

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та SMART-систем

(повне найменування кафедри)

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

ТЕСТЕР ЄМНОСТІ LI-ION АКУМУЛЯТОРА 18650

18650 LI-ION BATTERY CAPACITY TESTER

спеціальність

171 Електроніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма

«Електроніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕЛ-41

Чиркін Юрій Олександрович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент

Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» червня 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« _____ » _____ доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ
2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Чиркіну Юрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Тестер ємності Li-ion акумулятора 18650*

керівник роботи: *к.т.н., доцент Мороз С. А.*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 року №559/01-02

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи: 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Li-ion акумулятори формату 18650; номінальна напруга – 3,7 В; максимальна напруга заряду – 4,2 В; мінімальна напруга розряду – 3,0 В; струм навантаження – до 1 А; живлення пристрою – зовнішнє джерело 7–12 В.

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

Вступ

Розділ 1 Аналітичний огляд інформаційних джерел

Розділ 2 Теоретичні основи та схемотехнічні рішення для вимірювання ємності LI-ION акумуляторів

Розділ 3 Розроблення апаратної частини тестера ємності LI-ION акумуляторів

Розділ 4 Розроблення програмного забезпечення тестера ємності LI-ION акумуляторів

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації Power Point.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Пристаупа С. О., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	_____ %		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 31 грудня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1</i>	до 25.04.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2</i>	до 01.05.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3</i>	до 04.05.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4</i>	до 14.05.2026 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.05.2026 р.	
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	до 25.05.2026 р.	
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 30.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 02.06.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 03.06.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Чиркін Ю. О.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Мороз С. А.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Чиркін Ю. О. Тестер ємності Li-ion акумулятора 18650. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра освітньої програми «Електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

У кваліфікаційній роботі розглянуто сучасні методи визначення ємності акумуляторних елементів, проаналізовано існуючі реалізації тестерів ємності та обґрунтовано вибір методу контрольованого розряду стабілізованим струмом. Виконано розроблення тестера ємності літій-іонних акумуляторів формату 18650 на базі мікроконтролерної платформи Arduino Nano. Проведено аналіз конструкції, принципу роботи, експлуатаційних характеристик та механізмів деградації Li-ion акумуляторів.

Ключові слова: Li-ion акумулятор, акумулятор 18650, тестер ємності, Arduino Nano, електронне навантаження, вимірювання ємності.

ANNOTATION

Chirkin Yu. 18650 Li-ion Battery Capacity Tester. Manuscript.

Bachelor's qualification work of the educational program «Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work considers modern methods for determining the capacity of battery cells, analyzes existing implementations of capacity testers and justifies the choice of the method of controlled discharge with a stabilized current. A capacity tester for lithium-ion batteries of the 18650 format has been developed based on the Arduino Nano microcontroller platform. An analysis of the design, principle of operation, operational characteristics and mechanisms of degradation of Li-ion batteries has been carried out.

Keywords: Li-ion Battery, 18650 Battery, Capacity Tester, Arduino Nano, Electronic Load, Capacity Measurement.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	8
1.1 Основні характеристики Li-ion акумуляторів формату 18650	8
1.2 Причини зниження ємності та старіння літій-іонних акумуляторів	14
1.3 Особливості експлуатації Li-ion акумуляторів	18
1.4 Існуючі реалізації тестерів ємності	21
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЄМНОСТІ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ	26
2.1 Методи визначення ємності Li-ion акумуляторів	26
2.2 Навантажувальні схеми	32
2.3 Схеми вимірювання струму та напруги.....	36
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТЕСТЕРА ЄМНОСТІ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ	40
3.1 Принцип роботи тестера ємності Li-ion акумуляторів на основі електричної схеми	40
3.2 Конструктивна будова тестера ємності Li-ion акумуляторів	42
3.3 Функціональні складові тестеру для вимірювання ємності	46
3.4 Проектування друкованої плати тестера ємності акумуляторів у середовищі EasyEDA	58
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕСТЕРА ЄМНОСТІ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ	62
4.1 Програмне забезпечення та використані бібліотеки.....	62
4.2 Процес створення програмного забезпечення	65
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72
ДОДАТКИ	76

ВСТУП

Сучасний розвиток портативної електроніки, електротранспорту, систем автономного живлення та накопичення енергії супроводжується широким використанням літій-іонних акумуляторів. Особливе місце серед них займають акумулятори формату 18650, які поєднують високу енергоємність, тривалий термін служби та відносно невеликі габаритні розміри. Найважливішим показником технічного стану такого акумулятора є його фактична ємність, яка дозволяє оцінити залишковий ресурс елемента живлення та можливість його подальшого використання.

Для оцінювання технічного стану акумуляторів необхідно здійснювати контроль їх фактичної ємності. Існуючі професійні вимірювальні комплекси мають високу вартість і є недоступними для більшості користувачів, тоді як прості побутові тестери часто характеризуються недостатньою точністю.

Тому розроблення недорогого, компактного та достатньо точного тестера ємності літій-іонних акумуляторів є актуальним науково-технічним завданням, що має практичне значення для контролю стану акумуляторних елементів та підвищення ефективності їх експлуатації.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення тестера ємності літій-іонних акумуляторів формату 18650 на базі мікроконтролера Arduino Nano, який забезпечує автоматизований контрольований розряд акумулятора стабілізованим струмом, вимірювання його параметрів та визначення фактичної ємності.

Завдання роботи:

1. Провести аналітичний огляд інформаційних джерел характеристик та особливостей експлуатації літій-іонних акумуляторів формату 18650.
2. Проаналізувати методи визначення ємності акумуляторів.
3. Проаналізувати конструкції електронного навантаження зі стабілізацією струму розряду.
4. Розробити апаратну частину тестера ємності LI-ION акумуляторів.

5. Розробити програмне забезпечення тестера ємності LI-ION акумуляторів.

Об'єкт дослідження – тестер ємності LI-ION акумуляторів.

Предмет дослідження – особливості функціонування та будови тестеру для перевірки ємності акумуляторів.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Основні характеристики Li-ion акумуляторів формату 18650

Літій-іонні акумулятори формату 18650 стали базовим джерелом живлення для сучасних мобільних пристроїв, засобів мікромобільності та систем резервного енергозабезпечення. Назву цього стандарту безпосередньо розкривають його геометричні розміри: перші дві цифри «18» вказують на діаметральний переріз у міліметрах, а число «650» означає довжину батареї 65 мм. Високий попит на ці акумулятори в інженерній практиці пов'язаний з хорошим балансом між розміром і вагою до обсягу наявної електричної ємності. Типовими представниками цього класу слугують Samsung 25R (рис. 1.1, а), LG HG2 (рис. 1.1, б) та Molicel P26A (рис. 1.1, в).



Рисунок 1.5 – Різновиди АКБ 18650: а) Samsung INR18650 25R 2500 mAh; б) LG HG2 3000mAh; в) Molicel P26A 18650 високострумний [1]

Конструкція літій-іонного акумулятора включає основні елементи електрохімічної системи: анод, катод та електроліт. Як активний матеріал анода зазвичай використовується графіт, тоді як катод виготовляється на основі літійвмісних оксидних сполук. Для забезпечення електропровідності та механічної

міцності активні матеріали наносяться тонким шаром на металеві струмознімальні підкладки: мідну фольгу для анода та алюмінієву фольгу для катода (рис. 1.2). Між анодом і катодом розміщується пористий сепаратор, просочений електролітом. Сепаратор виконує функцію електричної ізоляції електродів, запобігаючи короткому замиканню, та водночас забезпечує вільне переміщення іонів літію між електродами під час процесів заряджання і розряджання.

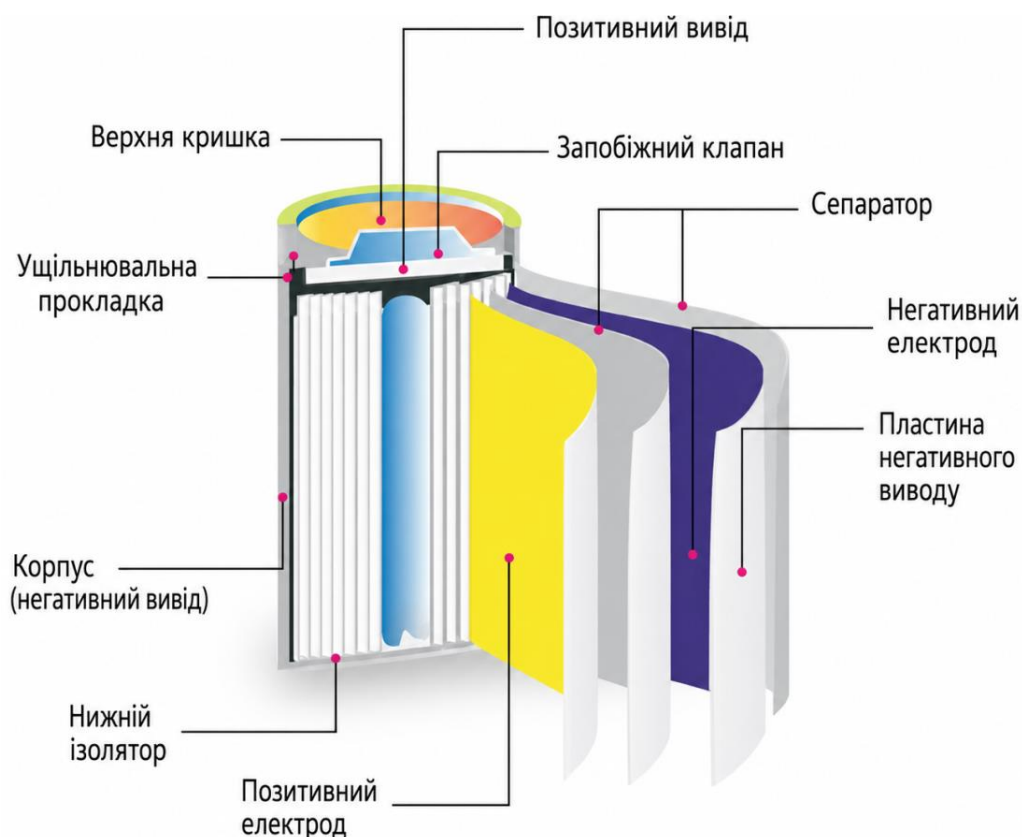


Рисунок 1.2 – Внутрішня структура Li-іон акумулятора формату 18650 [1]

Анодні та катодні шари разом із сепаратором формують багатошарову електродну структуру. У циліндричних літій-іонних акумуляторах типу 18650, 21700 та інших подібних типорозмірів ця структура скручується у спіральний рулон, який розміщується всередині металевого корпусу. Така конструкція дозволяє ефективно використовувати внутрішній об'єм елемента та забезпечує високу питому енергоемність акумулятора.

Схематичне зображення принципу роботи літій-іонного акумулятора під час

процесів заряджання та розряджання показан на рисунку 1.3.

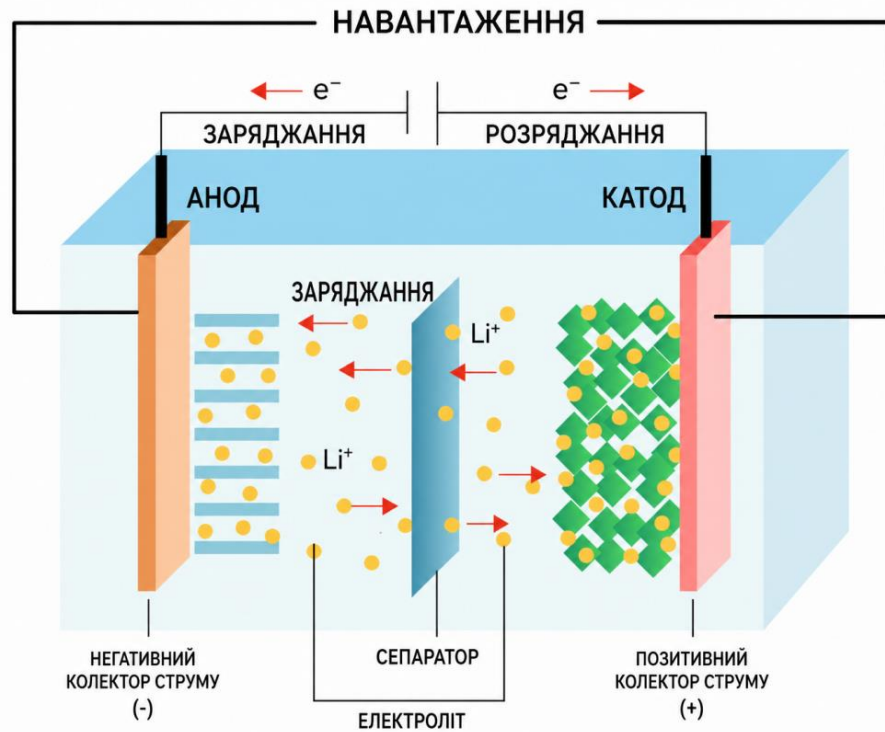


Рисунок 1.3 – Принцип роботи літій-іонного акумулятора [2]

Під час заряджання іони літію Li^+ переміщуються від катода через електроліт і сепаратор до анода, де накопичуються в структурі графіту. Одночасно електрони рухаються через зовнішнє електричне коло до анода. Під час розряджання відбувається зворотний процес: іони літію переміщуються від анода до катода через електроліт, а електрони проходять через зовнішнє коло та навантаження, забезпечуючи живлення електричного пристрою. Сепаратор виконує функцію електричної ізоляції між електродами, запобігаючи короткому замиканню, при цьому не перешкоджаючи переміщенню іонів літію.

Одним із найнебезпечніших аварійних режимів роботи літій-іонних акумуляторів є зовнішнє коротке замикання. У такому випадку через акумулятор починають протікати надзвичайно великі струми, величина яких для повністю заряджених елементів типорозмірів 18650 та 21700 може досягати сотень ампер. Протікання струму такої величини супроводжується інтенсивним виділенням

теплової енергії всередині елемента, що призводить до швидкого підвищення температури та зростання внутрішнього тиску. У результаті нагрівання відбувається розширення газів та збільшення тиску всередині герметичного металевого корпусу акумулятора. За відсутності спеціальних засобів захисту надлишковий тиск може спричинити механічне руйнування корпусу елемента та виникнення небезпечної аварійної ситуації.

Для запобігання таким наслідкам у конструкції більшості циліндричних літій-іонних акумуляторів передбачено спеціальний захисний елемент – пристрій переривання струму CID (Current Interrupt Device). Як правило, він розташовується під позитивним контактом акумулятора та являє собою металеву мембрану, чутливу до внутрішнього тиску (рис. 1.4).

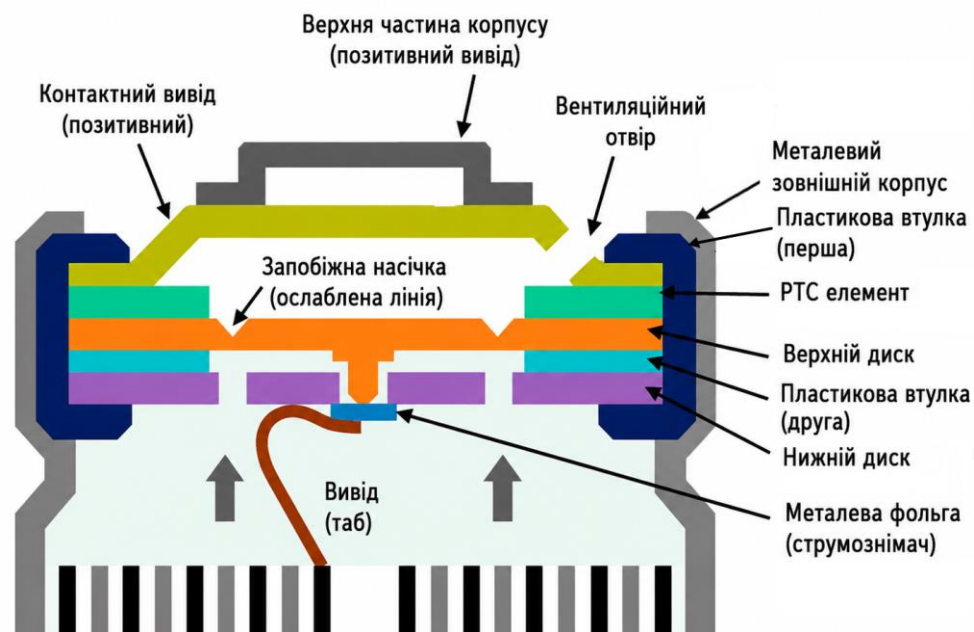


Рисунок 1.4 – Будова пристрою переривання струму CID [2]

При досягненні критичного значення тиску мембрана деформується та механічно розриває електричне з'єднання між позитивним виводом акумулятора та внутрішніми електродами. Унаслідок цього відбувається повне припинення протікання струму через зовнішнє коло, що дозволяє запобігти подальшому перегріванню та руйнуванню елемента. Під час штатного спрацювання пристрою

CID основною функцією є саме розрив електричного кола. При цьому захисний клапан не призначений для скидання газів назовні, а виконує функцію електромеханічного відключення акумулятора від навантаження.

Пристрій переривання струму CID спрацьовує не лише у випадку короткого замикання, але й за умов значного підвищення внутрішнього тиску, спричиненого перегріванням акумулятора. Подібна ситуація може виникати внаслідок порушення режимів заряджання, зокрема при перевищенні допустимого струму заряду, використанні зношених акумуляторів із підвищеним внутрішнім опором або несправності зарядного обладнання (рис. 1.5). Відомо, що під час заряджання літій-іонні акумулятори, як правило, нагріваються інтенсивніше, ніж під час розряджання за аналогічного значення струму.

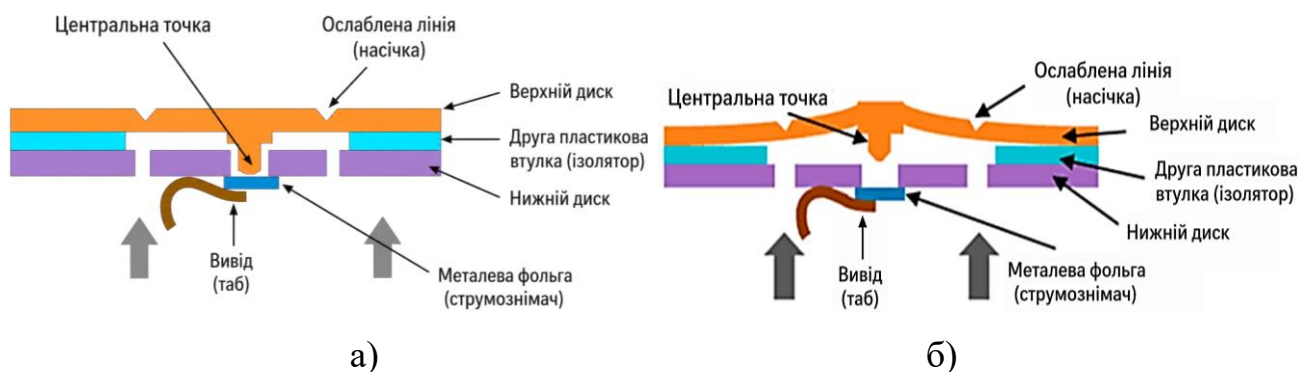


Рисунок 1.5 – Стани CID: а) нормальний; б) спрацювання [2]

У разі спрацювання пристрою CID відбувається розрив внутрішнього електричного кола між позитивним виводом і електродною системою акумулятора. Після цього напруга на зовнішніх контактах елемента може знижуватися практично до нуля, а подальша експлуатація такого акумулятора стає неможливою. Застосування пристрою CID суттєво підвищує безпеку експлуатації літій-іонних акумуляторів та є одним із найважливіших елементів внутрішнього захисту сучасних акумуляторних елементів циліндричного типу.

