

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ТЕСТЕР ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ НА БАЗІ ARDUINO**

ARDUINO-BASED LI-ION BATTERY TESTER

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІс-21
Філянець Станіслав Васильович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« 06 » червня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Тарас ТЕРЛЕЦЬКИЙ

« 10 » 01 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Філянцю Станіславу Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Тестер для визначення параметрів Li-ion акумуляторів на базі Arduino

Керівник роботи к.т.н., доцент Гринюк Сергій Васильович

затвержені наказом закладу вищої освіти від «20» березня 2025 року № 170/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 10.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області та різні інтернет-ресурси технічного спрямування.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Огляд літератури із дослідження тестування акумуляторів

Проектування системи тестування на базі Arduino

Програмна реалізація та підключення компонентів тестера

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Огляд літератури із дослідження тестування акумуляторів</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Проектування системи тестування на базі Arduino</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Програмна реалізація та підключення компонентів тестера</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Лавренчук С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		____%	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 10.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із дослідження тестування акумуляторів</i>	до 01.04.2025 р.	Виконано
2.	<i>Проектування системи тестування на базі Arduino</i>	до 20.04.2025 р.	Виконано
3.	<i>Програмна реалізація та підключення компонентів тестера</i>	до 30.04.2025 р.	Виконано
4.	<i>Висновки та пропозиції</i>	до 10.05.2025 р.	Виконано
5.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 15.05.2025 р.	Виконано
6.	<i>Формування додатків</i>	до 18.05.2025 р.	Виконано
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 20.05.2025 р.	Виконано
8.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	до 23.05.2025 р.	Виконано
9.	<i>Нормоконтроль</i>	до 30.05.2025 р.	Виконано
10.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 03.06.2025 р.	Виконано
11.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедрі</i>	до 10.06.2025 р.	Виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Філянець С.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Гринюк С.В.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Філянець С. В. Тестер для визначення параметрів li-ion акумуляторів на базі Arduino. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків.

У першому розділі роботи представлено аналітичний огляд характеристик літій-іонних акумуляторів, розглянуто наявні методи вимірювання їх параметрів, а також проаналізовано вимоги безпеки при їх експлуатації.

Другий розділ присвячений проектуванню апаратної частини. Було обґрунтовано вибір основних компонентів: Arduino Nano, сенсора струму INA219, зарядного модуля TP4056, релейного модуля, LCD-дисплея з інтерфейсом I²C та інших допоміжних елементів. Розроблено електричну схему пристрою та реалізовано заходи для забезпечення стабільної та енергоефективної роботи тестера.

В третьому розділі реалізовано структуру взаємодії компонентів, а також алгоритм, який забезпечує вимірювання напруги, струму, обчислення ємності акумулятора та автоматичне перемикання режимів заряджання/розряджання. Під час тестування пристрою підтверджено коректність роботи алгоритму та відображення результатів на LCD-дисплеї. Результатом дослідження є компактний та функціональний тестер для побутового або навчального використання.

Ключові слова: літій-іонні акумулятори, тестер, Arduino, TP4056, INA219, реле, LCD-дисплей, ємність акумулятора, вимірювання.

ANNOTATION

Filyanets S. Arduino-based li-ion battery tester. Manuscript.

Qualification work of the bachelor of the OP «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of used sources and appendices.

The first section of the work presents an analytical review of the characteristics of lithium-ion batteries, considers existing methods for measuring their parameters, and analyzes safety requirements for their operation.

The second section is devoted to the design of the hardware part. The choice of the main components was justified: Arduino Nano, INA219 current sensor, TP4056 charging module, relay module, LCD display with I²C interface and other auxiliary elements. The electrical circuit of the device was developed and measures were implemented to ensure stable and energy-efficient operation of the tester.

In the third section, the structure of the interaction of components is implemented, as well as an algorithm that provides measurement of voltage, current, calculation of battery capacity and automatic switching of charging/discharging modes. During testing of the device, the correctness of the algorithm and the display of results on the LCD display were confirmed. The result of the research is a compact and functional tester for household or educational use.

Keywords: lithium-ion batteries, tester, Arduino, TP4056, INA219, relay, LCD display, battery capacity, measurement

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ ТЕСТУВАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ	5
1.1 Аналіз характеристик Li-ion акумуляторів	5
1.2 Аналіз існуючих рішень для вимірювання параметрів Li-ion акумуляторів	10
1.3 Вимоги безпеки при роботі з Li-ion акумуляторами	17
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕСТУВАННЯ НА БАЗІ ARDUINO	20
2.1 Вибір компонентів апаратної платформи	20
2.2 Розробка електричної схеми пристрою	30
2.3 Забезпечення енергоефективності й стабільності роботи пристрою	32
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДКЛЮЧЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ТЕСТЕРА	36
3.1 Архітектура системи та функціонального взаємозв'язку компонентів	36
3.2 Підключення сенсора струму INA219.....	37
3.3 Підключення LCD 2004 з інтерфейсом I ² C.....	39
3.4 Підключення зарядного модуля TP4056	41
3.5 Підключення релейного модуля.....	43
3.6 Алгоритм роботи пристрою	45
3.7 Тестування пристрою	48
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53
ДОДАТКИ	55

ВСТУП

У сучасному світі літій-іонні (Li-ion) акумулятори набули широкого застосування – їх використовують у мобільних телефонах, ноутбуках, електроінструментах, дронах, електромобілях та багатьох інших пристроях. Попри їхню популярність, контроль технічного стану таких акумуляторів залишається актуальною проблемою, адже з часом ємність знижується, внутрішній опір зростає, а невчасне виявлення несправності може призвести до виходу з ладу не лише акумулятора, а й пристрою в цілому.

Для забезпечення належного рівня експлуатаційної безпеки, ефективності та прогнозованої роботи акумуляторів необхідно регулярно проводити тестування їхніх параметрів. Існуючі комерційні тестери нерідко є дорогими, а їх функціонал – надлишковим для побутового використання. Саме тому розробка компактного, недорогого та простого у використанні тестера на базі мікроконтролера Arduino є актуальним завданням.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка тестера для визначення основних параметрів Li-ion акумуляторів, зокрема напруги, струму, ємності, побудованого на базі апаратно-програмної платформи Arduino.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання основних параметрів акумуляторів.

Предметом дослідження є апаратно-програмний комплекс, що реалізує функції тестування.

Для досягнення мети ставляться такі завдання:

- аналіз характеристик Li-ion акумуляторів;
- дослідження існуючих методів тестування;
- проектування апаратної частини тестера;
- розробка програмного забезпечення для тестера.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ ТЕСТУВАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ

1.1 Аналіз характеристик Li-ion акумуляторів

Літій-іонні акумулятори (Li-ion) (рис. 1.1) є ключовою технологією сучасних мобільних електронних пристроїв, електротранспорту, дронів, енергетичних систем зберігання (ESS) та інших застосувань. Їх популярність пояснюється високою питомою ємністю (до 250 Вт·год/кг), хорошими циклічними характеристиками, низьким саморозрядом (близько 2-3 % на місяць) та відсутністю ефекту пам'яті [1, 2].

Типовий Li-ion акумулятор складається з таких основних частин:

- катод (позитивний електрод): виготовляється з оксидів літію (LiCoO_2 , LiNiMnCoO_2 , LiFePO_4). Він є джерелом Li^+ -іонів під час розряду;
- анод (негативний електрод): зазвичай графітовий матеріал, що акумулює Li^+ -іони під час заряджання;
- сепаратор: пориста мембрана, яка розділяє катод та анод, пропускаючи іони, але не електрони;
- електроліт: рідкий (на основі органічних розчинників) або гелевий, що забезпечує перенос Li^+ -іонів між електродами;
- струмознімальні шари: алюмінієві (для катода) і мідні (для анода) фольги.

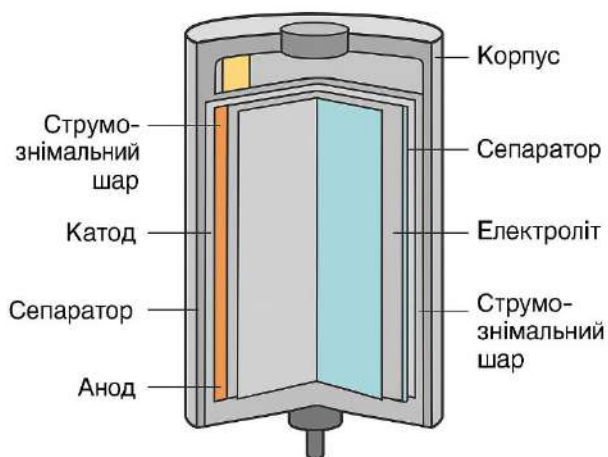


Рисунок 1.1 – Схема будови Li-ion акумулятора [3]

Акумулятор – це накопичувач енергії. Під час процесу заряджання до акумулятора подається електрична енергія, яка змінює баланс заряду між хімічно активними матеріалами. Процес заряду перетворює електричну енергію постійного струму в накопичену хімічну енергію. Накопичена хімічна енергія може бути пізніше використана як електрична енергія для будь-яких віддалених застосувань [4].

На рисунку 1.2 показано процес заряджання, коли джерело живлення додається до позитивного полюса, воно притягує електрони з катода. Оскільки електрони не можуть протікати через електроліт, вони проходять весь шлях через зовнішній ланцюг і досягають шару графіту. Таким чином, вони опиняються в пастці в графітовому шарі. Таким чином, елемент повністю заряджений, коли всі атоми літію досягають графітового шару.

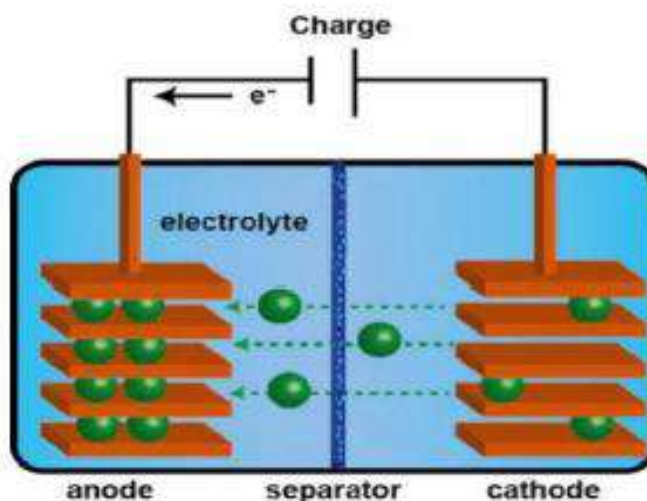


Рисунок 1.2 – Процес заряджання Li-іон акумулятора [4]

Щоб процес заряджання був безпечним, ефективним і результативним, необхідно контролювати напругу і струм [4]. Це необхідно, оскільки батареї не повинні бути перезаряджені, недозаряджені або пошкоджені під час процесу. Якщо струм заряду занадто високий, батарея перегрівається і може бути пошкоджена. І навпаки, якщо батарея заряджається при низькому струмі і низькій зарядній напрузі, процес зарядки займає занадто багато часу. Отже, процес

заряджання - це акт балансування, в якому напруга і струм повинні постійно контролюватися і підтримуватися між високими і низькими межами.

Будь-які літій-іонні або літій-полімерні елементи заряджаються однаково [4]. Єдина відмінність - це напруга заряду. Зазвичай напруга заряду становить 4,2 В або 4,1 В з точністю до 1 %, залежно від виробника. Термін придатності літій-іонного акумулятора і кількість перезарядок прямо пропорційні максимальній напрузі заряду і швидкості заряду, але напруга заряду є дуже важливою.

На рисунку 1.3 представлені різні етапи зарядки літій-іонного елемента. Він має двофазний режим постійного струму (CC) і постійної напруги (CV). Постійний струм – це перша частина циклу заряду, коли зарядний пристрій подає постійний струм, а струм регулюється на рівні $C/5$, як показано на рисунку 1.3. Як тільки елемент досягає максимальної напруги, яка в даному випадку становить 4,2 В, режим змінюється з режиму постійного струму на режим постійної напруги. У режимі постійної напруги напруга залишається постійною на рівні 4,2 В, а струм змінюється. Цикл заряду завершується, коли струм падає до $\sim 0,03C$.

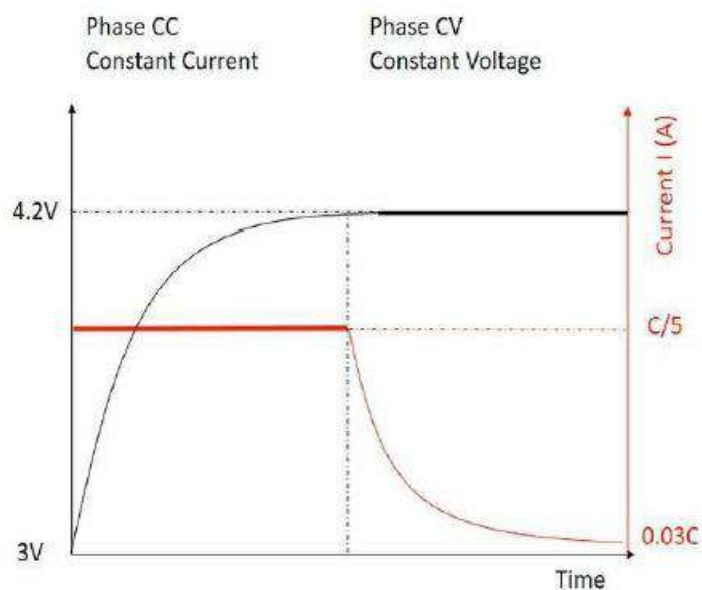


Рисунок 1.3 – Етапи зарядки літій-іонного акумулятора [4]

Акумулятор – це електрохімічний накопичувач, який при розряді перетворює хімічну енергію в рухомі електричні заряди [5]. Процес розряду вичерпує хімічно активні матеріали, при цьому хімічна реакція сповільнюється і врешті-решт припиняється [5]. В ідеальному світі 12-вольтова батарея забезпечувала б постійний струм при постійній напрузі 12 В протягом певного часу, а потім знижувала б напругу і переставала б функціонувати весь час, підтримуючи рівну лінію 12 В. Оригінальні батареї не демонструють такої поведінки через різні фактори, які впливають на ємність батареї.

На рисунку 1.4, будь-яке навантаження, прикладене до елемента, запускає процес руху електронів від анода до катода. Врешті-решт, коли всі електрони рухаються від анода до катода, елемент повністю розряджається.

