

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФОТОЕНЕРГЕТИКА
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою
програмою «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ 2023

«Фотоенергетика: лабораторний практикум» [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. Спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ;уклад.: О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук – Електронні текстові дані (1 файл: 3 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 41 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 23 лютого 2023 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 6 від 26 грудня 2022 р.)*

Електронне мережеве навчальне видання
навчальний посібник

ФОТОЕНЕРГЕТИКА
лабораторний практикум

Укладач:

Гаєвський Олександр Юлійович, д.ф.-м.н, проф. каф. відновлюваних джерел енергії,

Іванчук Владислав Юрійович, аспірант, асистент каф. відновлюваних джерел енергії,

Рецензент:

Кацадзе Теймураз Луарсабович, к.т.н, доцент каф. електричних мереж та систем.

Відповідальний редактор:

Будько Василь Іванович, д.т.н, доцент, завідувач каф. відновлюваних джерел енергії

Навчальний посібник присвячений освоєнню студентами основ фотометрії, принципів фотоелектричного перетворення сонячної енергії, знань і навиків автоматизованого вимірювання рівня сонячної радіації, температури, вологості, сканування вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів. На заняттях вивчаються принципи побудови вимірювальних схем на основі мікроконтролерів, складання програм управління збором експериментальних даних та їх обробки на ПК.

Зміст

Лабораторна робота № 1. Характеристики світлового потоку, сонячної радіації.....	4
Лабораторна робота № 2. Вимірювання температури та вологості. Освоєння технології автоматичних вимірювань за допомогою мікроконтролерної плати Arduino	9
Лабораторна робота № 3. Моніторинг сонячної радіації за допомогою фотодіодного датчика та мікроконтролера	15
Лабораторна робота № 4. Вимірювання освітленості від різних джерел фоторезисторним датчиком	23
Лабораторна робота № 5. Вимірювання ВАХ фотоелектричних модулів методом резистивного навантаження.....	29
Лабораторна робота № 6. Автоматизоване вимірювання ВАХ фотоелектричних модулів за допомогою мікроконтролера.....	34
Література	41

Лабораторна робота № 1. Характеристики світлового потоку, сонячної радіації

Мета роботи. Вивчити характеристики світлового потоку і сонячної радіації, основні поняття фотометрії. Освоїти методику вимірювання освітленості за допомогою люксметра, отримати залежність освітленості від відстані до джерела світла.

1. Теоретичні відомості

1.1. Основи фотометрії

Потік випромінювання. Тілесний кут

Основною величиною, яка дозволяє судити про кількість випромінювання, є *потік випромінювання* (або потужність випромінювання) Φ_e – це величина енергії, яку переносить поле в одиницю часу через ділянку, наприклад, приймальної поверхні. Потік випромінювання вимірюється в ватах:

$$[\Phi_e] = \text{Вт} = \text{Дж/с}$$

Енергія сонячного випромінювання, яке надходить до приймальної поверхні, залежить від спектрального складу світла. Якщо розкласти поле на монохроматичні складові $\Phi_\lambda(\lambda)$ (кожна з певною довжиною хвилі), то вся енергія деяким чином розподілиться між ними. *Спектральна щільність потоку* випромінювання – це функція, що показує розподіл енергії по спектру випромінювання:

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \frac{d\Phi_\lambda}{d\lambda}, \text{ Вт/нм} \quad (1)$$

Тоді загальний сумарний потік для всіх довжин хвиль в діапазоні від λ_1 до λ_2 обчислюватиметься як інтеграл:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Розглянемо випромінювання точкового джерела в межах деякого тілесного кута (Рис.1). *Тілесний кут* – це частина простору, яка є об'єднанням всіх променів, що виходять з цієї точки (вершини кута). Тілесний кут Ω обмежений деякою кінечною поверхнею і дорівнює відношенню площі A частини сфери, яка вирізається цим тілесним кутом, до квадрату радіуса r сфери:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (3)$$

Одиницею виміру тілесного кута в системі СІ є *стерадіан* (позначення sr) – це тілесний кут, який вирізається зі сфери радіуса r поверхнею площі r^2 . Повна сфера утворює тілесний кут, рівний 4π стерадіан (*повний тілесний кут*).

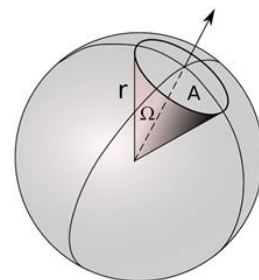


Рис.1. Тілесний кут Ω

Сила випромінювання

Сила випромінювання (енергетична сила світла) – це потік випромінювання від точкового джерела, що припадає на одиницю тілесного кута, в межах якого він поширюється:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}, \text{ Вт/ср} \quad (4)$$

За одиницю енергетичної сили світла прийняті сила випромінювання такого точкового джерела, у якого в межах 1 стерadiana рівномірно розподіляється потік випромінювання в 1 Ватт.

Для вимірювання сили світла, що падає на поверхню, в системі СІ передбачена також одиниця *кандела* (в перекладі «свічка», позначення *кд* або латиницею *cd*). Історично прийнято, що кандела – це потужність випромінювання чорного тіла – поверхні платини площею 60 см² під час переходу платини з рідкого в твердий стан (при застиганні).

Кількісно 1 кд дорівнює силі світла джерела випромінювання з довжиною хвилі 555 нм, що віддає потужність 1/683 Вт в тілесний кут 1 стерadian. Таким чином

$$1 \text{ кд} = \frac{1}{683} \text{ Вт/ср} \text{ при } \lambda = 555 \text{ нм або } f = 540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$$

Такий вибір частоти випромінювання пояснюється фактом, що людське око найчутливіше саме до цієї частоти, яка відповідає зеленому кольору (рис.2). При інших частотах для того щоб досягти такої ж сили видимого світла, необхідна, згідно зі спектральною чутливістю $V(\lambda)$, більша енергетична інтенсивність випромінювання.

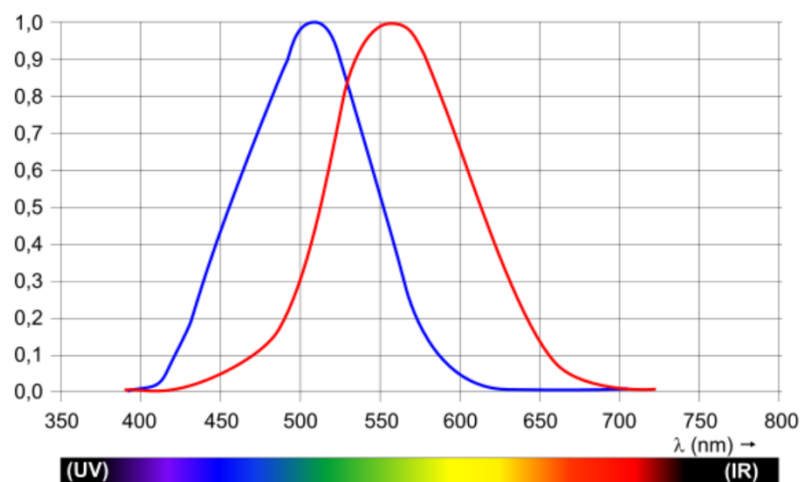


Рис.2. Відносна світлова спектральна ефективність $V(\lambda)$ для денного і нічного людського зору: денний час (червона лінія); нічний час (синя лінія)

Світловий потік та освітленість

З огляду різної чутливості людського ока до випромінювання з різними довжинами хвиль введено поняття *світлового потоку* (не плутати з потоком випромінювання), який враховує спектральну ефективність зору $V(\lambda)$. Нехай є монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі λ , потік випромінювання якого дорівнює $\Phi_e(\lambda)$. Тоді світловий потік такого випромінювання $\Phi_v(\lambda)$ виражається рівністю:

$$\Phi_v(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda) \quad (5)$$

де K_m – коефіцієнт, величина якого визначається системою одиниць, що використовується. K_m називається *фотометричним еквівалентом випромінювання*. В системі СІ цей коефіцієнт дорівнює 683 лм/Вт (лм – люмен, див. нижче). У разі нічного зору значення K_m буде іншим – відповідним залежності $V(\lambda)$ (Рис. 2).

Якщо розглядати не монохроматичне, а видиме сонячне світло, що має спектр від 380 нм до 780 нм, під $\Phi_e(\lambda)$ слід розуміти *спектральну щільність потоку* випромінювання (просто кажучи, сонячний спектр), що характеризує розподіл енергії випромінювання по спектру. Тоді сумарний (інтегральний) світловий потік буде дорівнювати інтегралу

$$\Phi_v = K_m \int_{380\text{нм}}^{780\text{нм}} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Світловий потік від джерела визначається за допомогою *люменів* (лм, lm) – одиницями системи СІ. Один люмен дорівнює світловому потоку, що випромінюється точковим ізотропним джерелом з силою світла 1 кандела в тілесний кут 1 стерадіан: $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \times \text{ср}$. Повний світловий потік, створений ізотропним джерелом з силою світла 1 кандела дорівнює 4π люменам.

Інтенсивність світлового потоку, яка називається *освітленістю*, чисельно дорівнює світловому потоку, що падає на ділянку поверхні одиничної площі, нормальної до напрямку потоку:

$$L = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad (7)$$

У разі рівномірного (ізотропного) світлового потоку

$$L = \frac{\Phi_v}{S}, \quad (8)$$

де S – площа перетину, який охоплює світловий потік і нормально орієнтований до променів світла.

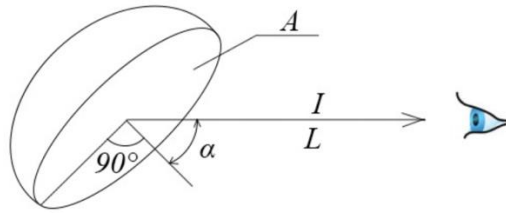


Рис.3. Освітленість при похилої орієнтації променів

Освітленість прямо пропорційна силі світла джерела. При видаленні його від освітлюваної поверхні її освітленість зменшується обернено пропорційно квадрату відстані: $L \sim r^{-2}$ (закон зворотних квадратів).

Коли промені світла падають похило до поверхні, що освітлюється, освітленість зменшується пропорційно косинусу кута падіння променів (Рис. 3):

$$L = \frac{\Phi_v}{A \cos \alpha} \quad (9)$$

Для оцінки освітленості, тобто інтенсивності світлового потоку, вводяться одиниці люкси (лк) та гекталюкси (глк): 1 лк = 1 лм/1м², 1глк = 100 лк.

При розгляданні відбиття світла від поверхні вводять на відміну від освітленості – світність. Це інтенсивність відбитого світлового потоку.

2. Експериментальна частина

2.1. Краткий опис вимірювальної установки

Значення освітленості в даній роботі вимірюється люксметром DT 1308 на діапазонах $\times 10$ (децилюкси) або $\times 100$ (гекталюкси). Джерелом світла служать лампа розжарювання і світлодіодний прожектор. В ході експерименту треба вимірювати освітленість на різних відстанях від джерела.

2.2. Хід виконання роботи і завдання

1. Розташувати на столі джерело світла (лампу розжарювання) і датчик люксметра. Площина датчика люксметра має бути орієнтованою перпендикулярно напрямку на джерело. На столі має бути нанесеною лінійка для вимірювання відстані між джерелом і датчиком.
2. В ході експерименту треба вимірювати освітленість на різних відстанях від джерела, починаючи з 20 см до 120 см з кроком 10 см. Дані занести в таблицю 1.