Крім захисного пристрою CID, у конструкції багатьох сучасних літій-іонних акумуляторів додатково використовується елемент PTC (Positive Temperature

Coefficient) – терморезистор із позитивним температурним коефіцієнтом опору. Зазвичай він розташовується між вузлом захисного клапана та позитивним контактом акумулятора.

За нормальних умов експлуатації РТС-елемент має дуже малий електричний опір і практично не впливає на роботу акумулятора. Однак при підвищенні температури до певного порогового значення, яке зазвичай становить від 80 до 110 °С, його опір різко зростає (рис. 1.6). Унаслідок цього відбувається обмеження струму, що проходить через акумулятор, і зменшується інтенсивність його нагрівання.

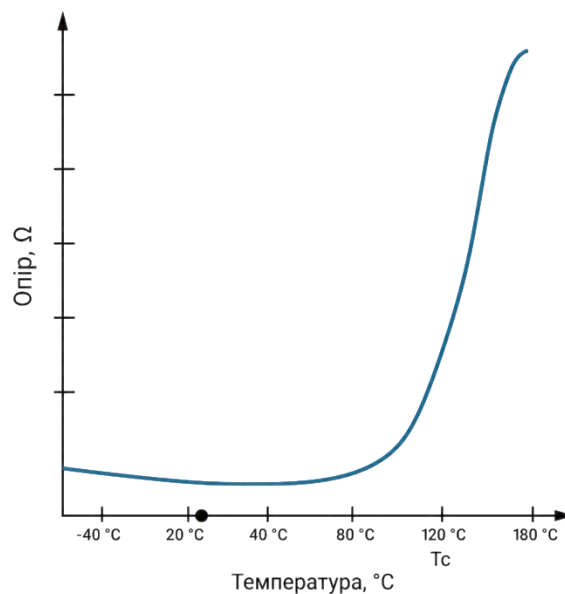


Рисунок 1.6 – Залежність опору РТС-терморезистора від температури [2]

Важливою особливістю РТС-елемента є його самовідновлюваність. Після зниження температури до нормального рівня опір терморезистора повертається до початкового значення, і він знову забезпечує проходження робочого струму без суттєвих втрат. Застосування РТС забезпечує додатковий рівень захисту акумулятора від перевантаження струмом під час заряджання та розряджання. Крім того, цей елемент опосередковано сприяє захисту від перезарядження. При спробі заряджання акумулятора напругою, що перевищує допустиме значення,

температура елемента починає зростати, внаслідок чого опір РТС збільшується, а зарядний струм автоматично обмежується до безпечного рівня.

1.2 Причини зниження ємності та старіння літій-іонних акумуляторів

Літій-іонні акумулятори сьогодні є основним джерелом енергії для портативної електроніки, електромобілів, систем накопичення енергії та багатьох інших пристроїв. Їхніми основними перевагами є висока питома енергоемність, відсутність ефекту пам'яті, низький саморозряд та тривалий термін служби. Незважаючи на це, у процесі експлуатації характеристики літій-іонних акумуляторів поступово погіршуються. Найбільш помітним проявом старіння є зменшення ємності, збільшення внутрішнього опору та зниження максимальної потужності, яку здатен віддавати акумулятор (рис. 1.7).

Погіршення технічного стану акумулятора є наслідком сукупності складних фізичних, механічних та електрохімічних процесів, що відбуваються всередині елемента протягом його життєвого циклу. Інтенсивність цих процесів залежить від режимів заряджання та розряджання, температури навколишнього середовища, рівня заряду, глибини циклу та умов зберігання.

Розглянемо причини, які впливають на деградацію та старіння літій-іонних акумуляторів.

Однією з причин деградації літій-іонних акумуляторів є зміна структури активних матеріалів електродів. Під час циклів заряджання та розряджання іони літію багаторазово переміщуються між анодом і катодом, що супроводжується структурними перетвореннями кристалічної решітки матеріалів.

Для катодів на основі оксиду літій-марганцю характерним є поступове розчинення іонів марганцю. Розчинені іони мігрують через електроліт до анода, де беруть участь у побічних реакціях та руйнуванні міжфазних захисних шарів. У результаті зростає внутрішній опір елемента та зменшується кількість активного літію, який бере участь у процесах накопичення енергії. Зі збільшенням кількості

циклів заряджання та розряджання структурні зміни накопичуються, що призводить до незворотного погіршення електрохімічних властивостей електродів і зниження ємності акумулятора.

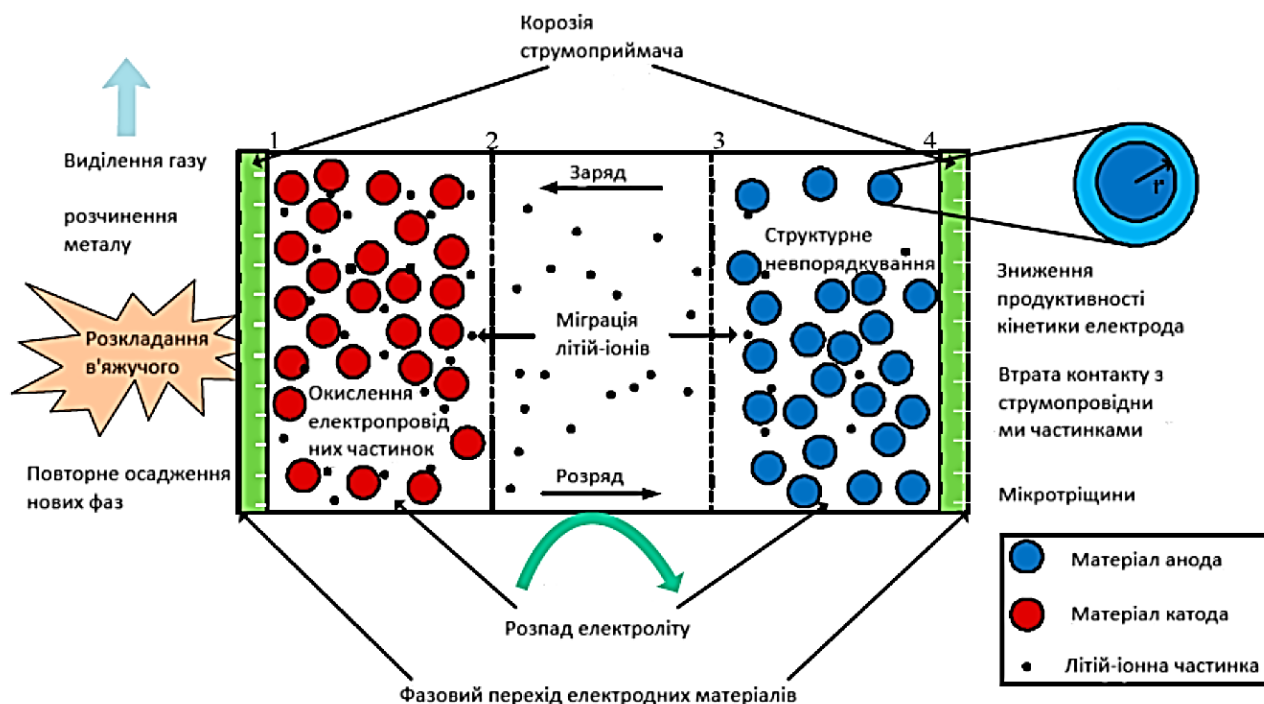


Рисунок 1.7 – Базова схема старіння літій-іонного акумулятора [3]

Ще однією причиною є утворення та ріст міжфазного шару SEI. На поверхні графітового анода під час перших циклів заряджання формується твердий електролітний міжфазний шар SEI (Solid Electrolyte Interphase). Його утворення є природним процесом і необхідне для стабільної роботи літій-іонного акумулятора (рис. 1.8).

SEI-шар виконує захисну функцію, запобігаючи подальшому розкладанню електроліту на аноді. Однак у процесі експлуатації він поступово потовщується. Для формування нових шарів SEI витрачаються іони літію, які вже не можуть брати участь у процесах заряджання та розряджання. Шар утворюється внаслідок взаємодії літію з електролітом. З часом він стає товщим і починає діяти як пастка, зв'язуючи вільні іони літію, що перешкоджає їх нормальному руху.

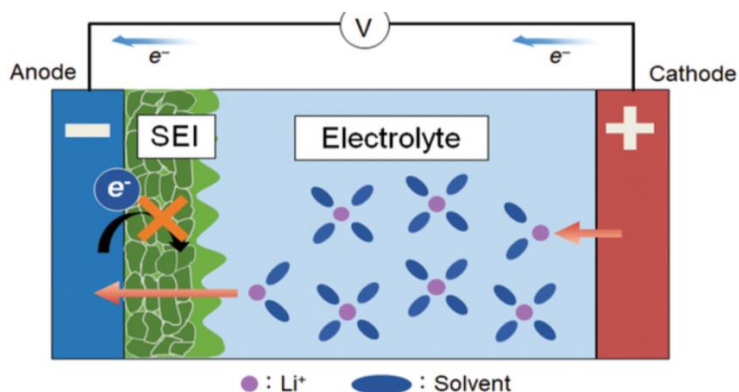


Рисунок 1.8 – Схема формування шару SEI в Li-ion акумуляторі [3]

Крім втрати активного літію, збільшення товщини SEI-шару призводить до: зростання внутрішнього опору; погіршення дифузії іонів літію; збільшення поляризації електродів; зниження швидкості заряджання та розряджання. Саме ріст SEI вважається одним із головних механізмів календарного старіння літій-іонних акумуляторів.

Одним із найбільш небезпечних процесів деградації є осадження металевого літію на поверхні анода, яке отримало назву літієве покриття (Lithium Plating). У нормальному режимі заряджання іони літію вбудовуються в кристалічну структуру графіту. Однак при низьких температурах, високих зарядних струмах або високому рівні заряду швидкість інтеркаляції літію зменшується. У таких умовах літій починає осідати на поверхні анода у вигляді металевих відкладень. Частина осадженого літію необоротно реагує з електролітом і утворює побічні продукти реакції. Це призводить до: втрати активного літію; збільшення товщини міжфазних шарів; зростання внутрішнього опору; зменшення ємності акумулятора. У важких випадках металевий літій може утворювати дендрити, які здатні прорости крізь сепаратор та викликати внутрішнє коротке замикання.

Механічна деградація електродів. Під час циклів заряджання та розряджання відбувається зміна об'єму активних матеріалів електродів. Для графітового анода зміна міжшарової відстані може досягати 10 %, а загальна зміна товщини електрода становить близько 5 %.

Багаторазове розширення та стискання матеріалу викликає механічні

напруження, які можуть спричиняти: утворення мікротріщин; руйнування структури графіту; відшарування активного матеріалу; погіршення електричного контакту між частинками.

Особливо інтенсивно ці процеси відбуваються під час роботи при високих струмах та глибоких циклах розряду. Механічна деградація сприяє прискореному росту SEI-шару, що додатково збільшує втрати літію та прискорює старіння акумулятора.

Деградація катодних матеріалів. Катод є одним із найбільш навантажених елементів літій-іонного акумулятора. У сучасних акумуляторах електромобілів найчастіше використовуються катодні матеріали типу NMC (нікель-марганець-кобальт) та NCA (нікель-кобальт-алюміній).

Під час експлуатації в катоді виникають: фазові переходи; механічні напруження; утворення мікротріщин; розчинення перехідних металів. Унаслідок цього зменшується електрохімічна активність катода та збільшується його внутрішній опір.

Розчинені іони нікелю, кобальту та марганцю можуть мігрувати до анода, де беруть участь у побічних реакціях і прискорюють ріст SEI-шару.

Розкладання електроліту. Електроліт забезпечує перенесення іонів літію між електродами. Однак у процесі експлуатації він поступово розкладається під дією високих потенціалів та температур.

Розкладання електроліту супроводжується: утворенням поверхневих плівок; виділенням газів; зростанням внутрішнього тиску; зменшенням концентрації провідної солі. Ці процеси призводять до збільшення омичного опору елемента та погіршення умов транспортування літію між електродами.

Деградація сепаратора. Сепаратор є пористою полімерною мембраною, що запобігає контакту анода та катода. У процесі старіння пори сепаратора можуть закупорюватися продуктами розкладання електроліту. Це призводить до: зменшення іонної провідності; нерівномірного розподілу струму; локальних перегрівів; збільшення ризику осадження металевих літію. Механічне старіння

сепаратора також може викликати зменшення його пористості та погіршення транспортних характеристик.

Календарне та циклічне старіння. Старіння літій-іонних акумуляторів поділяють на календарне та циклічне.

Календарне старіння відбувається незалежно від використання акумулятора і визначається: часом зберігання; температурою; рівнем заряду.

Циклічне старіння виникає під час заряджання та розряджання і залежить від: кількості циклів; глибини розряду; зарядних і розрядних струмів; температурного режиму роботи.

У реальних умовах обидва процеси відбуваються одночасно та сумарно впливають на технічний стан акумулятора [4–8].

1.3 Особливості експлуатації Li-ion акумуляторів

При розробці вимірювального пристрою дуже важливо правильно контролювати робочу напругу акумулятора. Через особливості хімічного складу літій-іонні елементи 18650 мають суворі межі допустимої напруги. Ці базові показники, на які ми будемо спиратися під час розрахунків та написання алгоритму тестування, наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри напруги стандартного Li-ion елемента 18650

Показник напруги	Значення
Номінальна напруга	3,6–3,7 В
Максимальна напруга (повний заряд)	4,2 В
Напруга відсічення (повний розряд)	2,5–2,75 В

Стабільна експлуатація літій-іонних елементів формату 18650 безпосередньо залежить від підтримання балансу внутрішніх хімічних процесів. Критичною умовою їхньої безпечної роботи є суворе дотримання діапазону робочих напруг від 2,5 до 4,2 В. Навіть незначне порушення цих експлуатаційних меж провокує руйнування активних матеріалів та запускає незворотні хімічні реакції.

При порушенні правил експлуатації, зменшується його реальна ємність, а внутрішній опір збільшується (рис. 1.9).

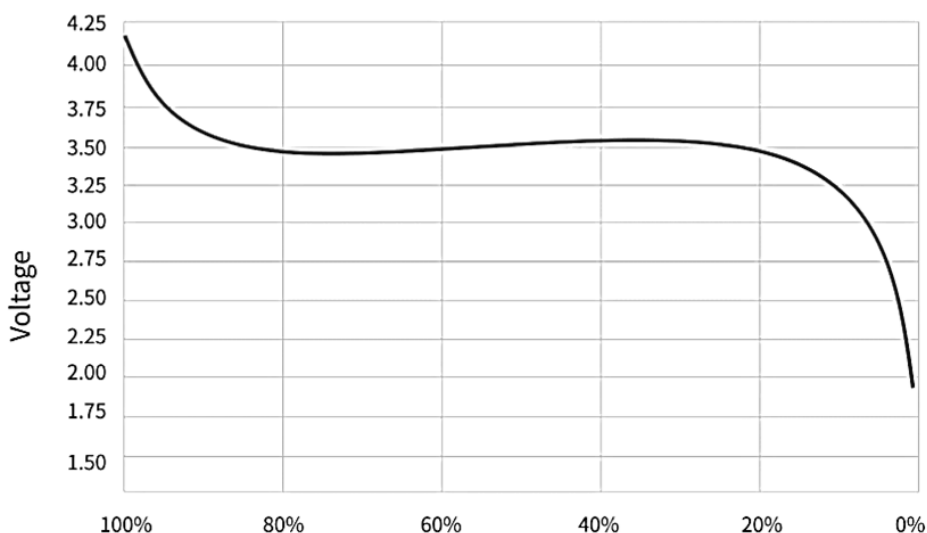


Рисунок 1.9 – Крива розряду стандартного Li-ion елемента 18650 [9]

Велику роль у тому, як швидко зношується акумулятор, відіграє температура, бо вона керує швидкістю всіх хімічних реакцій. Підвищення робочої температури з 25°C до 55°C призводить до прискорення деградації процесів у комірці. Низькі температури впливають на акумулятор інакше, але не менш суттєво. На холоді електроліт густішає, і через це батарея тимчасово не може видавати потрібну потужність. Те, як саме різні температурні умови впливають на характеристики акумулятора, показано в таблиці 1.2 та рисунку 1.10.

Таблиця 1.2 – Зміна характеристик акумулятора залежно від температури середовища

Робоча температура	Вплив на ємність	Вплив на внутрішній опір
Низька (< 0°C)	Тимчасове зниження (до 20–40%)	Суттєве зростання (сповільнення іонів)
Оптимальна (20–25°C)	Номінальна (100%)	Мінімальний (паспортні значення)
Висока (> 45°C)	Прискорена незворотна деградація	Зростання опору через руйнування SEI
Критична (> 60°C)	Ризик термічного розгону	Лавиноподібне зростання опору

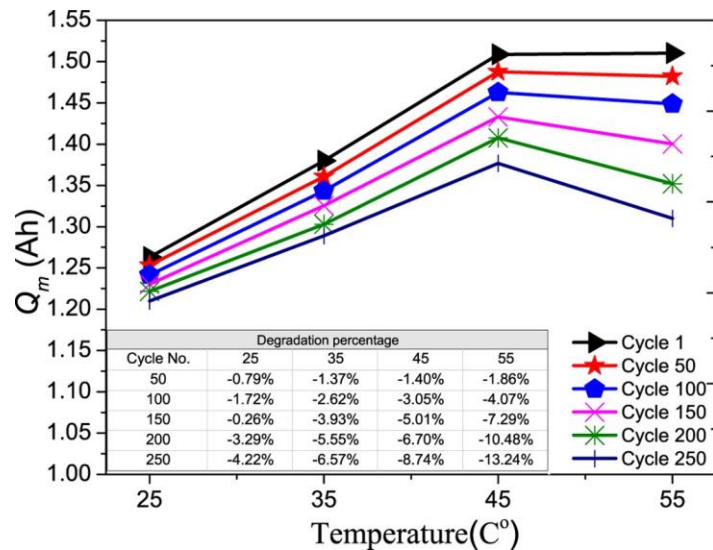


Рисунок 1.10 – Залежність максимальної ємності Li-іон акумулятора від температури (приклад деградації при різних циклах) [10]

Окремо варто зупинитись на силовому підкласі акумуляторів 18650. На відміну від звичайних енергетичних елементів, орієнтованих на максимальну ємність, силові комірки вирішують зовсім інше завдання, яке дозволяє стабільно працювати під струмом від 10 А і вище, причому тривалий час. Класичний оксид кобальту, який лежить в основі ICR (Lithium-Ion Cobalt Round), при серйозних навантаженнях просто починає перегріватись і для силових застосувань це одразу стає проблемою. Через це виробники перейшли на термічно стійкіші матеріали. Найпоширенішим рішенням стали нікель-марганець-кобальтові катода з маркуванням INR (Lithium-Ion Nickel Round). Тут логіка розподілу проста, марганець тримає температуру в допустимих межах, а нікель забезпечує ту саму здатність впевнено віддавати великі струми.

Завдяки цим змінам внутрішній омичний опір (Direct Current Internal Resistance) вдається знизити до 15–25 мОм. Разом із тим зменшується загальна кількість активного матеріалу всередині комірки, через що ємність таких елементів майже не перевищує 1500–2500 мА·год. Потужність тепловиділення на внутрішньому опорі акумулятора розраховується за формулою:

$$P = I^2 \cdot R_{in}, \quad (1.1)$$

де I – струм розряду;

R_{in} – внутрішній омичний опір комірки.

Через квадратичну залежність від струму при навантаженнях до 1 А різниця між силовою та звичайною коміркою майже непомітна. Проте вже при 3–5 А кількість виділеного тепла зростає в десятки разів, і ця різниця стає вирішальною. Тоді від силової частини схеми та теплового режиму навантажувального вузла залежить те, чи отримаємо ми достовірний результат, чи просто гарне число на дисплеї.