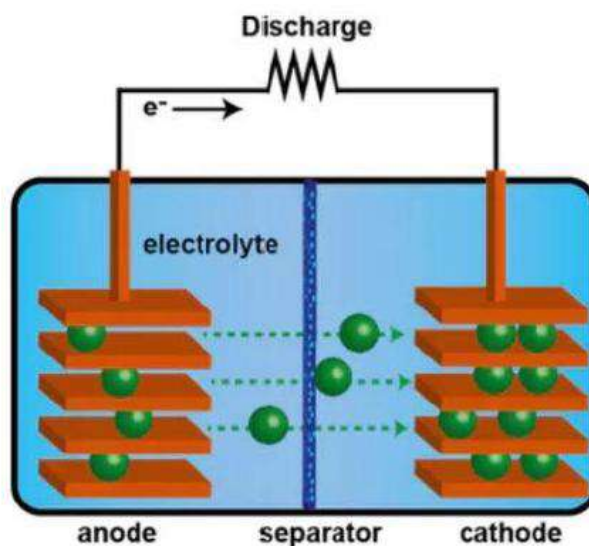


Рисунок 1.4 – Процес розрядження Li-іон акумулятора [5]

Акумулятори мають внутрішній опір, який іноді називають еквівалентним послідовним опором. Внутрішній опір має два джерела: постійний електричний опір і змінний іонний опір [5], який є функцією рухливості електроліту і площі функціональної поверхні. Внутрішній опір – це спрощення цих двох ефектів в один резистор всередині акумулятора. Внутрішній опір є постійним, але слід пам'ятати про змінний іонний опір, який під час розрядження змінюється до

екстремальних значень. Крива регулювання напруги акумулятора – це графік залежності робочої напруги акумулятора від споживаного струму.

На рисунку 1.5 показано, що коли повністю заряджений 12-вольтовий акумулятор ємністю 7 Ач подає струм 140 міліампер, робоча напруга становить приблизно 12,89 вольт. Однак, якщо подати струм 14 ампер, робоча напруга впаде до 11,03 вольт. Внутрішній опір акумулятора можна оцінити за допомогою різних методів у певній точці кривої. Внутрішній опір, як і температура та період розряду, може змінюватися з віком та станом акумулятора.

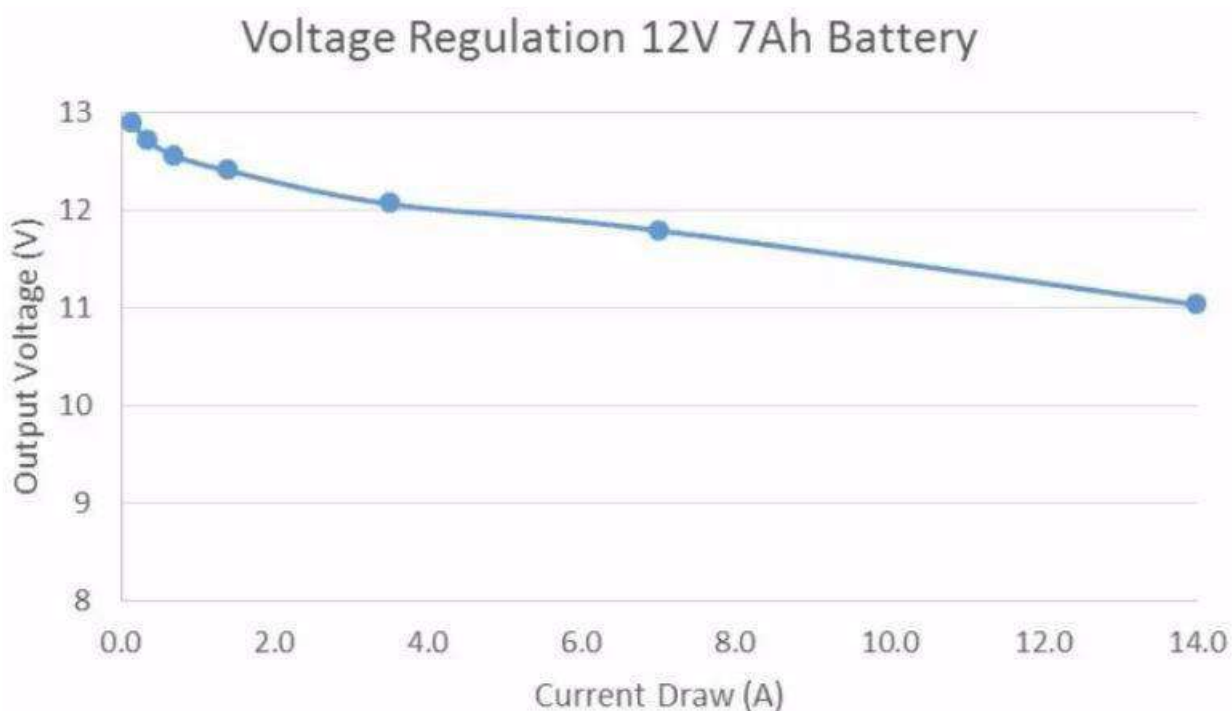


Рисунок 1.5 – Випадок регулювання напруги 12 В батареї ємністю 7 Ач [5]

У таблиці 1.1 подано основні параметри літій-іонних акумуляторів, що визначають їхню ефективність, довговічність та безпечність експлуатації. Ці параметри використовуються як орієнтир для розробки тестера, оскільки саме їх потрібно моніторити для своєчасного виявлення відхилень від норми. Наприклад, підвищений внутрішній опір може сигналізувати про деградацію елементів, а зменшення ємності – про старіння акумулятора. Розуміння цих

характеристик дозволяє створювати адекватні алгоритми вимірювань і коректно інтерпретувати результати.

Таблиця 1.1 – Основні параметри літій-іонних акумуляторів

Параметр	Значення / Опис
Номінальна напруга	3,6-3,7 В для одного елемента. Напруга змінюється від 4,2 В (повністю заряджений) до 2,5-3,0 В (повністю розряджений)
Ємність	1000-3500 мА·год для акумуляторів формату 18650; визначає, скільки енергії акумулятор може віддати за одиницю часу
Енергетична щільність	До 250 Вт·год/кг; залежить від хімії катода та конструкції акумулятора
Внутрішній опір	20-100 мОм; зростає з часом через деградацію матеріалів, впливає на нагрівання та ефективність
Робочий діапазон температур	Заряджання: 0-45°C; розряд: -20–60°C. Перевищення температурних меж може призвести до деградації або навіть теплового розгону
Кількість циклів	500-1500 циклів (залежно від режиму експлуатації), після чого ємність знижується приблизно на 20 %

Таким чином, характеристики Li-іон акумуляторів визначаються як їхньою хімією, так і умовами експлуатації. Для надійної роботи системи, що використовує такі джерела живлення, важливо регулярно моніторити їхню напругу, струм, ємність та внутрішній опір. Це підкреслює актуальність створення тестерів, які дозволяють виконувати контрольні вимірювання швидко та точно.

1.2 Аналіз існуючих рішень для вимірювання параметрів Li-іон акумуляторів

У сучасних умовах експлуатації літій-іонних акумуляторів виникає нагальна потреба в точному й регулярному моніторингу їхніх параметрів. Для цього застосовуються різні рішення: від простих побутових тестерів до промислових лабораторних стендів і вбудованих BMS-систем. Для забезпечення продуктивності та надійності батареї необхідно проводити різні тривалі

випробування на заряд і розряд, щоб гарантувати її працездатність і надійність. Для того, щоб мати загальне уявлення про процес тестування літій-іонних акумуляторів, було досліджено комерційні продукти.

Побутові тестери – це пристрої, розроблені для швидкої оцінки основних характеристик Li-ion акумуляторів у домашніх умовах. Вони є важливими інструментами для користувачів, які активно експлуатують акумулятори у побутовій електроніці (ліхтарики, пауербанки, портативні пристрої), оскільки дозволяють швидко оцінити, чи придатний акумулятор до подальшого використання.

Принцип роботи більшості побутових тестерів полягає в тому, що акумулятор розряджається через вбудоване резистивне навантаження, а сам тестер фіксує струм розряду та час, необхідний для досягнення заданого мінімального рівня напруги (зазвичай 2,8-3,0 В) [6].

LiitoKala Lii-500 (рис. 1.6) – це багатофункціональний зарядно-тестувальний пристрій, призначений для роботи з широким спектром акумуляторів, зокрема літій-іонними (форматів 18650, 26650, 14500) та нікель-металгідридними (NiMH). Цей пристрій поєднує функції зарядного пристрою, тестера ємності та приладу для вимірювання внутрішнього опору, що робить його популярним серед побутових користувачів та ентузіастів [7].



Рисунок 1.6 – LiitoKala Lii-500 [7]

У таблиці 1.2 наведено основні технічні характеристики побутового тестера LiitoKala Lii-500, які визначають його функціональні можливості та сферу застосування. Зокрема, пристрій підтримує роботу з літій-іонними, нікель-металгідридними та нікель-кадмієвими акумуляторами, що робить його універсальним для побутового використання. Чотири незалежних канали дозволяють одночасно проводити тестування кількох акумуляторів, а гнучкий вибір струму заряджання (від 300 мА до 1000 мА) забезпечує адаптацію до різних типів елементів. Однак струм розрядки фіксований (~250 мА), що дещо обмежує точність вимірювань для акумуляторів з великою ємністю. Важливою особливістю є функція вимірювання внутрішнього опору, яка дозволяє оцінити ступінь деградації акумулятора, хоча ці вимірювання є індикативними й не замінюють професійної діагностики.

Таблиця 1.2 – Основні характеристики LiitoKala Lii-500

Параметр	Значення
Підтримувані типи	Li-ion (3,7 В), NiMH, NiCd
Кількість каналів	4 незалежних канали
Струм заряджання	300 мА/500 мА/700 мА/1000 мА
Струм розряджання	~250 мА
Діапазон вимірювання ємності	0-9999 мА·год
Вимірювання внутрішнього опору	Так (індикативний рівень, у міліомах)
Інтерфейс	LCD-дисплей із підсвіткою, кнопочне управління
Безпека	Захист від перевантаження, короткого замикання, перегріву

Наведені в таблиці 1.2 дані демонструють, що LiitoKala Lii-500 є доступним і багатофункціональним рішенням для побутових потреб, але не є професійним лабораторним стендом.

Лабораторні стенди – це професійні установки, які дозволяють програмувати режими заряджання та розряджання, контролювати параметри з високою точністю та реєструвати великі обсяги даних для подальшого аналізу. Відомі виробники таких рішень: Arbin Instruments, Neware, BioLogic, Chroma 17020.

Chroma 17020 (рис. 1.7) – це високоточна багатоканальна система для тестування акумуляторних модулів і батарей, розроблена для використання у виробничих, науково-дослідних та випробувальних лабораторіях. Вона дозволяє проводити як стандартні цикли заряд-розряд, так і складні сценарії випробувань, включаючи прискорені тести старіння, аналіз термальних характеристик та діагностику деградації [8].



Рисунок 1.7 – Chroma 17020 [8]

Система Chroma 17020 базується на модульній архітектурі, де кожен канал може працювати незалежно, дозволяючи одночасно тестувати десятки батарейних модулів. Пристрій має можливість програмування складних сценаріїв (наприклад, імітація режимів експлуатації електромобіля), а також реєструє великі обсяги даних для подальшого аналізу.

Особливістю стенда є підтримка режиму рекуперації енергії: під час розряду батарей надлишкова енергія повертається в мережу, що значно знижує витрати на електроенергію.

У таблиці 1.3 наведено основні технічні параметри лабораторного стенда Chroma 17020, що використовується для тестування Li-ion акумуляторних

модулів і батарей. Ця система вирізняється модульною архітектурою, яка дозволяє масштабувати кількість каналів залежно від потреб дослідження або виробництва. Точність вимірювання напруги та струму, що становить 0,02-0,05 % від повної шкали, забезпечує високу достовірність результатів, а можливість програмування складних режимів випробувань дозволяє моделювати реальні умови експлуатації батарейних систем.

Окремої уваги заслуговує підтримка режиму рекуперації енергії, який дає змогу повертати частину спожитої енергії назад у мережу під час розрядження батарей, що знижує експлуатаційні витрати.

Таблиця 1.3 – Основні характеристики Chroma 17020

Параметр	Значення
Напруга тестування	До 1000 В (залежно від конфігурації)
Струм заряджання/розряджання	До 1200 А (для окремих моделей)
Кількість каналів	Модульна архітектура: 4-256 каналів
Точність вимірювання	Напруга: $\pm 0,02$ % F.S.; струм: $\pm 0,05$ % F.S.
Частота запису даних	До 10 мс
Підтримувані режими	Постійний струм (CC), постійна напруга (CV), постійна потужність (CP), постійний опір (CR)
Інтерфейс керування	Програмне забезпечення Chroma Battery Pro, SCADA-системи
Безпека	Захист від перенапруги, перевищення струму, перегріву, короткого замикання

Таким чином, наведені характеристики демонструють, що Chroma 17020 є висококласним рішенням для лабораторій і промисловості, але його застосування потребує значних фінансових та технічних ресурсів.

Системи управління батареями (Battery Management System, BMS) – це складні електронні комплекси, інтегровані в багатокоміркові акумуляторні батареї, що забезпечують контроль, захист та оптимізацію роботи Li-ion акумуляторів. Вони є критично важливими для безпеки та ефективності експлуатації як у побутових пристроях, так і в масштабних промислових системах (електромобілях, накопичувачах енергії, дронах) [9].

Сучасні системи BMS виконують кілька ключових функцій:

- моніторинг напруги на кожній окремій комірці, щоб уникнути перезарядження або надмірного розряду;
- вимірювання струму заряджання/розрядження для контролю енергетичних потоків;
- вимірювання температури на рівні комірок або модулів для захисту від перегріву;
- балансування комірок (пасивне або активне), щоб усі елементи батареї мали однаковий рівень заряду;
- захист від аварійних станів, таких як коротке замикання, перевантаження, перевищення температури.

BMS складається з низки апаратних компонентів (рис. 1.8) (контролери, сенсори, драйвери) та програмного забезпечення. Вона постійно зчитує значення напруги, струму, температури, розраховує параметри SoC (State of Charge, стан заряду) та SoH (State of Health, стан здоров'я батареї), а також приймає рішення щодо балансування або відключення батареї при виявленні небезпечних станів [10].