Табл.1. Дані освітленості

Відстань r , см	Освітленість L , глк	
	Лампа розжарювання, 500 Вт	LED прожектор, 400 Вт
20
...
120

3. Повторити пп. 1, 2 з LED-прожектором у якості джерела світла.
4. Побудувати в MATLAB графіки залежності $L(r)$ для двох джерел.
5. За допомогою модуля **cftool** MATLAB зробити апроксимацію отриманих даних. Апроксимуючу функцію взяти у вигляді:

$$L(r) = \frac{a_1}{(r - a_2)^2}, \quad (10)$$

де a_1, a_2 – підганальні параметри.

6. Визначити, наскільки точно (або не точно) виконується закон убутання освітленості для точкового джерела:

$$L(r) \sim \frac{1}{r^2} \quad (11)$$

при $r > 30$ см.

7. Зробити висновки.

3. Контрольні питання

1. Які світлові величини ви знаєте? В яких одиницях їх вимірюють?
2. Що таке потік випромінювання і світловий потік?
3. Що таке спектральна щільність потоку випромінювання? спектральна щільність світлового потоку?
4. Як ви розумієте поняття тілесний кут?
5. Що собою уявляють одиниці вимірювання: кандела, люмен, люкс?
6. Яким чином пов'язані сила світла і світловий потік?
7. Що таке освітленість? Як вона пов'язана зі світловим потоком?
8. До якого явища відноситься закон зворотних квадратів?
9. Як змінюється освітленість поверхні, якщо змінювати кут її нахилу відносно напрямку променів?
10. Що таке відносна світлова спектральна ефективність?
11. Чому дорівнює фотометричний еквівалент випромінювання K_m , якщо світловий потік вимірюється в люменах? В Ватах?

Лабораторна робота № 2. Вимірювання температури та вологості. Освоєння технології автоматичних вимірювань за допомогою мікроконтролерної плати Arduino

Мета роботи. Освоїти прийоми роботи з мікроконтролерною платою Arduino Uno, мову складання сценаріїв в середовищі розробки Arduino IDE. Навчитись методиці вимірювання температури і вологості за допомогою цифрового датчика DHT11 и збору даних мікроконтролером.

1. Теоретичні відомості

Важливим етапом практично будь-якого сучасного експерименту є збір експериментальних даних та їх збереження в цифровому вигляді для подальшої обробки та аналізу. Плата Arduino Uno, що представляє популярний клас бюджетних мікроконтролерів, дозволяє оцифровувати і передавати в комп'ютер експериментальні сигнали з 10-бітною роздільною здатністю, достатньою для проведення більшості електричних вимірювань. На ПК дані надходять із послідовного порту і можуть бути збережені стандартним програмним забезпеченням (наприклад, програмами Hyper Terminal, CoolTerm та ін.).

1.1. Короткий опис плати Arduino Uno

Зовнішній вигляд плати Arduino Uno показаний на рисунку 1. Зліва знаходиться роз'єм підключення шини USB (Universal Serial Bus): з його допомогою плата підключається до комп'ютера, що дозволяє подати на неї напругу живлення, вивантажувати програми (скетчі), надсилати та приймати дані з комп'ютера. Під роз'ємом USB – роз'єм для підключення блока живлення. У центрі - мікроконтролер, що виконує інструкції, що включає кілька видів пам'яті для зберігання даних і інструкцій і має різні входи і виходи для виведення або введення даних.



Рис. 1. Мікроконтролерна плата Arduino Uno

Нижче мікроконтролера розташовуються ряд портів електроживлення (Power) та аналогових входів (їх позначення починаються з літери A), які служать для вимірювання рівнів напруги, а порти A4 і A5 – для обміну даними з іншими пристроями.

У верхньому ряду плати розташовані порти з номерами від 0 до 13 – цифрові входи/виходи (лінійка з позначенням Digital). Служать вони для прийому вхідних сигналів або генерування вихідних сигналів. Контакти 0 і 1, також відомі як послідовний порт, можуть використовуватися для обміну з іншими пристроями (наприклад, з ПК) через схему підключення до USB-роз'єму. Порти, позначені знаком тильди ~, можуть також генерувати ШІМ-модульований сигнал (наприклад, для керування світлодіодами або електродвигунами).

На платі Arduino є чотири світлодіоди:

- ON – індикація підключеного до плати електроживлення;
- RX і TX – індикація отримання та відправлення даних відповідно через послідовний порт та USB;
- L – призначений для потреб користувача (підключений до цифрового порту 13).

Невелика мікросхема у квадратному корпусі є мікроконтролером з керуючим інтерфейсом USB. Кнопка RESET (на малюнку червона) дозволяє перезавантажувати плату.

Два ряди портів уздовж кожної сторони Arduino дозволяють підключати будь-яку плату розширення (наприклад, Ethernet).

1.2. Середовище розробки Arduino

Середовище розробки Arduino IDE нагадує текстовий процесор (Рис.2). Вікно IDE ділиться на три основні області: область керування, область введення тексту та область виведення повідомлень.

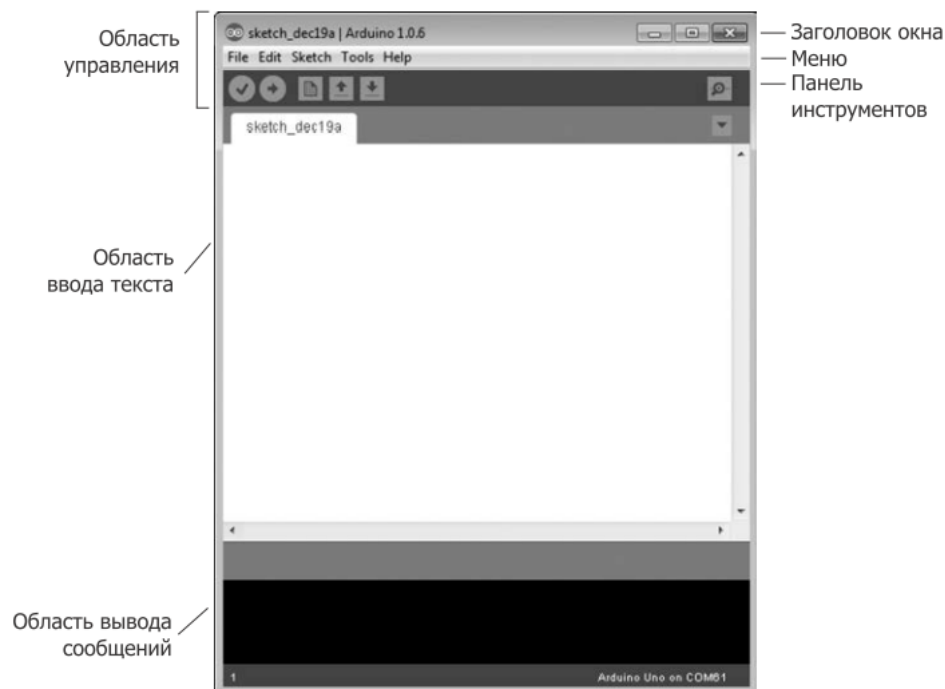


Рис. 2. Середовище розробки Arduino IDE

Область керування містить заголовок вікна з ім'ям файлу скетчу, меню та панель інструментів.

Область введення тексту служить для введення коду скетчів. Ім'я поточного скетчу відображається у вкладці над областю введення. За замовчуванням скетчу присвоюється ім'я, що містить поточну дату.

В області виведення повідомлень відображаються результати перевірки та завантаження скетчів, повідомлення про помилки та ін.

1.3. Шини даних

Взаємодія плати Arduino з іншими пристроями здійснюється за допомогою шини даних – системи з'єднань, що дозволяє двом і більше пристроям обмінюватись за певним протоколом. Шина даних використовується для підключення до плати різних датчиків, розширювальних пристроїв введення/виводу та інших компонентів.

Arduino має дві шини:

- SPI (Serial Peripheral Interface) - шина послідовного периферійного інтерфейсу;
- I²C (Inter-Integrated Circuit) – шина зв'язку інтегральних схем, відома також як двопровідний інтерфейс.

Передача даних між пристроями та Arduino здійснюється за двома лініями:

- SDA (Serial Data Line) – лінія даних, виведена на контакт A4;
- SCL (Serial Clock Line) – тактова лінія, виведена на контакт A5.

Будучи підключеною до шини I²C, плата Arduino вважається ведучим пристроєм, а решта всіх пристроїв – веденими пристроями. Кожен ведений пристрій має свою адресу – шістнадцяткове число, що дозволяє платі Arduino звертатися і взаємодіяти з кожним пристроєм окремо. Зазвичай пристрій має на вибір діапазон адресів I²C, який вказаний в документації до нього. Передача даних по шині здійснюється побайтно.

Оскільки Arduino запитується напругою 5В, пристрої I²C, що підключаються до неї, також повинні живитися напругою 5В або витримувати її.

Для використання шини I²C скетч спочатку активує бібліотеку Wire (входить до складу Arduino IDE) директивою::

```
#include <Wire.h>
```

Потім у функції `void setup()` активується шина I²C:

```
Wire.begin();
```

Інша шина – SPI, на відміну від I²C, може застосовуватися для одночасної передачі даних в обох напрямках і з різними швидкостями, в залежності від типу мікроконтролера, що використовується. Однак самі взаємодії так само здійснюються за схемою ведучий/відомий. Плата Arduino - провідний пристрій, вона визначає, з яким пристроєм (відомим) вона буде взаємодіяти.

Кожен пристрій, що підтримує підключення до шини SPI, має чотири лінії, за якими здійснюється обмін даними:

- SPI (Serial Peripheral Interface) - шина послідовного периферійного інтерфейсу;
- MOSI (Master-Out, Slave-In - ведучий посилає, ведений приймає),
- MISO (Master-In, Slave-Out - ведучий приймає, ведений посилає),
- SCK (тактова лінія) і
- SS або CS (Slave Select або Chip Select - вибір веденого або вибір пристрою). Ці лінії шини SPI підключаються до плати Arduino, як показано на рисунку 3.

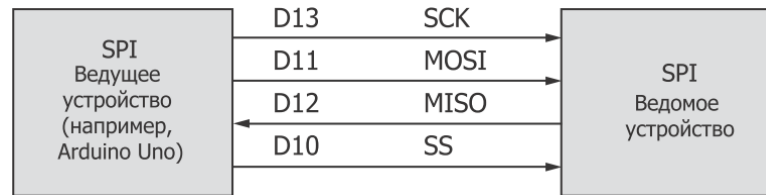


Рис.3. Підключення по шині SPI

2. Схема вимірювальної установки

В даній лабораторній роботі треба зібрати схему для вимірювання температури і вологості повітря. До плати Arduino підключаємо цифровий датчик DHT11, призначений для вимірювання цих величин. Цей датчик формує калібрований цифровий вихідний сигнал і складається з двох основних частин: ємнісний датчик вологості та термістор. Датчик DHT11 має наступні технічні характеристики:

Відносна вологість:

Роздільна здатність: 16Bit

Діапазон: 20% – 80%

Повторюваність: $\pm 1\%$ відносної вологості

Точність: на 25 °C $\pm 5\%$ відносної вологості

Температура:

Роздільна здатність: 16Bit

Повторюваність: $\pm 0,2$ °C

Діапазон: 0 °C - 50 °C

Електричні характеристики:

Живлення: DC 3,5 ~ 5,5 В

Струм живлення: вимір 0.3mA, очікування 60µA

Період вибірки: більше 2 секунд

Контакти:

Vcc - живлення (+) 3,5 – 5,5 В

Data – передача даних

NC – не використовується

GND – земля (-).

Контакт Data підключається до цифрового порту Arduino, наприклад, 2 (Рис. 4). Між Vcc і Data потрібно включити резистор 10 кОм, що підтягує вихідну напругу до необхідного рівня.