Оскільки акумулятори 18650 дуже вразливі до умов експлуатації, до вимірювальних приладів висуваються спеціальні технічні вимоги. Для того щоб не нашкодити елементу живлення під час перевірки, система повинна відстежувати не лише поточну напругу, а й зміни температури та показники внутрішнього опору. Тривале утримання комірки під максимальною напругою помітно прискорює її хімічне старіння, що є важливим фактором при проектуванні вимірювального алгоритму. Тому зберігати такі батареї найкраще при рівні заряду від 40% до 60%. Усі ці закономірності є базою для створення програмної частини розроблюваного тестера, адже прилад повинен не просто вимірювати ємність, а також оцінювати поточний стан акумулятора та безпеку його подальшого використання [11–15].

1.4 Існуючі реалізації тестерів ємності

Зараз існує безліч готових рішень для тестування літієвих акумуляторів 18650. Проте на практиці всі ці пристрої діляться на дві великі групи. Високоточні професійні стенди для лабораторій та прості модулі для домашнього використання. Кожен із цих типів розроблявся під свої специфічні умови. Тому вони кардинально відрізняються як за характеристиками і рівнем похибки, так і за

ціною.

Професійні лабораторні комплекси суттєво відрізняються від звичайних тестерів. Виробничий контроль якості та тривалі циклічні випробування є їх основою. На перше місце виходить точність вимірювань. Їхня похибка майже не перевищує 0,02–0,1 %. Зазвичай їх будують багатоканальними, що дозволяє паралельно тестувати від 8 комірок і аж до кількох сотень штук. Користувач може сам писати програми для розряду. Наприклад, налаштувати стандартний CC-CV або складні пульсуючі струми, а всю статистику потім вивантажити через спеціальне ПЗ. Як правило, подібна апаратура сертифікується за міжнародними стандартами (IEC 61960, UN 38.3). Ще варто згадати про можливість проведення EIS – електрохімічної імпедансної спектроскопії. Разом із безперервним моніторингом температури цей метод дозволяє побачити перші ознаки зносу матеріалів ще задовго до того, як акумулятор почне реально втрачати ємність.

Прикладами професійного обладнання є: системи від компаній Arbin Instruments (серія LBT або RBT-Cell) – високоточні циклери з роздільною здатністю 24 біти та точністю струму / напруги до 100 ppm, використовуються в R&D-центрах для Li-ion елементів (рис. 1.11, а); Neware (серії CT-4000 або багатоканальні стенди) – підтримують до сотень каналів, інтеграцію з лабораторними інформаційними системами (LIMS) та тестування в термокамерах, з функціями для 18650 (наприклад, BTS-4008-5V6A) (рис. 1.11, б); Cadex C8000 або Winack BTS – універсальні аналізатори для кваліфікації батарей, з підтримкою SMBus та EIS (рис. 1.11, в). Зустріти лабораторні комплекси можна здебільшого на великих заводах, в інститутах чи органах сертифікації. Перевага цих систем – стовідсоткова достовірність показників. На таких цифрах будуються серйозні дослідження і тримається контроль якості при масовому випуску акумуляторів. Втім, висока точність має свою ціну не лише у фінансовому плані. Сама апаратура настільки складна в управлінні, що для її обслуговування потрібно залучати окремого кваліфікованого інженера.

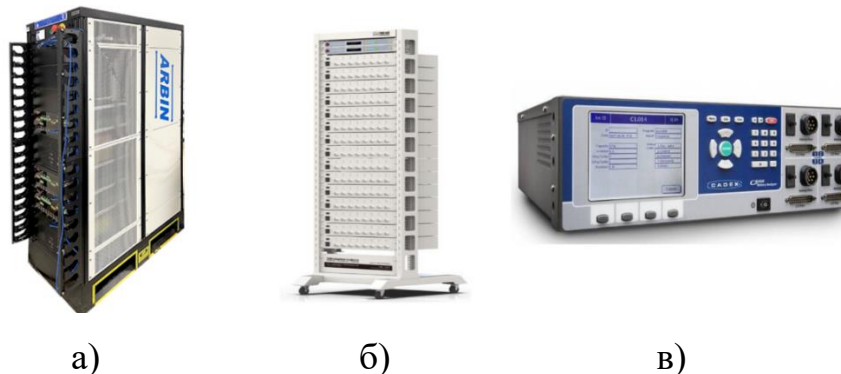


Рисунок 1.11 – Професійні лабораторні комплекси: а) Arbin Instruments LBT, б) Neware CT-4000, в) Cadex C8000 [16]

Побутові тестери здебільшого розраховані на майстрів, радіоаматорів, студентів. У таких приладах на перше місце ставлять компактність та простоту. Мають від одного до чотирьох місць під акумулятори 18650 або 21700. Можуть зарядити елемент, виміряти ємність через розряд (режим CC), перевірити внутрішній опір або запустити цикл refresh. Похибка в 2–10 % тут вважається нормою. Для повсякденних задач, наприклад, коли треба швидко розсортувати старі акумулятори, таких можливостей вистачає.

Серед популярних моделей: Opus BT-C3100 v2.2 (або BT-C3400) – 4-слотовий аналізатор з режимами Capacity Test, Discharge, Refresh, вимірюванням IR, струмом розряду до 1 А на слот (рис. 1.12, а); SkyRC MC3000 – просунутий аналізатор з Bluetooth, підтримкою більшості сучасних типів акумуляторів (Li-ion, NiMH, LiFePO₄), точним вимірюванням ємності, струмом до 3 А та температурним датчиком (рис. 1.12, б).

Окрім комерційних рішень, широке поширення отримали DIY-проекти на базі Arduino, які дозволяють зібрати недорогий тестер ємності самостійно (рис. 1.13). Вони базуються на принципі повного розряду акумулятора з фіксованим або регульованим струмом, інтегрування струму за часом (метод підрахунку кулонів або просте множення струму на час) та відображенні результатів на OLED / LCD-дисплеї.



Рисунок 1.12 – Побутові тестери: а) Orpus BT-C3100 v2.2 універсальний зарядний пристрій; б) Зарядний пристрій SkyRC MC3000 [16]

Аналізуючи популярні DIY-проекти, можна виділити кілька характерних підходів до побудови тестерів. Найчастіше зустрічаються варіанти на базі Arduino Nano, де реалізовано регулювання струму в межах 70–1000 мА. У такій схемі стабілізація зазвичай будується на зв'язці ШІМ, операційного підсилювача LM358 та MOSFET (по типу IRFZ44N) із шунтом на 0,5 Ом. Для виводу даних ставлять OLED SSD1306, а за безпеку відповідає термістор NTC, який зупиняє процес, якщо напруга падає до 3,4 В. Розрахунок тут класичний:

$$C = I \cdot t. \quad (1.2)$$

Це гнучке рішення, хоча відсутність прямого вимірювання струму та нелінійність транзистора можуть вносити свої похибки.

Для реалізації більш точних алгоритмів тестування в сучасних DIY-проектах базові аналогові компоненти часто замінюють на спеціалізовані цифрові монітори струму та напруги, зокрема на модулі сімейства INA219 (рис. 1.13). Застосування подібних інтегральних рішень у поєднанні з комутаційними реле дозволяє системі автоматично керувати циклами заряду та розряду. Підхід фактично трансформує мікроконтролерну платформу у повноцінну діагностичну станцію з можливістю детального відстеження енергетичних параметрів комірки [17–23].

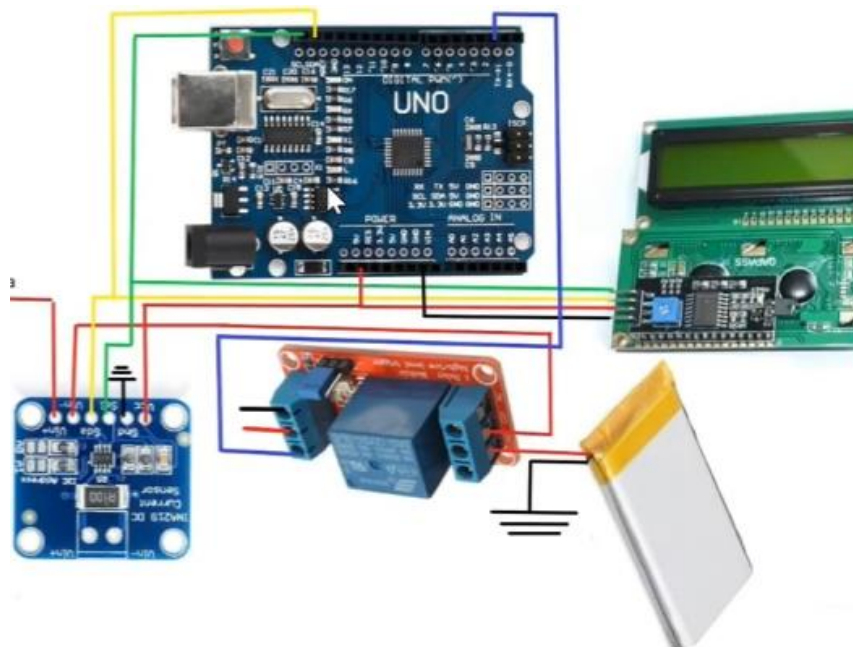


Рисунок 1.13 – Тестер ємності АКБ з використанням INA219 [17]

Вони також мають більш спрощені рішення. У них MOSFET працює як ключ, а замість активного джерела струму використовується звичайний резистор на 10 Ом. Обчислення базуються на інтеграції показників через функцію `millis()`, оскільки постійний струм тут не існує, розряд батареї лінійно падає. Пристрої можна налаштувати на відсічку між 2,9 і 3,0 В, а потім вони подають сигнал про завершення через звичайний buzzer.

Враховуючи все викладене вище, очевидно, що кожен із розглянутих класів вирішує лише частину завдання, але не все одразу. Там, де є точність, бракує доступності, а там, де є свобода налаштувань, страждає достовірність результату. З огляду на це, розробка власного пристрою є цілком обґрунтованою, в якому поєднання вузла активної стабілізації струму з прецизійним АЦП дозволяє подолати зазначені обмеження без суттєвого ускладнення конструкції та зростання її вартості.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЄМНОСТІ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ

2.1 Методи визначення ємності Li-ion акумуляторів

Ємність позначають у міліампер-годинах (мА·год) чи ампер-годинах (А·год). В ідеальних умовах акумулятор із ємністю 2500 мА·год здатен віддавати струм 2,5 А рівно одну годину. Коли ж навантаження менше і становить 1,25 А, заряду вистачить уже на дві години безперервної роботи. У силовій техніці, зокрема в акумуляторних інструментах та системах резервного живлення, точне визначення ємності набуває особливого практичного значення. На сьогоднішній день акумулятори 18650 випускаються з номінальною ємністю здебільшого в межах від 1200 до 3500 мА·год. Існують і вузькоспеціалізовані елементи, показники яких можуть виходити за ці рамки. Досягнення таких високих характеристик залежить від застосованих хімічних компонентів. Наразі найбільшого масового поширення набули комірки на основі літій-нікель-марганець-кобальт-оксидної (NCM) та літій-залізо-фосфатної (LFP) систем. Обидві технології дозволяють виробникам знаходити найкращий компроміс між здатністю батареї безпечно віддавати великі струми та максимальною кількістю енергії, яку вона може в собі запасти. Але внаслідок багаторазових циклів заряду-розряду та деградації матеріалів, навіть найякісніші елементи з часом втрачають свою початкову ємність. Це може спричинити розбіжності між паспортними та фактичними даними, змушуючи регулярно контролювати реальний стан батарей.

2.1.1 Метод повного розряду (Еталонне вимірювання)

Найвища достовірність результатів тут досягається за рахунок безпосереднього підрахунку тієї кількості енергії, яку акумулятор реально віддає під навантаженням.

Методика передбачає розрядження попередньо повністю зарядженого елемента (від напруги 4,2 В) до встановленої мінімальної межі (зазвичай 2,5–

3,0 В) через тестове навантаження. З математичної точки зору, фактична ємність (С) обчислюється як визначений інтеграл розрядного струму (I) за загальний час розряду (t):

$$C = \int_0^t I(t)dt. \quad (2.1)$$

Якщо розроблений тестер має функцію стабілізації струму (режим Constant Current, CC), інтегрування не потрібне, і формула лінійно спрощується. Ємність буде дорівнювати простому добутку сили струму на час розряджання:

$$C = I \cdot \Delta t. \quad (2.2)$$

Метод дає максимально достовірний результат, проте в реальній експлуатації він стикається з серйозними обмеженнями. Процес вимірювання є занадто довгим, а батарею на цей час доводиться відключати від основного навантаження. У випадках, коли пристрій має оцінювати стан заряду (SOC) не перериваючи своєї роботи, цей класичний підхід не працює. Щоб вирішити цю проблему, інженери застосовують алгоритми постійного моніторингу, базовим серед яких вважається метод підрахунку кулонів.

2.1.2 Метод підрахунку кулонів

Він базується на законі збереження електричного заряду. Визначення ємності та поточного стану заряду відбувається шляхом безперервного вимірювання струму, що протікає через акумулятор, та його інтегрування у часі.

З теоретичної точки зору, поточний стан заряду SOC(t) описується через визначений інтеграл:

Узагальнену графічну модель визначення стану заряду акумулятора методом підрахунку кулонів представлено на рисунку 2.1.

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{nom}} \int_{t_0}^t I(t) dt, \quad (2.3)$$

де $SOC(t_0)$ – початковий стан заряду;

C_{nom} – номінальна (або раніше виміряна) ємність комірки;

$I(t)$ – миттєве значення струму (позитивне під час заряду та негативне під час розряду).

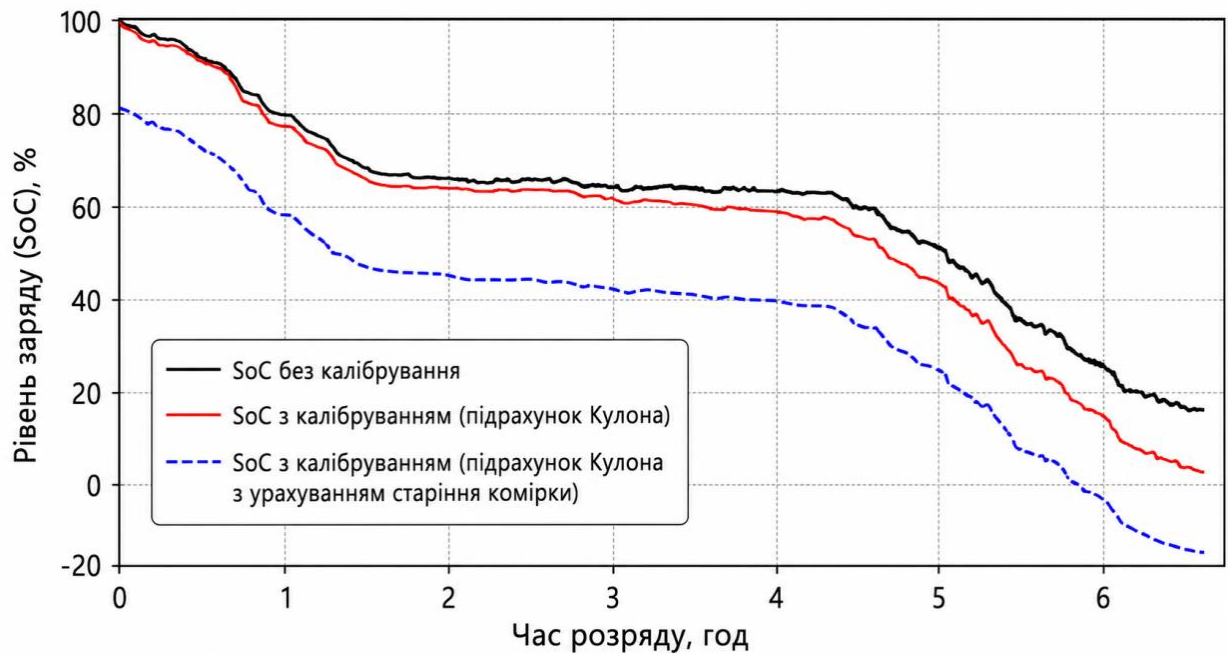


Рисунок 2.1 – Графічна інтерпретація визначення стану заряду акумулятора методом підрахунку кулонів

Мікроконтролери, працюючи в цифровій площині, не здатні виконувати класичне безперервне інтегрування аналогових сигналів. Їхнє застосування вимагає перетворення формули у дискретний вигляд. В саморобних вимірювальних пристроях, і в промислових системах захисту (BMS) струм вимірюється через однакові часові інтервали (Δt). Реалізується це програмно: мікроконтролер за допомогою вбудованого АЦП періодично знімає покази падіння напруги на точному шунті.

$$C_{cur} = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \Delta t. \quad (2.4)$$

Незважаючи на те, що рахування кулонів зручно для динамічного спостереження, у методі є деякі недоліки. Прогресуюча обчислювальна похибка є його головною проблемою. Накопичення цієї похибки зумовлене трьома основними апаратними та алгоритмічними факторами: недостатньою роздільною здатністю АЦП (що призводить до втрати даних про мікроструми), дрейфом нуля операційних підсилювачів (хибне детектування струму за його фактичної відсутності) та математичною прив'язкою до початкового стану заряду ($SOC(t_0)$). Загальний результат швидко перестає відповідати дійсності, якщо хоч один із цих параметрів зазнає температурного або часового дисбалансу. Алгоритм потребує періодичної синхронізації, щоб тримати цю похибку в прийнятних межах. Мікроконтролер скидає всю накопичену математичну похибку після того, як акумулятор досягне напруги 4,2 В (100%) або 2,5 В (0%).

2.1.3 Метод напруги холостого ходу як засіб калібрування

Для вирішення проблеми з похибкою без надмірного ускладнення обчислень сучасні вимірювальні системи застосовують гібридний підхід. Між напругою акумулятора, що перебував у стані спокою і його реальним станом заряду існує стійка залежність. Якщо комірка достатньо довго простояла без навантаження, достатньо зчитати її напругу і за кривою OCV-SOC визначити точне початкове значення заряду (рис. 2.2). Після цього кулонівський алгоритм отримує коректну стартову точку, і вся накопичена до цього моменту похибка фактично скидається.

OCV метод нормально працює тільки тоді, коли акумулятор повністю перебуває в стані спокою. Наприклад, під час активного розряду чи заряду напруга на клеммах вже не показує справжній рівень заряду. Загалом, це відбувається через те, що до показників додається падіння напруги на внутрішньому опорі комірки, тому орієнтуватись на ці цифри під час роботи просто не можна.

