і руху транспорту. Аварійне освітлення у приміщеннях і на місцях виконання робіт необхідно передбачати, якщо відключення робочого освітлення і пов'язане з цим порушення

обслуговування устаткування може привести до вибуху, пожежі, тривалого порушення технологічного процесу або роботи об'єктів життєзабезпечення. Найменша освітленість, створювана аварійним освітленням, повинна становити 5 % освітленості, нормованої для робочого освітлення, але НЕ менше 2 лк всередині будівель і не менше 1 лк для території підприємств.

В якості джерел штучного освітлення застосовуються лампи розжарювання, газорозрядні та світлодіодні лампи.

На робочій поверхні видимість об'єкта при штучному освітленні вимірюють у люксах, а при природному освітленні видимість характеризують коефіцієнтом природної освітленості (КПО). КПО дорівнює відношенню природної освітленості, створюваної у визначеній точці заданої площини усередині приміщення ( $E_c$ ) до одночасного значення зовнішньої горизонтальної освітленості, створюваної світлом цілком відкритого небозводу ( $E_3$ ). КПО ( $e$ ) виражається у відсотках:

$$e = E_c/E_3 \cdot 100\%. \quad (1)$$

Нормування (установлення необхідної видимості об'єкта) як штучної, природної так сполученої освітленості здійснюється виходячи із ступеня утомленості ока при виконанні конкретної роботи [7]. При цьому характеристикою напруженості зорового аналізатора людини є ступінь точності виконання зорових робіт, що, в свою чергу, визначається так званим найменшим розміром об'єкта розрізнення. Ця величина вимірюється в міліметрах. Об'єктом розрізнення виступає найменший розглянутий предмет, окрема його частина чи дефект, які необхідно розрізнити під час роботи. Якщо трудовий процес протікає у виробничому приміщенні, то зорові роботи залежно від їхньої точності підрозділяються на 8 розрядів – від I до VIII [7,табл.1].

Якщо трудовий процес протікає поза будинками, на відкритому майданчику, то зорові роботи підрозділяється на 5 розрядів – IX-XIII і також визначається за [7.табл.16].

Зорове сприйняття предмета залежить від різниці в яскравості об'єкта і фону, на якому розташовується об'єкт (контрасту об'єкта розрізнення з фоном), а також від характеристики яскравості самого фону. У зв'язку з цим кожний з розрядів зорової роботи залежно від характеристики фону і контрасту об'єкта розрізнення з фоном має декілька під розрядів.

Виходячи з усіх цих характеристик визначається нормоване значення освітленості  $E_n$  для штучного освітлення і значення КПО для природного і сполученого освітлення [7,табл.1,2]. Ці параметри використовуються у світлотехнічних розрахунках.



Природне освітлення характерне тим, що створювана в приміщеннях освітленість змінюється в широких межах і залежить від часу дня, року, метеорологічних факторів, географічного розташування будинку, орієнтації віконних прорізів щодо обр'ю та ін. З огляду на ці фактори, уся територія СНД умовно розділена на V світлових поясів [7,рис.1]. Нормовані значення КПО приводяться тільки для III світлового пояса [7,табл.1,2].

Нормовані значення КПО для інших світлових поясів визначають за формулою:

$$\text{КПО} = \text{КПО}_н \cdot m^i \cdot c^i, \quad (2)$$

де  $m^i, c^i$  – відповідно, коефіцієнти світлового і сонячного клімату. Значення цих коефіцієнтів приведені в [7,табл.4,5].

## 1.2. Основні світлотехнічні величини

### 1.2.1. Світловий потік

У світлотехніці, де еталонним приймачем випромінювання є око людини, для оцінки ефективної дії потоку випромінювання вводиться поняття світлового потоку.

Світловий потік  $\hat{O}$  – це потік випромінювання, що оцінюється його дією на око, відносна спектральна чутливість якого визначається усередненою кривою спектральної ефективності, затвердженою МКО (рис. 1).