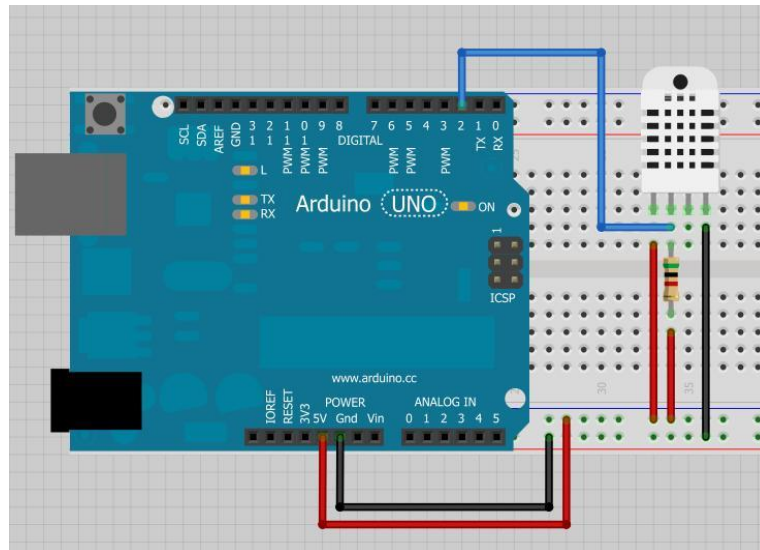


Рис.4. Схема підключення датчика DHT11 до плати Arduino Uno

3. Програма керування платою Arduino Uno (скетч)

```
#include <Wire.h> // бібліотека I2C
#include <dht11.h> // бібліотека датчика DHT11
#define DHT11PIN 2 // контакт 2 буде шиною DATA
dht11 sensor; // ініціалізація екземпляру датчика DHT11

void setup() {
  Serial.begin(9600); // ініціалізація послід. порта
}

void loop() {
  //зчитування показань датчиків:
  sensor.read(DHT11PIN);
  //виведення показань у послід. порт:
  Serial.print("H=");
  Serial.print(String(sensor.humidity)+"\t");
  Serial.print("T=");
  Serial.print(String(sensor.temperature)+"\t");
  Serial.println();
  delay(500);
}
```

4. Завдання і хід виконання роботи

1. Зібрати вимірювальну схему, підключивши до плати Arduino датчик DHT11. До комп'ютера поки що не підключати.
2. Відкрити середовище розробки Arduino IDE та набрати код сценарію. Зберегти код у вигляді файлу з розширенням .ino.
3. Підключіть плату до комп'ютера через USB-кабель.

4. За допомогою меню **Інструменти – Порт** встановити порт **COM...**(Arduino).
5. Завантажити програму (кнопка зі стрілкою або меню **Скетч – Завантаження**).
6. Переглянути дані у вікні монітора послідовного порту (меню **Інструменти – Монітор порту**).
7. Виконати вимірювання вологості та температури.
8. Вивести дані, отримані в п.8, файл за допомогою програми CoolTerm.
9. Обробити дані у MATLAB шляхом усереднення за часом.
10. Підготувати звіт з лабораторної роботи, в якому привести:
 - вимірювальну схему,
 - коди скриптів,
 - скріншоти моніторів послідовного порту,
 - графіки вихідних даних і модельних кривих,
 - висновки.

5. Контрольні питання

1. Яке призначення мікроконтролерної плати Arduino Uno в даній лабораторній роботі?
2. Які порти для введення-виведення даних є на платі Arduino Uno?
3. Що таке шина даних I²C?
4. Чим відрізняються шини даних I²C і SPI?
5. Що уявляє собою середовище розробки Arduino IDE?
6. Яке призначення датчику DHT11 і які його технічні характеристики?
7. Що таке програма керування платою Arduino Uno (сценарій, скетч), з яких обов'язкових блоків вона складається?
8. Як запустити на виконання скетч?
9. Що таке монітор послідовного порту Arduino Uno? Як його ввести на екран?
10. Які команди здійснюють виведення даних на екран Arduino IDE?

Лабораторна робота № 3. Моніторинг сонячної радіації за допомогою фотодіодного датчика та мікроконтролера

Мета роботи. Освоїти методику вимірювання інтенсивності сонячної радіації за допомогою мікроконтролерної плати Arduino Uno з підключеними цифровим фотодіодним датчиком ВН1750.

1. Теоретичні відомості

1.1. Принципи роботи і характеристики фотодіодів

Фотодіод – приймач оптичного випромінювання, робота якого заснована на фотовольтаїчному ефекті в $p-n$ - переході (поділ електронів і дірок в p - і n -області, за рахунок чого утворюється заряд і ЕРС). Крім $p-n$ -фотодіодів, існують також $p-i-n$ фотодіоди, в яких між шарами p і n знаходиться шар нелегованого напівпровідника i . Обидва типів фотодіодів тільки перетворюють світло в електричний струм, але не підсилюють його, на відміну від лавинних фотодіодів і фототранзисторів.

При попаданні квантів випромінювання в базу відбувається генерація вільних носіїв, які спрямовуються до границі $p-n$ -переходу (Рис.1а). Ширина бази (n -область) має бути такою, щоб дірки не встигали рекомбінувати до переходу в p -область. Струм фотодіода визначається струмом неосновних носіїв - дрейфовим струмом. Швидкодія фотодіода визначається швидкістю поділу носіїв полем $p-n$ -переходу і ємністю $p-n$ -переходу.

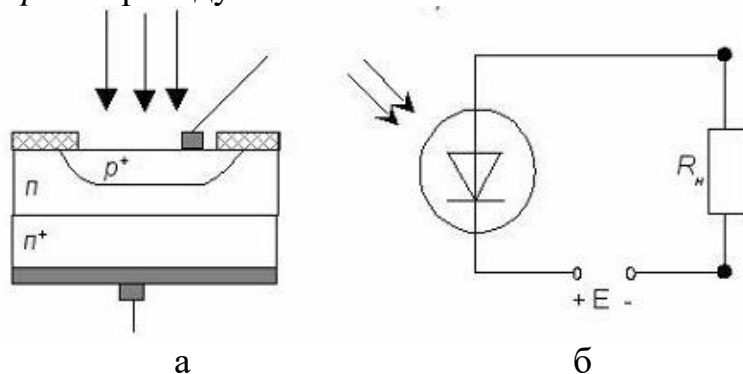


Рис.1. Структура (а) та схема включення фотодіоду для роботи в вентильному режимі (б)

Фотодіод може працювати в двох режимах: *фотовольтаїчному* (без зовнішньої напруги – режим фотоелектричного елемента) і *фотодіодному* (із зовнішньою зворотною напругою, Рис.1б). Останній режим часто називають *фотовентильним*.

Фотодіод описується *вольтамперної* (Рис.2), *енергетичної* (світловий, Рис.3) і *спектральної* характеристиками. Якщо до неосвітленого фотодіоду підключити джерело напруги, значення і полярність якого можна змінювати, то вольтамперна характеристика матиме такий самий вигляд, як у звичайного напівпровідникового

діода. При висвітленні фотодіода істотно змінюється лише зворотна гілка вольтамперної характеристики, прямі ж гілки при порівняно невеликих напругах практично збігаються.

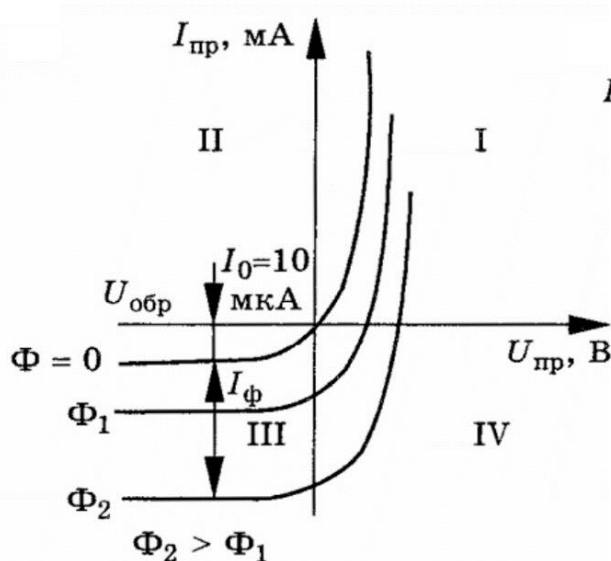


Рис.2. Вольтамперна характеристика фотодіода

Як показано на рисунку 2, сімейство вольтамперних характеристик фотодіода розташоване в квадрантах I, III і IV. Квадрант I – це неробоча область для фотодіода: до $p-n$ переходу прикладається пряма напруга і дифузійна складова струму повністю пригнічує фотострум ($I_{p-n} \gg I_{\phi}$). Залежність фотоструму від прикладеної напруги незначна і використання фотодіоду як датчика освітленості неможливе.

Квадрант III – це *фотодіодна* область роботи фотодіода, коли до $p-n$ переходу прикладається зворотна напруга. Відзначимо, що в робочому діапазоні зворотних напруг фотострум суттєво залежить від світлового потоку і практично не залежить від зворотної напруги та опору навантаження.

Квадрант IV відповідає *фотовольтаїчному* режиму, коли фотоелемент стає джерелом електричної енергії.

Енергетична характеристика фотодіода $I_{\phi}(\Phi)$ (Рис. 3) пов'язує фотострум I_{ϕ} з інтенсивністю світлового потоку Φ (люкс), який падає на фотодіод. При роботі фотодіода в *фотовольтаїчному* режимі енергетична характеристика істотно залежить від опору резистора R_H , включеного в зовнішній ланцюг (Рис.6а). Вона має лінійний характер тільки при короткому замиканні фоторезистору. З ростом R_H характеристики все більш викривляються і при великих R_H мають ділянку насичення. При роботі фотодіода в *фотодіодному* режимі, тобто із зовнішнім джерелом, енергетичні характеристики лінійні (Рис.6б). Це обумовлено тим, що практично всі носії заряду доходять до $p-n$ переходу і беруть участь в утворенні фотоструму.

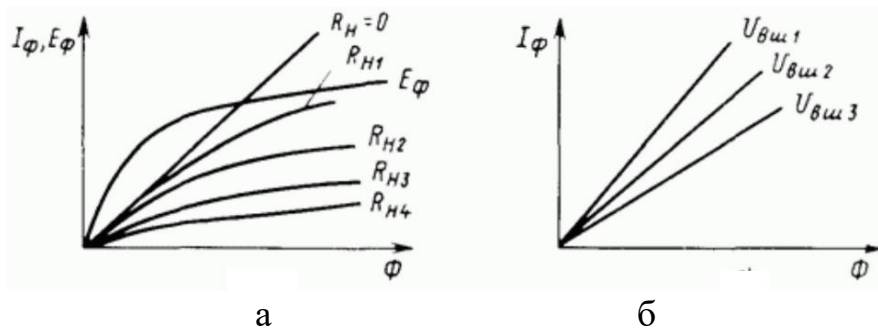


Рис.3. Енергетичні характеристики фотодіода в фотовольтаїчному (а) і фотовентільному (б) режимах

Спектральна чутливість фотодіода $V(\lambda)$ – це залежність фотоструму від довжини хвилі падаючого світла на фотодіод. Вона визначається з боку великих довжин хвиль шириною забороненої зони, а при малих довжинах хвиль – великим показником поглинання і збільшення впливу поверхневої рекомбінації носіїв заряду із зменшенням довжини хвилі. Далі на рисунку 5а наведена відносна спектральна характеристика фотодіоду в складі датчика ВН1750, яка визначається відношенням

$$V(\lambda) = \frac{I_{\phi}(\lambda)}{I_{\phi, \max}}, \quad (6)$$

де $I_{\phi}(\lambda)$ – фотострум для випромінювання з довжиною хвилі λ , $I_{\phi, \max}$ – максимальне значення фотоструму (при $\lambda = 575$ нм).