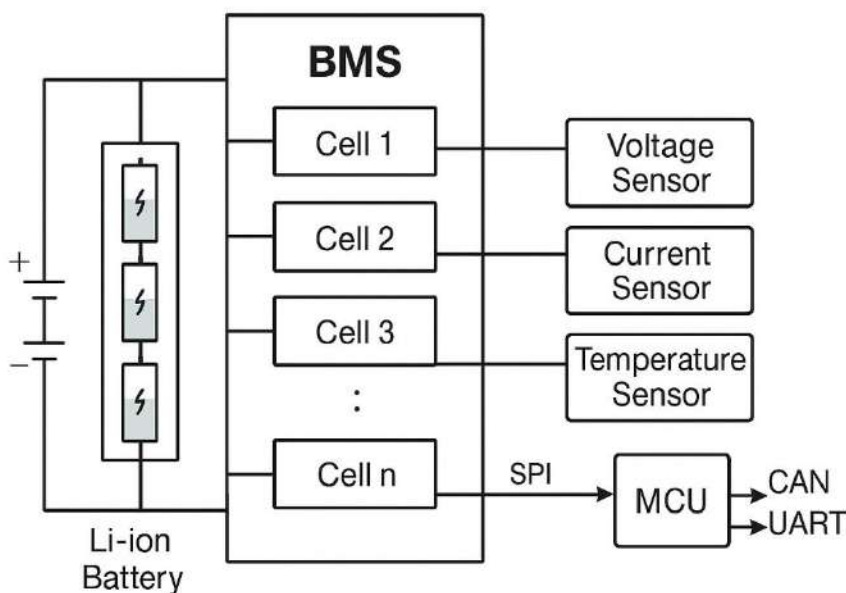


Рисунок 1.8 – Спрощена архітектура BMS для багатокоміркової Li-ion батареї

[10]

INA219 (рис. 1.9) – це високоточний цифровий сенсор струму та напруги, розроблений компанією Texas Instruments. Він дозволяє вимірювати струм і напругу на навантаженні та розраховувати потужність у реальному часі. Цей модуль широко застосовується в проектах на базі Arduino, ESP32 та Raspberry Pi для моніторингу батарей, джерел живлення, сонячних панелей, електродвигунів і вбудованих систем [11].

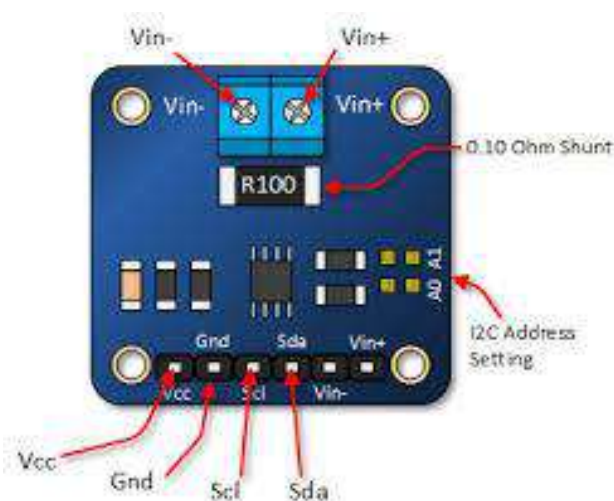


Рисунок 1.9 – Сенсор струму та напруги INA219 [11]

У таблиці 1.4 наведено основні технічні характеристики модуля INA219, який є високоточним сенсором струму та напруги для вбудованих систем. Модуль забезпечує вимірювання струму до $\pm 3,2$ А і напруги до 26 В завдяки вбудованому шунту і 12-16-бітному аналого-цифровому перетворювачу, що дозволяє використовувати його в проектах на базі Arduino, ESP32 та Raspberry Pi.

Особливу увагу слід звернути на підтримку інтерфейсу I²C, що спрощує підключення модуля до мікроконтролерів, а також на низьке енергоспоживання – близько 1 мА в активному режимі, що робить його придатним для використання в енергообмежених системах. Незважаючи на обмежений діапазон струму, INA219 є надійним і доступним рішенням для DIY-тестерів батарей, систем моніторингу живлення та контролю енергоспоживання, забезпечуючи високу точність за доступної ціни.

Таблиця 1.4 – Основні технічні характеристики модуля INA219

Параметр	Значення
Напруга живлення модуля	3,0-5,5 В
Діапазон вимірювання струму	До $\pm 3,2$ А (залежить від шунта)
Діапазон вимірювання напруги	До 26 В (до шини), до ± 320 мВ (падіння на шунті)
Роздільна здатність	12-16 біт
Інтерфейс	I ² C (адреса налаштовується)
Точність вимірювань	До ± 1 %
Споживана потужність	~ 1 мА в активному режимі, ~ 1 μ А в режимі сну

Проведений аналіз показав, що існуючі рішення для вимірювання параметрів Li-ion акумуляторів охоплюють широкий спектр потреб – від простих побутових тестерів, які забезпечують базову перевірку ємності та внутрішнього опору, до високоточних лабораторних стендів і вбудованих BMS-систем, що забезпечують професійний моніторинг та захист у режимі реального часу.

Побутові тестери вирізняються доступністю та простотою, але мають обмежену точність; лабораторні стенди забезпечують масштабованість і високий рівень контролю, проте потребують значних фінансових та технічних ресурсів; BMS-системи є невід'ємною частиною батарейних рішень, але зазвичай мають закриті алгоритми і призначені для інтеграції на етапі проектування. Ці результати підтверджують актуальність розробки доступного, гнучкого тестера на базі відкритих платформ, наприклад, Arduino, який дозволить реалізувати баланс між функціональністю та вартістю для користувачів і розробників.

1.3 Вимоги безпеки при роботі з Li-ion акумуляторами

Літій-іонні (Li-ion) акумулятори – це високоефективні джерела живлення, проте вони є термочутливими й чутливими до механічних пошкоджень, що накладає особливі вимоги до безпеки їх експлуатації, зберігання та тестування.

Порушення цих вимог може призвести до короткого замикання, перегріву, теплового розгону та навіть займання або вибуху акумулятора [12].

Основні ризики:

- перезарядження (перевищення напруги понад 4,2 В для стандартної комірки може викликати деградацію електроліту й утворення газів);
- глибокий розряд (падіння напруги нижче 2,5 В призводить до утворення мідних дендритів на аноді, що підвищує ризик короткого замикання);
- перегрів (підвищення температури понад 60 °С активує термочутливі реакції, які можуть призвести до теплового розгону);
- механічні пошкодження (проколювання, удари чи здавлювання пошкоджують сепаратор, що ізолює електроди, і призводять до внутрішнього замикання).

На рисунку 1.10 зображено основні сценарії небезпечних ситуацій, які можуть виникнути при роботі з літій-іонними (Li-ion) акумуляторами.

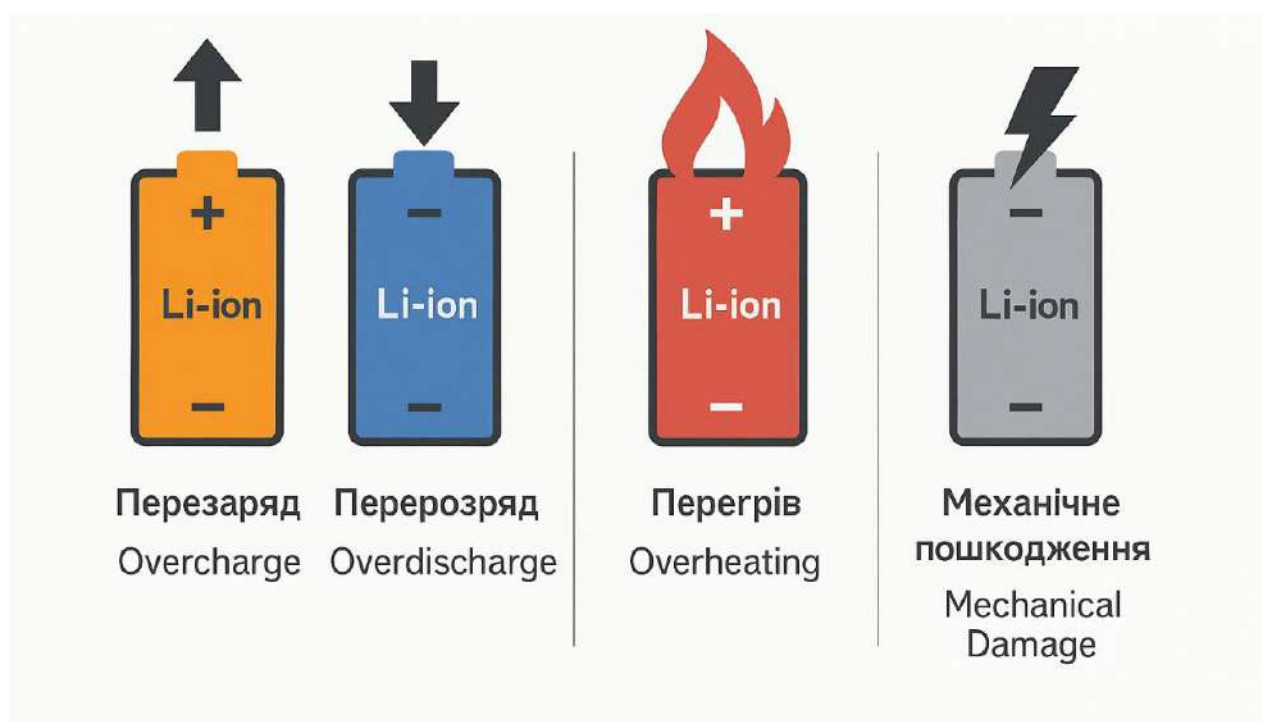


Рисунок 1.10 – Сценарії небезпечних ситуацій у Li-ion акумуляторах [12]

Візуально представлені чотири типові ризики:

– перезаряд (Overcharge) (ситуація, коли напруга на акумуляторі перевищує допустиму межу, що може спричинити утворення газів і пошкодження електроліту);

– перерозряд (Overdischarge) (надмірне зниження напруги, що підвищує ризик утворення внутрішніх коротких замикань через дендритні відкладення);

– перегрів (Overheating) (підвищення температури понад критичний рівень, що активує термохімічні реакції та може призвести до теплового розгону);

– механічне пошкодження (Mechanical Damage) (наслідок проколювання, удару або деформації акумулятора, що руйнує внутрішню структуру і провокує короткі замикання).

Проведено всебічний аналіз характеристик Li-ion акумуляторів, принципів їхньої роботи, існуючих рішень для тестування та вимог безпеки під час експлуатації. Було визначено, що Li-ion акумулятори характеризуються високою питомою енергією, стабільністю напруги та хорошими циклічними властивостями, але потребують уважного контролю параметрів для запобігання деградації та аварійним ситуаціям.

Існуючі рішення для тестування варіюються від простих побутових тестерів до складних лабораторних систем і вбудованих BMS, що дозволяє обрати підхід залежно від поставлених завдань та бюджету. Водночас аналіз засвідчив необхідність дотримання суворих вимог безпеки, зокрема захисту від перезаряду, перерозряду, перегріву та механічних пошкоджень. Це створює передумови для розробки надійних, точних і доступних тестерів на базі Arduino, які можна використовувати як у побуті, так і в навчально-дослідницьких проєктах..

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕСТУВАННЯ НА БАЗІ ARDUINO

2.1 Вибір компонентів апаратної платформи

Для побудови ефективного тестера параметрів Li-ion акумуляторів необхідно ретельно підібрати апаратні компоненти, які забезпечать точність вимірювань, гнучкість системи, безпеку експлуатації та масштабованість рішення. У цьому проєкті використовується апаратна платформа на базі Arduino, яка завдяки своїй відкритій архітектурі та великій екосистемі додаткових модулів є оптимальним вибором для швидкого прототипування й подальших розробок [13].

Для розробки компактного тестера параметрів Li-ion акумуляторів як альтернативу Arduino Uno можна використовувати Arduino Nano V3.0 (рис. 2.1) – мініатюрну плату, яка має повну функціональність Uno, але відрізняється значно меншими розмірами (43 × 18 мм) та можливістю прямого встановлення на макетну плату або вбудовання в друковану плату [13]



Рисунок 2.1 – Arduino Nano V3 [13]

У таблиці 2.1 наведено основні технічні характеристики мікроконтролерної плати Arduino Nano V3.0, яка є компактною альтернативою популярної плати Arduino Uno. Завдяки мікроконтролеру ATmega328P плата

забезпечує повну сумісність з Arduino IDE, підтримку стандартних цифрових та аналогових інтерфейсів, а також здатність працювати на частоті 16 МГц.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики Arduino Nano V3.0

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Робоча напруга	5 В (логічний рівень)
Вхідна напруга (через VIN)	7-12 В
Кількість цифрових входів/виходів	14 (з них 6 можуть використовуватися як PWM)
Кількість аналогових входів	8
Частота роботи	16 МГц
Пам`ять	32 КБ Flash, 2 КБ SRAM, 1 КБ EEPROM
Інтерфейси	UART, I ² C, SPI
Підключення до ПК	Через mini-USB

Особливої уваги заслуговує невеликий фізичний розмір плати (43 × 18 мм), що дозволяє легко інтегрувати її в портативні або обмежені за простором пристрої, зокрема тестери Li-ion акумуляторів. Крім того, Arduino Nano підтримує живлення як через USB (5 В), так і через окремий вхід VIN (7-12 В), що робить її гнучкою для використання в різних джерелах живлення. Наведені параметри демонструють, що Arduino Nano V3.0 є оптимальним вибором для реалізації малогабаритних проєктів, що потребують високої функціональності при мінімальних габаритах.

Arduino Nano V3.0 завдяки своїй розпіновці забезпечує значну гнучкість під час розробки різних схем. Наприклад, цифрові лінії D2-D13 можуть використовуватися як універсальні входи/виходи для керування реле, світлодіодами, MOSFET чи читання цифрових сигналів.

Особливо цінною є підтримка ШІМ (PWM) на пінтах D3, D5, D6, D9, D10, D11, що дозволяє здійснювати регулювання яскравості світлодіодів, швидкості моторів чи плавного керування іншими пристроями.

Аналогові входи A0-A7 можуть зчитувати напругу в діапазоні 0-5 В із роздільністю 10 біт, що забезпечує можливість моніторингу аналогових сигналів, наприклад, з датчиків температури, освітленості чи струму.

Важливо зазначити, що піни A6 та A7 на Nano працюють лише як входи й не мають цифрової функції, на відміну від Uno.

Для підключення модулів, таких як OLED-дисплеї, INA219, RTC (годинник реального часу) чи BME280 (датчик температури та вологості), використовуються інтерфейси I²C (A4-A5) або SPI (D10-D13). Наявність цих апаратних протоколів значно розширює можливості мікроконтролера без перевантаження портів (рис. 2.2).



