

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Фізичний факультет  
Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Підготовка та проведення демонстраційної лабораторної роботи «Вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням мікроконтролерної плати Arduino»**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки  
**Спеціальність:** 104 Фізика та астрономія  
**Освітня програма:** Фізика та астрономія

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
студента 4 курсу  
Шатлик ІЛАМАНОВ

**Науковий керівник:**  
доктор фізико-математичних наук,  
професор, професор кафедри загальної фізики  
Олег ОЛІХ

Робота заслухана на засіданні кафедри загальної фізики та рекомендована до захисту на ЕК, протокол №\_\_\_\_ від «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023р.

Завідувач кафедри загальної фізики

проф. Микола БОРОВИЙ

Київ – 2023

## **ВИТЯГ**

з протоколу № \_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент \_\_\_\_\_ виконав та захистив  
кваліфікаційну роботу бакалавра з оцінкою \_\_\_\_\_.

Голова ЕК \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

## АНОТАЦІЯ

**Шатлик ІЛАМАНОВ.** Підготовка та проведення демонстраційної лабораторної роботи «Вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням мікроконтролерної плати Arduino»

*Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Фізика та астрономія». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ – 2023.*

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук, професор Олег ОЛІХ, професор кафедри загальної фізики.

Розроблена лабораторна робота для вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням мікроконтролерної плати Arduino Uno, цифро-аналогового перетворювача MCP4725 та монітору INA226. Створена програма для прошивки мікроконтролера. Підготовлений опис роботи.

**Ключові слова:** вольт-амперні характеристики, Arduino, лабораторна робота.

## SUMMARY

**Shatlik ILAMANOV.** Preparation and conducting of a demonstration laboratory work "Measurement of current-voltage characteristics using Arduino microcontroller board. *Bachelor qualification in specialty 104 Physics and astronomy, educational program «Physics and astronomy». – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, General Physics Department. – Kyiv. – 2023.*

**Research supervisor:** Doctor of Physics and Mathematics, Professor Oleg OLIKH, Professor at General Physics Department.

The laboratory work has been developed for the measurement of current-voltage characteristics using the Arduino Uno microcontroller board, the digital-analog converter MCP4725, and the monitor INA226. A program has been created to firmware the microcontroller, and a description of the work has been prepared.

**Key words:** current-voltage characteristics, Arduino, laboratory work.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
Розділ 1. Огляд літератури .....	6
1.1. Основні властивості вольт-амперних характеристик .....	6
1.2. Загальна інформація про платформу Arduino.....	10
Розділ 2. Методика роботи.....	13
2.1 Загальна схема вимірювання вольт-амперних характеристик.....	13
2.2 Кероване джерело живлення .....	13
2.2 Вимірювальні елементи .....	14
2.4 Керуючий елемент.....	16
Розділ 3. Отримані результати.....	17
3.1 Особливості реалізації лабораторної роботи.....	17
3.2 Порядок виконання роботи та результати тестових вимірювань.....	19
Висновки .....	24
Список використаних джерел.....	25
Додаток 1. Лістинг програми, що записується у мікроконтроллер.....	26

## ВСТУП

Практично всі досягнення людства пов'язані зі здатністю досліджувати навколишній світ, визначати його особливості та використовувати їх для власних потреб. Найпоширенішим способом отримання інформації про довкілля є проведення експериментальних досліджень. Здатності працювати з вимірювальними приладами та обладнанням, а також виконувати різноманітні експерименти є одними з найголовніших компетентностей, які має отримати учень в результаті вивчення курсу фізики в середній школі. Вони є основою таким програмних результатів навчання школярів як отримання базових навичок експериментальних досліджень, розуміння та здатності аналізувати та пояснювати результати, отримані в результаті експерименту, умінь отримувати експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій. Насамперед досягненню цієї мети сприяє проведення лабораторних робіт з різних частин фізики.

Окреме місце займає частина шкільного практикуму, яка стосується вивчення електричних властивостей матеріалів та пристроїв. Це пов'язано з тим, що переважаюча частина всіх тих інструментів, які використовує людина для забезпечення свого комфортного існування та проведення різноманітної професійної діяльності, базуються саме на використанні процесів проходження електричного струму та явищ, які супроводжують цю фізичну подію. Зокрема надзвичайно важливу інформацію можна отримати з дослідження вольт-амперних характеристик різноманітних електричних елементів.

Класичний підхід до забезпечення проведення лабораторних робіт з курсу електрики передбачає необхідність придбання великої кількості різноманітного обладнання: джерела струму, вольтметри, амперметри, осцилографи, мультиметри тощо. Як правило всі ці прилади є високовартісними та вимагають окремих площ для свого зберігання. Водночас у наше повсякденне життя все ширше входять різноманітні мікроконтролерні елементи, які мають мініатюрні розміри, дешеві та не споживають значної енергії. Зокрема апаратна обчислювальна платформа Arduino надзвичайно широко використовується для створення різноманітних

автономних інтерактивних об'єктів через свої надзвичайно широкі можливості, передбачає спрощене програмування та використання програмного забезпечення з відкритим кодом, забезпечується великою кількістю програмних бібліотек, що знаходяться у широкому доступі.

У зв'язку з цим метод цієї дипломної роботи було розробка лабораторної роботи для вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням мікроконтролерної платформи Arduino. Необхідне для цього обладнання є дешевим (за умови використання клонів загальна вартість знаходиться в околі 10 доларів США), невеликим за розміром (співмірне з розміром мобільного телефону) та універсальним (може використовуватися і для інших лабораторних робіт). Сама лабораторна робота може виконуватися як з використанням персонального комп'ютера, так і смартфона зі спеціальним програмним забезпеченням, що є у вільному доступі. Крім того, виконуючи подібну роботу, школярі окрім компетентностей, вказаних раніше, отримують навички роботи з мікроконтролерами, що є надзвичайно важливим у сучасному світі.

## Розділ 1. Огляд літератури

### 1.1. Основні властивості вольт-амперних характеристик

Однією з властивостей речовин є електропровідність, яка виникає в електричному полі та пов'язана зі здатністю проводити електричний струм [1]. Електропровідність властива будь-яким речовинам, проте для того, щоб вона досягала значних величин необхідно наявність вільних носіїв заряду. Такими частинками можуть бути електрони, дірки, іони, куперівські пари тощо. Іншим визначальним фактором, окрім концентрації носіїв заряду, є процеси їхнього розсіювання під час руху, викликаним зовнішнім електричним полем. Розсіювання відбувається на неоднорідностях, які можуть бути пов'язані зі зміщеннями атомів ґратки від положень рівноваги (тепловими коливаннями), дефектами кристалічної структури, наявністю різноманітних границь розділу та зв'язаних з ними потенціальними бар'єрами. Прикладення напруги до речовини чи певного функціонального пристрою не лише викликає рух носіїв заряду, але й може видозмінювати внутрішню структуру і тому дослідження провідності як функції напруженості зовнішнього електричного поля дозволяє отримувати надзвичайно важливу інформацію щодо цілої низки параметрів.

Поведінка елементів та пристроїв при їхньому ввімкненні в електричне коло залежить від електричних параметрів та характеристик. Одним із найпоширеніших методів характеристики елементів кола є визначення їхніх вольт-амперних-характеристик (ВАХ). Найчастіше ВАХ визначає функціональну залежність струму  $I$  від прикладеної до елемента електричного кола напруги  $U$ :  $I = I(U)$ . Проте ВАХ може описувати і обернене співвідношення: залежність падіння напруги на елементі електричного кола від величини струму, що протікає через нього  $U = U(I)$ . Елементами можуть бути резистор, котушка індуктивності, діод, сонячний елемент, транзистор тощо.