1.2. Цифровий датчик освітленості ВН1750

Датчик ВН1750 на основі фотодіода призначений для вимірювання освітленості, тобто інтенсивності світлового потоку, що падає на ділянку поверхні малої одиничної площі. Датчик розташовується на платі (модулі) GY302 (Рис.4).



Рис.4. Модуль GY-302 з датчиком ВН1750 (вид з двох сторін)

Фотодіод в складі ВН1750 визначає освітленість, яка перетворюється у вихідну напругу за допомогою інтегрованого операційного підсилювача. Спектр чутливості ВН1750 майже збігається з кривою чутливості людського ока.

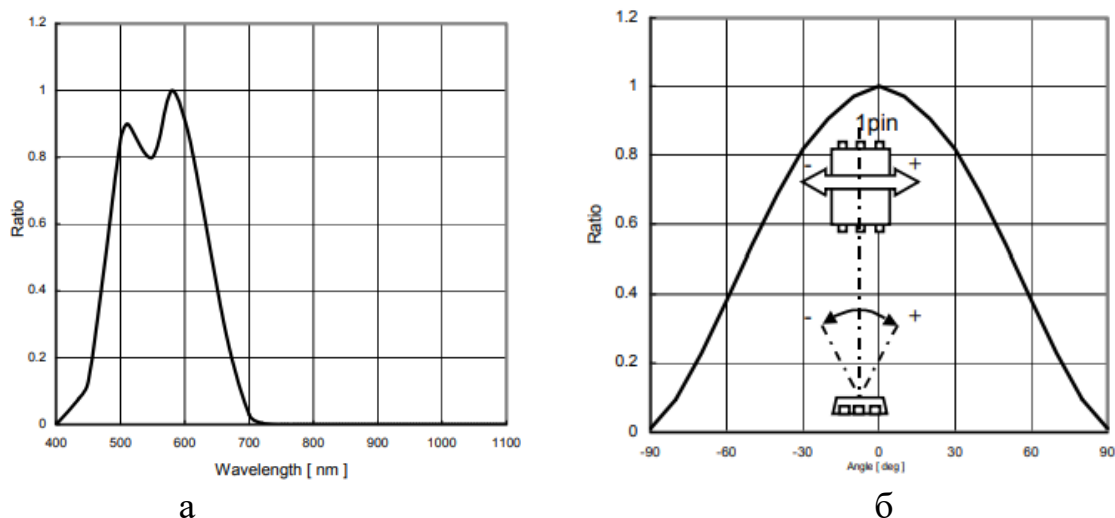


Рис.5. Характеристики датчика BH1750: а - відносна спектральна чутливість; б - спрямованість спектральної чутливості

В модулі GY-302 є вбудований 16-розрядний АЦП (Рис.6). Передача даних здійснюється через інтерфейс шини I²C¹. Внутрішня логіка модуля усуває необхідність будь-яких складних обчислень, оскільки він безпосередньо виводить значущі цифрові дані в люксах (лк). BH1705 має 3 режими вимірювання, що відповідають різним рівням чутливості (0,5 лк, 1 лк і 4 лк). Рекомендується режим H-Resolution, так як він забезпечує найкраще придушення шуму.

Модуль GY-302 живиться від джерела з напругою від 3.3 до 5.0 В. На модулі є п'ять контактів: два для джерела живлення (VCC і GND) і два для інтерфейсу I²C (SCL і SDA). Додатковий контакт (ADDR) може використовуватись для установки адреси I²C датчика.

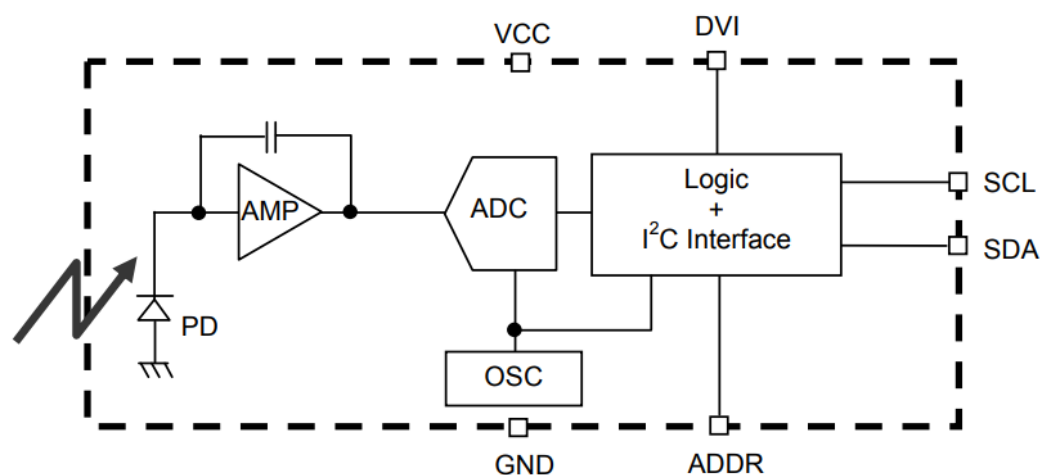


Рис.6. Внутрішня блок-схема модуля BH1750 / GY302

Наведемо список позначень на блок-схемі, показаної на рисунку 6:

¹ I²C (ІІС, англ. Inter-Integrated Circuit) или TWI (Two Wire Interface) — последовательная асимметричная шина для связи между интегральными схемами внутри электронных приборов. Использует две двунаправленные линии связи (SDA и SCL), применяется для соединения низкоскоростных периферийных компонентов с процессорами и микроконтроллерами.

- PD – фотодіод, спектральна чутливість якого приблизно співпадає з чутливістю людського ока;
- AMP – операційний підсилювач для перетворення струму PD в напругу;
- ADC – аналогово-цифровий 16-бітний перетворювач (АЦП);
- Logic+I²C Interface – блок обчислення освітленості і I²C-інтерфейс, що включає шину даних (SDA) і шину синхронізації (SCL);
- OSC – внутрішній генератор (320 кГц), що забезпечує тактування внутрішньої логіки;
- VCC – напруга живлення;
- DVI – опорна напруга для I²C інтерфейсу датчика;
- ADDR – шина адресації.

Час вимірювання в режимі високої роздільної здатності (встановленого за умовчанням) становить 120 мс.

2. Опис вимірювальної установки і керуючої програми

Для вимірювання освітленості в даній лабораторній роботі треба зібрати установку, яка складається з наступних компонентів:

1. Джерело світла – LED-прожектор або лампа розжарювання.
2. Цифровий датчик BH1750 в складі модуля GY302 (Рис.4).
3. Мікроконтролерна плата Arduino Uno.

Електрична схема установки показана на рисунку 7. До плати Arduino Uno підключений цифровий датчик BH1750, який живиться від плати Arduino, і через програмно задані інтервали часу виконує вимірювання в люксах.

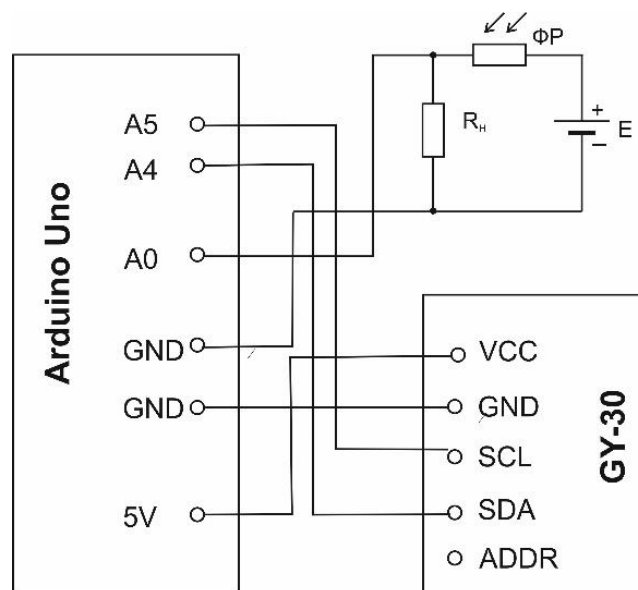


Рис.7. Вимірювальна схема для лабораторної роботи

З'єднання в схемі виконуються згідно наступної таблиці:

BH1750 (GY-30)	Arduino Uno
Vcc	+5V
GND	GND
SCL	A5
SDA	A4
R_H	
E-	GND
E+	A0

Управління автоматизованим процесом вимірювання здійснюється за допомогою наступного скетча:

```
#include <Wire.h> // бібліотека I2C
#include <BH1750.h> // бібліотека датчика BH1750
float U;
BH1750 lightSensor; // об'ява об'єкта

void setup() {
  Serial.begin(9600); //ініціалізація послід. порта
  lightSensor.begin(); // ініціалізація датчика BH1750
  delay(500);
}

void loop() {
  //зчитування показання з BH1750:
  uint16_t lux = lightSensor.readLightLevel();
  // зчитування показання з навантажувального резистора:
  U=((float)analogRead(A0)) * 5. /(1024);
  //виведення показань у послідовний порт:
  Serial.print(String(U) + " volt");
  Serial.print(", ");
  Serial.print(String(lux/100.0) + " hlx\n");
  U=0;
  delay(500);
}
```

3. Завдання і хід виконання роботи

1. Зібрати схему вимірювання (Рис.7), не підключаючи плату Arduino до комп'ютера.
2. Завантажити середовище розробки Arduino IDE і набрати код сценарію. Збережить код у вигляді файлу з розширенням .ino.

3. Після перевірки схеми викладачем, підключити плату Arduino до комп'ютера через кабель USB.
4. За допомогою меню **Інструменти – Порт** встановити порт COM ... (Arduino).
5. Завантажити програму (кнопка зі стрілкою, або меню **Скетч – Завантаження**).
6. Переглянути дані у вікні монітора послідовного порту (меню **Інструменти - Монітор порту**).
7. Виконати вимірювання освітленості на різних відстанях r від датчику до джерела (крок 10 см). Положення плати модуля GY-30 має бути перпендикулярним напрямку на джерело.
8. Виводити дані, які будуть отримуватись в п.7, в файли через послідовний порт за допомогою програми CoolTerm.
9. Опрацювати дані в MATLAB / Octave, а саме:
 - усереднити дані, отримані для кожної відстані r між датчиком і джерелом;
 - виконати апроксимацію даних від BH1750, отриманих для $r \geq 40$ см, за допомогою модельної функції
$$L = \frac{L_0}{(r - r_0)^n} \quad (2)$$

де L_0 , r_0 , n – підганальні параметри. Розрахунок підганальних параметрів зробити за допомогою модуля **cftool** у MATLAB.

 - побудувати графіки отриманих залежностей освітленості від r для двох джерел світла (лампи розжарювання і LED).
10. Оформити звіт з лабораторної роботи, в якому привести:
 - вимірювальну схему,
 - коди скриптів,
 - скріншоти моніторів послідовного порту,
 - графіки вихідних даних і модельних кривих,
 - висновки.

4. Контрольні питання

1. На якому ефекті заснована робота напівпровідникового фотодіода?
2. В яких режимах може працювати фотодіод?
3. Який вигляд має ВАХ неосвітленого фотодіоду?
4. На якій ділянці ВАХ фотодіод працює у фотодіодному режимі?
5. Яка ділянка ВАХ фотодіода відповідає фотовольтаїчному режиму?
6. Що таке енергетична характеристика фотодіода?
7. Яку залежність характеризує спектральна чутливість фотодіода?