ARDUINO
NANO

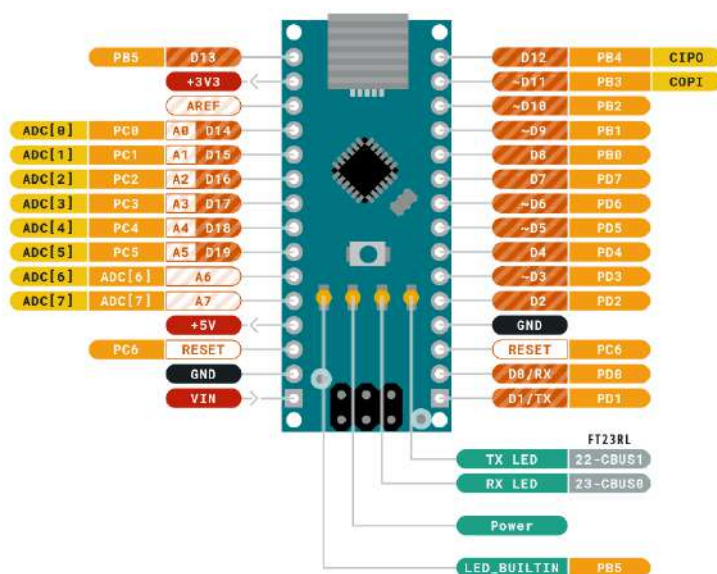


Рисунок 2.2 – Розпіновка Arduino Nano V3 [14]

Для зручного відображення параметрів Li-ion акумулятора (наприклад, напруги, струму, ємності, стану розряду) у тестері доцільно використовувати

LCD-дисплей 2004 з інтерфейсом I²C, який поєднує великий розмір, низьке енергоспоживання й простоту підключення.

LCD 2004 (рис. 2.3) – це рідкокристалічний дисплей, здатний відобразити 4 рядки по 20 символів, що значно перевищує інформативність стандартного LCD 1602. Завдяки вбудованому модулю I²C (на базі PCF8574) дисплей потребує лише двох проводів (SDA, SCL) для підключення до Arduino, що економить порти й спрощує монтаж [15].



Рисунок 2.3 –LCD-дисплей [15]

У таблиці 2.2 наведено основні технічні характеристики LCD-дисплея 2004 з інтерфейсом I²C, який використовується в системі для виведення даних про параметри Li-ion акумуляторів. Дисплей підтримує формат відображення 20 символів на 4 рядки, що дозволяє зручно представити всю необхідну інформацію без перегортання чи оновлення сторінок.

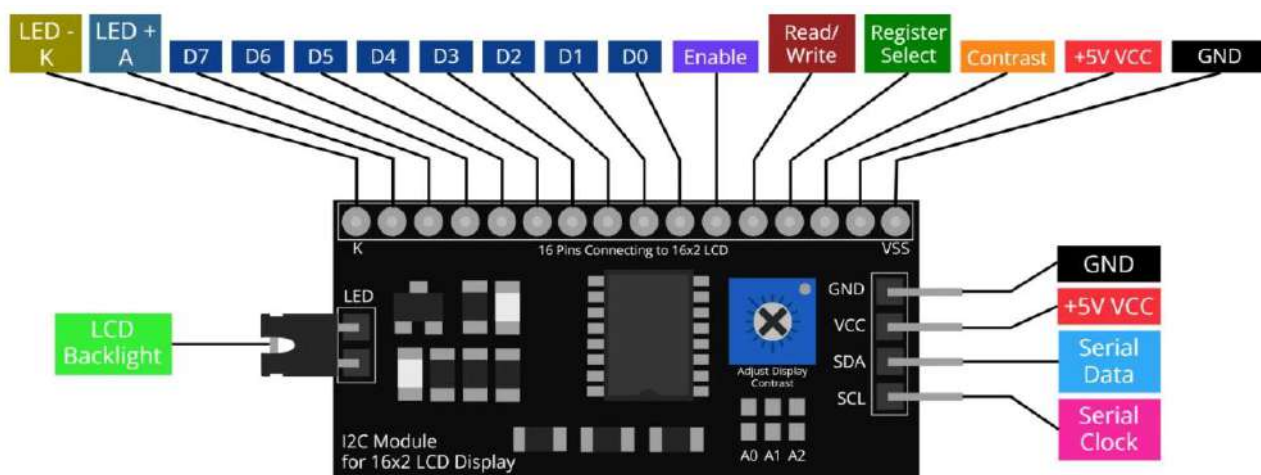
Завдяки наявності I²C-конвертера на базі мікросхеми PCF8574, для підключення до мікроконтролера Arduino необхідно лише дві лінії – SDA та SCL, що звільняє інші порти для додаткових модулів (наприклад, датчик струму або температури). Параметри споживання струму свідчать про енергоефективність модуля, що є важливою перевагою при живленні від акумулятора. Регулювання підсвітки та контрастності дозволяє адаптувати дисплей до різних умов освітлення.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики дисплея LCD 2004

Параметр	Значення
Формат	20 символів × 4 рядки
Контролер	HD44780 або сумісний
Інтерфейс	I ² C (через PCF8574), адреса зазвичай 0x27 або 0x3F
Напруга живлення	5 В (через Arduino або окремий стабілізатор)
Рівень логіки	5 В
Регулювання яскравості	Через потенціометр на I ² C-модулі
Споживання струму	~1-2 мА (без підсвітки), до 20 мА з підсвіткою

LCD 2004 є ефективним і доступним рішенням для відображення даних у системі тестування Li-ion акумуляторів. Великий розмір, економне використання пінів і підтримка бібліотек роблять його ідеальним для навчальних, побутових і лабораторних розробок.

I²C (Inter-Integrated Circuit) (рис. 2.4) – це синхронний двоканальний послідовний інтерфейс, розроблений компанією Philips (нині NXP Semiconductors) для обміну даними між мікроконтролерами та периферійними пристроями на невеликих відстанях. Завдяки своїй простоті, надійності та універсальності, інтерфейс I²C широко використовується в пристроях інтернету речей, портативній електроніці та системах контролю [16].

Рисунок 2.4 – Схема розпіновки модуля послідовного інтерфейсу I²C [16]

В таблиці 2.4 наведено основні технічні характеристики інтерфейсу I²C (Inter-Integrated Circuit), який широко використовується в системах на базі

мікроконтролерів для підключення сенсорів, дисплеїв, модулів живлення та пам'яті.

Протокол підтримує швидкість передачі даних до 3,4 МГц, проте в більшості побутових застосувань використовується стандартна швидкість 100 кГц або швидкий режим 400 кГц. Зазначено, що I²C дозволяє підключати до 127 пристроїв на одній шині, що забезпечує хорошу масштабованість проєктів, зокрема у тестерах Li-іон акумуляторів.

Також зазначено, що для стабільної роботи необхідно використовувати підтягувальні резистори на кожній з ліній, а довжина шини обмежується фізичними параметрами провідників. Дані параметри демонструють ефективність та економічність інтерфейсу I²C, особливо в контексті використання з Arduino-платами.

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики інтерфейсу I²C

Параметр	Значення
Кількість ліній	2 (SDA – передача/прийом даних, SCL – тактовий сигнал)
Швидкість передавання	100 кГц (стандартна), 400 кГц (швидка), до 3,4 МГц
Адресація	7-бітна (до 127 пристроїв), іноді 10-бітна
Логічні рівні	Сумісність із 3,3 В і 5 В логікою
Довжина шини	До 1 м (при низьких швидкостях)

I²C дозволяє легко масштабувати систему, підключаючи кілька сенсорів і дисплеїв, не перевантажуючи мікроконтролер Arduino Nano.

Модуль TP4056 Micro-USB є одним із найпопулярніших рішень для заряджання літій-іонних акумуляторів (Li-іон 3.7 В), завдяки своїй компактності, низькій вартості та інтегрованим функціям захисту. Модуль базується на мікросхемі TP4056 виробництва NanJing Top Power ASIC Corp, яка забезпечує лінійний заряд акумулятора зі стабільним струмом, а також слідкує за напругою на елементі.

Оновлені версії TP4056 оснащуються також мікросхемами DW01A та FS8205A або аналогами – що забезпечує захист від перезаряду, перерозряду, перевищення струму та короткого замикання [17].

На рисунку 2.5 зображено друковану плату зарядного модуля TP4056 з роз'ємом Micro-USB для живлення від стандартного джерела 5 В (наприклад, від USB-адаптера чи павербанку). У центрі розміщено основну мікросхему TP4056, що реалізує алгоритм заряджання літій-іонного елемента струмом до 1 А. Поруч видно додаткові мікросхеми захисту – контролер DW01A, що слідкує за граничними значеннями напруги, та подвійний n-канальний MOSFET FS8205A, який фізично розмикає коло при перевищенні порогових значень (перезаряд, перерозряд або коротке замикання). На платі також присутні контактні площадки V+ і V– для підключення акумулятора, а також OUT+ і OUT– – для навантаження або живлення схеми. Світлодіоди індикації (зазвичай червоного та синього кольору) сигналізують про статус зарядки.

Даний модуль зручний для вбудовування в портативні пристрої, зокрема – в тестер параметрів Li-іон акумуляторів, де потрібна автоматизація заряджання та захист елемента живлення.

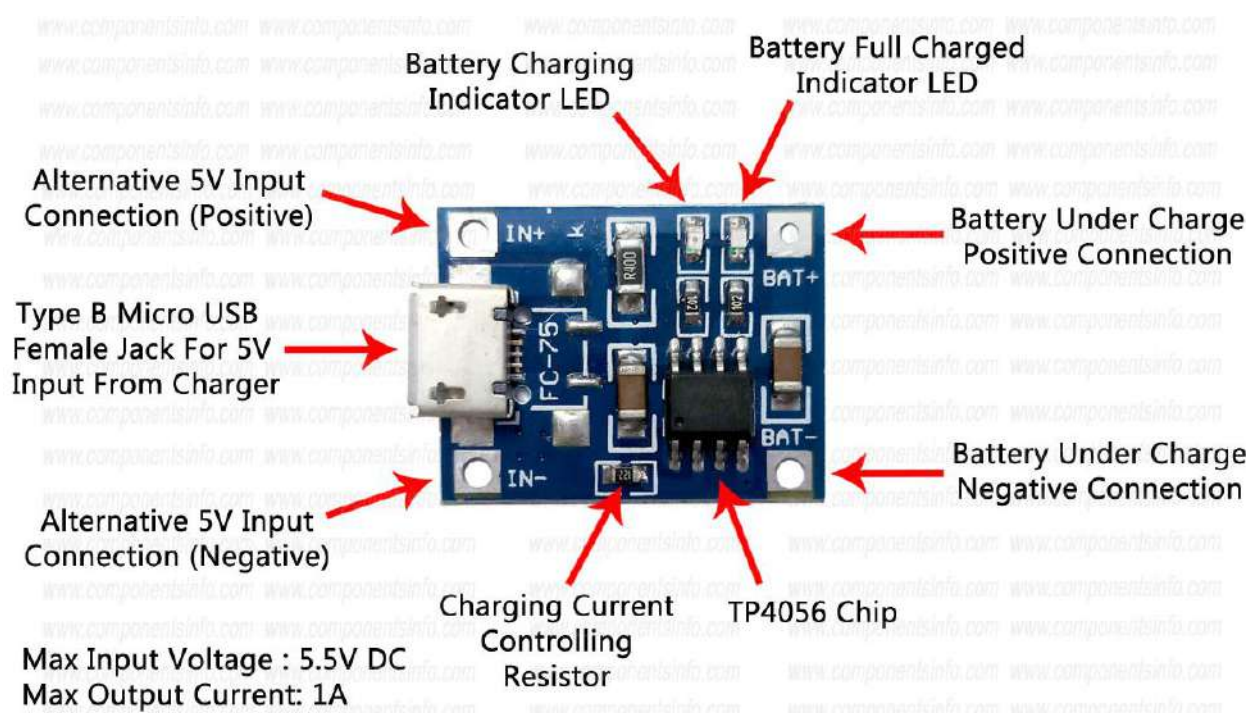


Рисунок 2.5 – Схема розпіновки модуля зарядного пристрою TP4056 [17]

В таблиці 2.5 представлено ключові параметри зарядного модуля TP4056 Micro-USB, який використовується для безпечного заряджання одного літій-

іонного елемента живлення з номінальною напругою 3,7 В. Таблиця містить значення вхідної напруги (5 В), цільової зарядної напруги (4,2 В), максимального струму заряджання (до 1000 мА), а також перелік реалізованих захисних функцій, серед яких – захист від перезаряду, перерозряду, короткого замикання та перевищення струму. Також зазначено, що струм заряджання залежить від зовнішнього резистора RPROG, а інтерфейс підключення може здійснюватися як через роз'єм Micro-USB, так і безпосередньо через контактні площадки IN+/IN-. Параметри індикації та фізичні розміри плати підкреслюють зручність модуля для використання в портативних розробках.

Таблиця 2.5 – Основні технічні характеристиками модуля TP4056

Параметр	Значення
Вхідна напруга	4,5-5,5 В (рекомендовано 5 В через Micro-USB)
Зарядна напруга	4,2 В \pm 1%
Струм заряджання (типовий)	1000 мА (залежить від резистора RPROG)
Інтерфейс	Micro-USB або контактні площадки IN+ / IN-
Захист від перезаряду	> 4,28 В
Захист від перерозряду	< 2,5 В
Захист від перевищення струму	~3 А
Захист від короткого замикання	Так
Світлодіодна індикація	Червоний – заряд, Синій – повністю заряджено
Розміри	~25 × 19 × 1 мм

Таким чином, наведена таблиця 2.5 дає змогу швидко оцінити функціональні можливості модуля TP4056 та обґрунтувати його вибір для застосування в складі тестера параметрів Li-ion акумуляторів.

Модуль реле на 5 В із високорівневим керуванням використовується для керування потужним навантаженням змінного або постійного струму за допомогою слабких цифрових сигналів із мікроконтролера. У таких модулях спрацювання реле відбувається при подачі логічної «1» (близько 5 В) на керуючий вхід IN, що відрізняє його від low-level (низькорівневих) модулів, які активуються логічним «0».

На рисунку 2.6 зображено одноканальний релейний модуль, що керується логічним сигналом високого рівня (high level trigger). Видно основні конструктивні елементи: реле типу SRD-05VDC-SL-C, оптрон, світлодіод індикації, а також контактні клеми живлення (VCC, GND), керуючого сигналу (IN) і комутації навантаження (NC, NO, COM).