Для проведення вимірювань вольтметр вмикають паралельно ділянці кола, на якій знаходиться елемент, який потрібно охарактеризувати. Аби струм, який проходить через вольтметр, був незначним, його опір має бути великим порівняно

з ділянкою кола. Вимірюючи амперметром струм у колі, його вмикають послідовно з ділянкою.

Як правило, вольт-амперну характеристику представляють у вигляді графіку. Нерідко на цій залежності виділяють пряму та зворотну гілки. Перша відповідає тій області, де прикладена до елемента напруга додатна, друга – від’ємна. Залежно від вигляду ВАХ, елементи розділяють на лінійні та нелінійні. Для лінійних елементів ВАХ є прямою лінією, яка проходить через початок координат (рис.1.1а) і описується законом Ома [2]:

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

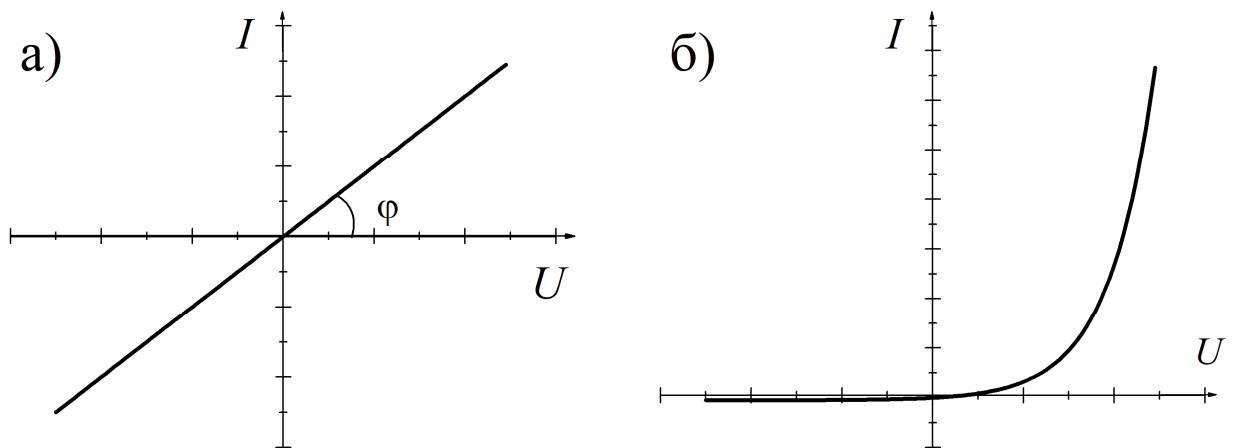


Рис.1.1 Типові ВАХ резистора (а) та діода (б)

де  $R$  – електричний опір елемента. Фактично, опір обумовлює кут нахилу ВАХ:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I}{U} = \frac{1}{R}. \quad (1.1)$$

Величину, обернену до опору, називають електричною провідністю  $G$ :

$$G = \frac{1}{R}. \quad (1.2)$$

Для лінійного елемента характерною ознакою є те, що його опір не залежить від величини струму, що протікає через нього (не залежить від величини прикладеної напруги). Прикладом лінійного елемента може бути резистор, для



якого пряма та зворотна гілки ВАХ тотожні (з точністю до зміни знаку напруги та сили струму). Водночас, опір резистора залежить від температури і тому вигляд ВАХ буде модифікуватися внаслідок нагріву елементу. Для металевих та дріт'яних резисторів опір зі збільшенням температури незначно зростає, причому залежність  $R = R(T)$  практично лінійна. Опір напівпровідникових резисторів може залежати від температури значно сильніше, зменшуючись при її підвищенні за експоненціальним законом.

Для нелінійних елементів вигляд ВАХ є складнішим, що пов'язано із нестійкістю величини опору (провідності) при проходженні впорядкованого руху заряджених частинок різної інтенсивності див. рис.1.1б. В цьому випадку для характеристики елементу доцільно використовувати диференційний опір, який описує властивості системи при певному значенні сили струму (певному значенні прикладеної напруги)

$$R_d = \left( \frac{dI}{dU} \right)^{-1} \quad (1.3)$$

або диференційну провідність

$$G_d = \left( \frac{dI}{dU} \right). \quad (1.4)$$

Тобто диференційний опір (диференційна провідність) визначаються похідною вольт-амперної характеристики, яка також може бути представлена у вигляді графіку  $R_d = R_d(U)$  - рис.2. Графічно диференційні параметри визначаються тангенсом кута нахилу ВАХ в околі певної напруги (наприклад, в області робочої ділянки приладу). Звичайно, диференційний опір можна визначити і для лінійних елементів: в цьому випадку  $R_d$  залишатиметься сталим (і рівним  $R$ ), а графік  $R_d = R_d(U)$  матиме вигляд прямої лінії, паралельної осі напруг.

Ступінь нелінійності ВАХ нелінійних елементів визначається коефіцієнтом нелінійності:

$$K = \frac{U}{I} \cdot \left( \frac{dI}{dU} \right). \quad (1.5)$$

В загальному випадку, коефіцієнт нелінійності також залежить від прикладеної до елемента напруги – див.рис.1.3. Для лінійних елементів  $K = 1$ .

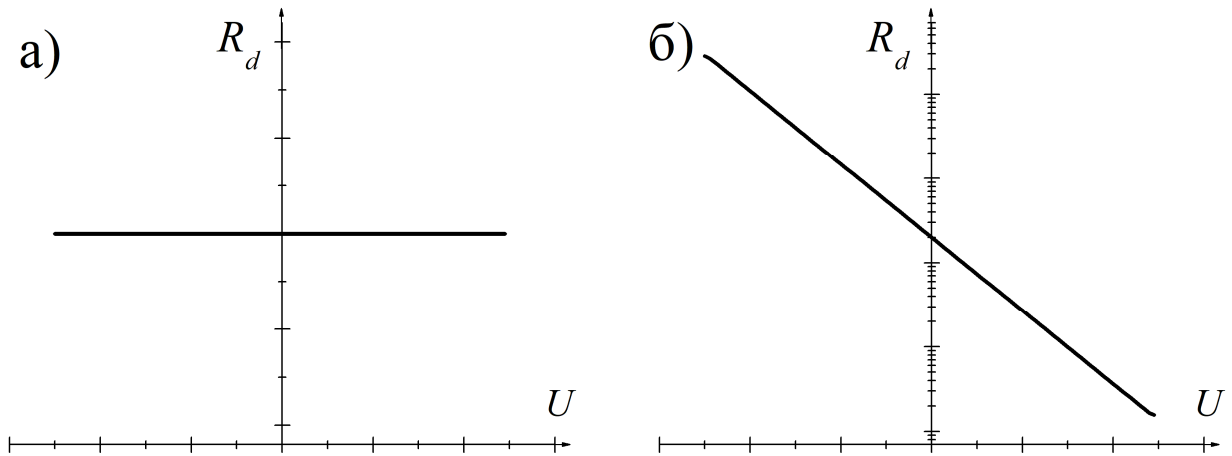


Рис.1.2 Типові залежності диференційного опору для резистора (а) та діода (б) від прикладеної напруги. Для частини б вісь ординат має логарифмічний масштаб.