8. Який вигляд має крива спектральної чутливості фотодіодного датчика ВН1750?
9. Опишіть блок-схему фотодіодного модуля ВН1750 / GY302.
10. Опишіть експериментальну схему вимірювань в даній роботі.
11. За яким законом убуває освітленість поверхні від точкового джерела світла на великих відстанях до джерела?

Лабораторна робота № 4. Вимірювання освітленості від різних джерел фоторезисторним датчиком

Мета роботи. Освоїти методику фотометричних вимірювань освітленості за допомогою датчика з фоторезистором. На основі отриманих даних вимірювань визначити фотометричні та електричні характеристики фоторезисторів.

1. Теоретичні відомості

1.1. Конструкція і принцип роботи фоторезистора

Фоторезистор (ФР) – напівпровідниковий прилад, в якому використовується явище фотопровідності напівпровідників. *Фотопровідність* - прирощення електричної провідності напівпровідника під дією світла. Причина фотопровідності - збільшення концентрації носіїв заряду - електронів в зоні провідності і дірок у валентній зоні.

Світлочутливий напівпровідниковий матеріал в ФР міститься між двома струмопровідними електродами, причому напівпровідник для збільшення свого опору укладається "змійкою" (рис.4). Керамічна основа, на якій розташовується напівпровідник, покрита шаром прозорого полімеру для захисту від вологи та бруду. Можливі й інші конструктивні виконання фоторезисторів, наприклад, в металевому корпусі з віконцем, через яке світло потрапляє на поверхню напівпровідника.

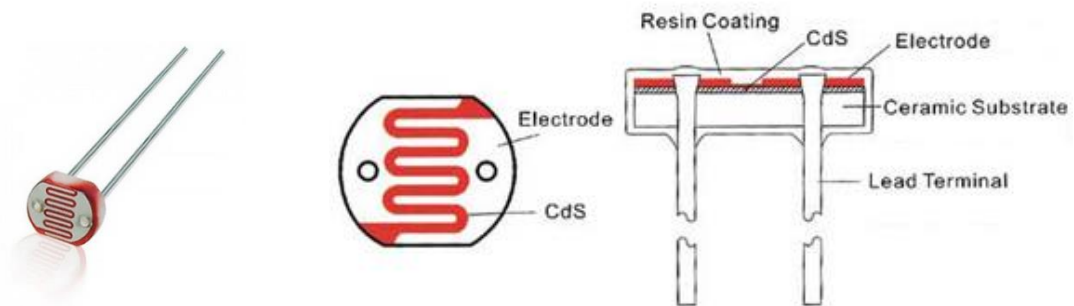


Рис.1. Зовнішній вигляд та конструкція фоторезистора на основі CdS

Коли напівпровідник не освітлений, його опір великий, аж до одиниць і десятків мегом. При висвітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на переходи електронів в зону провідності. При цьому кількість вільних електронно-діркових пар зростає і опір ФР падає приблизно за законом

$$R = R_0 L^{-b} \quad (1)$$

де L - освітленість (лк), R_0 - темновий опір (опір ФР при відсутності світла), постійна b визначається властивостями матеріалу напівпровідника. У логарифмічному масштабі залежність описується лінією (рис.2):

$$\lg R = \lg R_0 - b \lg L \quad (2)$$

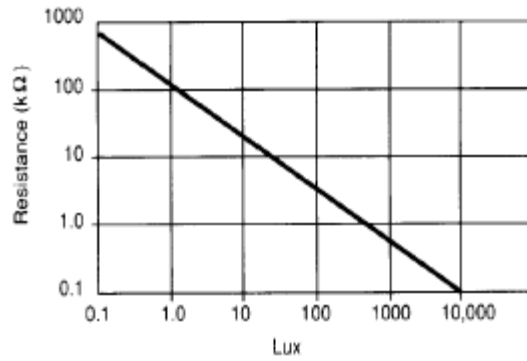


Рис.2. Типова залежність в подвійному логарифмічному масштабі опору ФР від освітленості

Щоб виміряти фотострум, фоторезистор включається послідовно з джерелом напруги і опором навантаження (Рис.6). Струм в цьому ланцюзі дорівнює

$$I(L) = \frac{E}{R(L) + R_H} \approx I_H = \frac{U_H}{R_H} \quad (3)$$

де E – ЕРС джерела живлення, R_H - опір навантаження. Формула (3) записана для випадку, коли навантаження застосовується тільки для вимірювання напруги на ньому. Тоді можна вважати, що внутрішній опір мультиметра значно перевищує опір навантаження: $R_{\text{внутр}} \gg R_H$. Відповідно струм через R_H буде з великою точністю дорівнювати струму через фоторезистор.

Якщо ФР не освітлений, в його ланцюзі протікає *темновий струм* I_0 , який визначається *темновим опором* R_0 як $I_0 = (E - U_H) / R_0$.

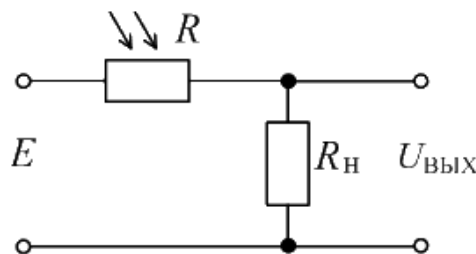


Рис.3. Схема вимірювання освітленості за допомогою фоторезистора

1.2. Характеристики фоторезистора

Різниця між світловим і темновим струмом називається *фотострумом провідності*

$$I_{\Phi}(L) = I(L) - I_0 \approx \frac{U_H}{R_H} - \frac{E - U_H}{R_0} \quad (4)$$

Залежність фотоструму від освітленості світлочутливої поверхні при постійній напрузі називається *світловою (люкс-амперною) характеристикою* ФР. Напівпровідникові ФР мають нелінійну люкс-амперну характеристику. Найбільша чутливість спостерігається при малої освітленості. При збільшенні освітленості фотострум зростає приблизно пропорційно \sqrt{L} . Нахил люкс-амперної характеристики залежить від прикладеної до ФР напруги.

Важливим параметром ФР є питома чутливість K_0 – відношення фотоструму до добутку величини падаючого на фоторезистор світлового потоку Φ_v на прикладену до нього напругу U :

$$K_0 = \frac{I_\Phi}{\Phi_v U} = \frac{Y_\Phi}{\Phi_v}, \text{ мкА / (лм}\cdot\text{В)}, \quad (5)$$

де $\Phi_v = L \cdot A$ – падаючий на ФР світловий потік (лм), A – площа приймальної поверхні ФР, $Y_\Phi = I_\Phi / U$ – «ефективна» провідність за фотострумом. Значення K_0 може досягати кількох тисяч мкА/(лм·В). Для оцінки чутливості ФР зазвичай вимірюють фотострум при $L = 200$ лк.

Окрім K_0 вводять ще одну характеристику фоторезисторів – *інтегральну чутливість*, яка є добутком питомої чутливості на граничну робочу напругу: $K = K_0 U_{\max}$.

2. Опис вимірювальної установки і керуючої програми

Для вимірювання освітленості в даній лабораторній роботі треба зібрати установку, яка складається з наступних компонентів:

1. Джерело світла – LED-прожектор або лампа розжарювання.
2. Фоторезистор серії PGM55 (Рис. 1).
3. Резистор навантаження R_H , включений послідовно з фоторезистором (Рис.3). В даному експерименті $R_H = 160$ Ом, темновий опір фоторезистора складає $R_0 = 0.5$ МОм.
4. Цифровий датчик ВН1750 в складі модуля GY302.
5. Мікроконтролерна плата Arduino Uno.

Електрична схема установки показана на рисунку 4. До плати Arduino Uno підключені:

- ланцюг для вимірювання освітленості за допомогою фоторезистора, який живиться від зовнішнього джерела 9В, а на плату через аналоговий порт А0 поступають значення напруги на резисторі R_H (потім їх треба перерахувати в струм через фоторезистор і після калібрування фоторезистора отримати значення освітленості);
- цифровий датчик ВН1750, який живиться від плати Arduino, і через програмно задані інтервали часу виконує вимірювання в люксах і не вимагає калібрування.

Показання датчика ВН1750 слугують для калібрування фоторезистора, тобто визначення числової залежності опору фоторезистора від освітленості.

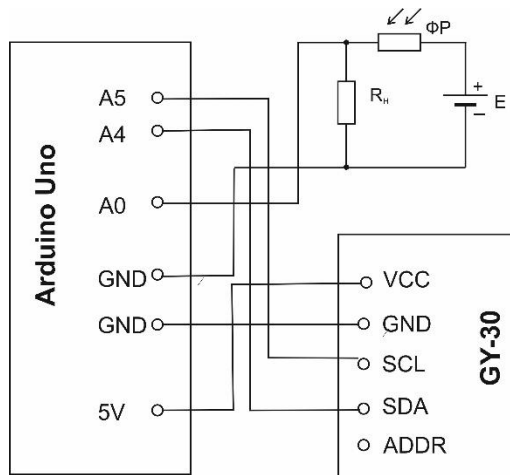


Рис.4. Вимірювальна схема для лабораторної роботи

З'єднання в схемі виконуються згідно наступної таблиці:

BH1750 (GY-30)	Arduino Uno
Vcc	+5V
GND	GND
SCL	A5
SDA	A4
R_н	
E-	GND
E+	A0

Управління автоматизованим процесом вимірювання здійснюється за допомогою наступного скетча:

```
#include <Wire.h> // бібліотека I2C
#include <BH1750.h> // бібліотека датчика BH1750
float U;
BH1750 lightSensor; // об'ява об'єкта

void setup() {
  Serial.begin(9600); //ініціалізація послід. порта
  lightSensor.begin(); // ініціалізація датчика BH1750
  delay(500);
}

void loop() {
  //зчитування показання з BH1750:
  uint16_t lux = lightSensor.readLightLevel();
  // зчитування показання з навантажувального резистора:
  U=((float)analogRead(A0)) * 5. /(1024);
  //виведення показань у послідовний порт:
```

```

Serial.print(String(U) + " volt");
Serial.print(", ");
Serial.print(String(lux/100.0) + " hlx\n");
U=0;
delay(500);
}

```

3. Завдання і хід виконання роботи

1. Зібрати схему вимірювання (Рис.11), не підключаючи плату Arduino до комп'ютера, а фоторезистор до батарейки.
2. Завантажити середовище розробки Arduino IDE і набрати код сценарію. Збережіть код у вигляді файлу з розширенням .ino.
3. Після перевірки схеми викладачем, підключити плату Arduino до комп'ютера через кабель USB, а фоторезистор до батарейки.
4. За допомогою меню **Інструменти – Порт** встановити порт COM ... (Arduino).
5. Завантажити програму (кнопка зі стрілкою, або меню **Скетч – Завантаження**).
6. Переглянути дані у вікні монітора послідовного порту (меню **Інструменти - Монітор порту**).
7. Виконати вимірювання освітленості на різних відстанях r від датчику до джерела (крок 10 см). Положення плати модуля GY-30 має бути перпендикулярним напрямку на джерело.
8. Виводити дані, які будуть отримуватись в п.7, в файли через послідовний порт за допомогою програми CoolTerm.
9. Опрацювати дані в MATLAB / Octave, а саме:

- усереднити дані, отримані для кожної відстані r між датчиком і джерелом;

- виконати апроксимацію даних від ВН1750, отриманих для $r \geq 40$ см, за допомогою модельної функції

$$L = \frac{L_0}{(r - r_0)^n} \quad (2)$$

де L_0 , r_0 , n – підганальні параметри.