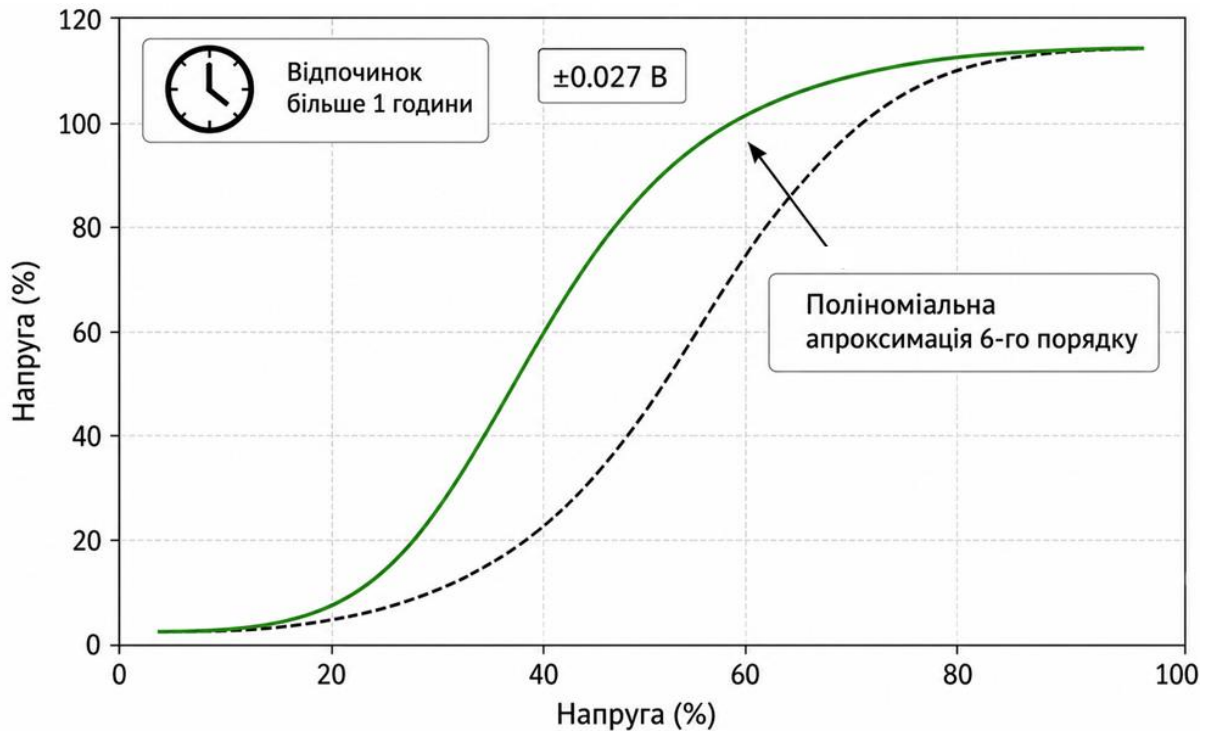


Рисунок 2.2 – Крива калібрування OCV-SOC

Через цю особливість метод OCV майже не використовують як повноцінний самостійний спосіб вимірювання. Він скоріше працює як додатковий інструмент калібрування, який має реальний сенс тільки в поєднанні з тим же кулонівським підрахунком.

2.1.4 Порівняльний аналіз методів визначення ємності

Щоб остаточно визначитися з алгоритмом тестування, треба порівняти їхні реальні експлуатаційні характеристики. Якщо розібратися, стає зрозуміло, що ці підходи створені для абсолютно різних задач. Метод повного розряду – це суто стаціонарна (або offline) перевірка. Його застосовують, коли нам потрібно один раз і максимально точно протестувати конкретну батарею. Алгоритм підрахунку кулонів працює інакше. Він більше розрахований на використання в платах керування (BMS), щоб постійно моніторити стан акумулятора прямо під час його роботи, тобто в режимі online.

Коли ми обираємо метод повного розряду, все основне навантаження лягає саме на силові компоненти. Головна проблема при проектуванні такого

тестера полягає у сильному нагріванні компонентів. Потрібно утилізувати всю енергію, яку віддає батарея. Тоді в конструкції обов'язково доводиться передбачати масивні радіатори або навіть ставити вентилятори для активного охолодження.

З методом підрахунку кулонів ситуація трохи інша. При повному розряді найважче, зробити надійну силову частину і нормально відвести тепло, то тут головна проблема ховається в точності самих вимірювань та написанні коду. Як уже розглядалося раніше, цей алгоритм має неприємну особливість поступово накопичувати похибку (рис. 2.3). Через це він просто не зможе надійно працювати в довгостроковій перспективі, якщо періодично не калібрувати його за допомогою методу OCV. Він ідеально підходить для систем BMS, де акумулятор постійно знаходиться в роботі і його не можна просто відключити для перевірки.

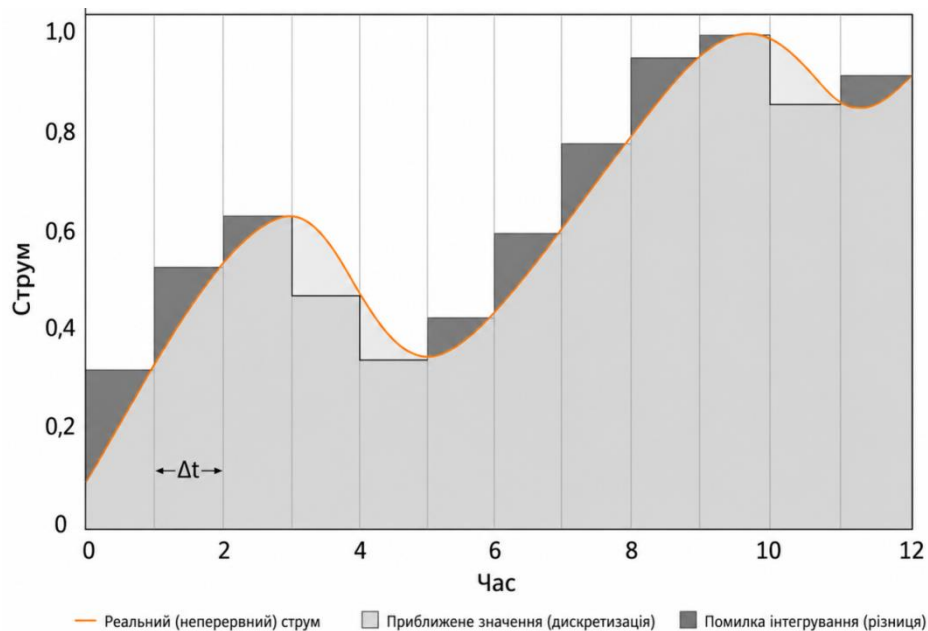


Рисунок 2.3 – Джерела помилок у методі підрахунку кулонів: накопичення помилки інтегрування струму через дискретизацію та час вибірки (порівняння з ідеальним інтегруванням)

Якщо основним призначенням розроблюваного пристрою є одноразова точна діагностика конкретної комірки, а не безперервне спостереження за її станом,

вибір методу повного розряду видається найбільш обґрунтованим. Щоб виключити математичну похибку обчислень, цей алгоритм ідеально доповнюється апаратною стабілізацією струму (СС). Таке поєднання гарантує дійсно високу вимірювальну достовірність результатів. Загальний підсумок того, чим ці підходи відрізняються на практиці та для системного аналізу ключові експлуатаційні характеристики обох методів зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика базових методів вимірювання ємності

Характеристика	Метод повного розряду	Кулонний метод
Принцип дії	Пряме вимірювання відданої енергії	Математичне інтегрування струму у часі
Точність	Висока (еталонне значення)	Середня (залежить від роздільної здатності АЦП)
Швидкість оцінки	Низька (вимірюється годинами)	Висока (динамічний моніторинг)
Вплив на ресурс	Додаткове зношення від глибокого циклу	Не створює додаткового хімічного стресу
Головний недолік	Виділення тепла і тривалість перевірки	Накопичення похибки та необхідність калібрування

2.2 Навантажувальні схеми

Навантажувальний вузол є базовим апаратним елементом тестера ємності, оскільки саме він керує відбором електричного струму від акумулятора під час циклу розряду. Від конструктивних рішень, реалізованих у цій частині пристрою, безпосередньо залежать точність вимірювання, стабільність струму, теплові режими роботи та загальна достовірність отриманих результатів. Зазвичай застосовують кілька принципово різних методів побудови навантажувальних кіл.

Резистивне навантаження з фіксованим опором. Базовим і найбільш доступним методом організації навантаження виступає використання постійного резистора, що підключається до досліджуваного акумулятора через електронний ключ – N-канальний MOSFET-транзистор. У рамках такої архітектури струмовідвідний елемент (із типовим номіналом від 5 до 10 Ом) комутується за

допомогою силового транзистора (зокрема, IRFZ44N або 2N7000), логічний стан якого безпосередньо контролюється мікроконтролером (рис. 2.4).

Недоліком цього підходу є те, що струм розряду $I=U/R$ не є постійним: оскільки напруга на акумуляторі в процесі розряду зменшується від 4,2 В до 2,5 В, струм через резистор також змінюється пропорційно. При навантаженні 5 Ом початковий струм становить 840 мА, а в кінці розряду лише 500 мА. Похибка визначення ємності для подібних схем зазвичай становить понад 5–10%. Резистивні навантаження з фіксованим опором застосовуються, де абсолютна точність не є критичною вимогою.

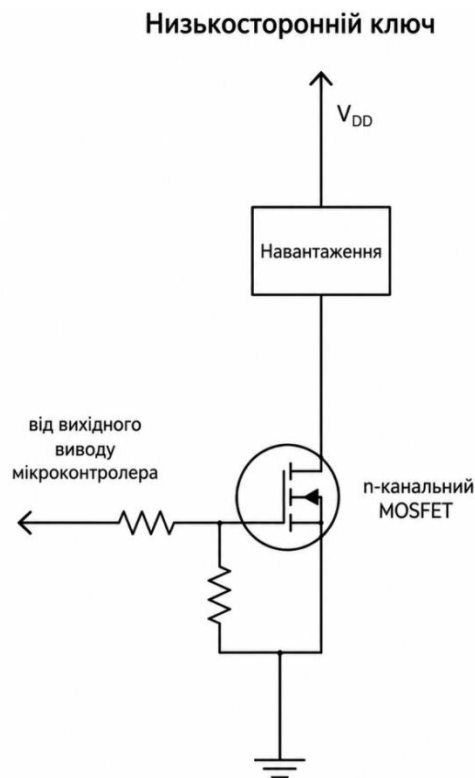


Рисунок 2.4 – Принципова схема пасивного резистивного навантаження

Схема активного навантаження зі стабілізацією струму (Constant Current, CC). Значно вищий рівень точності досягається при переході до активного навантаження з апаратною CC. У центрі такої конфігурації лежить класичний принцип від'ємного зворотного зв'язку. Операційний підсилювач (ОП) працює в режимі безперервного моніторингу, зіставляючи фактичне падіння напруги на

вимірювальному шунті із заданим рівнем. Як тільки фіксується найменша розбіжність, ОП динамічно змінює керуючий потенціал на затворі польового транзистора. Завдяки цій миттєвій саморегуляції струм розряду залишається стабілізованим, що дозволяє системі повністю компенсувати природне зниження напруги на клеммах акумулятора в процесі його розряджання (рис. 2.5).

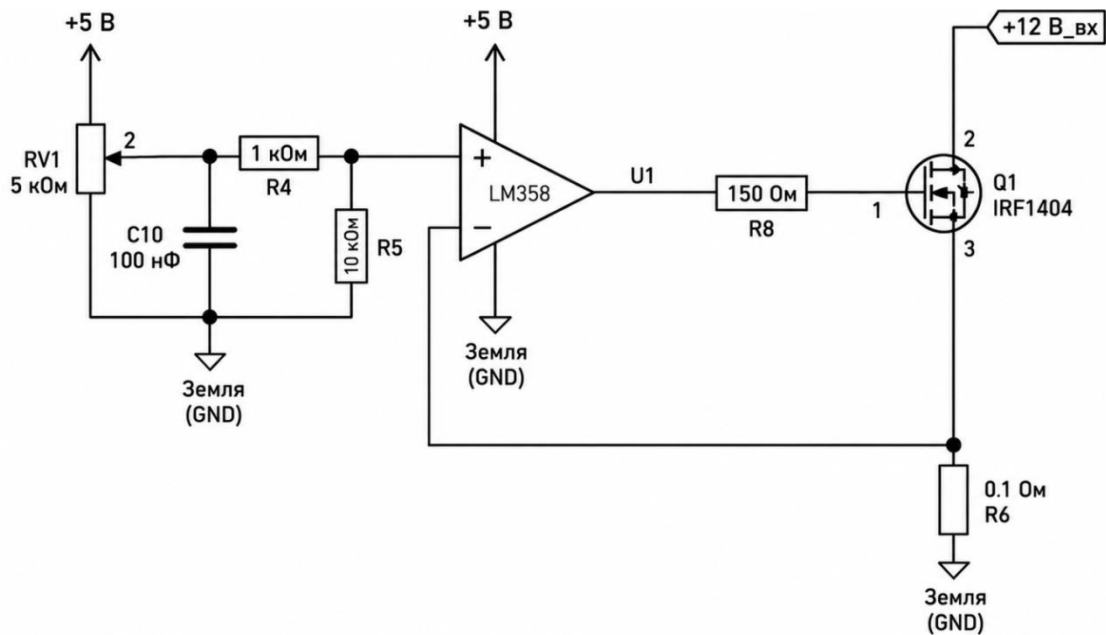


Рисунок 2.5 – Принципова схема активного електронного навантаження зі стабілізацією струму

Як було зазначено раніше, практична реалізація такого контуру найчастіше базується на зв'язці операційного підсилювача та силового N-канального MOSFET-транзистора. У цій архітектурі підсилювач виконує роль компаратора (підсилювача помилки). Джерелом напруги виступає відфільтрований ШІМ-сигнал від мікроконтролера, який подається на один із входів ОП. На інший вхід надходить сигнал зворотного зв'язку з вимірювального шунта. Завдяки цій різниці потенціалів транзистор динамічно змінює свій лінійний опір, розсіюючи надлишкову енергію у вигляді тепла та підтримуючи заданий струм. Умова такої апаратної стабілізації описується наступним рівнянням:

$$I_{pos} = \frac{U_{\text{опор}}}{R_{\text{шунт}}} = \text{const}, \quad (2.5)$$

де I_{pos} – струм розряду;

$U_{\text{опор}}$ – опорна напруга;

$R_{\text{шунт}}$ – опір шунта.

Перевагою СС-схеми є значно вища точність вимірювання ємності: при постійному струмі розряду обчислення ємності виконується за формулою (2.6) без потреби в чисельному інтегруванні.

$$C = I \cdot t. \quad (2.6)$$

Точність таких схем у DIY-тестерах досягає 1–2%, а у побутових комерційних приладах (Opus BT-C3100, SkyRC MC3000) складає 1–3%.

Суттєвим фактором при реалізації СС-навантаження є теплове навантаження на силовий транзистор. Вся розсіювана потужність (формула 2.7) виділяється у вигляді тепла на транзисторі.

$$P = U_{\text{акум}} \cdot I, \quad (2.7)$$

При напрузі 3,7 В та струмі 1 А потужність розсіювання сягає 2,5–3,5 Вт, що вимагає застосування алюмінієвого тепловідведення.

Навантаження на основі модуля INA219 + MOSFET. Альтернативою апаратній стабілізації на базі операційних підсилювачів є програмно-апаратне керування розрядним струмом. У таких архітектурах аналоговий компаратор замінюється цифровим циклом: мікроконтролер безперервно зчитує дані з високоточного зовнішнього вимірювача струму та напруги по цифровій шині (рис. 2.6).

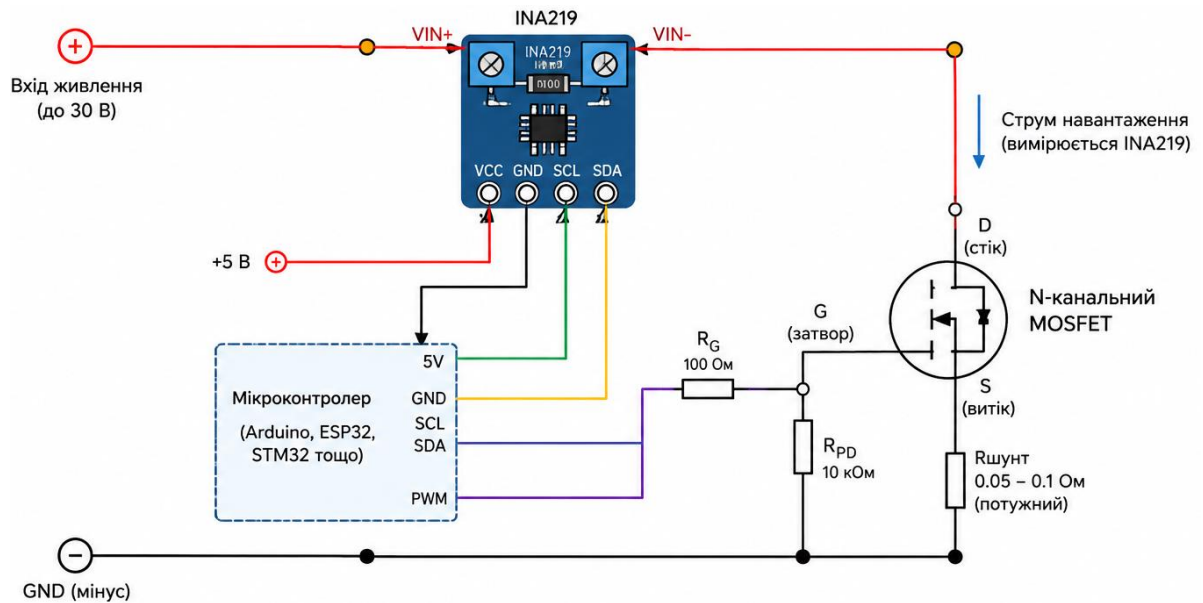


Рисунок 2.6 – Схема навантаження на основі модуля INA219 + MOSFET

Програма порівнює отримані фактичні показники із заданим цільовим значенням і динамічно коригує коефіцієнт заповнення ШІМ-сигналу на затворі силового MOSFET-транзистора. Він дозволяє позбутися аналогової обв'язки підсилювачів та суттєво розширює можливості для програмного калібрування системи.

2.3 Схеми вимірювання струму та напруги

Точність роботи алгоритмів розрахунку ємності залежить від достовірності даних про напругу та струм у колі навантаження, які мікроконтролер має отримувати в режимі реального часу. Оскільки ці величини є аналоговими, їх перетворення у цифровий код виконується за допомогою вбудованого АЦП. Попри те, що напруга літій-іонної комірки вписується у діапазон стандартного 5-вольтового входу мікроконтролера, пряме підключення на практиці використовується обмежено. Для захисту портів від випадкових сплесків напруги, а також для можливості тестування інших типів акумуляторів у майбутньому, у вимірювальний тракт доцільно інтегрувати резистивні дільники (рис 2.7).

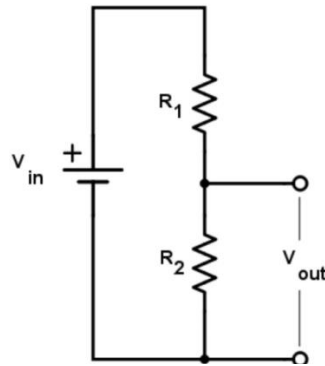


Рисунок 2.7 – Типова схема резистивного дільника напруги для узгодження рівнів сигналів

Математична модель такого перетворення описується класичним рівнянням дільника напруги:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.8)$$

де $U_{\text{вих}}$ – масштабована напруга, що подається на вхід АЦП мікроконтролера;

$U_{\text{вх}}$ – фактична напруга на клеммах досліджуваного акумулятора;

R_1 та R_2 – номінали опорів резисторів верхнього та нижнього дільника відповідно.

Переваги резистивного дільника полягають у тому, що він недорогий і простий у використанні. Точність такого рішення залежить від того, наскільки реальний опір резисторів відрізняється від їхнього номіналу, який зазвичай становить 1–5%, а також від впливу струмів витоку. У поширених конструкціях на базі Arduino типовим кроком є встановлення резисторів R_1 та R_2 номіналом по 10 кОм. Це дозволяє отримати коефіцієнт поділу 1/2, що є оптимальним для узгодження рівнів напруги.

Для вимірювання струму розряду найпоширенішим є шунтовий метод, де струм проходить через прецизійний резистор низького номіналу (шунт, 0,1–1 Ом), а напруга на ньому вимірюється АЦП мікроконтролера.

Струм обчислюється за законом Ома:

$$I_{\text{роз}} = \frac{U_{\text{шунт}}}{R_{\text{шунт}}}, \quad (2.9)$$

де $U_{\text{шунт}}$ – напруга на шунті;

$R_{\text{шунт}}$ – його опір.