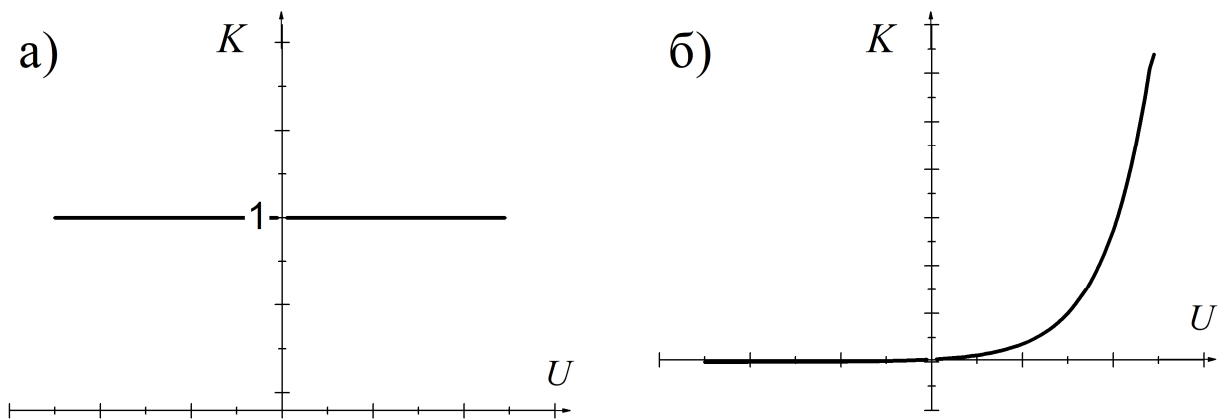


Рис.1.3 Типові залежності коефіцієнта нелінійності для резистора (а) та діода (б) від прикладеної напруги

Прикладами елементів з істотно нелінійним ВАХ є діод, транзистор, стабілітрон. Наприклад, для діоду ВАХ в ідеалізованому випадку описується виразом

$$I = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1.6)$$

де  $I_0$  – струм насичення (для діоду з р-п переходом залежить від концентрації та довжини вільного пробігу неосновних носіїв),  $e$  – елементарний заряд,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура.

Нерідко для нелінійних елементів ВАХ не є симетричною відносно зміни знаку напруги, тобто пряма та зворотні гілки не тотожні і випрямляючий діод (рис.1.1б) є типовим прикладом саме такого елементу. Проте можливі ситуації, коли нелінійні ділянки ВАХ при прямому та зворотному зміщенні однакові: наприклад, подібна ситуація спостерігається для резонансно-тунельного діоду.

Якщо система, яка характеризується, має два контакти, то ВАХ визначається однозначно (при певних зовнішніх умовах, таких як температура чи освітлення). Елементи, що мають більше двох контактів, мають безліч ВАХ. Наприклад, для транзистора ВАХ [3], пов'язана з проходженням струму та прикладанням різниці напруг між емітером та колектором, буде суттєво залежати від струму бази – рис.1.4.

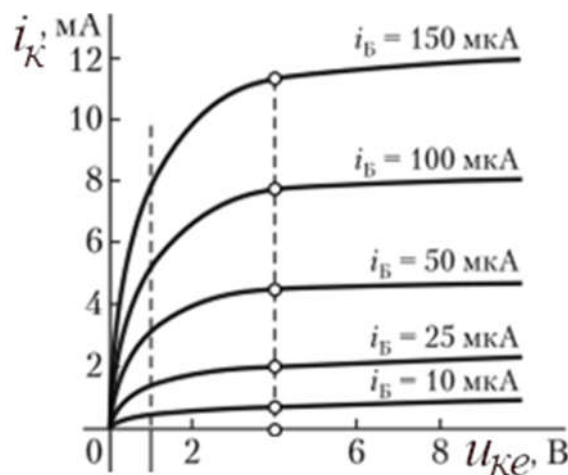


Рис.1.4 Типові залежності струму колектора від напруги між колектором та емітером для біполярного транзистора при різних значеннях струму бази

## 1.2. Загальна інформація про платформу Arduino

Arduino – це сімейство плат невеликого розміру, що містить 8-ми або 32-бітний контролер та набір елементів, необхідних для його роботи. Вони обладнані USB-інтерфейсом та містять низку контактів для аналогового введення та

цифрового введення та виведення. Ці системи з'явилися у 2005 році в італійському місті Івреа (батьком система вважається доцент місцевого університету Массімо Банці) і були розроблені з метою спрощення створення інтерактивних об'єктів та середовищ, а також забезпечення їхньої більшої доступності [4]. Arduino є доступною та дешевою та надає як розробникам професіоналам, так і любителям можливість створювати пристрої, які взаємодіють із навколишнім світом за допомогою різноманітних датчиків та виконуючих пристроїв. Всі роз'єми на платах є стандартними, що дозволяє розширювати функціональність базової комплектації за допомогою вбудованих плат та створювати великі та складні проекти. Платформу можна використовувати для створення надзвичайно широкого діапазону пристроїв, включно з музичними інструментами, роботами, іграми, інтерактивними меблями чи одягом [5]. Arduino використовується у дуже багатьох програмах для навчання у всьому світі.

Загалом, Arduino є набагато більшим, ніж просте апаратне забезпечення. Мікроконтролер необхідно програмувати і для цього використовується інтегроване середовище розробки, яке працює на персональних комп'ютерах, що перебувають під керуванням різних операційних систем, та дозволяє писати спеціальні програми (так звані скетчі) з використанням C-подібної мови програмування Processing на платформі Wiring (полегшений варіант C++, який містить доступні і зрозумілі функції для роботи з контролером). Це програмне забезпечення поширюється з відкритим програмним кодом і знаходиться у вільному доступі. Існує також величезна кількість готових програм для безкоштовного скачування, які демонструють використання різноманітних можливостей платформи.

Користувачам доступна ціла низка плат Arduino (UNO, Mega, Leonardo, Duemilanove, Diecimila, Nano, ADK та інші, зображення деяких з яких наведено на рис.1.5), які призначені для використання у проєктах конкретних типів і мають різні технічні характеристики (кількість виходів та входів, тактова частота, об'єм пам'яті, напругу живлення, форм-фактор, наявність тих чи інших вбудованих елементів тощо). Більшість плат містить роз'єм USB, який використовується як для живлення платформи, так і для взаємодії з комп'ютером.

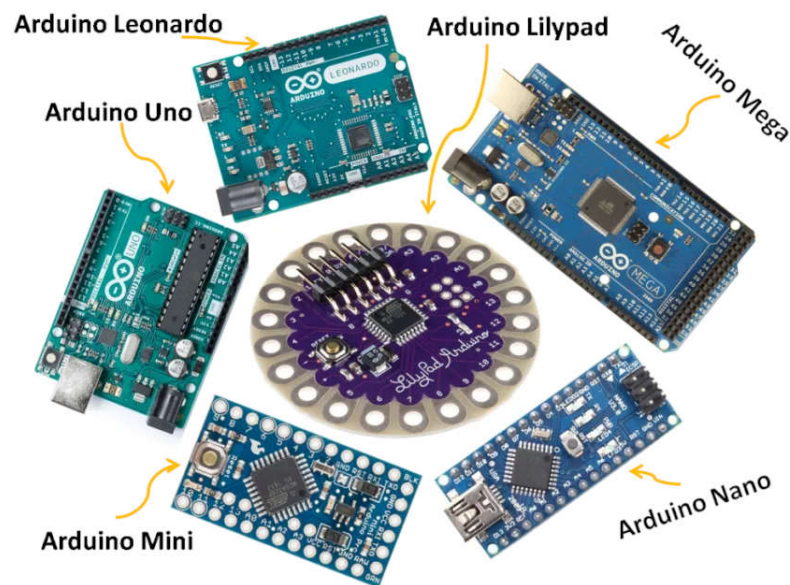


Рис.1.5 Зовнішній вигляд деяких плат Arduino.