- побудувати графіки отриманих залежностей освітленості від r для двох джерел світла (лампи розжарювання і LED).

- побудувати графіки залежностей $I_\Phi(L)$, $R(L)$ і $K_0(L)$ для фоторезистора (див. формули розд.1.1).

10. Оформити звіт з лабораторної роботи, в якому привести:

- вимірювальну схему,
- коди скриптів,
- скріншоти моніторів послідовного порту,

- графіки вихідних даних і модельних кривих,
- висновки.

4. Методичні вказівки

1. Розрахунок підганальних параметрів зробити за допомогою модуля **cftool** у MATLAB.
2. Світловий потік на фоторезистор, орієнтований нормально до напрямку променів, оцінювати як $\Phi_v = LA$, взявши радіус круглої приймальної поверхні фоторезистору рівним 4.4 мм (з паспортних даних).

5. Контрольні питання

1. Опишіть експериментальну схему вимірювань в даній роботі.
2. За яким законом убуває освітленість поверхні від точкового джерела світла на великих відстанях до джерела?
3. Що таке напівпровідниковий фоторезистор (ФР)?
4. На якому ефекті заснована робота фоторезистора?
5. Чим ФР відрізняється від звичайного омичного опору?
6. Що таке темновий опір і темновий струм ФР?
7. Що описує люкс-амперна характеристика ФР?
8. Що таке питома чутливість ФР?

Лабораторна робота № 5. Вимірювання ВАХ фотоелектричних модулів методом резистивного навантаження

Мета роботи: Освоїти методику вимірювання вольтамперної характеристики (ВАХ) фотоелектричних модулів (ФМ) за допомогою схеми зі змінним резистивним навантаженням. Знайти шляхом обробки експериментальних даних точку максимальної потужності, послідовний та паралельний опори втраг.

1. Теоретичні відомості.

1.1. Загальна задача

Вольт-амперні характеристики ФМ можуть бути отримані різними експериментальними методами [3, 4], серед яких найбільш популярні наступні методи:

- змінного резистивного навантаження,
- заряджання конденсаторів,
- регульованого джерела постійної напруги,
- джерела світла змінної інтенсивності.

В даній роботі використовується метод змінного резистивного навантаження, при якому навантаження змінюється між режимами короткого замикання і холостого ходу. При цьому вимірюється напруга на клеммах ФМ і струм у навантаженні. Метод працює в польових умовах, тобто при денному сонячному випромінюванні та фактичній температурі повітря.

Загальна схема для вимірювання ВАХ резистивним методом виглядає, як показано на рисунку 1. В якості навантаження виступає змінний опір (набір послідовно включених реостатів).

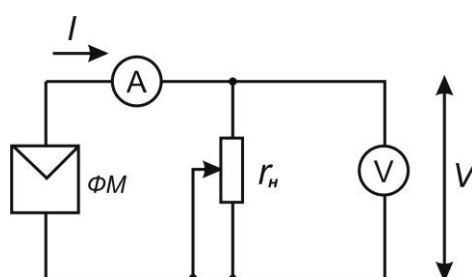


Рис.1. Схема вимірювання ВАХ фотоелектричного модуля методом змінного резистивного навантаження

Вольтметр вимірює напругу на навантаженні, а амперметр – струм через навантаження: при заданому опорі навантаження отримується одна точка на ВАХ фотомодуля. Для вимірювання струму застосовується так званий «струмовий шунт» (резистор), який підключається послідовно з опором навантаження і значно менший цього опору в основному діапазоні напруги на навантаженні. Звичайно опір шунта складає десятки або соті частки ома.

В лабораторній роботі для вимірювання ВАХ монокристалічного і полікристалічного Si-фотомодулів використовується схема, що показана на рисунку 2.

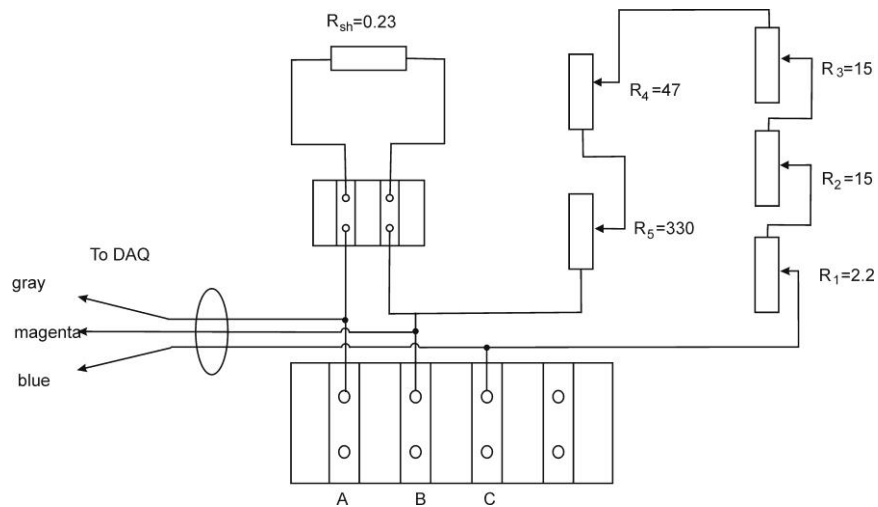


Рис.2. Схема магазину змінних опорів

1.2. Схема заміщення та електричні параметри фотомодулів

При розробці і експлуатації фотоелектричних систем потрібне точне знання параметрів фотомодулів та фотоелектричних комірок (ФЕК), які їх складають [1, 2]. Ці характеристики зазвичай відтворюються за допомогою електричних схем заміщення з модельними параметрами, що описують процеси генерації і розсіювання електричної потужності. Найчастіше використовується однодіодна схема заміщення комірок (Рис.3) з наступними параметрами: фотострум i_{ph} , що генерується коміркою; зворотний струм насичення i_0 , послідовний r_s і паралельний r_p опори електричних втрат і коефіцієнт неідеальності A діода.

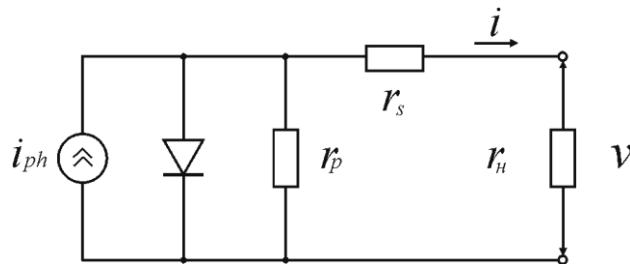


Рис.3. Однодіодна схема заміщення фотоелектричної комірки

ВАХ фотоелектричної комірки згідно з однодіодною схемою описується нелінійним рівнянням

$$F(i, v) = i \left(1 + \frac{r_s}{r_p} \right) - i_{ph} + \frac{v}{r_p} + i_0 \left[\exp \left(\frac{\beta(v + ir_s)}{A} \right) - 1 \right] = 0 \quad (1)$$

де $\beta = \frac{q}{kT}$, q – заряд електрона, k – постійна Больцмана, T – температура матеріалу комірки. Основним методом оцінки експлуатаційних характеристик фотоелектричних перетворювачів є вимірювання ВАХ з подальшим визначенням саме цих параметрів.

Фотоелектричний модуль складається з ФЕК, включених послідовно в серії, а серії з'єднуються між собою паралельно. Нехай n_s і n_p – кількість ФЕК в серії і кількість серій в ФМ. Результуюча ВАХ фотомодуля описується рівнянням

$$F(I, V) = I \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - I_{ph} + \frac{V}{R_p} + I_0 \left[\exp \left(\frac{\beta(V + IR_s)}{An_s} \right) - 1 \right] = 0 \quad (2)$$

де $V = vn_s$ і $I = in_p$ – напруга і струм в навантаженні; $I_{ph} = i_{ph}n_p$ – фотострум, $I_0 = i_0n_p$ – зворотний струм насичення діода. У формулі (2) введені еквівалентні послідовний $R_s = r_s n_s / n_p$ і паралельний $R_p = r_p n_s / n_p$ опори втрат.

Електрична потужність P , яка виділяється в активному навантаженні, та точка максимальної потужності (V_m, I_m) визначаються наступними рівняннями:

$$P = VI, \quad \frac{dP}{dV} = I_m + V_m \frac{dI}{dV} \Big|_{V=V_m} = 0 \quad (3)$$

Величини опорів R_s, R_p можна оцінити з ВАХ, обчисливши нахили кривої $I(V)$ в околиці точок короткого замикання і холостого ходу:

$$\frac{dI}{dV} \Big|_{V \rightarrow 0} \approx -\frac{1}{R_p}, \quad \frac{dI}{dV} \Big|_{V \rightarrow V_{xx}} \approx -\frac{1}{R_s} \quad (4)$$

Коефіцієнт неідеальності A pn -переходів комірок описує співвідношення дифузійної і рекомбінаційної складових струму. Його значення лежать в інтервалі від 1 до 2: чим менше внесок небажаного процесу рекомбінації в струм через pn -переходи, тим менше коефіцієнт A відносно 2. Обчислення із експериментальних даних коефіцієнту A , а також зворотного струму насичення I_0 є більш складною математичною задачею, ніж отримання оцінок (4), для вирішення якої запропоновано багато підходів [3, 4].

2. Завдання та хід виконання практичної роботи

1. Зібрати схему згідно з рисунків 1, 2 для вимірювання ВАХ монокристалічного (полікристалічного) Si- фотомодуля.

2. При відключеному навантаженні виміряти вольтметром напругу холостого ходу, а також виміряти люксметром рівень сонячної радіації. Записати ці дані.

3. Підключити реостати навантаження. Ввести на реостатах повний опір. Виміряти падіння напруги, струм у навантаженні і рівень радіації. Записати ці дані.

4. Плавно зменшуючи опір реостатів і тим самим зменшуючи напругу на навантаженні, знімати через 0.01 - 0.02 В значення струму в навантаженні. Коли

при кроці струм перестане суттєво змінюватися, збільшити крок по напрузі до 0.5 В. Записувати напругу, струм в навантаженні і рівень радіації.

5. Продовжувати вимірювання, поки опір реостатів не буде зменшений до нуля. При цьому в ролі навантаження виступає тільки струмовий шунт (відтворюється режим, близький до короткого замикання). Записати значення струму в цьому режимі.

6. Створити текстові файли, що містять дані вимірювань у вигляді трьох стовпців "Вольт-Ампер-гекталюкс", розділених пробілами.

7. Скласти в MATLAB програму для обробки експериментальних даних, яка включає

- кусково-поліноміальну апроксимацію експериментальних відліків,
- побудову в одному графічному вікні кривої-апроксиманти ВАХ з експериментальними точками та графіка потужності $P(V)$ (загалом два вікна - для моно- і для полі-кристалічного модулів).

8. Знайти напругу холостого ходу і струм короткого замикання. Визначити точку максимуму потужності (V_m, P_m), як максимуму на кривої-апроксиманті потужності при базовій освітленості (яка обрана для нормування, див. Методичні вказівки).

9. Порівняти отримані параметри моно- і полікристалічного кремнієвих фотомодулів. Зробити висновки про якість фотомодулів і відповідність заводським характеристикам.

10. Оформити звіт з лабораторної роботи, в якому привести

- формулювання завдання,
- таблицю експериментальних даних,
- графіки ВАХ і $P(V)$,
- числові значення величин згідно п.8.

11. Зробити загальні висновки з лабораторної роботи.