У найпростіших DIY-схемах вимірювальний шунт встановлюється послідовно з навантаженням, після чого напруга зчитується через аналоговий порт мікроконтролера з використанням конденсаторів (0,1–10 мкФ) для фільтрації шумів. Застосування прецизійних резисторів дозволяє досягти високої точності вимірювань із похибкою лише 1–2 %, але цей підхід має суттєві експлуатаційні обмеження. Зокрема, проходження струму супроводжується тепловиділенням, що спричиняє теплові втрати на самому шунті ($P = I^2 \cdot R_{\text{ш}}$), яке за сили струму в 1 А може сягати 1–2 Вт. Для коректної фіксації малих струмів необхідно застосування додаткових операційних підсилювачів. Щоб уникнути частини цих проблем та оптимізувати керування, у більш досконалих тестерах із MOSFET-навантаженням шунт інтегрують безпосередньо в контур зворотного зв'язку (рис. 2.8).

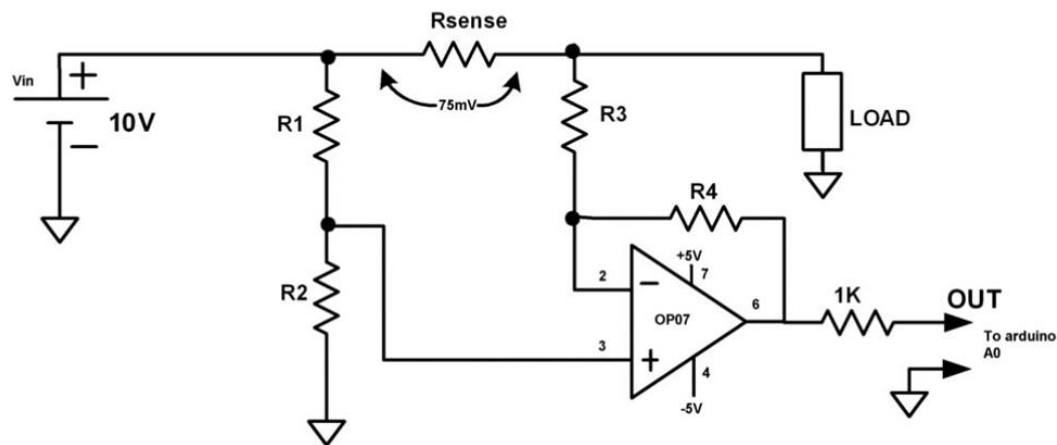


Рисунок 2.8 – Схема вимірювання струму за допомогою шунтового резистора в тестері 18650

Сьогодні більшість апаратних реалізацій тестерів ємності відмовляються від дискретних аналогових кіл підсилення на користь спеціалізованих інтегральних моніторів струму та напруги. Два класи пристроїв, які вирішують це завдання, представлені датчиками на основі ефекту Холла (наприклад, модуль ACS712) та спеціалізованими мікросхемами з прецизійним шунтом. Проте ACS712 має високу базову похибку та надмірну чутливість до електромагнітних полів, що робить його неприйнятним для прецизійних тестерів. Натомість найбільш оптимальним представником цього класу для портативних приладів є мікросхема INA219.

Цей вимірювальний модуль є комплексним цифровим рішенням, яке об'єднує прецизійний підсилювач із програмованим коефіцієнтом підсилення (PGA), високоточний 12-бітний АЦП і вбудований математичний співпроцесор на одному напівпровідниковому кристалі (рис. 2.9).

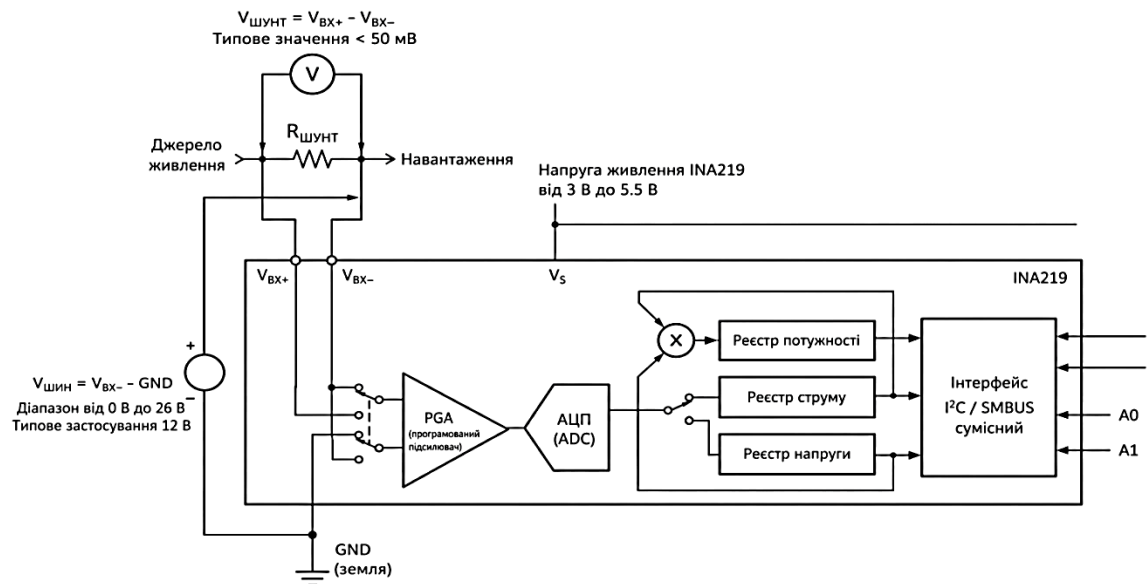


Рисунок 2.9 – Структурна схема інтегрального цифрового вимірювача струму та напруги INA219

Модуль передає цифрові дані до мікроконтролера через універсальну шину I2C, забезпечуючи вимірювання струму з похибкою до 1% у діапазоні до 3,2 А. Ці характеристики роблять його ідеальним апаратним вибором для розробки точного вимірювального комплексу.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТЕСТЕРА ЄМНОСТІ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ

3.1 Принцип роботи тестера ємності Li-ion акумуляторів на основі електричної схеми

Розглянемо запропоновану конструкцію тестера ємності, який здатний вимірювати ємність акумуляторів типу 18650 Li-ion. Водночас, за параметрами такий тестер підходить практично для будь-якого типу акумуляторів з номінальною напругою нижче 5 В. Користувачі можуть встановлювати струм розряду за допомогою кнопок. Тестер оснащений OLED-інтерфейсом користувача. Пристрій можна використовувати як електронне навантаження.

Для тестера використаємо такі основні компоненти: Arduino Nano; операційний підсилювач LM358; мікросхема опорної напруги LM385BZ-1.2; 0,96-дюймовий OLED-дисплей; керамічний резистор; конденсатор 100 нФ; конденсатор 220 мкФ; резистори 4,7 кОм та 1 МОм.

Схема тестера ємності Li-ion акумуляторів працює за принципом контрольованого розряду акумулятора стабілізованим струмом із подальшим вимірюванням часу розряду та автоматичним обчисленням ємності в мА·год. Основним керуючим елементом пристрою є мікроконтролер Arduino Nano, який забезпечує керування електронним навантаженням, вимірювання параметрів та виведення результатів на OLED-дисплей (рис. 3.1).

Після подачі живлення через роз'єм DC Jack на схему надходить стабілізована напруга +5 В. Світлодіод LED через струмообмежувальний резистор R5 сигналізує про ввімкнення пристрою та готовність до роботи. Після запуску Arduino Nano ініціалізує OLED-дисплей, кнопки керування, PWM-вихід та звуковий сигналізатор.

Користувач підключає Li-ion акумулятор до роз'єму P1. Напруга акумулятора через фільтрувальні конденсатори C1 і C2 подається на аналоговий

вхід A0 мікроконтролера. Конденсатори забезпечують пригнічення високочастотних шумів та згладжування пульсацій, що підвищує точність АЦП.

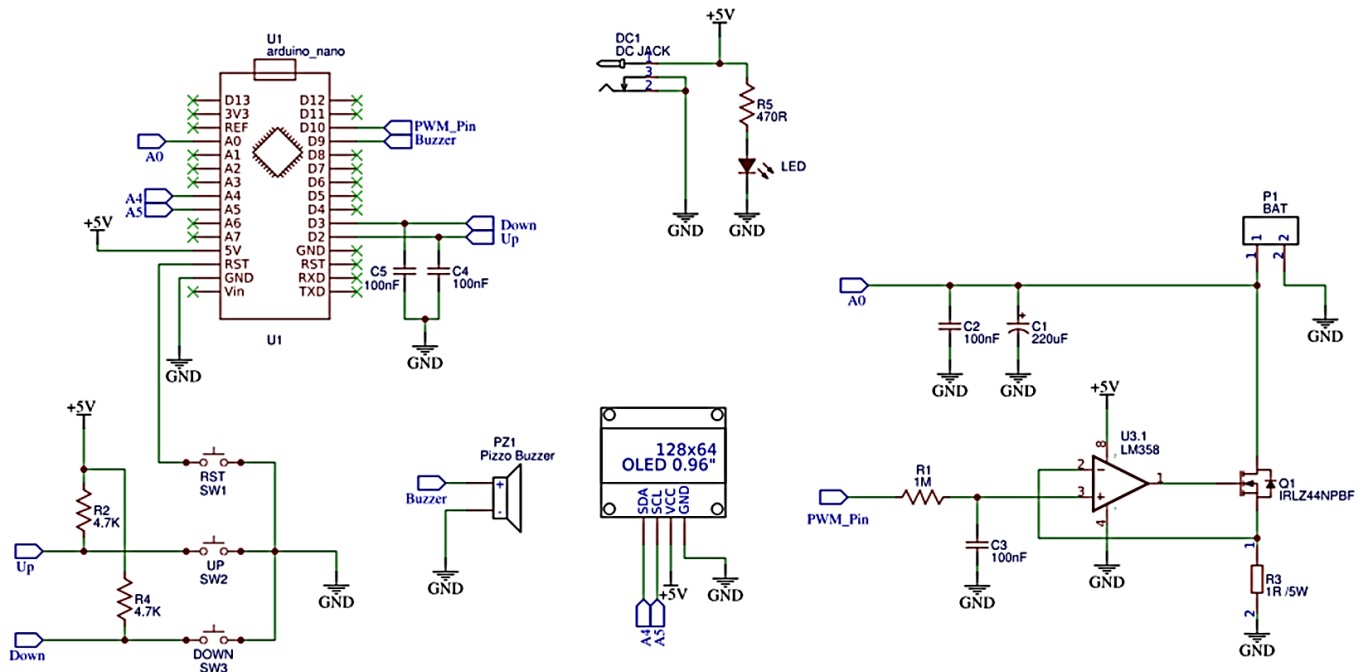


Рисунок 3.1 – Електрична схема тестера ємності АКБ

Кнопками UP і DOWN користувач встановлює необхідний струм розряду акумулятора. Після вибору режиму Arduino формує PWM-сигнал на виході D10. Цей сигнал проходить через RC-фільтр, утворений резистором R1 та конденсатором C3, у результаті чого імпульсний сигнал перетворюється у квазіпостійну аналогову напругу. Отримана напруга використовується як опорна для керування операційним підсилювачем LM358.

Операційний підсилювач LM358 разом із MOSFET-транзистором IRLZ44N утворює електронне навантаження стабілізованого струму. LM358 порівнює опорну напругу із напругою на шунті R3 та змінює ступінь відкриття MOSFET-транзистора. Якщо струм розряду менший за встановлений, операційний підсилювач збільшує напругу на затворі MOSFET, унаслідок чого транзистор відкривається сильніше і струм збільшується. Якщо струм перевищує задане значення, LM358 зменшує керуючу напругу, частково закриваючи транзистор.

Таким чином забезпечується підтримання стабільного струму розряду незалежно від зміни напруги акумулятора.

Шунт R3 номіналом 1 Ом використовується для контролю струму. Під час проходження струму через шунт на ньому виникає падіння напруги, пропорційне величині струму. Саме це падіння напруги аналізується операційним підсилювачем для стабілізації режиму роботи електронного навантаження.

Після запуску тестування Arduino починає відлік часу розряду. Щосекунди мікроконтролер вимірює напругу акумулятора та обчислює ємність за формулою:

$$C=I \cdot t, \quad (3.1)$$

де C – ємність акумулятора;

I – струм розряду;

t – тривалість розряду.

Поточні значення часу тестування, струму розряду, напруги акумулятора, обчисленої ємності відображаються на OLED-дисплеї у режимі реального часу.

Розряд триває доти, доки напруга акумулятора не знизиться до встановленого мінімального рівня, який для Li-ion акумуляторів становить приблизно 3,0 В. Після досягнення цієї межі Arduino автоматично вимикає PWM-сигнал, MOSFET закривається і процес розряду припиняється. На дисплей виводиться остаточне значення ємності акумулятора, а бусер подає звуковий сигнал про завершення тестування.

3.2 Конструктивна будова тестера ємності Li-ion акумуляторів

Структурно пристрій складається з п'яти основних функціональних блоків: джерела живлення, вузла формування навантаження постійного струму, вузла вимірювання напруги акумулятора, інтерфейсу користувача та блоку звукової індикації (рис. 3.2). Кожен із цих вузлів виконує окрему функцію в процесі

визначення ємності літій-іонного акумулятора.

Схема джерела живлення. Схема живлення пристрою реалізована на основі зовнішнього джерела постійної напруги 7–9 В, яке підключається через роз'єм DC Jack. Напруга подається на вивід Vin плати Arduino Nano, після чого вбудований лінійний стабілізатор Arduino знижує її до стабілізованих 5 В, необхідних для живлення мікроконтролера та периферійних вузлів пристрою.

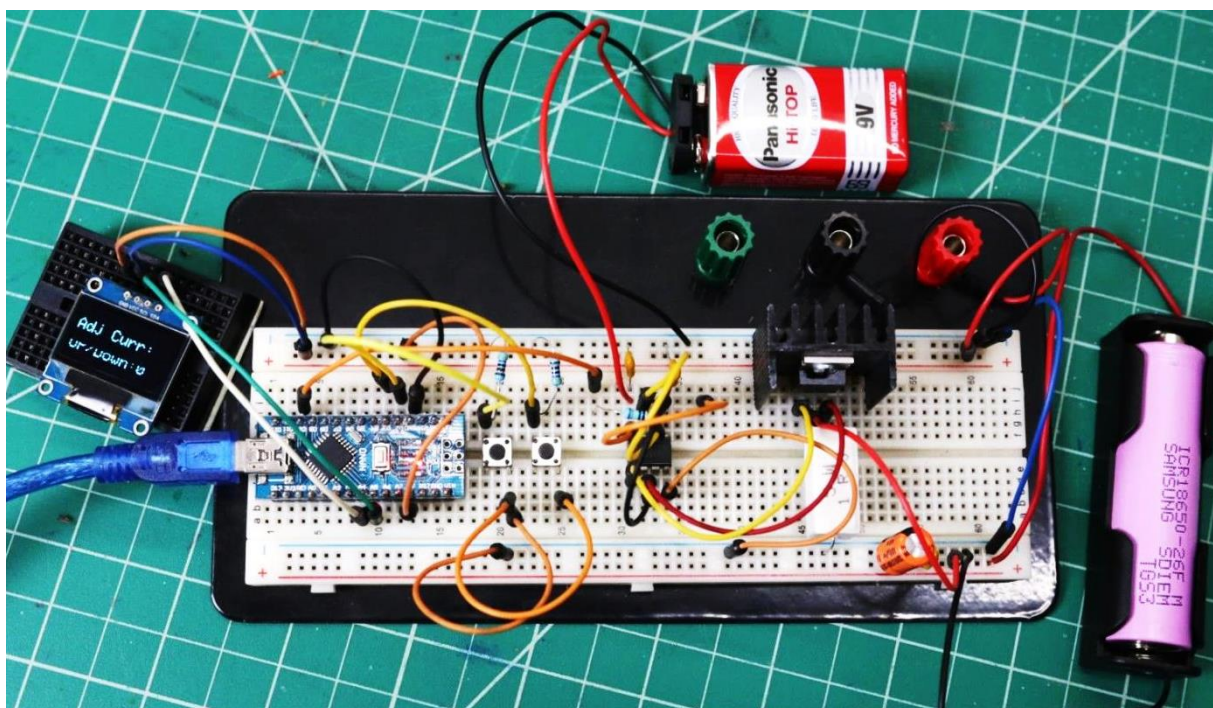


Рисунок 3.2 – Зібрана схема тестера ємності на макетній платі

Світлодіод LED та резистор R5 виконують функцію індикації наявності живлення.

Схема стабілізованого струмового навантаження. Основним вузлом тестера є схема стабілізованого електронного навантаження, побудована на операційному підсилювачі LM358 та MOSFET-транзисторі IRLZ44N. LM358 містить два операційні підсилювачі в одному корпусі, однак у даному проекті використовується лише один із них.

ШИМ-сигнал з цифрового виводу D10 Arduino подається на RC-фільтр низьких частот, утворений резистором R1 та конденсатором C3. Після фільтрації

формується квазіаналогова опорна напруга, яка надходить на неінвертуючий вхід операційного підсилювача.

Інвертуючий вхід операційного підсилювача підключений до точки між MOSFET-транзистором IRLZ44N та шунтуючим резистором R3 опором 1 Ω . Операційний підсилювач здійснює негативний зворотний зв'язок та керує затвором MOSFET таким чином, щоб падіння напруги на шунті R3 дорівнювало опорній напрузі на неінвертуючому вході.

Відповідно до закону Ома, струм розряду визначається виразом:

$$I = \frac{U_{ref}}{R3}, \quad (3.2)$$

де U_{ref} – опорна напруга після RC-фільтра;

R3 – шунтуючий резистор.

Таким чином, зміна коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу дозволяє регулювати струм розряду акумулятора.

Схема вимірювання напруги акумулятора. Напруга акумулятора вимірюється за допомогою аналогового входу A0 мікроконтролера Arduino Nano. Конденсатори C1 та C2 використовуються для фільтрації високочастотних та низькочастотних шумів, які виникають у силовому колі електронного навантаження та можуть впливати на точність аналого-цифрового перетворення.

Схема інтерфейсу користувача. Інтерфейс користувача складається з двох кнопок керування та OLED-дисплея 0,96" з інтерфейсом I2C. Кнопки UP та DOWN використовуються для збільшення або зменшення встановленого струму розряду шляхом зміни коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу.

Резистори R2 та R4 виконують функцію підтягувальних резисторів для кнопок. Конденсатори C4 та C5 застосовуються для придушення дребезгу контактів. Кнопка RESET призначена для перезапуску мікроконтролера Arduino Nano.

Схема звукової індикації. П'єзоелектричний зумер, підключений до цифрового виводу D9 Arduino Nano, використовується для звукового сповіщення про початок та завершення процесу тестування акумулятора.

Розглянемо детальніше схему електронного навантаження, яка реалізована на основі операційного підсилювача LM358 та MOSFET-транзистора IRLZ44N (рис. 3.3).