Одною з найбільших переваг використання платформи Arduino є легкість, з якою можна під'єднати готові плати розширення або й просто напрями підключати необхідні елементи. Для Arduino створено безліч бібліотек, які дозволяють працювати з найрізноманітнішими пристроями чи й окремими інтегральними мікросхемами. Зокрема, існують бібліотеки, які дозволяють просто реалізовувати комунікаційні протоколи, такі як UART, I2C, SPI, 1-Wire тощо. Як наслідок, розробник може зосередитися на підготовці кінцевої системи, а не вивченні принципів функціонування окремих елементів.

Товариство Arduino завжди готове прийти на допомогу, зокрема через форуми (<https://forum.arduino.cc>), надавши поради та приклади розробки проєктів та розв'язку задач.

## Розділ 2. Методика роботи

### 2.1 Загальна схема вимірювання вольт-амперних характеристик

Для побудови ВАХ необхідно прикладати до досліджуваного елементу відомі значення напруги та фіксувати величини сили струму, що проходять при цьому через нього. Загальна схема в цьому випадку виглядатиме так, як показано на рис.2.1. При цьому на рисунку елемент, ВАХ якого потрібно виміряти, стандартно позначено як DUT (device under testing).

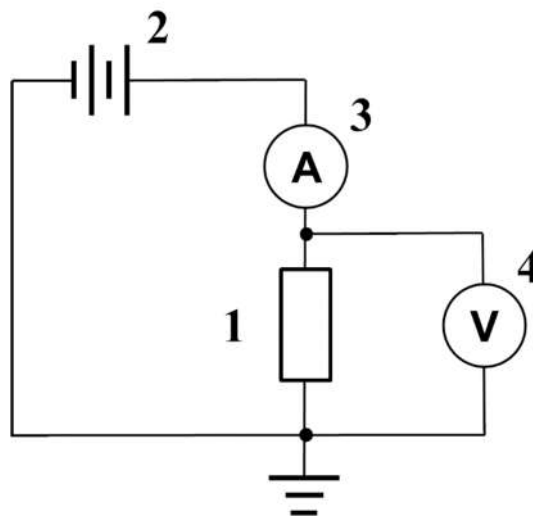


Рис.2.1 Схема для вимірювання ВАХ. 1 – DUT, 2 – регульоване джерело живлення, 3 – амперметр, 4 - вольтметр

Як видно з рисунку, необхідними елементами є кероване джерело живлення, що дозволяє змінювати різницю потенціалів, прикладену до DUT та два вимірювальні пристрої, що дозволяють визначати безпосередньо силу струму (амперметр) та падіння напруги на досліджуваній системі (вольтметр). Крім того, потрібно забезпечити можливість зчитування результатів вимірювання. Розглянемо вибрані для реалізації роботи елементи детальніше.

### 2.2 Кероване джерело живлення

Враховуючи, що як основний керуючий елемент у лабораторній роботі передбачено використовувати мікроконтролерну плату Arduino, найкращим варіантом керованого джерела живлення виглядає цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Взявши до уваги необхідність малого розміру пристрою, невисоку

вартість, низьке енергоспоживання та не надто високі вимоги до навантажувальної здатності було прийнято рішення використати мікросхему MCP4725 [6]. Це 12-бітний ЦАП, напруга живлення  $V_{DD}$  якого складає від 2,7 до 5,5 В, а споживаний струм – до 50 мА. Можлива вихідна напруга знаходиться в діапазоні від потенціалу виводу  $V_{SS}$ , який, як правило заземляється, до  $V_{DD}$ , причому точність її встановлення дорівнює  $(V_{DD} - V_{SS}) / 4096$ . Тобто, при живленні 5 В можливий крок зміни напруги приблизно дорівнює 1,2 мВ. Час встановлення вихідної напруги – 6 мкс, максимальний вихідний струм 25 мА. Схема здатна працювати в діапазоні температур від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ . На рис.2.2 наведена блок-діаграма цього пристрою.

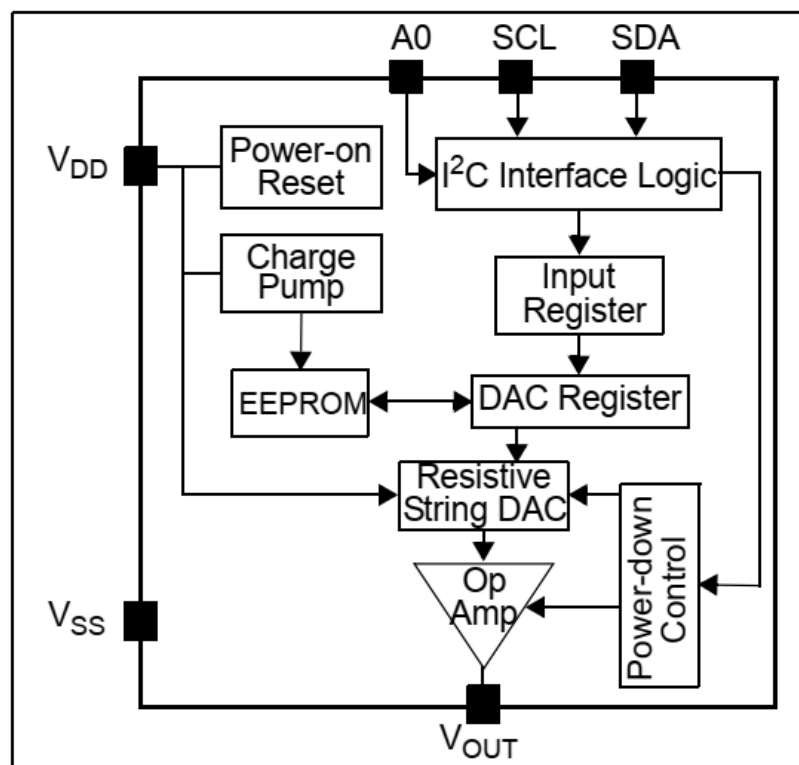


Рис.2.2 Блок-діаграма ЦАП MCP4725. Рисунок взятий з офіційного опису [7].

Керування пристроєм здійснюється за допомогою передачі команд по стандартній шині I2C. Відповідна адреса пристрою може бути змінена шляхом приєднання одного з виводів мікросхеми до землі чи напруги живлення.

## 2.2 Вимірювальні елементи

Для забезпечення вимірювань сили струму та напруги було вирішено використати монітор струму та потужності INA226 [8]. Цей датчик дозволяє

вимірювати постійну напругу, силу струму, що проходить через навантаження, а також обчислювати потужність. Пристрій працює при напрузі живлення складає від 2,7 до 5,5 В, споживаючи до 420 мкА. Робочий діапазон температур від -40°C до 125°C. Він містить 16-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), час конвертації якого може бути змінено від 140 мкс до 8,2 мс. Пристрій здатен вимірювати напругу в діапазоні від 0 до 36 В з роздільною здатністю 1,25 мВ. Вхідний опір під час таких вимірювань – 830 кОм. Вимірювання струму ґрунтується на визначенні падіння напруги на шунтуючому опорі  $R_{sh}$ , величину якого можна змінювати під час налаштування схеми. Діапазон допустимих падінь напруги на цьому опорі становить від -81,9175 мВ до 81,9 мВ, що дозволяє визначати силу струму з роздільною здатністю  $2,5 \text{ мкВ} / R_{sh}$ . Монітор може бути використаний як з нижнім (Low-Side Sensing), так і з верхнім (High-Side Sensing) розташуванням датчика струму – див. рис.2.3.