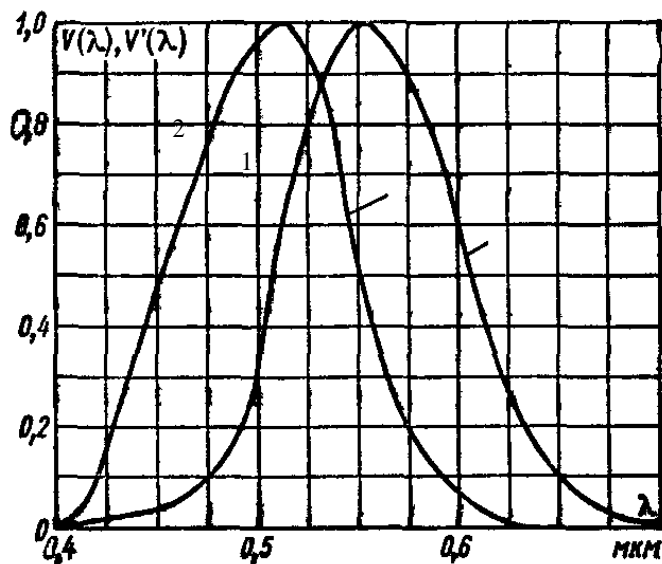


Рис. 1. Середні значення спектральної чутливості ока

У світлотехніці використовується і таке визначення світлового потоку: світловий потік – це потужність світлової енергії. Одиниця світлового потоку – люмен (лм). 1 лм відповідає світловому потоку, випромінюваному в

одиночному тілесному куті точковим ізотропним джерелом із силою світла 1 кандела.

Однорідне випромінювання потужністю 1 Вт при  $\lambda = 0,555$  мкм становить 680 лм світлового потоку. Число 680 – світловий еквівалент потужності випромінювання.

Співвідношення між електричною енергією, що розсіюється в джерелі світла, і випромінюваним світловим потоком називається світловою віддачею, що вимірюється в лм/Вт.

Максимальне значення світлової віддачі становить 680 лм/Вт при довжині хвилі випромінювання  $\lambda = 0,555$  мкм.

### 1.2.2. Сила світла

Розподіл випромінювання реального джерела в навколишньому просторі нерівномірний. Тому світловий потік не буде вичерпною характеристикою джерела, якщо одночасно не визначається розподіл випромінювання за різними напрямками навколишнього простору. Для характеристики розподілу світлового потоку користуються поняттям просторової густини світлового потоку за різними напрямками навколишнього простору. Просторову густину світлового потоку, що визначається відношенням світлового потоку до тілесного кута з вершиною в точці розміщення джерела, у межах якого рівномірно розподілений цей потік, називають силою світла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}, \quad (3)$$

де  $\Phi$  – світловий потік;  $\omega$  – тілесний кут.

Одиницею сили світла є кандела (кд) – світловий потік у люменах (лм), що випускається точковим джерелом у тілесному куті 1 ср (стерадіан) (лм/ср).

### 1.2.3. Освітленість

Освітленість – це кількість світла або світлового потоку, що падає на одиницю площі поверхні. Вона позначається літерою  $E$  і вимірюється в люксах (лк).

Один люкс дорівнює одному люмену на метр квадратний (лм/м<sup>2</sup>).

Освітленість можна визначити як густину світлового потоку на освітлюваній поверхні:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (4)$$

Освітленість не залежить від напрямку поширення світлового потоку на поверхню.

Наведемо кілька загальноприйнятих показників освітленості:

Літо, день під безхмарним небом	100 000 люкс
Вуличне освітлення	5-30 люкс
Повний місяць у ясну ніч	0,25 люкс

#### 1.2.4. Горизонтальна освітленість

Для розрахунку горизонтальної освітленості (рис. 2) використовують наступну формулу:

$$E_p = \frac{I \cos \gamma}{d^2},$$

$$d = h / \cos \gamma.$$

отримуємо

$$E_p = \frac{I \cos^3 \gamma}{h^2}. \quad (5)$$

За даною формулою розраховується горизонтальна освітленість у точці виміру.