Реле має виводи COM (загальний контакт), NO (нормально розімкнутий) та NC (нормально замкнутий), що дозволяє підключати як пристрої, які мають вмикатися при спрацюванні реле, так і ті, що мають розмикатися. Світлодіод на платі світиться під час активного стану реле, сигналізуючи про замикання контактної групи.

Оптрон забезпечує гальванічну розв'язку між логікою керування Arduino та релейною частиною, підвищуючи безпечність роботи схеми. Компактність та універсальність модуля роблять його придатним для застосування у вимірювальних системах, тестерах акумуляторів та інших автоматизованих пристроях.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд модуля реле 5В з високорівневим входом [18]

В таблиці 2.6 наведено технічні характеристики одноканального модуля реле 5В 10А з високорівневим керуванням, який використовується для комутації потужного навантаження у системах на базі мікроконтролерів. Вказано робочу напругу (5 В), тип активації (логічна «1»), максимальний струм та напругу

навантаження, а також інформацію про наявність оптронної розв'язки та індикатора стану. Ці параметри дозволяють оцінити надійність модуля, його енергоспоживання, а також сумісність із платформами Arduino для використання в схемах автоматизованого керування навантаженням, зокрема в проєктах тестування Li-ion акумуляторів.

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики одноканального модуля реле 5 В 10 А

Параметр	Значення
Робоча напруга	5 В постійного струму
Керування	Високий рівень (High level trigger)
Струм споживання в активному стані	~70-80 мА
Максимальний струм комутації	10 А
Максимальна напруга комутації	250 В АС або 30 В DC
Ізоляція	Оптрон (оптронабор)
Світлодіодна індикація	Є (показує стан реле)
Розміри	~50 × 26 × 18 мм

Проведений аналіз компонентної бази дозволив сформувати оптимальну апаратну платформу для реалізації тестера параметрів Li-ion акумуляторів.

Обрана мікроконтролерна плата Arduino Nano V3.0 забезпечує достатню обчислювальну потужність, компактність і широкі можливості для підключення периферії. Використання модуля реле з високорівневим керуванням дає змогу ефективно комутувати навантаження, а модуль TP4056 забезпечує безпечне заряджання акумулятора з контролем критичних параметрів.

Дисплей LCD 2004 I²C забезпечує зручне відображення даних, тоді як датчик струму INA219 дозволяє з високою точністю реєструвати напругу та силу струму. Така конфігурація апаратної частини відповідає вимогам до точності, безпеки та енергоефективності, що є критичними для систем тестування елементів живлення.

2.2 Розробка електричної схеми пристрою

Проектування електричної схеми тестера є ключовим етапом створення пристрою, який дозволяє зчитувати основні параметри Li-ion акумулятора – напругу, струм, ємність, а також забезпечити автоматизований процес заряджання та розряджання з фіксацією контрольних значень. Схема реалізується на основі мікроконтролера Arduino Nano V3.0, який виступає керуючим центром системи, координуючи роботу всіх підключених модулів.

Основними елементами схеми є:

- Arduino Nano V3.0 – основний обчислювальний модуль;
- датчик INA219 призначений для вимірювання струму та напруги з високою точністю через I²C-інтерфейс;
- релейний модуль 5V (high-level trigger), який керує підключенням резистивного навантаження до акумулятора під час тесту розряджання;
- резисторне навантаження – елемент, через який розряджається акумулятор при вимірюванні ємності;
- зарядний модуль TP4056 з захистом, який забезпечує безпечне заряджання Li-ion акумулятора.
- LCD-дисплей 2004 із шиною I²C – виводить виміряні дані в реальному часі;
- живлення, яке подається через USB або зовнішній блок живлення (5 V).

На рисунку 2.7 представлено принципову електричну схему тестера для визначення параметрів Li-ion акумуляторів. Центральним елементом системи виступає мікроконтролер Arduino Nano V3.0, до якого підключено всі периферійні модулі.

До ліній SDA (A4) та SCL (A5) Arduino приєднано одразу два пристрої через інтерфейс I²C:

- модуль INA219, який вимірює струм і напругу акумулятора;
- LCD-дисплей 2004, що виводить поточні дані в реальному часі.

Релейний модуль підключено до цифрового піну D7, і він керує подачею навантаження (резистора) на вихід акумулятора. Після активації реле, струм протікає через INA219, резистор і замкнений контакт реле, що дозволяє Arduino здійснювати вимірювання протягом усього розрядного циклу.

Живлення системи подається через USB або VIN Arduino, а заряджання Li-ion акумулятора здійснюється окремим модулем TP4056 з Micro-USB, який підключено безпосередньо до елемента. У схемі передбачено окремі контакти В+/В- для підключення акумулятора, а також OUT+/OUT- – для навантаження.

Схема має компактне, але логічно структуроване компонування, яке забезпечує просте збирання, зручність тестування та безпечне керування процесами заряджання й розряджання акумулятора.

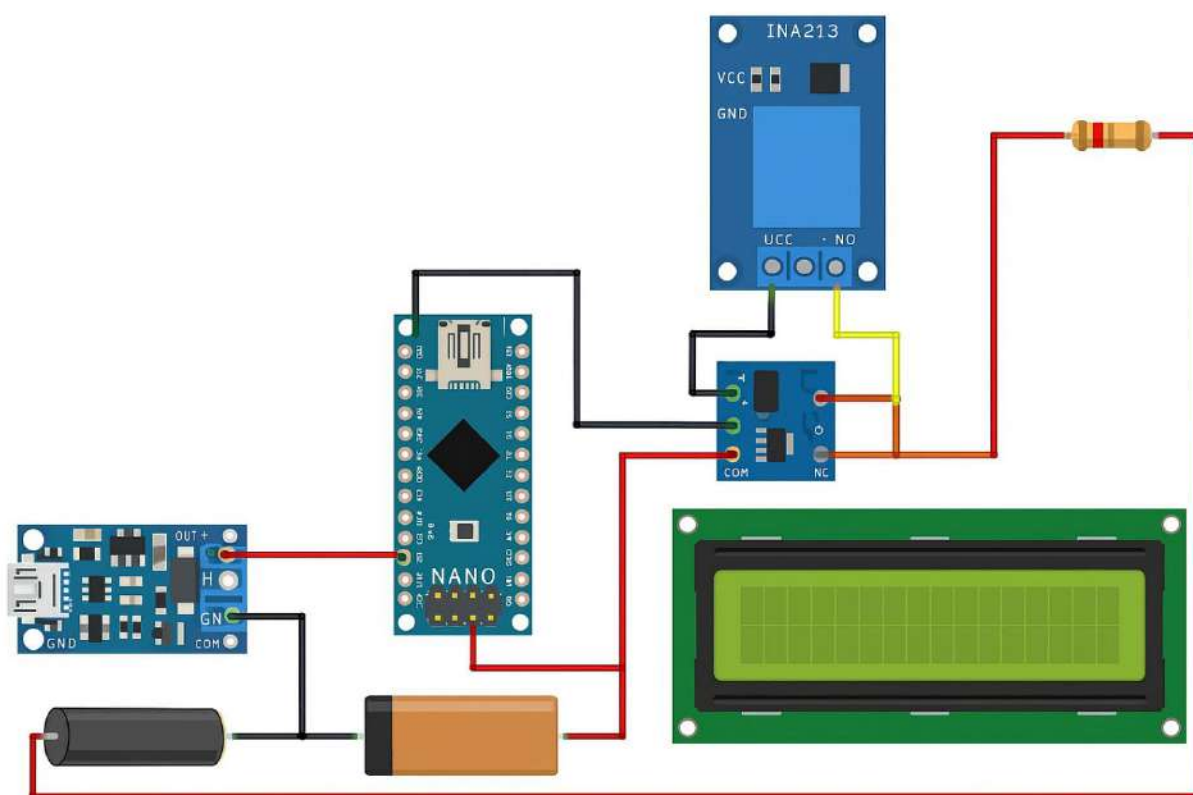


Рисунок 2.7 – Принципова електрична схема тестера Li-ion акумуляторів на базі Arduino Nano

2.3 Забезпечення енергоефективності й стабільності роботи пристрою

Енергоефективність та стабільність функціонування є критично важливими аспектами при проектуванні систем для довготривалого автономного вимірювання параметрів акумуляторів. У контексті розробленого тестера на базі Arduino Nano реалізовано комплекс апаратних і програмних рішень, які дозволяють знизити споживання енергії, забезпечити стабільність вимірювань і продовжити ресурс елементів живлення.

Arduino Nano характеризується низьким енергоспоживанням, особливо у режимі очікування, і це дає змогу додатково зменшити витрати енергії шляхом реалізації програмного переходу в режим сну між циклами вимірювання. Дисплей, що використовується в системі, активний лише під час виведення інформації, і його підсвітку можна вимикати під час простою, що знижує загальне навантаження. Датчик струму INA219, який виконує безперервне вимірювання струму і напруги, також підтримує режим зниженого енергоспоживання, що доречно після завершення вимірювань. Зарядний модуль TP4056 після завершення заряду акумулятора майже не споживає струму, що позитивно впливає на енергоефективність системи в цілому. Релейний модуль вмикається лише на період активного розрядження і не споживає помітної енергії в інший час, оскільки керується програмно за допомогою цифрового виходу мікроконтролера.

Живлення тестера здійснюється стабільно від джерела постійної напруги 5 В, що може подаватися через USB або зовнішній акумулятор. Для компенсації падіння напруги, пов'язаного з розрядом батареї, використовується підсилювальний модуль, наприклад MT3608, що дозволяє підтримувати постійний рівень напруги у системі. Для захисту мікроконтролера від нестабільностей у мережі живлення у схемі використовуються конденсатори з ємністю 100-470 мкФ, розміщені біля критичних вузлів, таких як Arduino та реле. Застосування інтерфейсу I²C замість SPI дозволяє зменшити кількість активних ліній та, відповідно, зменшити електромагнітне навантаження на контролер.

Крім того, реле ізольоване від логічної частини за допомогою оптронного або MOSFET-керування, що забезпечує надійну роботу в умовах зміни навантаження.

Втрата енергії під час вимірювання зведена до мінімуму завдяки використанню INA219 у високобічному режимі, що дозволяє уникати втрат на потенціалі землі. Використання шунтового резистора з низьким опором, у межах 0,01-0,1 Ом, мінімізує теплові втрати при проходженні струму через вимірювальну лінію.

Для підвищення надійності даних у програмному забезпеченні буде реалізовано алгоритмічні заходи згладжування, зокрема усереднення значень за методом рухомого середнього, що дозволяє зменшити вплив короточасних флуктуацій напруги та струму. Для запобігання глибокому розряду акумулятора введено порогове відключення навантаження при досягненні критичного рівня напруги (2,8-3,0 В), а інтервал оновлення інформації на дисплеї обрано таким чином, щоб мінімізувати навантаження на мікроконтролер і шину I²C, не втрачаючи при цьому точності представлення результатів. Усе це забезпечує баланс між стабільністю і точністю вимірювань пристрою.

В таблиці 2.7 наведено узагальнені дані щодо енергоспоживання основних апаратних компонентів тестера для вимірювання параметрів Li-ion акумуляторів. Вказано номінальні значення напруги живлення кожного модуля, типовий струм споживання в активному та пасивному режимах, а також пояснення до кожної конфігурації.

Мікроконтролер Arduino Nano V3.0, що є основним обчислювальним блоком системи, споживає приблизно 19 мА під час виконання коду. Датчик INA219, який здійснює точні вимірювання струму і напруги, характеризується низьким рівнем енергоспоживання – близько 1 мА, і підтримує режим зниженого енергоспоживання. Дисплей LCD 2004 I²C, який використовується для виведення даних, споживає до 20 мА, проте програмно може переводитися у неактивний режим із вимкненою підсвіткою.

Модуль заряджання TP4056 у фазі активного заряду споживає значний струм – до 500 мА, однак після завершення процесу заряджання його споживання падає до мікроамперного рівня. Релейний модуль, що комутує навантаження під час тестування, споживає до 70 мА у активному стані, але практично не навантажує систему в режимі очікування (близько 0,5 мА).

Більшість компонентів є малопотужними, і лише деякі (наприклад, TP4056 та реле) вимагають врахування високого струмового навантаження під час роботи. Ці дані є важливими для розрахунку загального енергобалансу системи та проектування стабільного живлення тестера.

Таблиця 2.7 – Енергоспоживання основних компонентів тестера

№	Компонент	Напруга живлення, В	Споживання струму, мА	Режим роботи/ Примітки
1.	Arduino Nano V3.0	5	19	Активне виконання програми
2.	INA219 (датчик струму)	3.3	1	Підтримує low-power режим
3.	LCD 2004 I ² C	5	20	Підсвітку можна вимикати
4.	TP4056 (у режимі заряджання)	5	500	Максимальний зарядний струм
5.	TP4056 (у режимі очікування)	5	0.05	Струм знижується до мікроампер
6.	Релейний модуль (активний)	5	70	Під час розряджання акумулятора
7.	Релейний модуль (неактивний)	5	0.5	Майже нульове споживання

В даному розділі було здійснено детальний аналіз, підбір та обґрунтування апаратної частини тестера для вимірювання параметрів Li-ion акумуляторів. Основою системи обрано мікроконтролер Arduino Nano V3.0, що забезпечує достатній рівень обчислювальної потужності, компактність та зручність програмування. До нього інтегровано сенсор струму INA219 для точного вимірювання напруги та струму, модуль індикації LCD 2004 з I²C-інтерфейсом, а

також зарядний модуль TP4056 з вбудованим захистом та релейний блок для навантаження.

Розроблено принципову електричну схему всієї системи, яка забезпечує надійне з'єднання компонентів і стабільність роботи пристрою. Особливу увагу приділено енергоефективності – зібрана система характеризується низьким енергоспоживанням у режимах очікування та вимірювання, що дозволяє використовувати її в умовах автономного живлення. Засоби стабілізації напруги, вибір low-power компонентів та реалізація алгоритмічних рішень сприяють тривалому терміну експлуатації тестера без втрати точності вимірювань.

Отже, апаратна платформа є збалансованою за критеріями вартості, енергоспоживання та функціональності й відповідає сучасним вимогам до пристроїв цього класу.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДКЛЮЧЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ТЕСТЕРА

3.1 Архітектура системи та функціонального взаємозв'язку компонентів

Архітектура розробленого тестера Li-ion акумуляторів базується на централізованій взаємодії між мікроконтролером Arduino Nano V3.0 та периферійними модулями, що забезпечують вимірювання, індикацію, керування навантаженням і заряджанням акумулятора. Arduino виконує роль основного керуючого пристрою, який ініціалізує роботу інших компонентів, здійснює обробку даних та формує логіку процесу тестування.