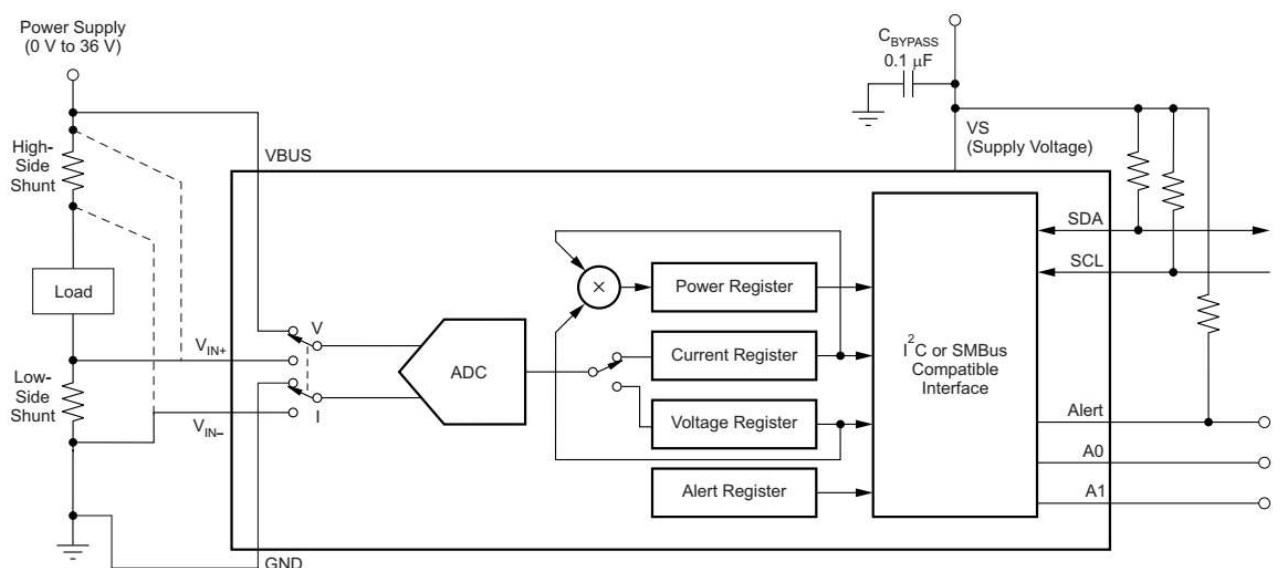


Рис.2.3 Блок-діаграма INA226 та можливі розташування датчика струму. Рисунок взятий з офіційного опису [5].

Передача команд на проведення вимірювань, встановлення режиму роботи, а також зчитування результатів вимірів відбувається з використанням шини I2C. В залежності від приєднання двох спеціальних пінів адреса пристрою може змінюватися від пінів 0x40 до 0x4F.



## 2.4 Керуючий елемент

Як вже неодноразово зазначалося, елементом, який забезпечує узгоджену роботу всіх пристроїв, а також взаємодію з людиною, було вибрано платформу Arduino. Проте, враховуючи існуюче різноманіття подібних систем, необхідно було вибрати конкретну платформу. Вимоги, які висувалися в нашому випадку, була достатньо низькими: здатність жити мікросхеми MCP4725 та INA226 та можливість підтримки протоколу I2C. Цим умовам задовольняє практично будь-яка система і тому для реалізації проєкту було вибрано стандартний варіант Arduino Uno, зовнішній вигляд якої представлений на рис.2.4.

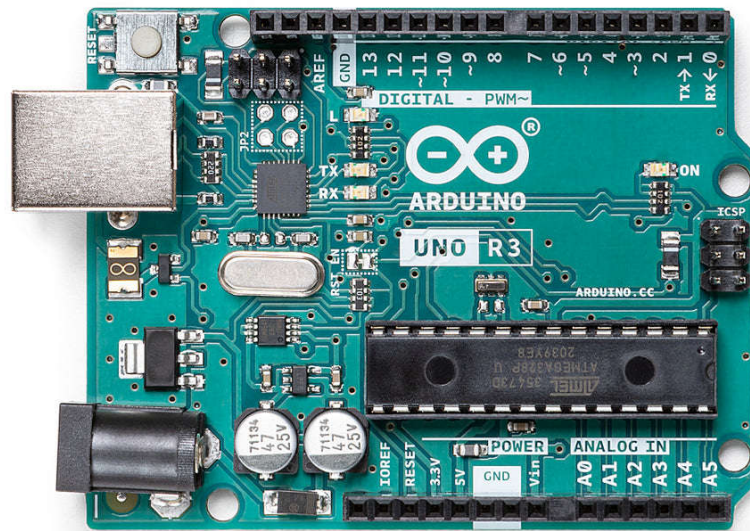


Рис.2.4 Зовнішній вигляд Arduino Uno. Рисунок взято з офіційного сайту [9].

Зокрема для цієї плати з використанням стандартної бібліотеки Wire зв'язок по інтерфейсу I2C може реалізовуватися з використанням виходів A4 (SDA шина) та A5 (SCL шина).

## Розділ 3. Отримані результати

### 3.1 Особливості реалізації лабораторної роботи

Для підвищення універсальності та зручності було вирішено використовувати не безпосередньо інтегральні мікросхеми MCP4625 та INA226, а модулі на їхній основі – див. рис.3.1. Подібні модулі є достатньо поширеним способом використання мікроелектронних пристроїв різного типу: вони містять додаткові елементи, що забезпечують роботу мікросхем та суттєво полегшують їхнє монтування у електричну схему, що особливо важливо саме для проведення лабораторної роботи.

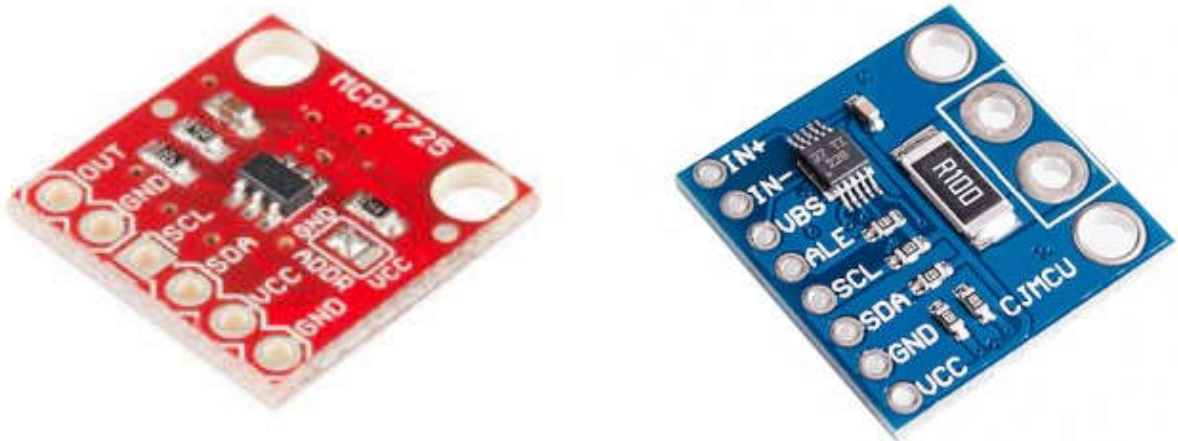


Рис.3.1 Зовнішній вигляд модулів MCP4625 (ліворуч) та INA226 (праворуч)