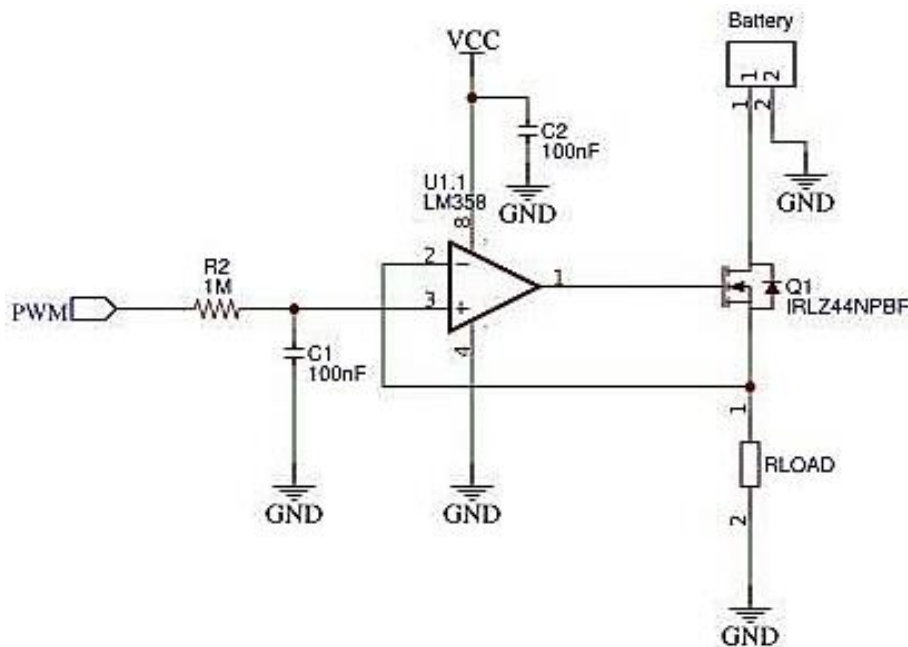


Рисунок 3.3 – Схема електронного навантаження тестера ємності

Теорія електронного навантаження базується на порівнянні напруги інвертуючого (вивід 2) та неінвертуючого (вивід 3) входів операційного підсилювача, налаштованого як одиничний підсилювач. Коли ми встановлюємо напругу, що подається на неінвертуючий вхід, шляхом регулювання ШІМ-сигналу, вихід операційного підсилювача відкриває затвор MOSFET. Коли MOSFET вмикається, струм протікає через R1, що створює падіння напруги, яке забезпечує негативний зворотний зв'язок до операційного підсилювача. Він керує MOSFET таким чином, що напруга на його інвертуючому та неінвертуючому входах є рівною. Таким чином, струм через навантажувальний резистор

пропорційний напрузі на неінвертуючому вході операційного підсилювача.

ШИМ-сигнал від Arduino фільтрується за допомогою схеми фільтра низьких частот (R2 та C1). Щоб перевірити працездатність ШИМ-сигналу та схеми фільтра, було підключено цифровий осцилограф (DSO) – канал 1 на вході та канал 2 на виході схеми фільтра. Форма вихідного сигналу показана на рисунку 3.4.

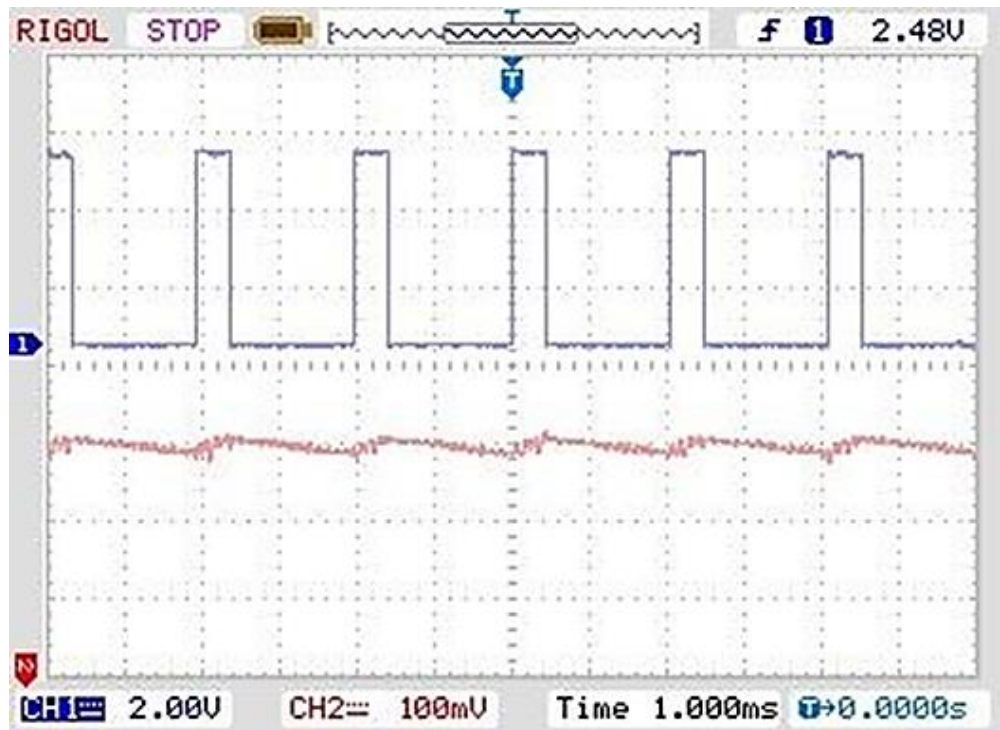


Рисунок 3.4 – Форма вихідного сигналу

На рисунку показано процес перетворення ШИМ-сигналу мікроконтролера на аналогову керуючу напругу за допомогою RC-фільтра низьких частот. Верхня осцилограма відповідає прямокутному PWM-сигналу, а нижня – напрузі на виході фільтра. Незначні пульсації вихідної напруги зумовлені процесами заряджання та розряджання конденсатора фільтра. Отримана аналогова напруга використовується операційним підсилювачем LM358 для формування стабільного струму розряду акумулятора.

3.3 Функціональні складові тестеру для вимірювання ємності

Розглянемо основні функціональні складові, які складають конструкцію тестеру ємності.

Arduino Nano. У розробленому пристрої для вимірювання ємності літій-іонних акумуляторів як центральний керуючий елемент використано мікроконтролерну плату Arduino Nano. Дана плата є компактною реалізацією платформи Arduino, побудованою на базі мікроконтролера ATmega328P, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для реалізації алгоритмів вимірювання, обробки даних та керування периферійними пристроями (рис. 3.5).

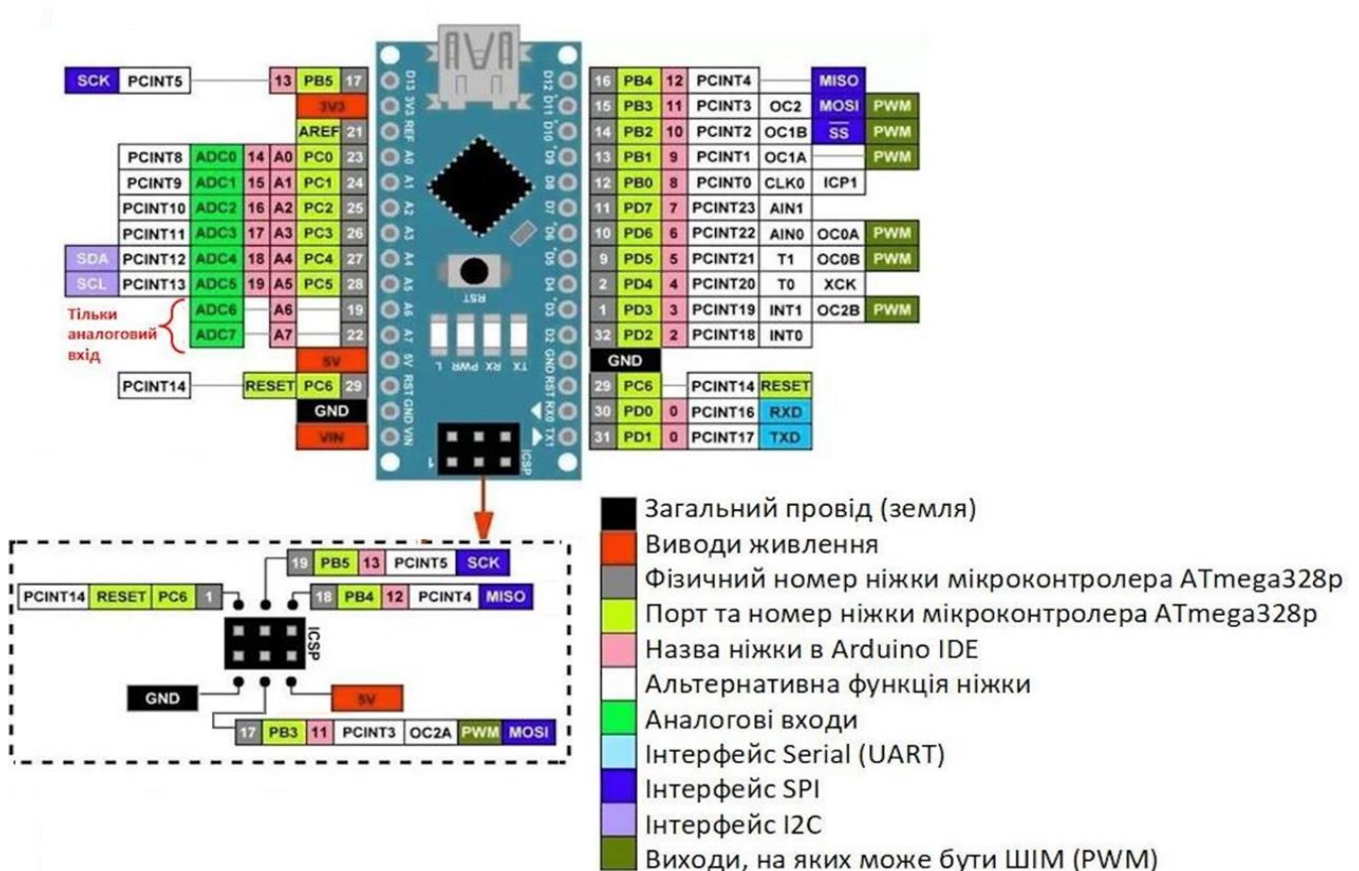


Рисунок 3.5 – Розпіновка Arduino Nano [7]

Arduino Nano відрізняється невеликими габаритами, низьким енергоспоживанням та простотою програмування, що робить її популярним

рішенням для створення вимірювальних, керуючих та навчальних електронних систем. Програмування плати здійснюється через середовище розробки Arduino IDE мовою C/C++, а завантаження програмного коду виконується через інтерфейс USB.

Основні технічні параметри плати наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики Arduino Nano

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Тактова частота	16 МГц
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга живлення	7–12 В
Цифрові входи/виходи	14
ШІМ-виходи	6
Аналогові входи	8
Flash-пам'ять	32 КБ
SRAM	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Інтерфейси зв'язку	UART, I ² C, SPI
Габаритні розміри	45 × 18 мм

У тестері ємності акумуляторів плата Arduino Nano виконує функції центрального контролера та координує роботу всіх функціональних вузлів пристрою.

Основними завданнями мікроконтролера є:

- вимірювання напруги акумулятора через вбудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
- формування ШІМ-сигналу для керування схемою електронного навантаження;
- обчислення струму розряду та ємності акумулятора;
- контроль напруги відсічення під час розряду;
- обробка натискань кнопок керування;
- керування OLED-дисплеєм;
- формування звукових сигналів через зумер;
- збереження та обробка результатів вимірювань.

Особливе значення для даного проєкту має наявність апаратного ШІМ-модуля. За допомогою ШІМ-сигналу формується керуюча напруга для операційного підсилювача LM358, який підтримує необхідний струм розряду акумулятора. Таким чином забезпечується робота електронного навантаження в режимі стабільного струму.

Мікроконтролер ATmega328P містить вбудований 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач. При опорній напрузі 5 В один крок квантування становить: $\Delta U = 8/1024 \approx 4,88$ мВ.

Така роздільна здатність є достатньою для контролю процесу розряду літій-іонних акумуляторів та визначення моменту досягнення напруги відсічення.

Для зв'язку з OLED-дисплеєм використовується інтерфейс I²C, який потребує лише двох сигнальних ліній: SDA – лінія даних; SCL – лінія синхронізації. Використання інтерфейсу I²C дозволяє мінімізувати кількість задіяних виводів мікроконтролера та спростити друковану плату пристрою.

Вибір Arduino Nano для реалізації тестера ємності акумуляторів обумовлений такими перевагами: компактні розміри плати; низька вартість; достатня продуктивність для виконання вимірювальних задач; наявність вбудованого АЦП; підтримка інтерфейсів UART, SPI та I²C; наявність апаратних ШІМ-виходів; простота програмування та налагодження; широка доступність програмних бібліотек.

OLED-дисплей SSD1306. Для відображення інформації у розробленому тестері ємності Li-іон акумуляторів використовується графічний OLED-дисплей діагоналю 0,96 дюйма на базі контролера SSD1306 (рис. 3.6). Даний дисплей призначений для виведення текстової та графічної інформації і широко застосовується у вбудованих мікропроцесорних системах завдяки малим габаритам, низькому енергоспоживанню та високій контрастності.

OLED-дисплей побудований на основі органічних світлодіодів (Organic Light Emitting Diode), у яких кожен піксель випромінює світло самотійно. На відміну від рідкокристалічних дисплеїв (LCD), OLED-дисплеї не потребують

окремої системи підсвічування, що забезпечує високий рівень контрастності, широкий кут огляду та менше енергоспоживання.



Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд OLED-дисплею SSD1306 [8]

Контролер SSD1306 є спеціалізованою CMOS-мікросхемою керування OLED-дисплеями та підтримує матрицю розміром 128×64 пікселів. Контролер містить: вбудовану відеопам'ять SRAM; генератор тактових імпульсів; систему регулювання контрастності; драйвери сегментів і рядків дисплея.

Наявність вбудованої пам'яті дозволяє зменшити навантаження на мікроконтролер та спрощує процес формування зображення.

Основні технічні характеристики OLED-дисплея SSD1306 наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики OLED-дисплея SSD1306

Параметр	Значення
Тип дисплея	OLED
Контролер	SSD1306
Діагональ	0,96"
Роздільна здатність	128×64 пікселів
Інтерфейс	I2C
Напруга живлення	3,3–5 В
Кількість кольорів	Монохромний
Кут огляду	понад 160°
Регулювання яскравості	256 рівнів
Робоча температура	–40...+85 °С

У розробленому пристрої дисплей підключений до мікроконтролера Arduino Nano через послідовний інтерфейс I2C. Для передачі даних використовуються

лише дві сигнальні лінії: SDA – лінія передачі даних; SCL – лінія тактової синхронізації. Використання інтерфейсу I2C дозволяє суттєво зменшити кількість задіяних виводів мікроконтролера та спростити монтаж електронного пристрою.

OLED-дисплей у тестері виконує функцію візуального інтерфейсу користувача та забезпечує відображення: поточної напруги акумулятора; встановленого струму розряду; часу тестування; обчисленої ємності акумулятора; службових повідомлень та режимів роботи пристрою.

Завдяки високій швидкості оновлення та контрастності дисплей забезпечує зручне відображення інформації навіть при різних умовах освітлення. Використання OLED-дисплея SSD1306 дозволило підвищити ергономічність та інформативність розробленого тестера ємності Li-ion акумуляторів.

Операційний підсилювач LM358. У розробленому тестері ємності Li-ion акумуляторів для реалізації схеми стабілізованого струмового навантаження використовується операційний підсилювач LM358 (рис. 3.7). Дана мікросхема належить до серії малопотужних подвійних операційних підсилювачів загального призначення та містить два незалежні операційні підсилювачі в одному корпусі з внутрішньою частотною компенсацією.

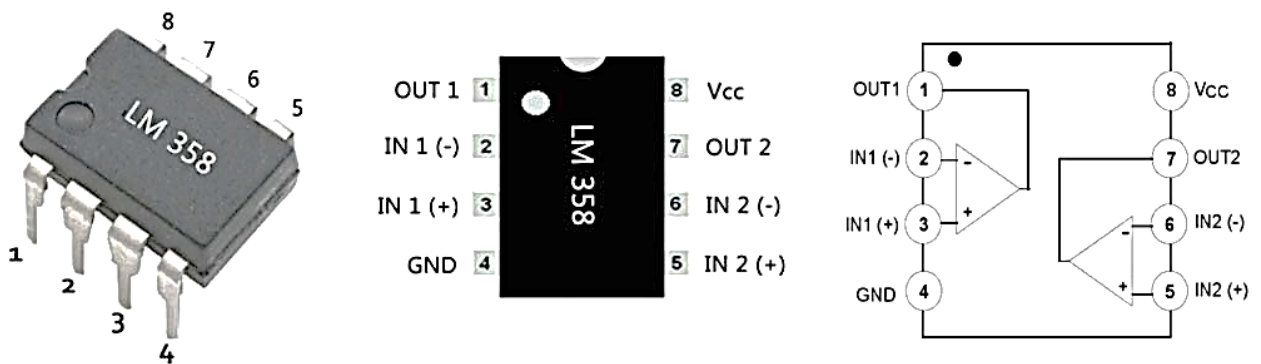


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд та розпіновка операційного підсилювача LM358

Серія LM358 розроблена для роботи як від однополярного, так і від двополярного джерела живлення. Однією з основних особливостей мікросхеми є можливість роботи при низькій напрузі живлення та широкий діапазон синфазної

вхідної напруги, який включає негативну шину живлення або землю. Це дозволяє використовувати LM358 у вимірювальних та керуючих системах із однополярним живленням без необхідності застосування додаткових схем зміщення.

LM358 є функціонально сумісним із популярними операційними підсилювачами серії MC1558, однак характеризується значно меншим енергоспоживанням. Струм спокою кожного підсилювача приблизно у п'ять разів менший порівняно з класичним операційним підсилювачем MC1741, що робить LM358 придатним для використання у переносних та автономних електронних пристроях.

Основні технічні характеристики LM358 наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні технічні характеристики LM358

Параметр	Значення
Тип мікросхеми	Подвійний операційний підсилювач
Напруга живлення	3...32 В
Двополярне живлення	± 16 В
Діапазон синфазної вхідної напруги	-0,3...32 В
Максимальна диференціальна вхідна напруга	± 32 В
Захист від короткого замикання	Наявний
Внутрішня компенсація	Наявна
Робочий температурний діапазон	0...+70 °C
Температура переходу	150 °C
Температура зберігання	-55...+125 °C

Важливою перевагою LM358 є можливість роботи при однополярному живленні від 5 В, що дозволяє безпосередньо використовувати його у схемах на базі мікроконтролерів Arduino Nano без додаткових джерел живлення.

Мікросхема має: захист виходів від короткого замикання; низькі вхідні струми зміщення; внутрішню частотну компенсацію; високу завадостійкість; покращене подавлення пульсацій живлення.

Вхідний каскад LM358 побудований за диференціальною схемою та містить буферні транзистори, що забезпечують широкий діапазон синфазних сигналів. Завдяки цьому операційний підсилювач може коректно працювати навіть при рівнях сигналів, близьких до потенціалу землі, що особливо важливо у схемах

стабілізації струму та вимірювання малих напруг на шунтуючих резисторах.

Другий каскад мікросхеми реалізований як підсилювач напруги з активним навантаженням на джерелі струму. Внутрішня компенсація забезпечує стійкість роботи без необхідності використання зовнішніх коригувальних елементів.

Операційний підсилювач керує MOSFET-транзистором таким чином, щоб підтримувати рівність напруг на своїх входах, забезпечуючи стабілізацію струму розряду. Це дозволяє реалізувати режим електронного навантаження постійного струму, необхідний для точного визначення ємності Li-ion акумулятора.

Використання LM358 у даному пристрої обумовлено: простотою застосування; низьким енергоспоживанням; можливістю роботи від однополярного живлення; стабільними характеристиками; широкою доступністю та низькою вартістю.

У розробленому тестері ємності Li-ion акумуляторів використовується мікросхема LM385BZ-1.2, яка являє собою малопотужне двовивідне джерело опорної напруги (Micropower Voltage Reference Diode). Даний компонент призначений для формування стабільної опорної напруги з високою точністю та низькою температурною залежністю.