Ключовим вузлом вимірювання є модуль INA219, який підключається до Arduino через шину I²C і дозволяє точно вимірювати струм та напругу на акумуляторі. Ці параметри необхідні для обчислення потужності та приблизної ємності батареї за допомогою методу інтегрування струму у часі. Дані з INA219 передаються в Arduino, де проходять попередню обробку – фільтрацію, усереднення та порівняння з пороговими значеннями.

Візуалізація результатів реалізована за допомогою LCD-дисплея формату 2004 з інтерфейсом I²C, що також з'єднаний з Arduino через ті самі лінії SDA та SCL, забезпечуючи економне використання виводів контролера. Дисплей відображає основні параметри акумулятора – поточну напругу, силу струму, статус (заряд/розряд), а також хід виконання тесту.

Модуль TP4056 відповідає за заряджання акумулятора і має вбудовані функції захисту від перенапруги, перезаряду, короткого замикання та надструму. Він також забезпечує живлення для мікроконтролера Arduino через USB. При тестуванні акумулятор попередньо заряджається до повного рівня, після чого TP4056 відключає заряд за внутрішнім порогом.

Для організації процесу розряду використовується 5 В релейний модуль, який комутує резистивне навантаження. Arduino керує станом реле через

цифровий пін, активуючи його лише в межах дозволеного розрядного інтервалу. При досягненні мінімальної напруги (наприклад, 2,8 В) контролер вимикає реле для запобігання глибокому розряду акумулятора.

Уся система живиться від акумулятора, підключеного до TP4056, з можливістю стабілізації напруги за допомогою підсилювального модуля MT3608. Для забезпечення безперебійної роботи також застосовуються електролітичні конденсатори та фільтри, що згладжують імпульсні перешкоди під час перемикання реле.

Таким чином, усі компоненти тестера злагоджено функціонують у рамках єдиної архітектури, що базується на мікроконтролерному керуванні з використанням цифрових інтерфейсів та реалізованою логікою послідовного тестування акумулятора: від заряджання – до розряду з вимірюванням і виведенням результатів. Це дозволяє досягти автоматизації процесу та високої точності вимірювань при мінімальному ручному втручанні.

3.2 Підключення сенсора струму INA219

Підключення INA219 до мікроконтролера Arduino Nano (рис. 3.1) здійснюється через інтерфейс I²C, що забезпечує передачу даних з високою точністю та мінімальною кількістю проводів. Стандартне з'єднання включає чотири сигнальні контакти:

- VCC – живлення модуля (підключається до 5 В Arduino);
- GND – земля, спільна для всієї системи;
- SDA – лінія передачі даних (з'єднується з піном A4 на Arduino Nano);
- SCL – лінія тактування (з'єднується з піном A5 на Arduino Nano).

Окрім цифрового інтерфейсу, INA219 має вхідний шунтовий канал, що з'єднується послідовно з навантаженням або джерелом струму. Залежно від конфігурації, сенсор можна підключити у високобічному (high-side) або низькобічному (low-side) режимі. У проєкті тестера Li-ion акумуляторів реалізовано високобічне підключення: шунт вбудовано безпосередньо в модуль,

і струм розряду акумулятора протікає через цей шунт перед подачею на резистивне навантаження.

На рівні програмного забезпечення зчитування параметрів здійснюється через бібліотеку `Adafruit_INA219.h`, яка підтримує функції вимірювання струму (у мА), напруги (у В) та розрахованої потужності (у мВт). Бібліотека дозволяє виводити значення у зручному форматі та забезпечує калібрування під різні типи шунтових опорів.

Таке підключення дає змогу мікроконтролеру Arduino Nano в реальному часі контролювати параметри розряду акумулятора, забезпечуючи точність та безпеку вимірювання. Це дозволяє не лише зібрати коректні дані для подальшого розрахунку ємності, а й реалізувати автоматичне завершення тесту при досягненні порогових значень напруги.

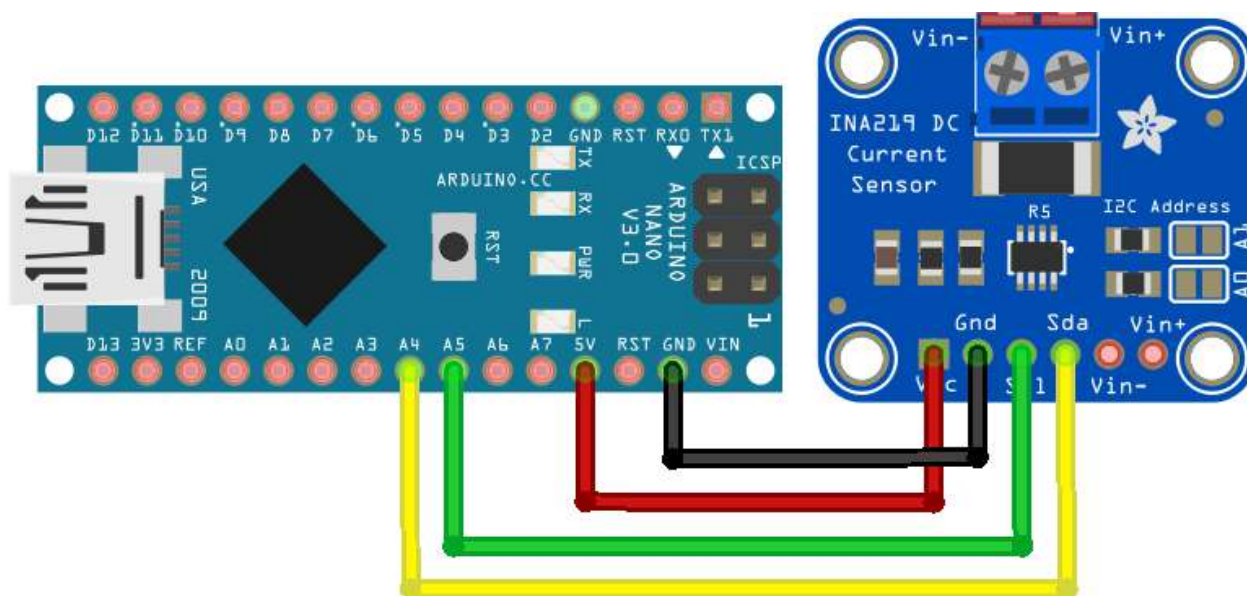


Рисунок 3.1 – Схема підключення сенсора струму INA219 до Arduino Nano

На рисунку 3.2 приклад базового коду для ініціалізації та зчитування значень з модуля INA219 на платформі Arduino Nano, з використанням бібліотеки `Adafruit_INA219`.

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>

// Створення об'єкта INA219
Adafruit_INA219 ina219;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    delay(1); // Чекаємо, поки відкриється серійний порт (для Leonardo, Micro)
  }

  // Ініціалізація I2C та сенсора
  if (!ina219.begin()) {
    Serial.println("Не знайдено модуль INA219. Перевірте підключення.");
    while (1) { delay(10); }
  }

  Serial.println("Модуль INA219 ініціалізовано успішно.");
}

void loop() {
  float busVoltage_V = ina219.getBusVoltage_V(); // Напруга на шині
  float current_mA = ina219.getCurrent_mA(); // Струм
  float power_mW = ina219.getPower_mW(); // Потужність
  float shuntVoltage_mV = ina219.getShuntVoltage_mV(); // Напруга на шунті

  Serial.print("Напруга (V): ");
  Serial.print(busVoltage_V);
  Serial.print(" | Струм (mA): ");
  Serial.print(current_mA);
  Serial.print(" | Потужність (mW): ");
  Serial.print(power_mW);
  Serial.print(" | Напруга на шунті (mV): ");
  Serial.println(shuntVoltage_mV);

  delay(1000); // Затримка між вимірюваннями
}

```

Рисунок 3.2 – Код ініціалізації та зчитування INA219

3.3 Підключення LCD 2004 з інтерфейсом I²C

Для зручного виведення вимірюваних параметрів (напруга, струм, ємність, стан акумулятора) у складі тестера використовується LCD-дисплей 2004 з

вбудованим модулем I²C-конвертера на базі мікросхеми PCF8574. Такий дисплей дозволяє виводити до 80 символів одночасно – по 20 символів у кожному з 4 рядків – що дає змогу представити всю необхідну інформацію без перемикання екранів або прокрутки.

Інтерфейс I²C (Inter-Integrated Circuit) забезпечує двосторонній обмін даними між Arduino і дисплеєм за допомогою лише двох цифрових ліній: SDA (Serial Data) та SCL (Serial Clock). Це дозволяє мінімізувати кількість з'єднань та звільнити цифрові порти мікроконтролера для інших задач.

Підключення дисплея до Arduino Nano здійснюється наступним чином (рис. 3.3):

- контакт VCC дисплея під'єднується до 5 В Arduino;
- контакт GND – до загальної землі системи;
- контакт SDA – до виводу A4 Arduino Nano;
- контакт SCL - до виводу A5 Arduino Nano.

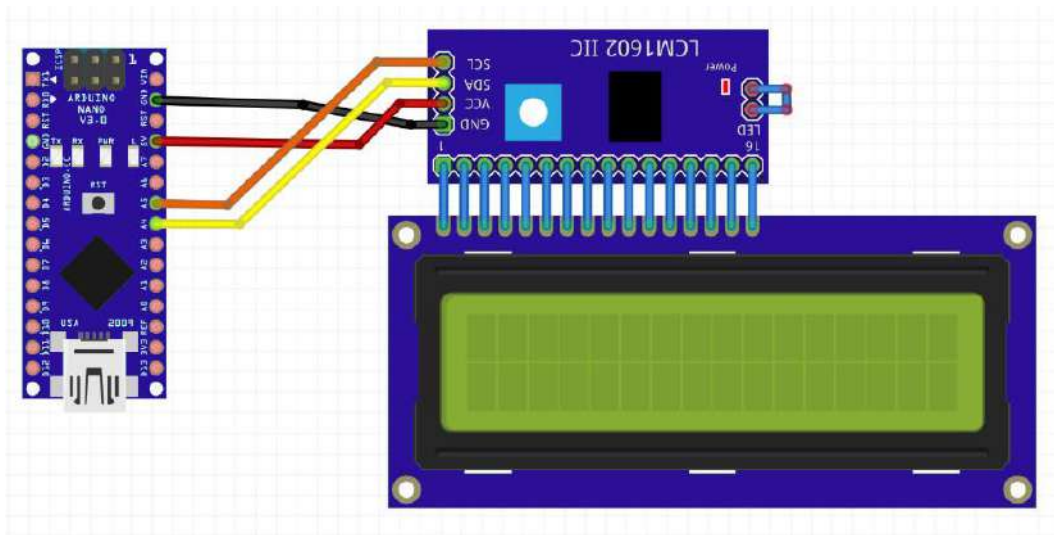


Рисунок 3.3 – Схема підключення дисплея до Arduino Nano

Для коректної роботи дисплея використовується бібліотека `LiquidCrystal_I2C.h`, яка дозволяє легко ініціалізувати модуль, задати розміри дисплея та виводити текст у задані координати. Крім того, на платі I²C-модуля

розміщено потенціометр для регулювання контрастності, що дозволяє адаптувати відображення до умов освітлення (рис. 3.4).

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Створення об'єкта дисплея: адреса 0x27, 20 колонок, 4 рядки
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

void setup() {
  lcd.init();           // Ініціалізація
  lcd.backlight();     // Увімкнення підсвітки
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Тестер Li-ion");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Заряд: 100%");
}
```

Рисунок 3.4 – Коду ініціалізації дисплея

У деяких модулях I²C-інтерфейсу адреса може відрізнитися – наприклад, 0x3F замість 0x27. Для визначення точної адреси використовується скетч I²C Scanner, доступний через Arduino IDE. Після ініціалізації дисплея можна реалізувати динамічне оновлення значень параметрів (наприклад, напруга, струм, стан реле), які будуть відображатись на відповідних рядках.

3.4 Підключення зарядного модуля TP4056

У проєкті модуль TP4056 використовується для безпечного попереднього заряджання акумулятора перед фазою розряджання, що забезпечує стандартизовані умови для тестування.

Використовується модифікація модуля TP4056 з вбудованою схемою захисту (DW01 + 8205A), що гарантує:

- відключення при перенапрузі (>4,25 В);
- відключення при глибокому розряді (<2,5 В);
- захист від короткого замикання та перевищення струму.

Підключення модуля відбувається наступним чином (рис. 3.5):

- IN+ – підключається до джерела живлення 5 В (USB, акумуляторний блок або підсилювач живлення);
- IN- – до GND (землі);
- V+ та V- – до акумулятора (відповідно + та –);
- OUT+ та OUT- – до навантаження.

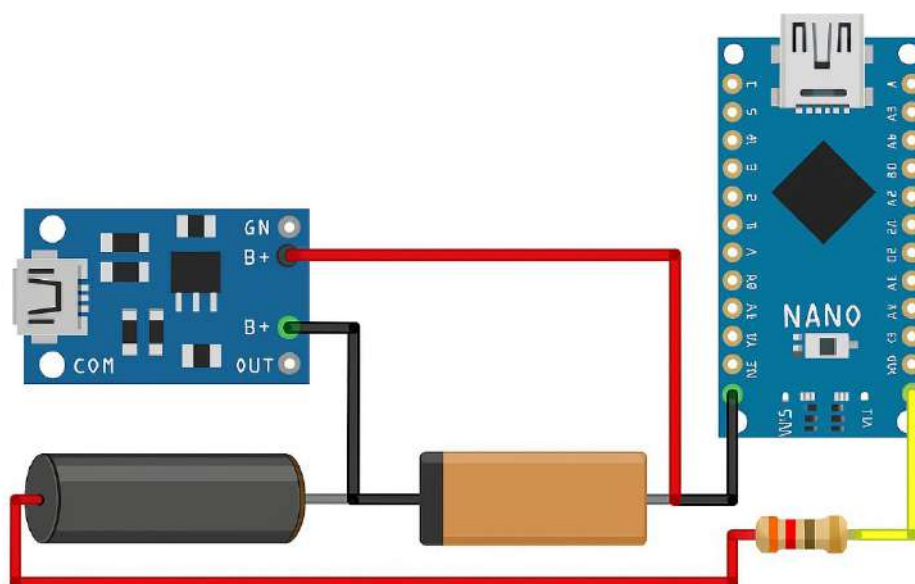


Рисунок 3.5 – Схему підключення модуля TP4056

Для заряджання через USB можна скористатися вбудованим Micro-USB роз'ємом, що спрощує процес живлення тестера. При роботі з Arduino важливо враховувати, що вихід TP4056 може бути підключений до модулів з низьким споживанням або через кероване реле, щоб уникнути перевантаження мікросхеми.