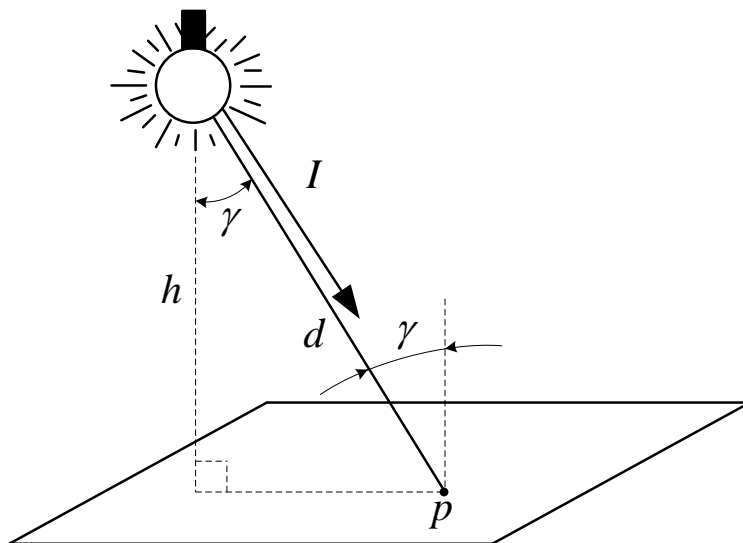


Рис. 2. Горизонтальна освітленість

### 1.2.5. Вертикальна освітленість

Освітлення тієї самої точки  $p$ , орієнтованої до джерела світла у вертикальній площині, можна представити як функцію висоти ( $h$ ) джерела світла і кута падіння ( $\gamma$ ) сили світла ( $I$ ) (рис. 3).

$$E_{\text{в}} = \frac{I}{d^2} \sin \gamma \quad \text{та} \quad d = \frac{h}{\cos \gamma}.$$

Отримуємо

$$E_{\text{в}} = \frac{I}{h^2} \cos^2 \gamma \sin \gamma. \quad (6)$$

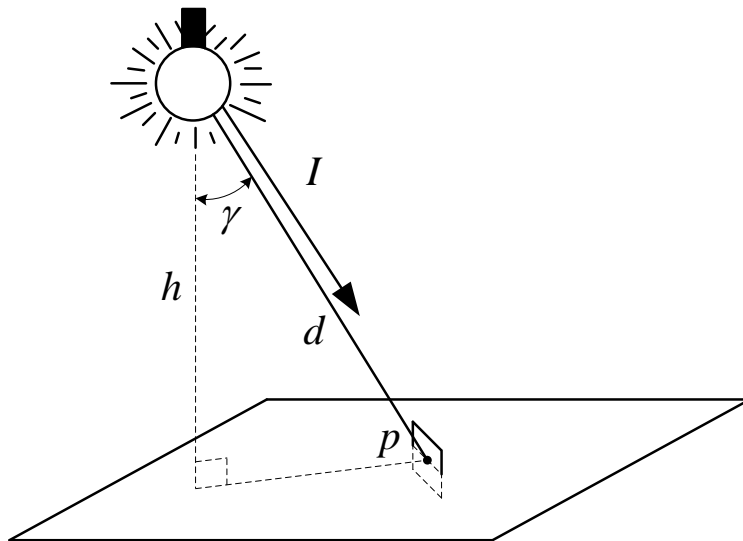


Рис. 3. Вертикальна освітленість

## 2. Хід роботи

Дослідити освітленість робочих місць у лабораторії при природному і штучному освітленні

1. Використовуючи СНиП [7], заповнити графи 1-6 табл. 1 з урахуванням характеристик виконуваної зорової роботи.

2. Визначити нормативне значення штучної освітленості  $E_n$  (1,табл.1) і внести в гр. 7 табл.1.