Загальна схема лабораторної роботи виглядає так, як показано на рис.3.2. Фактично, вона еквівалентна загальній схемі, представленій на рис.2.1, та враховує, що виводи  $V_{CC}$  модулів мікросхем відповідають точкам подачі живлення,  $GND$  – спільній шині, для MCP4625 вихід АЦП це OUT, а для INA226 вихід VBS пов'язаний з можливістю вимірювання напруги, а між  $IN+$  та  $IN-$  розташовується шунтуючий опір. Враховуючи, що, згідно з технічними характеристиками, для ефективної роботи вибраного АЦП необхідно, щоб опір навантаження перевищував декілька кілоом, а також навантажувальну здатність цієї мікросхеми, було вирішено використовувати шунтуючий опір  $R_{SH} = 55,09 \text{ Ом}$ . Його величина була

виміряна 4-зондовим методом з використанням прецизійного мультиметра Keitley DMM6500. При цьому максимальне значення сили струму, яке здатна вимірювати така схема, складає близько 1,2 мА, роздільна здатність вимірювань – близько 45 мкА.

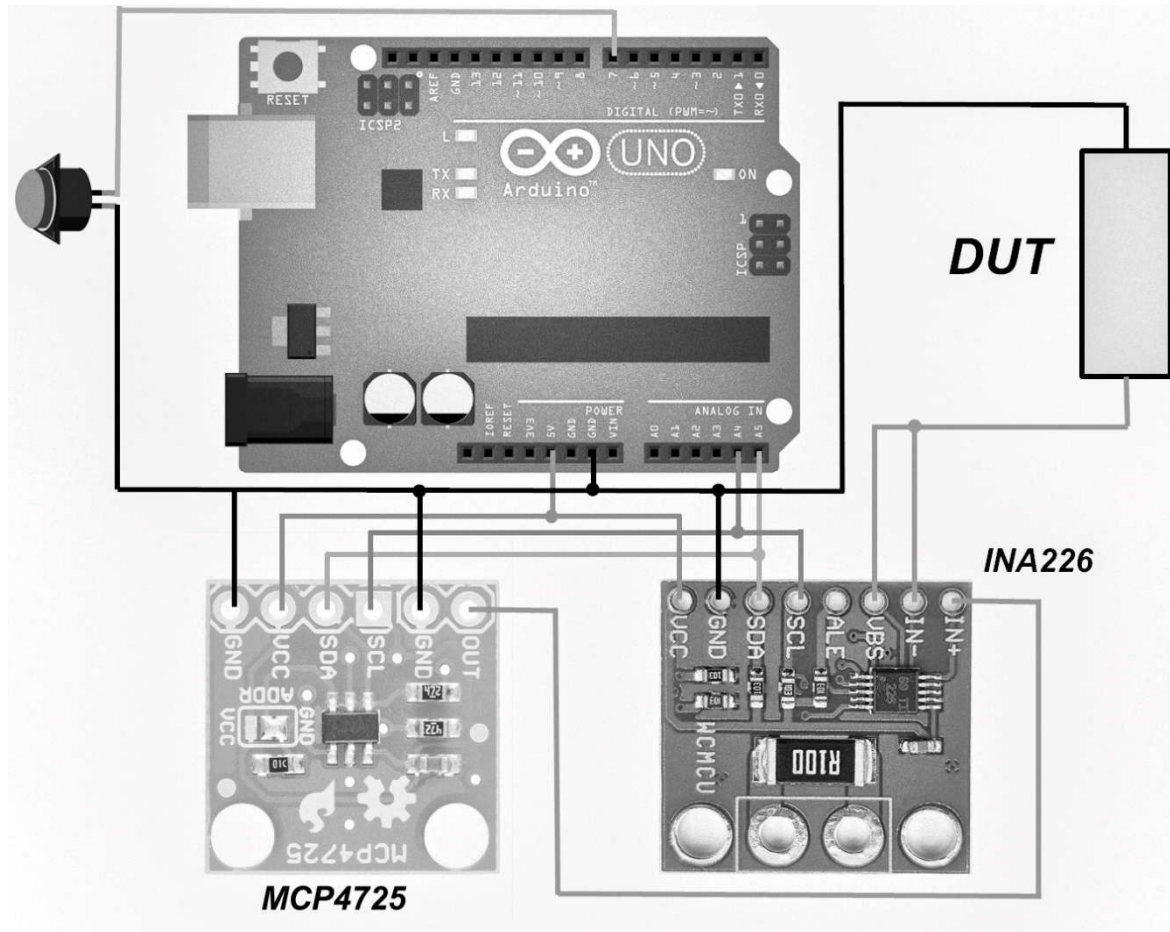


Рис.3.2 Схема лабораторної роботи

У схемі також враховано, що при використанні інтерфейсу I2C всі ведені пристрої приєднують паралельно до ведучого, а отже піни SDA і MCP4725, і INA226 мають бути приєднані до виходу A4 Arduino UNO, а піни SCL – до виходу A5.

Чи не єдиною відмінністю схем на рис.2.1 та 3.2 є наявність кнопки між землею та цифровим входом 7 Arduino UNO на останній з них. Як видно зі схеми, якщо підтягнути за допомогою вбудованого резистора цей вхід до живлення, то натискання кнопки призведе до появи низького рівня на 7. Поява кнопки пов'язана з особливістю роботи мікроконтролера, а саме з тим, що він циклічно виконує одну й ту саму, записану у його пам'ять програму. Якщо проводити

циклічну перевірку стану входу 7, то натискання кнопки дозволяє переходити з одного стану запрограмованого автомату до іншого і таким чином реалізувати інтерактивний режим.

Для програмування мікроконтролера використовувалась інтегроване середовище розробки Arduino IDE, яке доступне за посиланням [10]. При цьому були використані розташовані у відкритому доступі бібліотеки для модулів Adafruit\_MCP4725 [11] та Arduino-INA226 [12], які, в свою чергу, використовують стандартну бібліотеку Wire [13].

Було вирішено, що під час лабораторної роботи в інтерактивному режимі потрібно буде ввести максимальну напругу  $V_{max}$ , що подається на DUT (вимірювання проводитимуться в діапазоні від 0 до  $V_{max}$ ) та кількість кроків зміни напруги (відповідно, кількість вимірювань буде на одиницю більшою). Результати вимірювань виводяться в монітор послідовного порту, який входить до складу інтегрованого середовища розробки. Повний лістинг розробленої програми наведено в Додатку 1. Зауважимо, що запис цієї програми у пам'ять мікроконтролера є однократною операцією і школярам її проводити не потрібно.

### **3.2 Порядок виконання роботи та результати тестових вимірювань**

Узагальнюючи попередню інформацію, необхідними приладами та матеріалами для цієї лабораторної роботи є

1. Мікроконтролерна плата Arduino Uno (попередньо запрограмована) – вартість клона близько 200 грн.
2. Модуль MCP4725 – вартість в околі 50 грн, див., наприклад, [https://www.aliexpress.com/item/32311229368.html?spm=a2g0o.order\\_list.order\\_list\\_main.57.5dc71802LnXwZL](https://www.aliexpress.com/item/32311229368.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.57.5dc71802LnXwZL).
3. Модуль INA226 – вартість близько 110 грн, див., наприклад, [https://www.aliexpress.com/item/32800093372.html?spm=a2g0o.order\\_list.order\\_list\\_main.102.5dc71802LnXwZL](https://www.aliexpress.com/item/32800093372.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.102.5dc71802LnXwZL).
4. Набір з'єднувальних дротів.
5. Кнопка тактова.