Стан заряджання індикуюється двома світлодіодами:

- CHRG (червоний) – активний процес зарядки;
- DONE (синій/зелений) – завершення заряджання.

Цей модуль є критично важливим компонентом системи, оскільки забезпечує надійне, контрольоване і безпечне заряджання акумуляторів перед початком кожного тестового циклу.

На рисунку 3.6 подано код Arduino для взаємодії із зарядним модулем TP4056.

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>

Adafruit_INA219 ina219;

// Порогова напруга для повного заряду (В)
#define FULL_CHARGE_VOLTAGE 4.15

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  ina219.begin();

  Serial.println("Моніторинг TP4056 через INA219");
}

void loop() {
  float voltage = ina219.getBusVoltage_V();
  float current = ina219.getCurrent_mA();

  Serial.print("Напруга: ");
  Serial.print(voltage);
  Serial.print(" В | Струм: ");
  Serial.print(current);
  Serial.println(" мА");

  if (voltage >= FULL_CHARGE_VOLTAGE && abs(current) < 50) {
    Serial.println("✅ Заряд завершено. Можна розпочати розряд.");
    // Тут можна активувати реле для розряджання
  }

  delay(1000); // Затримка між вимірюваннями
}

```

Рисунок 3.6 – Код для моніторингу TP4056

3.5 Підключення релейного модуля

Для автоматизованого керування процесом розряджання Li-ion акумулятора у складі тестера застосовується одноканальний релейний модуль 5 В із високорівневим (High-Level Trigger) керуванням. Основне призначення

цього елемента – вмикати та вимикати навантаження (резистор) в обхід людського втручання, відповідно до логіки, закладеної в програму мікроконтролера.

Реле працює як електричний вимикач, що спрацьовує при подачі логічного сигналу на вхід IN. Для розрядження акумулятора через резистивне навантаження Arduino активує реле, замикаючи коло між акумулятором, сенсором струму (INA219) і навантаженням. Таким чином, вмикання реле означає запуск фази розрядження, а вимикання – завершення вимірювання або досягнення порогової напруги.

Схема підключення реле (рис. 3.7):

- IN – керуючий вхід, підключений до цифрового піну Arduino (наприклад, D7);
- VCC – підключається до 5 В живлення (від Arduino Nano);
- GND – до загального «мінуса» системи;
- COM – спільний контакт релейної групи.

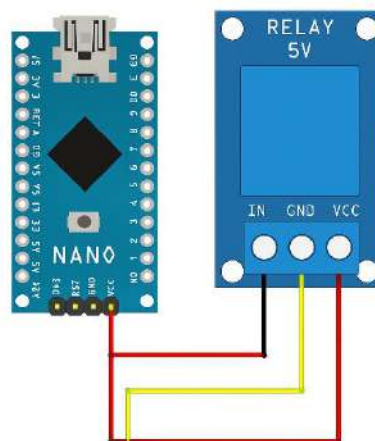


Рисунок 3.7 – Схема підключення реле

У робочому циклі, коли Arduino виявляє, що акумулятор повністю заряджений, програма активує реле – подає логічну «1» на пін IN. У цей момент замикається коло COM-NO, і починається контрольований розряд акумулятора.

Коли рівень напруги падає нижче порогу (наприклад, 2,8 В), мікроконтролер вимикає реле, запобігаючи глибокому розряду.

На рисунку 3.8 показано коду керування реле.

```

#define RELAY_PIN 7

void setup() {
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Початково вимкнено
}

void loop() {
  float voltage = readVoltage(); // умовна функція

  if (voltage > 4.0) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Увімкнення навантаження
  }

  if (voltage < 2.8) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Вимкнення навантаження
  }