3. Виміряти фактичну освітленість робочих поверхонь при штучному освітленні за допомогою люксметра на кожному столі при закритих шторах. Результат вимірів записати в гр.8 табл.1.

4. Знайти нормативне значення КПО для цих же характеристик виконуваної роботи.

5. Розрахувати за формулою (2) нормативне значення КПО для четвертого світлового пояса, в якому розташоване м. Харків, з урахуванням коефіцієнтів  $m$  і  $c$ . Отримане значення КПО внести в гр.9 табл.1.

## Дослідження освітленості робочих поверхонь

Група приміщень по задачам зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Характеристика фону	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Підрозряд зорової роботи	Освітлення					
						штучне		природне			
						Освітленість, лк		КПО нормативний, %	Освітленість, лк		КПО фактичний, %
						нормативна	фактична		зовнішня	внутрішня	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

6. Виміряти фактичну освітленість робочих поверхонь при природному освітленні. Для цього використовують два люксметри. Фотоелемент першого люксметра при бічному освітленні розташовують усередині приміщення в точці на відстані 1 м від стіни, найбільш віддаленої від світлових прорізів, а фотоелемент другого люксметра - поза приміщенням на відкритому просторі. Виміри освітленості виконують одночасно обома люксметрами (за сигналом) не менш 10 разів. Виміри здійснюють при умові відкритого небозводу. Значення КПО визначають за формулою (4.1), підставляючи середні значення  $E_c$  і  $E_z$ . Результати заносять у гр. 10,11,12 табл.4.1.

7. Проаналізувати отримані результати, зробити висновки про відповідність фактичної освітленості робочих поверхонь штучним і природним освітленням вимогам СНиП II-4-79 [1].

### 3. Контрольні запитання

1. На які групи поділяються приміщення за завданням зорової роботи?
2. Якими показниками характеризується зорова робота?
3. Назвіть види штучного освітлення робочих місць.
4. Що розуміють під сполученим освітленням?
5. Назвіть системи штучного освітлення.
6. В яких одиницях нормується штучне і природне освітлення?
7. Як визначається коефіцієнт природної освітленості приміщення?
8. Викладіть сутність розрахунку штучного освітлення виробничого приміщення методом світлового потоку.
9. Опишіть будову і порядок роботи з люксметром.
10. Викладіть сутність розрахунку прожекторного освітлення за питомою потужністю.

## Рекомендована література

1. Коваль В.П. Енергозбереження [електронний ресурс]: //Інституційний репозитарій Atutor (код дисципліни ID 963): офіційний сайт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя – Тернопіль, 2023. – Режим доступу: <https://dl.tntu.edu.ua/index.php>
2. Мельникова О.В., Праховнік А.В., Енергозбереження. Посібник з раціонального використання ресурсів та енергії для учнів загальноосвітньої школи. Видання друге виправлене та доповнене. Київ. - 2004.- 104 с.
3. Маляренко В.А., Лисак Л.В.. Енергетика, довкілля, енергозбереження. /Під заг. ред. проф. В. А. Маляренка, Х.: Рубікон, 2004. – 368 с.
4. Дудюк Д. Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі : навч.посіб. / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин. – Львів : Магнолія 2006, 2009. – 188 с.
5. Комплексна державна програма енергозабезпечення України (Держком з енергозбереження, Міністерство економіки, НАН України). - К.: 1996 -218 с.
6. Дзядикевич Ю.В., Буряк М.В., Розум Р.І. “Енергетичний менеджмент” – Тернопіль: Економічна думка, 2010. – 295 с.
7. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173
8. Коваль В. П. Світлотехнічні аспекти заміни ламп розжарення на енергоефективні джерела світла / В. П. Коваль, М. Г. Тарасенко, Р. В. Коцюрко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2014. - № 5. - С. 2-8.
9. Koval V.P. Energy efficiency of flat solar panels position system // V.P. Koval, M.G. Tarasenko, K.M. Kozak// Energy saving. Energy engineering. Energy audit. – 2015. – № 3. – С. 2-10.