3. Методичні вказівки

1. Врахувати мінливий в ході експериментів рівень сонячної радіації (освітленості) рекомендується в такий спосіб. Вимірювані значення струму в навантаженні привести до однієї освітленості, користуючись формулою

$$I = I_{\text{експ}} \frac{L_{\text{max}}}{L_{\text{експ}}}$$

де $I_{\text{експ}}$ і $L_{\text{експ}}$ - поточні експериментальні значення струму і освітленості (в гекталюксах), L_{max} - максимальне значення освітленості, отримане в даній серії вимірювань. Цей спосіб врахування зміни рівня сонячної радіації називається *перенормуванням* струму.

2. При виконанні лабораторної роботи в дистанційному режимі використовувати файли експериментальних даних **poly_745.xls** і **mono_730.xls**,

які містять експериментальні дані з ВАХ для полікристалічного і монокристалічного модулів при іррадіації 745 Вт/м^2 і 730 Вт/м^2 відповідно. В цих електронних таблицях значення V вказані в першому стовпчику, I – в другому стовпчику. Треба обчислити ці дані для обох модулів згідно з пунктами 7, 8 завдання.

4. Контрольні питання

1. Які елементи входять до однодіодної схеми заміщення ФМ?
2. Які параметри характеризують фотоелектричний модуль?
3. Що моделює діод на схемі заміщення ФМ?
4. Як оцінюються з ВАХ опори втрат R_s , R_p фотоелектричного модуля?
5. Що характеризує коефіцієнт неідеальності ФМ?
6. Для чого потрібна апроксимація експериментальної ВАХ у даної роботі?
7. Як пов'язані опори втрат R_s , R_p ФМ з коефіцієнтами кусково-поліноміальної апроксимації ВАХ?
8. З яких компонентів складається електрична схема установки для вимірювання ВАХ ФМ у даної роботі?
9. Як змінюється вигляд ВАХ при зростанні послідовного опору втрат R_s ?
10. Як змінюється вигляд ВАХ при зменшенні паралельного опору втрат R_p ?
11. Як залежить ВАХ від фотоструму I_{ph} ?
12. Для чого потрібно вносити поправку на рівень сонячної радіації при визначенні струму в навантаженні (перенормуванні)?

Лабораторна робота № 6. Автоматизоване вимірювання ВАХ фотоелектричних модулів за допомогою мікроконтролера

Мета роботи: Освоїти методику автоматизованого вимірювання вольтамперної характеристики (ВАХ) фотоелектричних модулів (ФМ) за допомогою плати Arduino Uno методом змінного резистивного навантаження. Знайти шляхом обробки експериментальних основні електричні характеристики ФМ.

1. Теоретичні відомості

1.1. DAQ-установка вимірювання ВАХ

Сучасні методи експериментальних вимірювань, як правило, використовують автоматизовані системи збору даних (DAQ - Data Acquisition). Під останніми розуміють комплекс засобів, призначений для роботи сумісно з персональним комп'ютером (або спеціальним сервером), який виконує автоматизований збір даних (електричних величин) в заданих точках об'єкта дослідження. Ці дані можуть поступати з аналогових і/або цифрових джерел сигналу (датчиків).

Така система представлена в лабораторній роботі мікроконтролерною платою Arduino Mega. Задача даної роботи, як і в попередньої – виконати вимірювання ВАХ моно- і полікристалічних фотомодулей методом змінного резистивного навантаження. Але експериментальна реалізація має бути здійснена вже автоматизованою DAQ-системою. Набір резисторів, які слугують навантаженням освітленого ФМ, комутуються у певної послідовності електромагнітними реле. Керування релейною схемою здійснює плата Arduino. Ця плата також відповідає за обробку даних і виведенням їх в послідовний порт, який підключений до персонального комп'ютера.

Використання мікроконтролеру в вимірювальній установці дозволяє значно покращити умови експерименту: здійснити вимірювання сукупності точок ВАХ за короткий проміжок часу в автоматичному режимі, коли сонячна радіація та температура повітря незначно змінюються. Лабораторним прикладом DAQ-установки є пристрій (Рис. 1), застосованої у даної роботі (його детальний опис дано в [5]).

В цьому пристрої опори, які розраховані на навантаження для ФМ максимальної потужності 250 Вт, складають магазин послідовно з'єднаних резисторів (Рис.2) і реалізують ступінчасту зміну навантаження від опору струмового шунта $R_{ш}$ до 640 Ом (резистори $R_1 - R_{16}$). Комутації резисторів здійснюються за допомогою системи з 16-ти реле марки Songle SRD-05VDC-SL-C, що керуються платою Arduino Mega 2560 на базі мікроконтролера Atmel 328. Дані поступають на плату через 4-х канальний 16-розрядний АЦП ADS1115, який дає можливість суттєво підвищити точність вимірювань порівняно з використанням АЦП, вбудованого в плату Arduino.

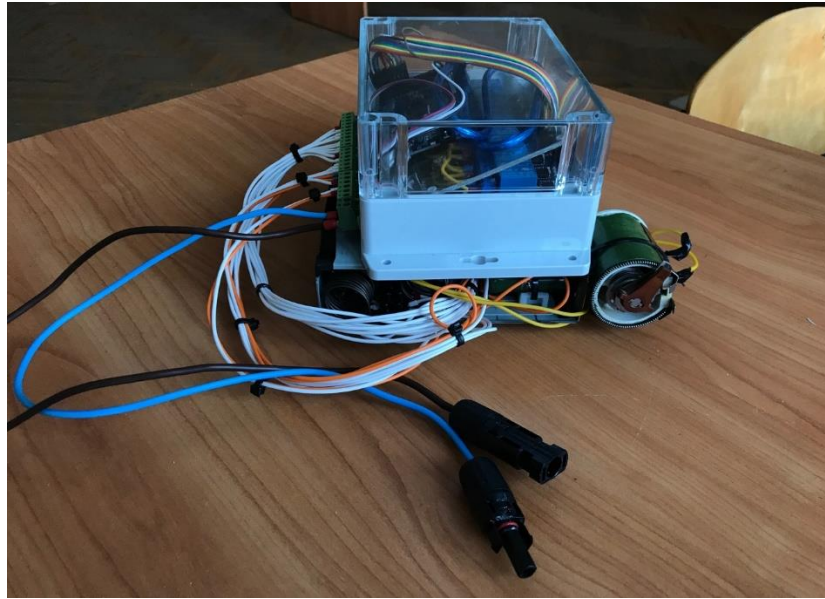


Рис.1. Загальний вигляд пристрою для вимірювання ВАХ фотомодулів

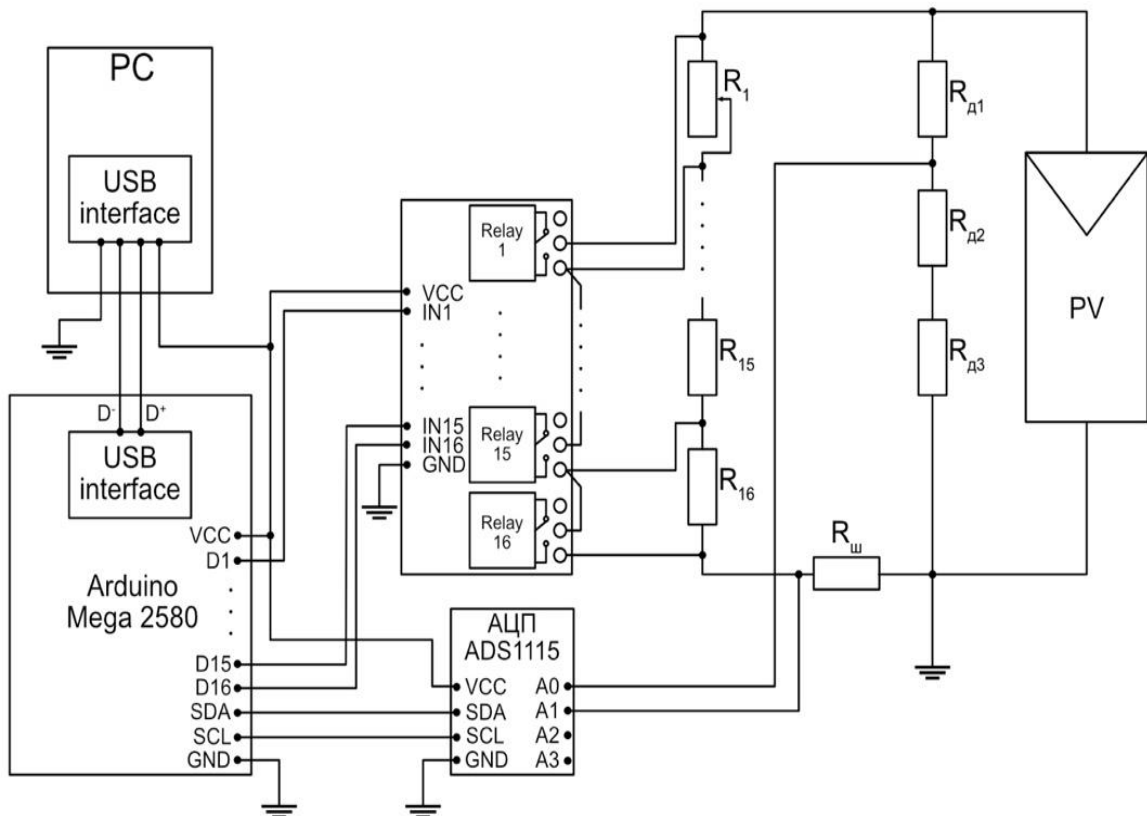


Рис.2. Електрична схема вимірювального пристрою

Оскільки вхідна напруга АЦП не повинна перевищувати 5 вольт, в контур вимірювання напруги V навантаження додано ділянку напруги $R_{д1} - R_{д3}$ у співвідношенні 1,22 до 9 кОм. Струм I у навантаженні вимірюється через падіння напруги на низькоомному струмовому шунті ($R_{ш}=0,23$ Ом). Низький опір шунта дозволяє максимально наблизитись до точки короткого замикання.

1.3. Алгоритм роботи

Збір та обробка експериментальних даних здійснюється за алгоритмом, основні етапи якого відображені на рисунку 5. Операції від початку до передачі даних на ПК виконуються сценарієм, який записаний у постійну пам'ять мікроконтролера (див. наступний розділ). Передані через USB-інтерфейс дані піддаються попередньої обробці у середовищі MATLAB за допомогою спеціалізованої програми [5], в ході якої виконується сортування пар значень (V , I) й апроксимація ВАХ на певних відрізках поліномами від 1-го до 4-го ступеня. Від вибору точок зшивання відрізків апроксимант критичним чином залежить якість апроксимації. Тому координати точок зшивання також знаходяться в ході процедури апроксимації, яка будується на алгоритмі нелінійної оптимізації. В результаті отримується гладка неперервно-диференційована функція $I(V)$ – саме вона використовується на наступному етапі – визначення параметрів ФМ.