Опорна напруга. Мікросхема LM385BZ-1.2 належить до серії прецизійних band-gap джерел опорної напруги та забезпечує стабільну опорну напругу 1,235 В. Основною особливістю LM385BZ є дуже мале енергоспоживання, що дозволяє використовувати її у портативних та автономних електронних пристроях із батарейним живленням (рис. 3.8). Робочий струм мікросхеми знаходиться у межах 10 мкА...20 мА

Основні параметри мікросхеми наведено в таблиці 3.4.

На рисунку 3.8 представлена внутрішня структурна схема прецизійного джерела опорної напруги LM385. Мікросхема побудована на основі band-gap технології та містить транзисторні диференціальні каскади, джерела струму, температурно-компенсуючі вузли та систему стабілізації опорної напруги.

Таблиця 3.4 – Основні технічні характеристики LM385BZ-1.2

Параметр	Значення
Тип пристрою	Джерело опорної напруги
Номінальна опорна напруга	1,235 В
Робочий струм	10 мкА – 20 мА
Динамічний опір	приблизно 1 Ω
Початкова точність	$\pm 1\%$ або $\pm 2\%$
Температурний коефіцієнт	до 30 ppm/°C
Робочий температурний діапазон	0...+70 °C
Максимальний зворотний струм	30 мА
Напруга живлення	до 32 В

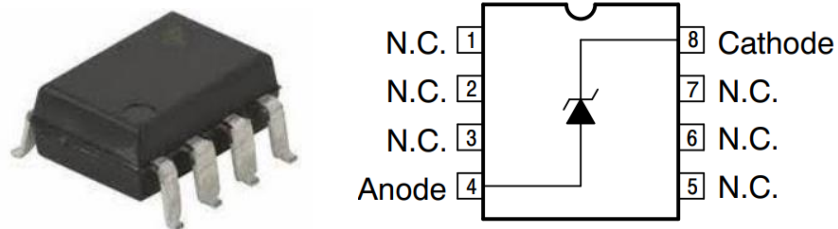


Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд та розпіновка мікросхеми LM385BZ-1.2

Основою роботи мікросхеми є формування температурно-незалежної опорної напруги шляхом компенсації температурних коефіцієнтів р-n переходів біполярних транзисторів. Внутрішні джерела струму та резистивні кола забезпечують стабільність режимів роботи та низький температурний дрейф.

Мікросхема забезпечує формування високостабільної опорної напруги 1,235 В або 2,5 В залежно від конфігурації внутрішніх з'єднань. Завдяки низькому енергоспоживанню, малому динамічному опору та високій довготривалій стабільності LM385 широко застосовується у вимірювальних системах, джерелах опорної напруги та аналогових електронних пристроях.

LM385BZ працює за принципом band-gap стабілізації напруги. Всередині мікросхеми використовується спеціальна схема компенсації температурної залежності напруги р-n переходів, що дозволяє отримати високостабільне джерело опорної напруги практично незалежно від зміни температури та напруги живлення.

На відміну від звичайних стабілітронів, LM385BZ: забезпечує стабільну

роботу при дуже малих струмах; має низький рівень шумів; характеризується високою довготривалою стабільністю; має низький динамічний опір.

Мікросхема є двовивідною та підключається аналогічно стабілітрону. Для нормальної роботи через неї повинен протікати струм стабілізації, який задається зовнішнім резистором.

Внутрішня схема LM385BZ побудована на: транзисторних диференціальних каскадах; джерелах струму; температурно-компенсованій band-gap схемі; внутрішніх компенсаційних елементах (рис. 3.9).

Мікросхема містить: внутрішню частотну компенсацію; схему температурної стабілізації; вузли зниження шумів та динамічного опору.

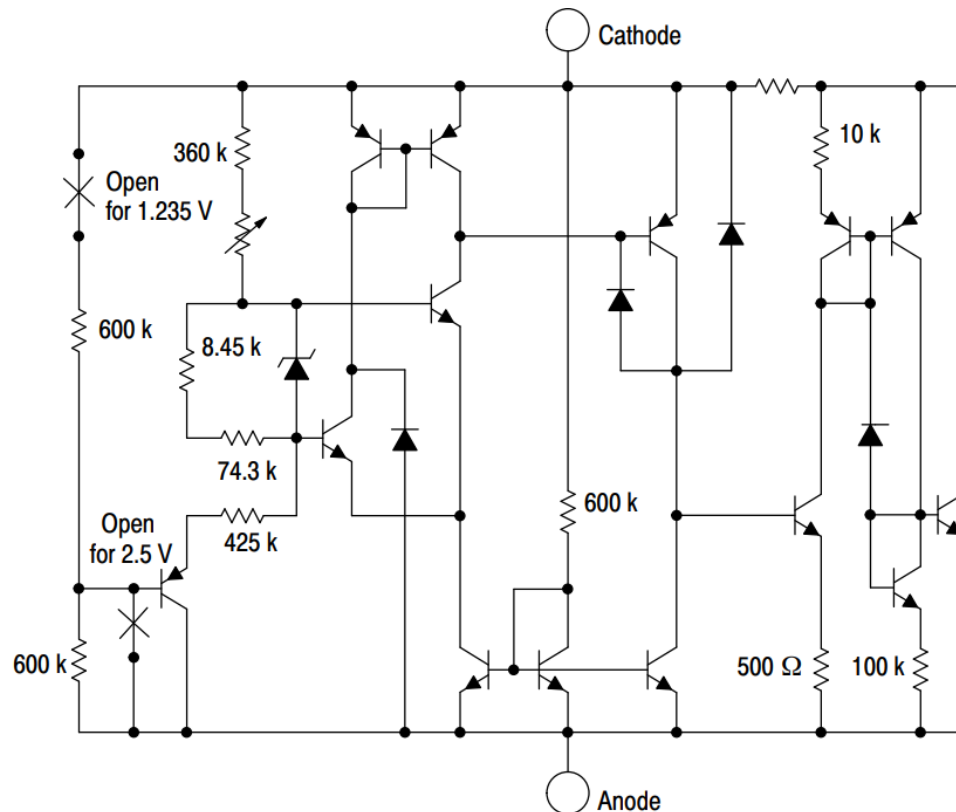


Рисунок 3.9 – Внутрішня схема LM385BZ

У тестері ємності Li-ion акумуляторів LM385BZ використовується для формування стабільної опорної напруги у схемі вимірювання та стабілізації струму розряду.

Завдяки високій стабільності опорної напруги забезпечується: підвищення точності вимірювання; зменшення впливу температурних змін; стабільність роботи аналого-цифрового перетворювача; стабільність режиму електронного навантаження.

Особливо важливим є використання LM385BZ у схемах із мікроконтролерами Arduino, оскільки нестабільність напруги живлення може суттєво впливати на точність вимірювання аналогових сигналів.

Пасивні радіоелементи тестера ємності Li-ion акумуляторів. У розробленому тестері ємності Li-ion акумуляторів використовуються пасивні радіоелементи, які забезпечують стабільність роботи електронної схеми, формування режимів роботи, фільтрацію сигналів, обмеження струмів та придушення завад. До основних пасивних компонентів належать: резистори; конденсатори; шунтуючий резистор (рис. 3.10).

1. РЕЗИСТОРИ				
R5 – 470 Ω (струмообмежувальний резистор світлодіода)	R2, R4 – 4.7 кΩ (підтягувальні резистори кнопок UP і DOWN)	R1 – 1 МОм (резистор RC-фільтра)	R3 – 1 Ω / 5 Вт (шунтуючий резистор)	
				
Функція: обмеження струму через світлодіод LED.	Функція: підтягування входів Arduino до логічного рівня HIGH.	Функція: разом з C3 утворює RC-фільтр для згладжування PWM-сигналу.	Функція: вимірювання струму розряду акумулятора.	

2. КОНДЕНСАТОРИ				
C1 – 220 мкФ (електролітичний конденсатор)	C2 – 100 нФ (керамічний конденсатор)	C3 – 100 нФ (конденсатор RC-фільтра)	C4 – 100 нФ (конденсатор кнопки UP)	C5 – 100 нФ (конденсатор кнопки DOWN)
				
Функція: згладжування низькочастотних пульсацій напруги живлення та сигналу вимірювання.	Функція: фільтрація високочастотних завад, покращення стабільності ADC-вимірювань.	Функція: разом з R1 формує RC-фільтр для перетворення PWM-сигналу у постійну напругу.	Функція: придушення дребезгу контактів кнопки, фільтрація імпульсних завад.	Функція: придушення дребезгу контактів кнопки, фільтрація імпульсних завад.

Рисунок 3.10 – Пасивні радіоелементи тестера ємності

Струмообмежувальний резистор R5 номіналом 470 Ом використовується у колі світлодіодної індикації живлення.

Основна функція: обмеження струму через світлодіод LED; захист світлодіода від перевантаження.

Підтягувальні резистори кнопок R2; R4 номіналом 4,7 кОм використовуються як pull-up резистори для кнопок керування UP та DOWN.

Вони забезпечують стабільний логічний рівень на входах Arduino та запобігання хибним спрацюванням.

Резистор RC-фільтра R1 = 1 МОм разом із конденсатором C3 утворює фільтр низьких частот. Функція RC-фільтра перетворення PWM-сигналу Arduino у квазіаналогову напругу та формування опорної напруги для LM358.

Шунтуючий резистор R3 = 1 Ом/5 Вт є силовим шунтом для вимірювання струму розряду акумулятора. При проходженні струму на резисторі виникає падіння напруги. Операційний підсилювач LM358 контролює цю напругу та підтримує стабільний струм розряду.

Шунтуючий резистор повинен мати: малий температурний коефіцієнт; високу потужність розсіювання; стабільний опір.

Потужність, що розсіюється на резисторі: $P=I^2R$. При струмі 1 А: $P=1^2 \cdot 1=1$ Вт. Тому використовується резистор потужністю 5 Вт із запасом.

Конденсатори у схемі застосовуються для: фільтрації шумів; згладжування пульсацій; стабілізації напруги; придушення дребезгу контактів.

Конденсатори C1 = 220 мкФ та C2 = 100 нФ. Ці конденсатори встановлені у колі вимірювання напруги акумулятора. C1 – електролітичний конденсатор великої ємності згладжує низькочастотні пульсації та компенсує коливання напруги. C2 – керамічний конденсатор пригнічує високочастотні шуми та покращує стабільність ADC-вимірювань.

Конденсатор C3=100 нФ разом із R1 утворює RC-фільтр низьких частот. Призначений для згладжування PWM-сигналу та формування постійної опорної напруги. Постійна часу фільтра: $\tau=R \cdot C$. Для даної схеми: $\tau=1 \text{ МОм} \cdot 100 \text{ нФ} = 0.1 \text{ с}$. Це дозволяє ефективно згладжувати ШІМ-сигнал.

Конденсатори C4=C5=100 нФ використовуються у схемі кнопок. Призначені

для усунення дребезгу контактів; фільтрація імпульсних завад; підвищення надійності зчитування кнопок.

Пасивні компоненти тестера повинні забезпечувати: стабільність параметрів; низький температурний дрейф; малий рівень шумів; достатню потужність розсіювання; високу надійність.

Особливо важливими є: точність шунтуючого резистора; стабільність RC-фільтра; якість фільтрації живлення.

3.4 Проєктування друкованої плати тестера ємності акумуляторів у середовищі EasyEDA

Для розроблення друкованої плати тестера ємності літій-іонних акумуляторів було використано онлайн-середовище автоматизованого проєктування EasyEDA. Дана система є сучасним веборієнтованим інструментом для створення електричних схем, розроблення друкованих плат та підготовки виробничої документації. EasyEDA поєднує редактор принципів схем, редактор друкованих плат, бібліотеки електронних компонентів і засоби тривимірної візуалізації проєкту.

Основними перевагами EasyEDA є безкоштовний доступ через веббраузер, підтримка великої кількості електронних компонентів, інтеграція з виробництвом друкованих плат JLCPCB та можливість автоматичного формування файлів Gerber для подальшого виготовлення плати.

Підготовка електричної схеми. На першому етапі проєктування було створено принципову електричну схему тестера ємності акумуляторів. До складу схеми входять: мікроконтролер Arduino Nano; OLED-дисплей 0,96" (128×64); операційний підсилювач LM358; MOSFET-транзистор IRLZ44N; кнопки керування; звуковий зумер; елементи джерела живлення; пасивні компоненти (резистори та конденсатори).

Після завершення створення схеми було виконано перевірку електричних

з'єднань (ERC – Electrical Rule Check), що дозволило виявити можливі помилки підключення компонентів.

Створення друкованої плати. Після завершення принципової схеми в EasyEDA було сформовано друковану плату шляхом імпорту компонентів у редактор PCB. На цьому етапі кожному компоненту автоматично було призначено відповідний посадковий майданчик (Footprint).

Для плати було обрано односторонню конструкцію з розміщенням усіх елементів на верхньому боці друкованої плати.

Розміщення компонентів. Під час компонування плати було враховано функціональне призначення окремих вузлів пристрою.

У центральній частині плати розміщено: Arduino Nano; OLED-дисплей; операційний підсилювач LM358.

У нижній частині плати розташовані кнопки керування: UP; DOWN; RST.

Таке розташування забезпечує зручність взаємодії користувача з пристроєм.

У правій частині плати розміщено силовий вузол електронного навантаження, який включає: MOSFET-транзистор Q1; шунтовий резистор; радіатор охолодження.

Силові елементи винесено до краю плати для покращення тепловідведення та зменшення впливу нагрівання на чутливі електронні компоненти.

Трасування друкованих провідників. Після розміщення компонентів було виконано трасування друкованих провідників. При проєктуванні були дотримані такі правила: сигнальні доріжки виконані мінімально можливої довжини; силові провідники мають збільшену ширину для зменшення втрат напруги; кола живлення та заземлення виконані з мінімальним опором; цифрові та силові кола максимально рознесені між собою для зниження рівня електромагнітних завад.

Особливу увагу приділено трасуванню силового вузла розряду акумулятора, через який протікає основний струм навантаження. Для цього використано широкі друковані доріжки та збільшені контактні майданчики.

Перевірка проєкту. Після завершення трасування було виконано перевірку

плати за допомогою функції DRC (Design Rule Check). Перевірка дозволила виявити можливі порушення мінімальних відстаней між доріжками, контактними майданчиками та отворами.

Після усунення зауважень було сформовано комплект виробничої документації: Gerber-файли; файли свердління; специфікацію компонентів (BOM); монтажне креслення плати.

У результаті виконаних робіт була розроблена друкована плата тестера ємності літій-іонних акумуляторів, зовнішній вигляд якої наведено на рисунку 3.11.

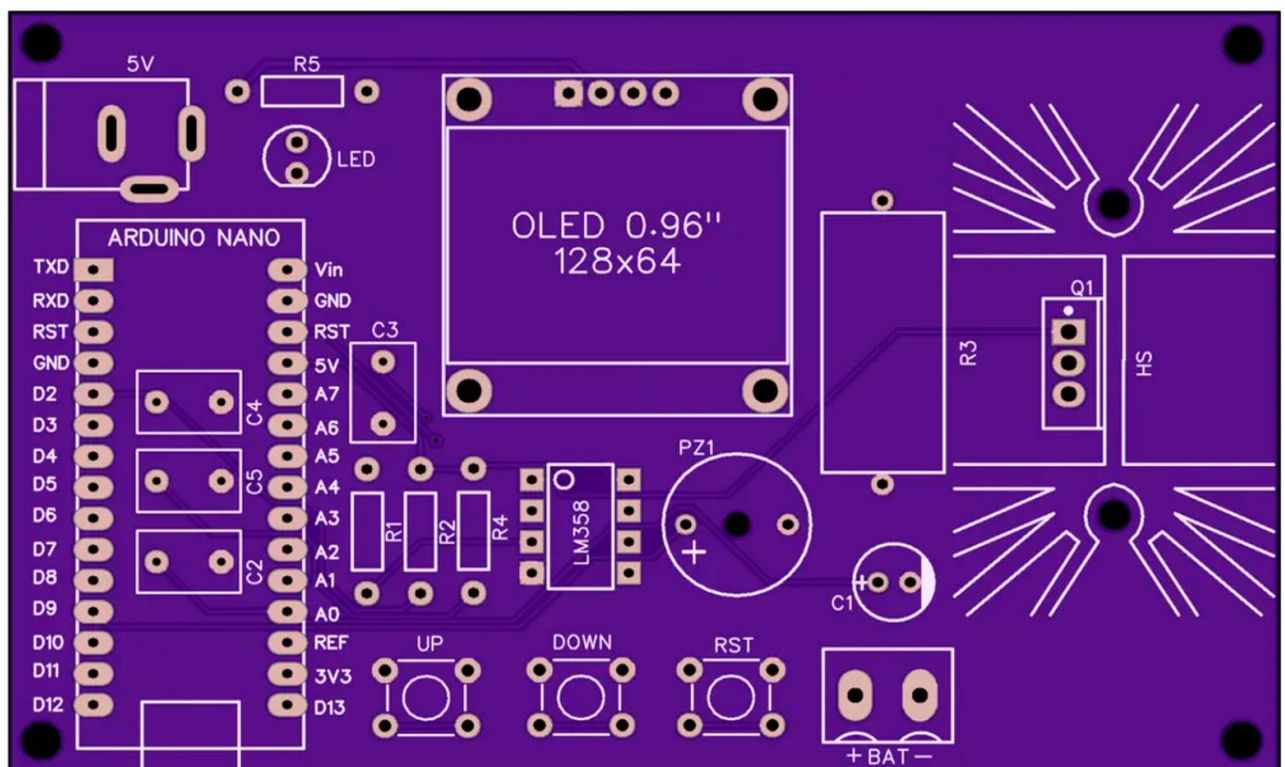


Рисунок 3.11 – Друкована плата тестера ємності Li-ion акумуляторів

Розроблена плата забезпечує компактне розміщення елементів, зручність монтажу, достатнє тепловідведення силових компонентів та можливість подальшого виготовлення на промисловому виробництві без додаткового доопрацювання конструкторської документації.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕСТЕРА ЄМНОСТІ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ

4.1 Програмне забезпечення та використані бібліотеки

Для забезпечення роботи тестера ємності літій-іонних акумуляторів було розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Nano. Програмне забезпечення тестера було розроблено в середовищі Arduino IDE мовою програмування C++, що є стандартним інструментом для програмування мікроконтролерів сімейства Arduino. Основною функцією програми є керування процесом розряду акумулятора, вимірювання його параметрів та обчислення ємності.

Розроблення програмного забезпечення виконувалося поетапно.

На початку програми виконувалося налаштування всіх периферійних пристроїв, підключених до мікроконтролера. На цьому етапі здійснювалася:

- ініціалізація OLED-дисплея;
- налаштування аналогових входів для вимірювання напруги;
- конфігурування ШІМ-виходу для керування електронним навантаженням;
- налаштування кнопок керування;
- підготовка зумера для звукової індикації.

Перед завантаженням програмного коду до мікроконтролера необхідно встановити додаткові програмні бібліотеки, які забезпечують коректну роботу елементів інтерфейсу користувача та дисплея. У проєкті використовуються такі бібліотеки:

– `JC_Button` – бібліотека для обробки натискань кнопок керування, що забезпечує програмне усунення дребезгу контактів та спрощує реалізацію меню користувача.

– `Adafruit SSD1306` – бібліотека для керування OLED-дисплеями на базі контролера SSD1306, яка забезпечує виведення текстової та графічної інформації

на дисплей.

Крім того, задавалися початкові значення струму розряду, порогової напруги відключення та службових змінних програми.

Для керування електронним навантаженням використовується широтно-імпульсна модуляція (ШИМ). Програма формує ШИМ-сигнал на відповідному виводі Arduino Nano, після чого RC-фільтр перетворює його на аналогову напругу. Отримана напруга надходить на операційний підсилювач LM358 та визначає струм розряду акумулятора.