  delay(500);
}

```

Рисунок 3.8 – Код керування реле

3.6 Алгоритм роботи пристрою

Алгоритм функціонування тестера для вимірювання параметрів Li-ion акумуляторів реалізовано у вигляді послідовного сценарію взаємодії апаратних модулів, що контролюється програмною логікою, завантаженою в мікроконтролер Arduino Nano. Робота системи поділена на кілька основних фаз: ініціалізація, заряджання, перехід до розряджання, вимірювання та завершення роботи. Кожен етап має визначене призначення та взаємодіє з відповідними апаратними компонентами.

Після подачі живлення Arduino виконує ініціалізацію підключених модулів – INA219 для вимірювання струму й напруги, дисплея LCD 2004 для

виведення інформації та реле, яке згодом керує фазою розрядження. Виводиться вітальне повідомлення, а також дані про початковий стан системи. Далі починається фаза заряджання, яка відбувається автоматично за участю модуля TP4056. Протягом цього етапу контролер періодично зчитує напругу та струм за допомогою INA219, щоб визначити момент досягнення повного заряду (зазвичай 4.15–4.20 В при спаданні струму нижче порогу, наприклад 50 мА).

Коли система фіксує, що акумулятор повністю заряджено, вона переходить у режим розрядження. Arduino активує релейний модуль, замикаючи ланцюг із резистивним навантаженням, через яке розряд відбувається контрольовано. Одночасно запускається вимірювання струму та напруги в режимі реального часу. Зібрані дані зберігаються у змінних, а також виводяться на дисплей. На основі безперервного інтегрування значень струму в часі розраховується приблизна ємність акумулятора.

Алгоритм передбачає порівняння напруги на акумуляторі з пороговим значенням (наприклад, 2.8 В). У разі його досягнення система вимикає реле, зупиняє процес розрядження та фіксує підсумкову ємність. На дисплей виводиться повідомлення про завершення тестування. Усі вимірювання проводяться циклічно з оптимальним інтервалом (зазвичай 500-1000 мс) для забезпечення балансу між точністю і стабільністю роботи системи. Таким чином, розроблений алгоритм реалізує повністю автоматизовану процедуру заряджання, контрольованого розрядження та вимірювання основних параметрів Li-ion акумулятора, що забезпечує високу наочність, точність і зручність експлуатації без постійного втручання користувача.

Програмна реалізація роботи тестера Li-ion акумуляторів здійснюється у середовищі Arduino IDE (Integrated Development Environment) (рис. 3.9) – офіційному інструменті розробки для мікроконтролерів на базі Arduino. Arduino IDE забезпечує простий інтерфейс, підтримку численних бібліотек та автоматичну компіляцію скетчів для Arduino Nano V3.0 з мікроконтролером ATmega328P).

Середовище підтримує основні мови C/C++ із застосуванням макросів, а також включає бібліотеки, які забезпечують керування підключеними модулями через інтерфейси I²C, UART, SPI тощо.

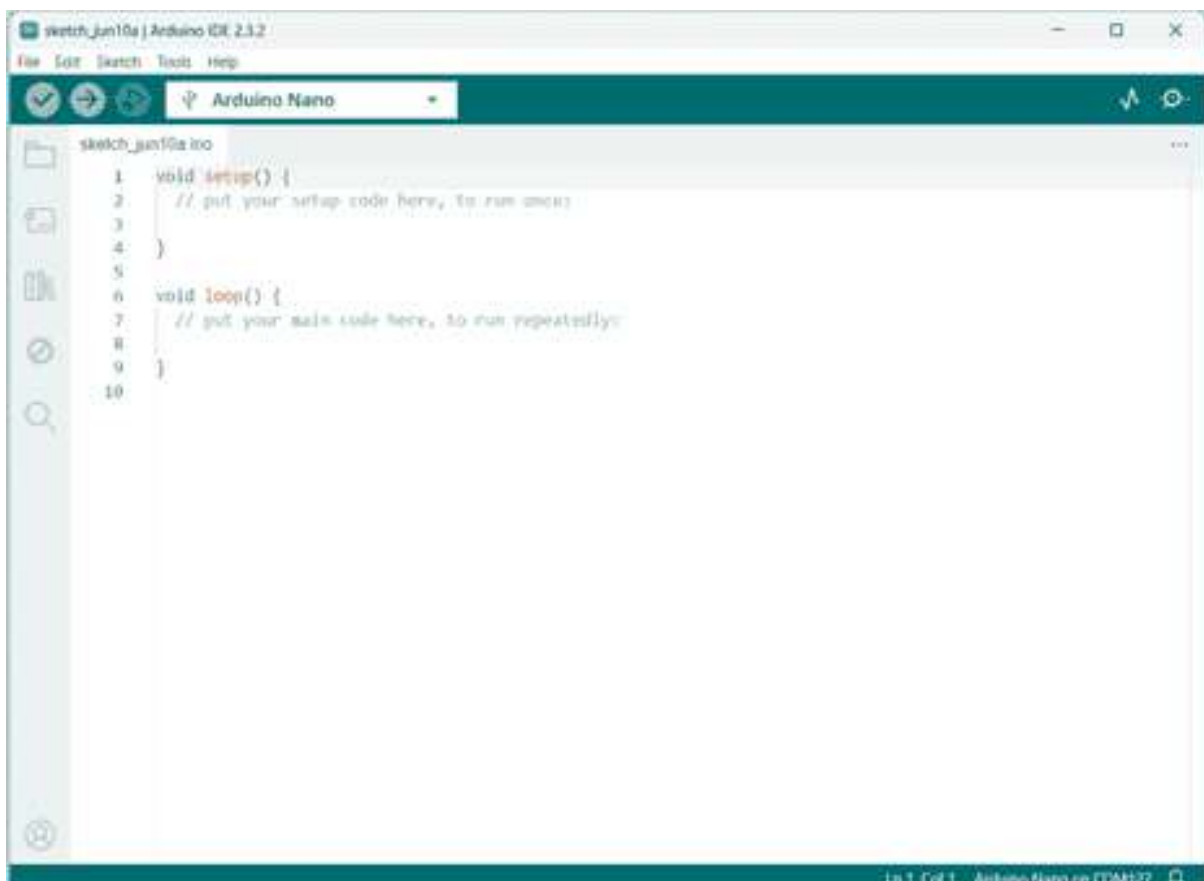


Рисунок 3.9 – Середовище Arduino IDE

Для роботи з компонентами, використаними у проєкті, необхідно підключити бібліотеки:

- Wire.h – для I²C-з'єднання з INA219 і LCD;
- Adafruit_INA219.h – для зчитування струму та напруги;
- LiquidCrystal_I2C.h – для роботи з LCD 2004.

Код розробляється у вигляді циклічної програми, яка складається з двох частин: setup() (ініціалізація) та loop() (основний цикл виконання). Це дозволяє реалізувати роботу в реальному часі із періодичними зчитуваннями та прийняттям логічних рішень (вмикання реле, завершення тесту тощо).

Приклад основного коду Arduino для реалізації алгоритму подано в Додатку А.

3.7 Тестування пристрою

Після завершення апаратного складання та прошивання мікроконтролера було проведено повноцінне тестування роботи тестера параметрів Li-ion акумуляторів у реальних умовах. Метою тестування стало підтвердження коректності функціонування основних етапів: заряджання, розряджання, вимірювання електричних параметрів, обчислення ємності та виведення інформації на дисплей.

На першому етапі було перевірено ініціалізацію усіх модулів (рис. 3.10). Після подачі живлення модуль INA219 та дисплей LCD 2004 були успішно розпізнані мікроконтролером Arduino Nano, на екрані відобразилось стартове повідомлення, а світлодіоди реле та TP4056 засвідчили подачу живлення та початок заряджання акумулятора.

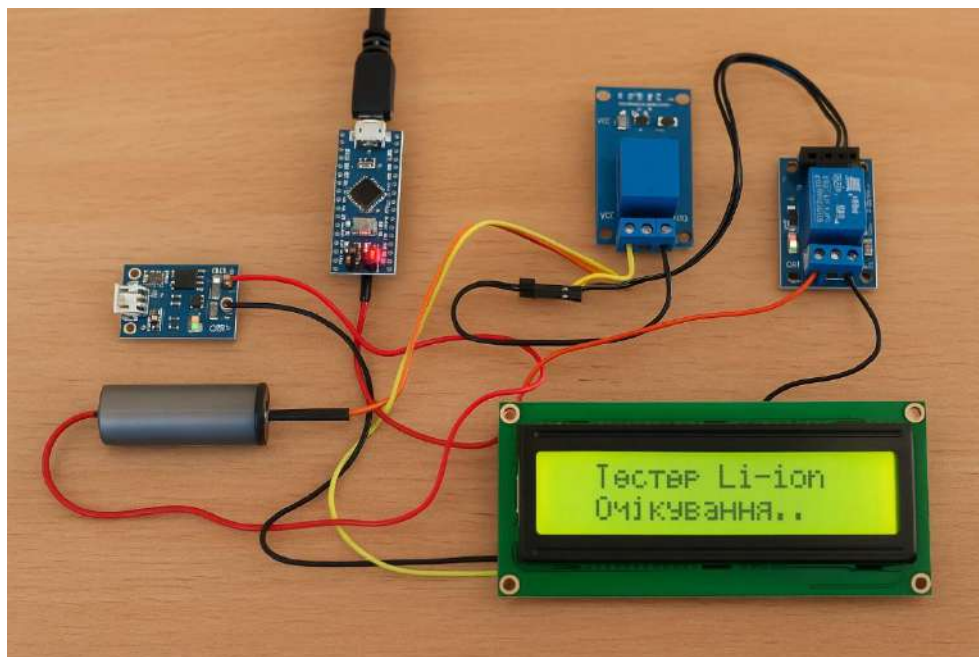


Рисунок 3.10 – Ініціалізацію усіх модулів

У режимі заряджання батарея (рис. 3.11) під'єднана до модуля TP4056 поступово набирала напругу. Через INA219 система постійно зчитувала рівень напруги та силу струму. При досягненні заданої межі напруги (близько 4,15 В) та зменшенні струму до порогового значення (менше 50 мА), система переходила до наступної фази. Це автоматично супроводжувалось активацією реле, яке замикає розрядний контур через навантаження.

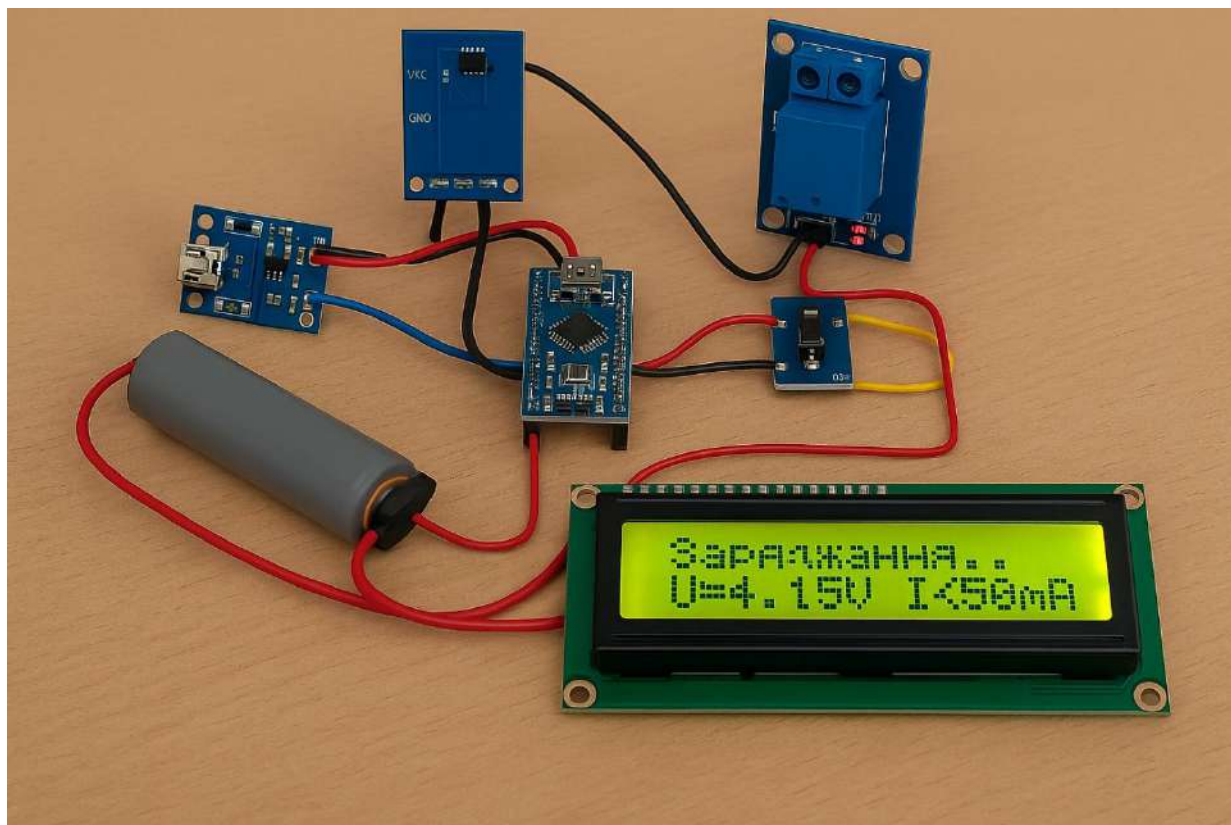


Рисунок 3.11 – Режим заряджання

Під час розряджання контролер реєстрував зміну параметрів щосекунди. Значення напруги та струму відображались на дисплеї (рис. 3.12), а потужність та ємність розраховувались на основі інтегрування струму в часі. Для практичного тесту використовувався стандартний Li-ion елемент формату 18650 з номінальною ємністю 2200 мА·г. Після повного розряду до порогової напруги 2,8 В система автоматично вимикала реле та фіксувала результати вимірювання. За результатами розряду значення ємності, визначеної пристроєм, склало близько

2090-2130 мА·г, що свідчить про високу точність тестування в межах похибки до $\pm 5\%$.

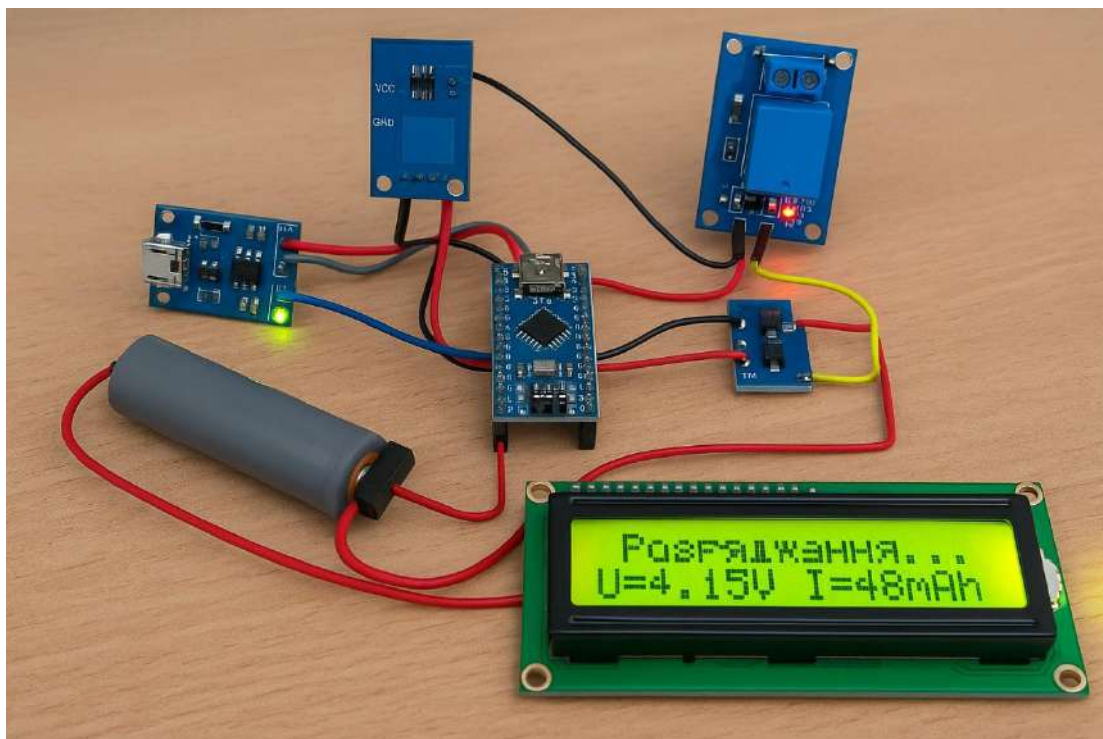


Рисунок 3.12 – Режим розрядження

У процесі тестування також було підтверджено стабільність роботи пристрою: система не перезавантажувалася при стрибках струму, реле спрацьовувало чітко, а інтерфейс дисплея залишався зручним для сприйняття. Особливо корисним виявилось виведення на екран параметрів у режимі реального часу, що дозволяло користувачу оперативно реагувати на зміну характеристик акумулятора.

Загалом результати тестування підтвердили, що пристрій функціонує та забезпечує точне й безпечне вимірювання параметрів акумуляторів, а також може бути застосований для перевірки справності або деградації Li-ion елементів у побутових і лабораторних умовах.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було розроблено та реалізовано апаратно-програмний тестер для контролю основних параметрів літій-іонних акумуляторів, що ґрунтується на платформі Arduino Nano. Актуальність обраної теми зумовлена широким розповсюдженням Li-ion акумуляторів у портативній та промисловій електроніці, а також необхідністю їх періодичного тестування для оцінки працездатності та залишкової ємності. Більшість комерційних тестерів мають високу вартість або складне інтерфейсне середовище, що робить недоцільним їх застосування у побутових умовах. Тому створення недорогого, простого та функціонального пристрою має практичну цінність.

У ході роботи проведено детальний аналіз фізико-хімічних властивостей та електричних характеристик літій-іонних елементів живлення. Вивчено існуючі методи визначення їх параметрів: метод розрядження, метод інтеграції струму та аналіз напруги.

Проектна частина охоплювала вибір та інтеграцію компонентів: модуля INA219 для прецизійного вимірювання напруги й сили струму, зарядного модуля TP4056, реле для реалізації фази розряду та LCD-дисплея для індикації поточних значень. Уся система керується мікроконтролером Arduino Nano, який у режимі реального часу зчитує електричні параметри та здійснює логіку керування режимами заряджання/розряджання.

Програмна реалізація передбачає алгоритм, що розпізнає досягнення кінця фази заряджання (напр. 4,15 В та струм < 50 мА), автоматично активує реле, фіксує час та накопичує дані про струм. Після завершення розряджання (напруга $< 2,5$ В) система вираховує фактичну ємність акумулятора в мА·год і відображає значення на екрані. Передбачено механізм захисту від надмірного розряджання.

Під час тестування пристрій продемонстрував стабільну роботу, достатню точність вимірювання (± 1 %) та наочне відображення інформації. Підключення через USB дозволяє виводити додаткову діагностику в монітор порту. Таким чином, підтверджено відповідність пристрою вимогам до функціонального

тестера: автономність, простота використання, інформативність та низька вартість.

Загалом, мету дослідження досягнуто повністю. Було створено прототип тестера, який дозволяє користувачу легко й швидко отримати ключові електричні характеристики акумулятора. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших удосконалень, зокрема впровадження графічного інтерфейсу, збереження даних у пам'ять, віддаленого моніторингу через Bluetooth або Wi-Fi, а також автоматичного побудови графіків залежності напруги та струму від часу.

Робота має як навчальну, так і практичну цінність, оскільки демонструє приклад прикладного проектування мікропроцесорних систем з використанням недорогих компонентів та відкритого програмного забезпечення.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Progress in Batteries & Battery Materials. *Researchbib*. URL: <https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/1099-4467> (дата звернення: 22.03.2025).
2. The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *ACS Publications*. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja3091438> (дата звернення: 22.03.2025).
3. Як працює літій іонний акумулятор? *Techemy*. URL: echemy.com/2019/04/03/ (дата звернення: 22.03.2025).
4. Charging Lithium-Ion Batteries. *Battery University*. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries (дата звернення: 22.03.2025).
5. Battery Discharge Method. *Battery University*. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_methods (дата звернення: 22.03.2025).
6. Battery technologies for electric vehicles. *Sciencedirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128030219000045> (дата звернення: 22.03.2025).
7. Lii-500 Smart Charge. *Amazon*. URL: <https://www.amazon.com/LiitoKala-Lii-500-Battery-charger-capacity/dp/B073R7VCMZ/> (дата звернення: 22.03.2025).
8. Regenerative Battery Pack Test System. *Avalon*. URL: <https://www.avalontest.com/chroma-regenerative-battery-pack-test-system-1700v-high-voltage-ev-battery-tester> (дата звернення: 22.03.2025).
9. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Sciencedirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775313008185?via%3Dihub> (дата звернення: 28.03.2025).
10. A comparative study of equivalent circuit models and enhanced equivalent circuit models of lithium-ion batteries with different model structures. *Ieeexplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6940946> (дата звернення: 22.03.2025).

11. INA219. *Instruments*. URL: <https://www.ti.com/product/INA219> (дата звернення: 22.03.2025).

12. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Sciencedirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829716303464?via%3Dihub> (дата звернення: 28.03.2025).

13. Nano V3.0 AtMega328P TypeC. *Мій проект*. URL: <https://myproject.com.ua/plata-rozrobnika-nano-v30-atmega328p-ua.html> (дата звернення: 20.04.2025).

14. Arduino Nano V3.0. *Store*. URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano> (дата звернення: 20.04.2025).

15. LCD 2004 I2C символний дисплей 20x4. *Arduino*. URL: <https://arduino.ua/prod663-lcd-2004-i2c-simvolnii-displei-20x4-sinii> (дата звернення: 20.04.2025).

16. I2C Serial Interface Module Pinout and Projects. *Electronicsprojects*. URL: <https://electronicsprojects.in/components/i2c-serial-interface-module-pinout-and-projects/> (дата звернення: 20.04.2025).

17. TP4056 3.7V Li-ion 18650 Battery Charger Module Pinout, Datasheet & Details. *Components Info*. URL: <https://www.componentsinfo.com/tp4056-module-pinout-datasheet-details/> (дата звернення: 28.04.2025).

18. Модуль реле затримки включення 5V-30V Micro-USB. *Radiostore Info*. URL: <https://radiostore.com.ua/ua/p1552318916-kanalnyj-modul-rele.html> (дата звернення: 28.04.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А

Код мікроконтролера

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
Adafruit_INA219 sensor219;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Адреса I2C, 16 колонок, 2 рядки
#define RELAY_PIN 8
#define BUTTON_PIN 3
unsigned long startTime = 0;
unsigned long duration = 0;
bool currentExceeded = false;
bool flag = false;
float i = 0;
float currentSum = 0;
float currentMedium = 0;
float batteryCapacity = 0;
float minVoltage = 2.5;
void setup() {
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
  digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Реле вимкнене
  Serial.begin(9600);
  sensor219.begin();
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Battery Tester");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Ver. 1.0");
  delay(2000);
  lcd.clear();
}
void loop() {
  float busVoltage = sensor219.getBusVoltage_V();
  float current = sensor219.getCurrent_mA();
  bool buttonPressed = !digitalRead(BUTTON_PIN);
  // Якщо кнопка натиснута і напруга > мінімальної – почати розряд
  if (busVoltage > minVoltage && buttonPressed && !flag) {
    flag = true;
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Вмикаємо реле (розряд)
    Serial.println("Розряд розпочато");
  }
  // Якщо струм перевищив 1 мА – фіксуємо час старту
  if (current > 1 && !currentExceeded) {
    startTime = millis() / 1000ul;
    currentExceeded = true;
    Serial.println("Start measuring...");
  }
}

```

```

if (currentExceeded) {
    duration = millis() / 1000ul - startTime;
    currentSum += current;
    i++;
    currentMedium = currentSum / i;
    if (busVoltage <= minVoltage) {
        digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Вимикаємо реле
    }
    // Розрахунок ємності в mAh
    if (current <= 1) {
        duration = millis() / 1000ul - startTime;
        batteryCapacity = currentMedium * (duration / 3600.0);
        currentExceeded = false;

        Serial.print("Розряд завершено. Ємність: ");
        Serial.print(batteryCapacity);
        Serial.println(" mAh");
    }
}
// Вивід на LCD
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("U=");
lcd.print(busVoltage, 2);
lcd.print("V ");
lcd.setCursor(9, 0);
lcd.print("C=");
lcd.print((int)batteryCapacity);
lcd.print("mAh");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("I=");
lcd.print((int)current);
lcd.print("mA ");
lcd.setCursor(9, 1);
lcd.print("t=");
lcd.print(duration);
lcd.print("s");
// Вивід у Serial
Serial.print("Voltage: ");
Serial.print(busVoltage);
Serial.print(" V | Current: ");
Serial.print(current);
Serial.println(" mA");
delay(1000);

```