6. Макетна плата (опційно).

7. Персональний комп'ютер зі встановленим Arduino IDE (або іншою програмою моніторингу послідовного порту; загалом, робота може бути модифікована і для виконання на смартфоні).

8. Декілька елементів для вимірювання ВАХ (резистори, випрямляючі діоди, стабілітрони, сонячні елементи тощо)

Порядок виконання роботи наступний:

1. Не підключаючи живлення до плати, зібрати схему відповідно до рис. 3.2. Замість DUT розташувати елемент, вольт-амперну характеристику якого потрібно виміряти.

2. Запустити на комп'ютері програму Arduino IDE.

3. Підключити до USB-входу комп'ютера плату Arduino. За необхідності, змінити порт, відповідно до якого підключена плата (в головному меню вибрати «Tools - > Port:»).

4. Запустити монітор послідовного порту (в головному меню вибрати «Tools - > Serial Monitor» або натиснути комбінацію клавіш «Ctrl+Shift+M»). Для початку роботи натиснути кнопку на схемі.

5. Користуючись підказками на екрані ввести у верхнє поле монітору значення максимальної напруги (до якої проводитимуться вимірювання, наприклад 4.5 В), натиснути кнопку «Send» на екрані та кнопку на схемі.

6. Користуючись підказками на екрані ввести у верхнє поле монітору значення кількості кроків зміни напруги (наприклад, 15), натиснути кнопку «Send» на екрані та кнопку на схемі.

7. Натиснути кнопку на схемі і дочекатися закінчення вимірів. Записати результати, враховуючи, що результати вимірювання напруги виводяться у послідовний монітор у вольтах, а сили струму – у мікроамперах.

8. Повторити пп.5-7 4-5 разів.

9. Від'єднати від USB-входу комп'ютера плату Arduino.

10. Замінити в схемі DUT на інший елемент. Повторити пп.5-9. Подібні дії виконати для всіх елементів, вольт-амперні характеристики яких потрібно виміряти.

11. Побудувати графіки ВАХ всіх досліджених елементів.

12. Визначити які, елементи є лінійними, які – нелінійними. Для перших визначити величину опору відповідно до формули (1.1).

Тестові вимірювання лабораторної роботи були проведені з використанням у ролі DUT двох резисторів R1 та R2 з номінальним опором 9,1 кОм та 5,6 кОм відповідно, розраховані на потужність 0,25 Вт кожен. Зібрана схема представлена на рис.3.3. При проведенні вимірювань як значення максимальної напруги була вибрана величина 4,5 В, а кількість кроків – 15. Отримані результати вимірювань наведено в табл.3.1 та 3.2.

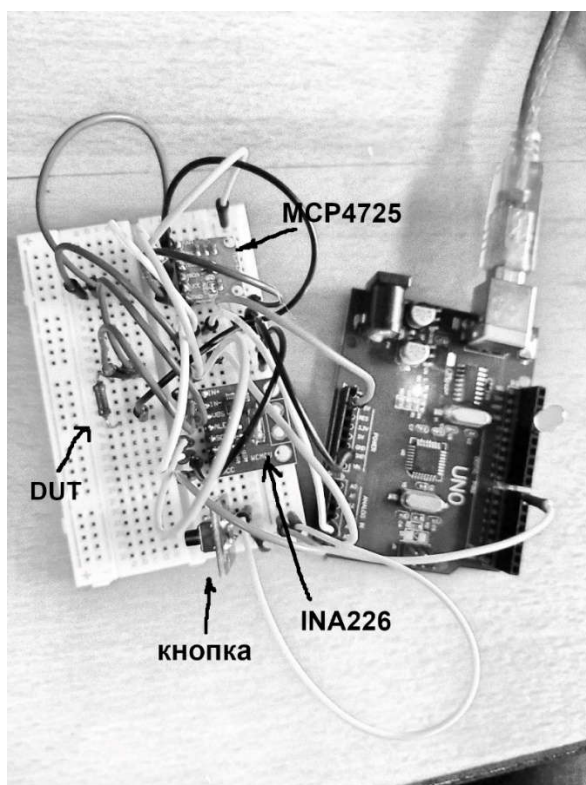


Рис.3.3 Фотографія лабораторної роботи у зібраному вигляді

Табл.3.1. Результати вимірювання ВАХ DUT R1

Напруга, В	0	0,299	0,601	0,900	1,202	1,502
	0	0,299	0,599	0,899	1,201	1,501
	0	0,299	0,600	0,899	1,200	1,500
	0	0,299	0,600	0,899	1,199	1,499
Сила струму, мкА	0	33,173	66,845	100,018	134,462	169,132
	0	33,173	66,709	100,018	134,371	168,996
	0	33,173	66,800	99,927	134,371	168,769
	0	33,128	66,754	99,927	134,053	168,542



Напруга, В	1,802	2,104	2,405	2,702	3,002	3,304
	1,800	2,100	2,401	2,701	3,001	3,302
	1,800	2,102	2,401	2,700	3,001	3,302
	1,799	2,101	2,400	2,699	3,000	3,301
Сила струму, мкА	202,487	236,114	269,468	302,596	339,074	374,478
	202,305	235,932	269,241	302,550	339,005	374,297
	202,305	235,932	269,150	302,414	339,005	374,387
	202,124	235,660	269,150	302,323	338,975	374,209
Напруга, В	3,609	3,911	4,209	4,511		
	3,606	3,907	4,206	4,507		
	3,605	3,907	4,206	4,505		
	3,602	3,904	4,203	4,505		
Сила струму, мкА	409,512	443,411	476,629	510,256		
	409,376	442,957	476,266	509,666		
	409,285	442,957	476,221	509,621		
	409,013	442,549	475,903	509,484		

Табл.3.2. Результати вимірювання BAX DUT R2

Напруга, В	0	0,296	0,598	0,894	1,195	1,492
	0	0,296	0,596	0,891	1,195	1,491
	0	0,296	0,596	0,893	1,194	1,491
	0	0,296	0,596	0,893	1,194	1,491
Сила струму, мкА	0	52,414	105,736	158,286	212,244	266,246
	0	52,414	105,691	158,196	212,198	265,883
	0	52,278	105,555	158,060	211,971	265,883
	0	52,323	105,509	158,014	211,926	265,974
Напруга, В	1,791	2,091	2,389	2,686	2,984	3,284
	1,790	2,090	2,389	2,685	2,982	3,284
	1,789	2,087	2,386	2,682	2,980	3,280
	1,789	2,087	2,385	2,681	2,980	3,280
Сила струму, мкА	319,023	372,254	424,986	477,627	530,496	588,310
	318,978	372,164	424,896	477,491	530,223	588,219
	318,570	371,801	424,442	476,992	529,588	587,629
	318,570	372,710	424,351	476,901	529,724	587,448
Напруга, В	3,585	3,885	4,181	4,481		
	3,580	3,884	4,180	4,481		
	3,580	3,880	4,176	4,475		
	3,581	3,880	4,176	4,476		
Сила струму, мкА	642,903	696,270	748,548	801,824		
	642,131	695,592	748,548	801,870		
	642,267	695,181	747,776	800,917		
	642,131	695,181	747,686	800,871		