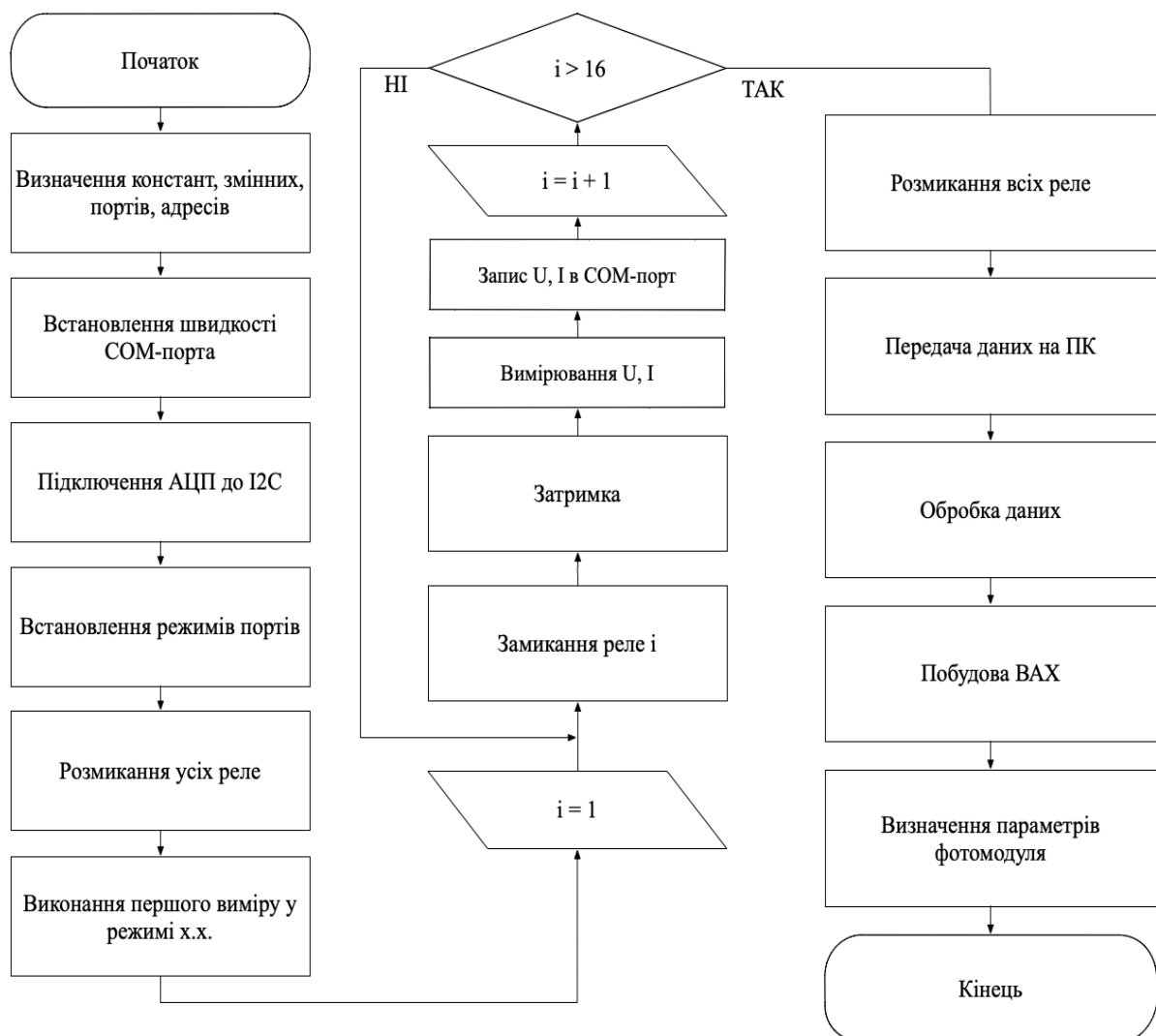


Рис.5. Блок схема алгоритму роботи програми

1.4. Код керуючого скетча

```
//-----  
//                               Arduino Program for I-V curve tracer  
//-----  
  
#include <Wire.h>                // підключення бібліотеки для I2C  
#include <Adafruit_ADS1015.h>    // підключення бібліотеки для АЦП  
  
//-----ініціалізація змінних-----  
  
double U[17],I[17];              // напруга та струм  
int R[17];                       // номер реле  
int StartPin = 22;               // перший цифровий порт, який керує реле  
  
double x1BIT = 0.1875;           // конвертація бітів  
double x1BIT2 = 0.1875;         // конвертація бітів  
double cor=1.26/10.36;          // визначення опору дільника напруги  
double shunt = 0.12;            // опір шунта  
double kU = 1.027;              // корегуючий коефіцієнт  
double kI = 1;                  // корегуючий коефіцієнт  
  
uint16_t ADCresA0;  
uint16_t ADCresA1;  
Adafruit_ADS1115 ads(0x48);      // встановлення I2C адреси каналу АЦП-1  
Adafruit_ADS1115 ads2(0x49);    // встановлення I2C адреси каналу АЦП-2  
  
//-----Інформація про налаштування АЦП-----  
// https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/modul-16-bitnogo-atasp-ads1115/  
  
void setup()  
{  
  Serial.begin(9600);           // встановлення швидкості послідовного порту  
  ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); // налаштування підсилення для АЦП-1  
  ads.begin();  
  ads2.setGain(GAIN_ONE);       // налаштування підсилення для АЦП-2  
  ads2.begin();  
  
  for(int i=0; i<16; i++)  
  {  
    R[i] = StartPin + i;        // визначення виходів Arduino, що керують реле  
    pinMode(R[i], OUTPUT);      // налаштування роботи виходу Arduino  
    digitalWrite(R[i], HIGH);   // примусове розмикання всіх реле (х.х. ФМ)  
  }  
  delay(1000);                 // затримка перед роботою основної частини програми  
  AutoMode();                  // запуск процесу вимірювання  
  Print();                      // вивід отриманих результатів  
}  
  
void loop() {  
}  
  
void AutoMode()  
{  
  Measure(0);  
  for(int i=0; i<=15; i++)  
  {  
    digitalWrite(R[i],LOW);     // замикання реле
```

```

    Measure(i+1);          // вимірювання значень
    delay(100);
}
for(int i=0; i<=15; i++)
{
    digitalWrite(R[i],HIGH); // розмикання всіх реле, х.х. для ФМ
}
}

void Measure(int i)
{
    ADCresA0 = ads.readADC_SingleEnded(0);      // зчитування АЦП-1 в бітах
    ADCresA1 = ads2.readADC_SingleEnded(3);     // зчитування АЦП-2 в бітах
    U[i] = (((ADCresA0 * x1BIT)/1000)/cor)*kU;  // перерахунок в Вольти
    I[i] = (((ADCresA1 * x1BIT2)/1000)/shunt)*kI; // перерахунок в Амперах
}

void Print()
{
    for(int i =0; i<=16; i++)
    {
        Serial.print(String(U[i],3));
        Serial.print("\t");
        Serial.print(String(I[i],3));
        Serial.println("");
    }
}

```

2. Хід виконання роботи

1. Зібрати схему для вимірювання ВАХ фотомодуля (рис. 4). До комп'ютера поки не підключати.
2. Завантажити середовище розробки Arduino IDE.
3. Після перевірки схеми викладачем, підключити вимірювальний пристрій до комп'ютера через кабель USB і до фотомодуля, який вкаже викладач.
4. За допомогою меню **Інструменти - Порт** встановити порт COM ... (Arduino).
5. Завантажити сценарій (кнопка зі стрілкою, або меню **Скетч - Завантаження**) – розд. 3.3.
6. Переглянути дані у вікні монітора послідовного порту (меню **Інструменти - Монітор порту**).
7. Результати автоматичного вимірювання записати у текстовий файл шляхом копіювання даних з монітору послідовного порту.
8. Дані має бути відсортовані у порядку зростання напруги. Треба видалити із файлу рядки з однаковою напругою, якщо такі є.
9. На основі відсортованих даних (файлу) скласти в MATLAB програму, яка включає
 - кусково-поліноміальну апроксимацію експериментальних відліків,

- побудову в одному графічному вікні кривої-апроксиманти ВАХ з експериментальними точками та графіка потужності $P(V)$ (загалом два вікна - для моно- і для полі-кристалічного модулів).
10. Знайти напругу холостого ходу і струм короткого замикання. Знайти точку максимальної потужності (V_m, P_m) при базовій освітленості (яка обрана для нормування, див. Методичні вказівки).
 11. Оформити звіт з лабораторної роботи, в якому привести
 - формулювання завдання,
 - скріншоти моніторів послідовного порту,
 - коди програм (у випадках відмінності їх від наведених у методичці),
 - графіки ВАХ і $P(V)$,
 - числові значення згідно п. 10.
 12. Зробити загальні висновки з лабораторної роботи.

3. Методичні вказівки

1. Врахувати мінливий в ході експериментів рівень сонячної радіації (освітленості) рекомендується в такий спосіб. Вимірювані значення струму в навантаженні привести до однієї освітленості, користуючись формулою

$$I = I_{\text{експ}} \frac{L_{\text{max}}}{L_{\text{експ}}}$$

де $I_{\text{експ}}$ і $L_{\text{експ}}$ - поточні експериментальні значення струму і освітленості (в гекталюксах), L_{max} - максимальне значення освітленості, отримане в даній серії вимірювань. Цей спосіб врахування зміни рівня сонячної радіації називається *перенормуванням* струму.

2. Зчитування даних з текстового файлу і запис даних в вектори можна виконувати за допомогою коду:

```
load exper.dat;
volt=exper(:,1);
amp=exper(:,2);
hlx=exper(:,3);
```

3. При виконанні лабораторної роботи в **дистанційному режимі** використовувати файли експериментальних даних **poly_745.xls** і **mono_730.xls**, які містять експериментальні дані з ВАХ для полікристалічного і монокристалічного модулів при іррадіації 745 Вт/м² і 730 Вт/м² відповідно. В цих електронних таблицях значення V вказані в першому стовпчику, I – в другому стовпчику. Треба обчислити ці дані для обох модулів згідно з пунктами 9, 10 завдання. Скріншоти моніторів послідовного порту плати Arduino у звіті не потрібні.

4. Контрольні питання

1. З яких компонентів складається електрична схема установки для вимірювання ВАХ ФМ у даної роботі?
2. Як залежить ВАХ від освітленості поверхні ФМ?
3. Які переваги має вимірювання ВАХ за допомогою мікроконтролерної схеми перед вимірюваннями мультиметрами?
4. Для чого потрібно вносити поправку на рівень сонячної радіації при визначенні струму в навантаженні (перенормуванні)?
5. Які змінні треба ініціалізувати в початкової частині скетчу?
6. Як зчитуються (згідно з кодом) експериментальні дані із текстових файлів?
7. Що таке швидкість послідовного порту і як вона задається?
8. Які функції скетчу регулюють роботою електромагнітних реле?
9. Які функції здійснюють зчитування даних з АЦП?

Література

1. *Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems* . – 1st edition / London: Academic Press, 2009. – 760 p.
2. *Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Energy of Termal Processes*. – 4th edition/ New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. – 910 p. ; *Даффі Дж.А., Бекман У.А. Теплові процеси з використанням сонячної енергії (Рос.)* /М.: Мир, 1977. – 420 с.
3. *Андріїв В.М., Гриліхес В.А., Рум'янцев В.Д. Фотоелектричне перетворення концентрованого сонячного випромінювання (Рос.)*, Л: Наука, 1989, 310 с.
4. *Раушенбах Г. Довідник з проектування сонячних батарей (Рос.)*. М:Енергоатоміздат, 1983, 360 с.
5. *Поліщук В.М. Фотометрія. Конспект лекцій для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 6.090600 «Світлотехніка і джерела світла»* // Харків: ХНАМГ, 2008. – 147 с.
6. *Cotfas D.T., Cotfas P.A., Kaplanis S. Methods to determine the DC parameters of solar cells: A critical review* // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.28. – 2013. – pp. 588–596.
7. *Гаєвський О.Ю., Іванчук В.Ю., Корнієнко І.О. Система вимірювання параметрів фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації* // *Відновлювана енергетика*. - 2019. - №2 (57). - с.32 – 39.
8. *E. Durán, M. B. Ferrera, J. M. Andujar and M. S. Mesa. I–V and P-V curves measuring system for PV modules based on DC-DC converters and portable graphical environment* // *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, 2010*, pp. 3323-3328, doi: 10.1109/ISIE.2010.5637972.