Отримані графіки ВАХ наведені на рис.3.4. Видно, що як і очікувалося, для резисторів вольт-амперні характеристики мають вигляд прямих ліній, що проходять через початок координат. Величини опорів, розраховані за нахилом ВАХ, дорівнюють 8,85 кОм та 5,67 кОм для R1 та R2, відповідно. Ці величини добре узгоджуються як з номіналами резисторів (з врахуванням 10% максимального допуску опору), так і з результатами вимірювань, виконаних за допомогою прецизійного мультиметра Keitley DMM6500 (9,07 кОм для R1 та 5,68 кОм для R2)

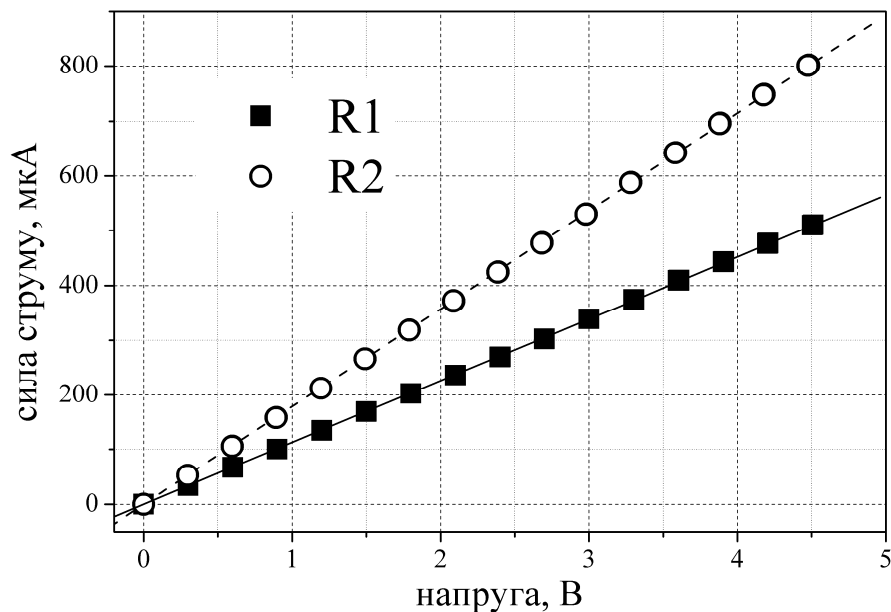


Рис.3.4 Результати вимірювання ВАХ. Точки – експеримент, лінії – лінійна апроксимація.

Ця дипломна робота може бути описом лабораторної роботи (за виключенням останньої частини цього параграфу).



## **Висновки**

1. Розроблена методика проведення лабораторної роботи, спрямованої на вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням мікроконтролерної плати Arduino. Проведено підбір необхідних елементів, а саме визначено доцільність використання цифро-аналогового перетворювача MCP4725 та монітору INA226.
2. Підготовлена програма для мікроконтролера та виготовлено прототип лабораторної роботи.
3. Створено опис роботи та проведено тестування обладнання.

### Список використаних джерел

- [1] Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики. Том 2. Електрика і магнетизм. Київ: Техніка, 2001. 452 с.
- [2] Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики. Книга 2. Електрика і магнетизм. Київ: Вища школа, 2003. 278 с.
- [3] Гуменюк А.Ф. Електрика та магнетизм. Київ: Четверта хвиля, 2008. 506 с.
- [4] Yarnold S. Arduino in easy steps. In Easy Steps Limited, 2015. 192 p.
- [5] Margolis M., Jepsen B., Weldin N.R. Arduino cookbook. Recipes to begin, expand, and enhance your projects. 3-rd Edition. O'Reilly Media, 2020. 795 p.
- [6] <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP4725>
- [7] <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MSLD/ProductDocuments/DataSheets/MCP4725-Data-Sheet-20002039E.pdf>
- [8] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>
- [9] <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
- [10] <https://www.arduino.cc/en/software>
- [11] [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_MCP4725](https://github.com/adafruit/Adafruit_MCP4725)
- [12] <https://github.com/jarzebski/Arduino-INA226>
- [13] <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/wire>

## Додаток 1. Лістинг програми, що записується у мікроконтроллер

```
/* підключення потрібних бібліотек */
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
#include <INA226.h>

Adafruit_MCP4725 dac;
INA226 ina;

#define KEYPIN 7
const float Rshunt = 55.09; // величина використаного шун-
туючого опору
const float maxVoltage = 4.92625; // максимальна напруга
ЦАП
int State = 0;
float V = 4;
int StepCount = 1;

void SetVoltageValue(float V);
float MeasureCurrentInmA(void);
void IVcharMeasurement(float maxV, int StepCount);

void setup(void) {
    pinMode(KEYPIN, INPUT_PULLUP);
    dac.begin(0x61);
    ina.begin(0x45);
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Hello!");
    Serial.println("To begin push the button");
    Serial.println("-----");
}

void loop(void) {
    while (digitalRead(KEYPIN) != HIGH) {
        switch (State) {
            case 0:
                Serial.println("Input high voltage value (high
limit is 4.8 V)");
                Serial.println("Send value and push the button");
                State = 1;
                break;
            case 1:
```

```

    if (Serial.available() > 0) {
        V = Serial.parseFloat();
        Serial.print("You input ");
        Serial.print(V, 3);
        Serial.println(" V");
        Serial.println("To continue push the button");
        if ((V > 0) && (V <= 4.8)) {
            State = 2;
            Serial.println("-----");
        } else {
            Serial.println("It is WRONG value!!!!");
            State = 0;
        }
    } else {State = 0;}
    break;
case 2:
    Serial.println("Input step number ( >0 )");
    Serial.println("Send value and push the button");
    State = 3;
    break;
case 3:
    if (Serial.available() > 0) {
        StepCount = Serial.parseInt();
        Serial.print("You input ");
        Serial.println(StepCount);
        Serial.println("To continue push the button");
        if (StepCount > 0) {
            State = 4;
            Serial.println("-----");
        } else {
            Serial.println("It is WRONG value!!!!");
            State = 2;
        }
    } else {State = 2;}
    break;
case 4:
    IVcharMeasurement(V, StepCount);
    State = 0;
    Serial.println("To continue push the button");
    break;
}
delay(500);
}
delay(10);
}

```

```

void SetVoltageValue(float V) {
    if ((V > maxVoltage) || (V < 0)) return;
    dac.setVoltage(round(V / maxVoltage * 4095), false);
}

float MeasureCurrentInmA(void) {
    return ina.readShuntVoltage() / Rshunt * 1e6;
}

void IVcharMeasurement(float maxV, int StepCount) {
    float VoltageStep = maxV / StepCount;
    float Volt = 0;
    float CurrFon = 0;
    float Curr = 0;
    while (Volt < maxV * 1.01) {
        SetVoltageValue(Volt);
        delay(200);
        ina.configure(INA226_AVERAGES_16,
            INA226_BUS_CONV_TIME_1100US,
            INA226_SHUNT_CONV_TIME_1100US, INA226_MODE_BUS_CONT);
        delay(50);
        Serial.print("Voltage:   ");
        Serial.print(ina.readBusVoltage(), 3);
        Serial.println(" V");
        ina.configure(INA226_AVERAGES_16,
            INA226_BUS_CONV_TIME_1100US,
            INA226_SHUNT_CONV_TIME_1100US, INA226_MODE_SHUNT_CONT);
        delay(50);
        Curr = MeasureCurrentInmA();
        if (Volt == 0) CurrFon = Curr;
        Serial.print("Current:   ");
        Serial.print(Curr - CurrFon, 3);
        Serial.println(" mA");
        Serial.println("-----");
        delay(4000);
        Volt += VoltageStep;
    }
    SetVoltageValue(0);
    delay(50);
    Serial.println("Measurement is done!!!");
}

```