Для забезпечення точності вимірювання ємності необхідно скоригувати масив значень струму розряду, який використовується програмою. Калібрування виконується шляхом підключення цифрового мультиметра послідовно до акумулятора та електронного навантаження. Після встановлення кожного режиму струму за допомогою кнопок керування вимірюється фактичне значення струму, яке заноситься до відповідного масиву в програмному коді.

У процесі роботи програма періодично зчитує значення напруги з аналогового входу мікроконтролера. Отримане цифрове значення перетворюється у фізичне значення напруги з урахуванням коефіцієнта подільника напруги та фактичної опорної напруги живлення мікроконтролера. Поточна напруга акумулятора постійно відображається на дисплеї та використовується для контролю процесу розряду.

Для визначення ємності необхідно знати тривалість розряду. З цією метою в програмі використовується внутрішній таймер мікроконтролера, який відлічує час від моменту запуску тестування до досягнення напруги відсічення. Час накопичується у секундах та надалі використовується для обчислення ємності акумулятора. Розрахунок ємності виконується відповідно до формули:

$$C = I \cdot t, \quad (4.1)$$

де C – ємність акумулятора, $\text{mA} \cdot \text{год}$;

I – струм розряду, mA ;

t – час розряду, год.

Оскільки струм розряду підтримується постійним за допомогою електронного навантаження, для визначення ємності достатньо помножити встановлене значення струму на виміряну тривалість розряду.

Для захисту акумулятора від надмірного розряду програма постійно контролює його напругу. Якщо напруга знижується до встановленого порогового значення `Low_BAT_Level`, процес тестування автоматично завершується.

Після завершення тесту: вимикається навантаження; подається звуковий сигнал; на дисплей виводяться результати вимірювання.

У процесі роботи на OLED-дисплеї відображаються: поточна напруга акумулятора; встановлений струм розряду; час тестування; накопичена ємність; службові повідомлення.

Після завершення тестування дисплей відображає підсумкове значення ємності акумулятора та повідомлення про завершення процесу вимірювання.

Загальна структура програмного забезпечення включає такі основні етапи:

1. Ініціалізація обладнання.
2. Встановлення струму розряду.
3. Запуск таймера.
4. Вимірювання напруги акумулятора.
5. Контроль порогової напруги.
6. Розрахунок ємності.
7. Відображення результатів на дисплеї.
8. Завершення тестування та подача звукового сигналу.

4.2 Процес створення програмного забезпечення

Розглянемо процес створення програмного коду. Код можна умовно створити у такій послідовності:

1. Спочатку задається апаратна частина: Arduino Nano, OLED-дисплей, кнопки, бузер, MOSFET-навантаження та вхід вимірювання напруги.
2. Далі підключаються бібліотеки для дисплея та кнопок.
3. Потім визначаються виводи Arduino: PWM-вихід, бузер, аналоговий вхід A0, кнопки UP/DOWN.
4. Створюється масив струмів розряду, який відповідає різним значенням PWM.
5. У setup() налаштовується дисплей, кнопки, бузер і початковий стан PWM.
6. У loop() реалізується меню вибору струму.
7. Довге натискання кнопки запускає тестування.
8. Під час тесту програма щосекунди вимірює напругу акумулятора, рахує час і обчислює ємність.
9. При досягненні нижньої межі 3,0 В програма автоматично вимикає навантаження та показує кінцевий результат.

Програма виконує контрольований розряд акумулятора заданим струмом. Користувач кнопками UP/DOWN вибирає струм розряду, після чого довгим натисканням кнопки UP запускає тест. Arduino вимірює напругу акумулятора, рахує час розряду та обчислює ємність у мА·год.

Формула, яка використовується в коді:

$$C = I \cdot t / 3600, \quad (4.2)$$

де C – ємність, мА·год;

I – струм розряду, мА;

t – час розряду, с.

1. Підключення бібліотеки.

```
#include<JC_Button.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
```

Бібліотека JC_Button використовується для зручної роботи з кнопками, зокрема для фіксації короткого та довгого натискання.

Бібліотека Adafruit_SSD1306 забезпечує роботу з OLED-дисплеєм 128×64 через інтерфейс I²C.

2. Налаштування OLED-дисплея.

```
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET 4
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);
```

У коді задано параметри дисплея: ширина 128 пікселів, висота 64 пікселі. Дисплей використовується для відображення струму розряду, напруги акумулятора, часу тестування та розрахованої ємності.

3. Основні параметри тестера.

```
const float Low_BAT_level = 3.0;
const int Current [] =
{0,110,210,300,390,490,580,680,770,870,960,1000};
```

Low_BAT_level = 3.0 – це нижній поріг напруги акумулятора. Коли напруга падає нижче 3,0 В, тест завершується.

Масив Current[] задає набір струмів розряду. Наприклад:

0, 110, 210, 300, ... 1000 мА

Тобто користувач може вибрати струм розряду приблизно від 0 до 1000 мА.

4. Призначення виводів Arduino.

```
const byte PWM_Pin = 10;
const byte Buzzer = 9;
const int BAT_Pin = A0;
```

D10 – PWM-вихід для керування MOSFET/електронним навантаженням. D9 – вихід для бузера. A0 – аналоговий вхід для вимірювання напруги акумулятора.

Кнопки підключені до цифрових входів:

```
Button UP_Button(2, 25, false, true);
Button Down_Button(3, 25, false, true);
```

Тобто: UP – D2; DOWN – D3; затримка антидребезгу – 25 мс.

5. Функція setup().

У цій частині програми виконується початкове налаштування пристрою:

```
Serial.begin(9600);
pinMode(PWM_Pin, OUTPUT);
pinMode(Buzzer, OUTPUT);
analogWrite(PWM_Pin, PWM_Value);
UP_Button.begin();
Down_Button.begin();
```

Arduino налаштовує PWM-вихід, бузер, кнопки та дисплей. На початку на OLED виводиться заставка:

```
display.print("Open Green Energy");
```

Після цього з'являється екран налаштування струму:

```
display.print("Adj Curr:");
display.print("UP/Down:");
```

Тобто після ввімкнення пристрій очікує, що користувач вибере потрібний струм розряду.

6. Функція loop().

У головному циклі постійно перевіряється стан кнопок:

```
UP_Button.read();
Down_Button.read();
```

Кнопка UP.

```
if (UP_Button.wasReleased() && PWM_Value < 55 && calc == false)
```

Коротке натискання UP збільшує значення PWM на 5 одиниць:

```
PWM_Value = PWM_Value + 5;
analogWrite(PWM_Pin, PWM_Value);
```

Одночасно на дисплей виводиться відповідний струм із масиву Current[].

Наприклад, якщо PWM_Value = 25, то:

```
Current[PWM_Value / 5] = Current[5] = 490 mA
```

Кнопка DOWN

```
if (Down_Button.wasReleased() && PWM_Value > 1 && calc == false)
```

Коротке натискання DOWN зменшує PWM на 5 одиниць. Це дозволяє зменшити встановлений струм розряду.

7. Запуск тестування.

Тест запускається довгим натисканням кнопки UP:

```
if (UP_Button.pressedFor (1000) && calc == false)
```

Якщо кнопка утримується понад 1 секунду: вмикається короткий сигнал бузера; очищується дисплей; запускається функція `timerInterrupt()`.

Попри назву, `timerInterrupt()` – це не апаратне переривання таймера, а звичайна функція, в якій виконується основний цикл тестування.

8. Основний процес тестування

У функції:

```
void timerInterrupt()
```

встановлюється прапорець:

```
calc = true;
```

Це означає, що тест уже запущено, і змінювати струм кнопками не можна.

Далі виконується цикл:

```
while (Done == false)
```

Він триває, доки напруга акумулятора не впаде нижче 3,0 В.

9. Підрахунок часу

Кожну ітерацію програма збільшує значення секунд:

```
Second ++;
```

Далі секунди переводяться у хвилини, а хвилини – в години:

```
if (Second == 60) {
    Second = 0;
    Minute++;
}
if (Minute == 60) {
    Minute = 0;
    Hour++;
}
```

Таким чином формується таймер розряду акумулятора.

10. Вимірювання напруги акумулятора

Напруга акумулятора зчитується з входу A0:

```
sample=sample+analogRead(BAT_Pin);
```

Код робить 100 вимірювань із затримкою 2 мс:

```
for(int i=0;i< 100;i++)
```

Після цього обчислюється середнє значення:

```
sample=sample/100;
```

Далі ADC-покази переводяться у вольти:

```
BAT_Voltage = sample * Vcc/ 1024.0;
```

Тут $V_{cc} = 4.96$ – фактично виміряна напруга живлення Arduino 5 В. Це зроблено для підвищення точності розрахунку напруги.

11. Виведення інформації на дисплей

Під час тесту OLED показує: час розряду; струм розряду; напругу акумулятора; поточну розраховану ємність.

```
display.print("Disch Curr: ");
display.print(String(Current[PWM_Value / 5])+"mA");
display.print("Bat Volt:" + String(BAT_Voltage)+"V");
display.print("Capacity:" + String(Capacity) + "mAh");
```

12. Розрахунок ємності

Код спочатку переводить час у секунди:

```
Capacity = (Hour * 3600) + (Minute * 60) + Second;
```

Потім обчислює ємність:

```
Capacity = (Capacity * Current[PWM_Value / 5]) / 3600;
```

Наприклад, якщо акумулятор розряджався струмом 1000 мА протягом 2 годин:

$$C = \frac{1000 \cdot 7200}{3600} = 2000 \text{ мА.} \quad (4.1)$$

13. Завершення тесту

Коли напруга акумулятора стає меншою за 3,0 В:

```
if (BAT_Voltage < Low_BAT_level)
```

програма: ще раз обчислює ємність; виводить фінальне значення на дисплей; встановлює Done = true; вимикає PWM; подає два короткі звукові сигнали.

```
PWM_Value = 0;  
analogWrite(PWM_Pin, PWM_Value);
```

Це вимикає електронне навантаження і припиняє розряд акумулятора.

Повний код наведений у додатку А.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз сучасних літій-іонних акумуляторів формату 18650, їх конструкції, принципу роботи та впливу основних механізмів старіння та експлуатаційних факторів на зміну ємності акумуляторів.

Проаналізовано основні методи визначення ємності акумуляторів, серед яких метод повного розряду, метод підрахунку кулонів та метод напруги холостого ходу. Встановлено, що для створення тестера ємності найбільш доцільним є використання методу контрольованого розряду стабілізованим струмом, який забезпечує високу достовірність результатів.

На основі проведеного аналізу розроблено електричну схему тестера ємності літій-іонних акумуляторів на базі мікроконтролера Arduino Nano. Реалізовано електронне навантаження зі стабілізацією струму за допомогою операційного підсилювача LM358 та MOSFET-транзистора IRLZ44N. Розроблена схема забезпечує стабільний розряд акумулятора та можливість автоматичного визначення його ємності.

Виконано проектування друкованої плати пристрою в середовищі EasyEDA, що дозволило створити компактну конструкцію з раціональним розміщенням компонентів та належним тепловідведенням силових елементів.

Розроблено програмне забезпечення мовою C++ у середовищі Arduino IDE, яке забезпечує керування електронним навантаженням, вимірювання напруги акумулятора, контроль процесу розряду, розрахунок ємності та відображення результатів на OLED-дисплеї.

У результаті виконання роботи створено працездатний тестер ємності літій-іонних акумуляторів формату 18650, який характеризується простотою конструкції, невисокою вартістю реалізації та достатньою точністю вимірювання. Розроблений пристрій може бути використаний для оцінювання технічного стану акумуляторів, їх сортування, контролю залишкового ресурсу та навчальних цілей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Neware battery testers – Reliable and cost-effective battery cyclers, analyzers, testers for batteries and supercapacitors. URL: <https://newarebattery.com> (дата звернення: 28.02.2026)
2. NEWARE - Battery Tester & Cyclers - Battery Testing System URL: <https://www.neware.net/> (дата звернення: 28.02.2026).
3. BTS-4008-5V6A-18650 Battery Tester Cycle Life Test Neware Battery Testing System. URL: <https://www.newarelab.com/neware-product-sheet/bts-4008-5v6a-18650-battery-tester-cycle-life-test> (дата звернення: 28.02.2026).
4. Arbin Instruments (офіційний сайт, опис серії LBT/RBT-Cell). URL: <https://arbin.com/> (дата звернення: 28.02.2026).
5. Neware Lab 5V1A 2A 3A 6A 8 Channel Cylinder Analyser/Tester Battery Testing Machine for 18650 Cylindrical Cell Battery Research. URL: https://www.alibaba.com/product-detail/Neware-Lab-5V1A-2A-3A-6A_62505396665.html (дата звернення: 28.02.2026).
6. Cadex C8000 Battery Analyzer. URL: <https://www.cadex.com/products/c8000> (з web-search для Cadex) (дата звернення: 28.02.2026).
7. Neware Tester - Battery Testing Equipment/Cycler. URL: <https://www.newarelab.com/> (дата звернення: 28.02.2026).
8. Opus BT-C3100 v2.2. URL: <https://lygte-info.dk/review/chargers2016/Opus%20BT-C3100%20V2.2%20UK.html> (дата звернення: 28.02.2026).
9. SkyRC MC3000. URL: https://www.skyrc.com/MC3000_Charger (офіційний сайт) (дата звернення: 28.02.2026).
10. DIY-тестера ємності 18650 на Arduino Nano. URL: <https://www.instructables.com/DIY-Arduino-Battery-Capacity-Tester-V20/> (дата звернення: 28.02.2026).
11. Побутовий DIY-тестер на Arduino з INA219. URL:

<https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/18650-lithium-battery-capacity-tester-using-arduino> (дата звернення: 28.02.2026).

12. Opus BT-C3100 - універсальний інтелектуальний зарядний пристрій для Ni-Cd/Ni-Mh та Li-Ion акумуляторів. URL: https://bestbattery.com.ua/ua/chargers_ua/opus_bt_c3100_ua (дата звернення: 28.02.2026).

13. Опис акумулятора 18650. URL: <https://www.large-battery.com/ru/blog/key-specs-exploring-18650-battery-dimensions/> (дата звернення: 28.02.2026)

14. Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. URL: <https://www.nature.com/articles/srep12967> (дата звернення: 28.02.2026).

15. Voltage Divider Calculator. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/tools/voltage-divider-calculator/> (дата звернення: 28.02.2026).

16. Forum Arduino. URL: <https://forum.arduino.cc/t/resistor-configuration-on-mosfet-high-side-low-side-switches/643155> (дата звернення: 28.02.2026).

17. DIY Arduino Battery Capacity Tester - V1.0. URL: <https://www.instructables.com/DIY-Arduino-Battery-Capacity-Tester-V10-> (дата звернення: 02.03.2026).

18. DIY 18650 Li-Ion Battery Capacity and Discharge Testing Meter using Arduino. URL: <https://circuitdigest.com/microcontroller-project/diy-18650-li-ion-battery-capacity-and-discharge-testing-meter-using-arduino> (дата звернення: 02.03.2026).

19. Simple 18650 capacity tester circuit - General Discussion. URL: <https://forum.arduino.cc/t/simple-18650-capacity-tester-circuit/1055736> (дата звернення: 02.03.2026).

20. The ultimate battery tester with ESR measurement and discharge graph. Based on an Arduino Nano and a 1602 LCD. URL: <https://github.com/ArminJo/Ulimate-Battery-Tester> (дата звернення: 02.03.2026).

21. DC Current Measurement using Resistor Shunt and OP AMP. URL: <https://forum.arduino.cc/t/dc-current-measurement-using-resistor-shunt-and-op->

amp/906014/2 (дата звернення: 02.03.2026).

22. State of Charge Estimation with a Kalman Filter. URL: <https://www.jackogradey.me/battery-management-system/state-of-charge> (дата звернення: 02.03.2026).

23. Coulomb Counting: A Simple Method for Battery SoC Estimation. URL: https://www.linkedin.com/posts/prabakaran-parameshwaran_coulomb-counting-the-simplest-way-to-activity-7367416245874249728-HCTZ (дата звернення: 02.03.2026).

ДОДАТОК А

Скетч для тестера ємності

```

#include<JC_Button.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels

// Declaration for an SSD1306 display connected to I2C (SDA, SCL
pins)
#define OLED_RESET      4 // Reset pin # (or -1 if sharing Arduino
reset pin)
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);

const float Low_BAT_level = 3.0;
//Current steps with a 3R load (R7)
const int Current [] =
{0,110,210,300,390,490,580,680,770,870,960,1000};
const byte PWM_Pin = 10;
const byte Buzzer = 9;
const int BAT_Pin = A0;
int PWM_Value = 0;
unsigned long Capacity = 0;
int ADC_Value = 0;
float Vcc = 4.96 ; // Voltage of Arduino 5V pin ( Mesured by
Multimeter )
float BAT_Voltage = 0;
float sample =0;
byte Hour = 0, Minute = 0, Second = 0;
bool calc = false, Done = false;
Button UP_Button(2, 25, false, true);
Button Down_Button(3, 25, false, true);

void setup () {
//
Serial.begin(9600);
pinMode(PWM_Pin, OUTPUT);
pinMode(Buzzer, OUTPUT);
analogWrite(PWM_Pin, PWM_Value);
UP_Button.begin();
Down_Button.begin();
display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
display.clearDisplay();

```

```

display.setTextColor(WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(12,25);
display.print("Open Green Energy");
display.display();
delay(3000);
display.clearDisplay();
display.setTextSize(2);
display.setCursor(2,15);
display.print("Adj Curr:");
display.setCursor(2,40);
display.print("UP/Down:");
display.print("0");
display.display();
}

//***** Функція завершення налаштування
*****

void loop() {
    UP_Button.read();
    Down_Button.read();
    if (UP_Button.wasReleased() && PWM_Value < 55 && calc == false)
    {
        PWM_Value = PWM_Value + 5;
        analogWrite(PWM_Pin,PWM_Value);

        display.clearDisplay();
        display.setCursor(2,25);
        display.print("Curr:");
        display.print(String(Current[PWM_Value / 5])+"mA");
        display.display();
        // Serial.println(String(Current[PWM_Value / 5]));
    }
    if (Down_Button.wasReleased() && PWM_Value > 1 && calc == false)
    {
        PWM_Value = PWM_Value - 5;
        analogWrite(PWM_Pin,PWM_Value);
        display.clearDisplay();
        display.setCursor(2,25);
        display.print("Curr:");
        display.print(String(Current[PWM_Value / 5])+"mA");
        display.display();
        // Serial.println(String(Current[PWM_Value / 5]) + "mA");
    }
}

```

```

if (UP_Button.pressedFor (1000) && calc == false)
{
    digitalWrite(Buzzer, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(Buzzer, LOW);
    display.clearDisplay();
    timerInterrupt();

}
}

//***** Функція «Кінець циклу»
*****

void timerInterrupt(){
    calc = true;
    while (Done == false)  {
        Second ++;
        if (Second == 60)  {
            Second = 0;
            Minute ++;
        }
        if (Minute == 60)  {
            Minute = 0;
            Hour ++;
        }
    }

    //***** Вимірювання напруги акумулятора *****

    for(int i=0;i< 100;i++)
    {
        sample=sample+analogRead(BAT_Pin); //read the Battery voltage
        delay (2);
    }
    sample=sample/100;
    BAT_Voltage = sample * Vcc/ 1024.0;

    //*****

    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(2);
    display.setCursor(20,5);
    display.print(String(Hour) + ":" + String(Minute) + ":" +
String(Second));

    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(0,25);
    display.print("Disch Curr: ");
    display.print(String(Current[PWM_Value / 5])+"mA");

```

```

display.setCursor(2,40);
display.print("Bat Volt:" + String(BAT_Voltage)+"V" );

Capacity = (Hour * 3600) + (Minute * 60) + Second;
Capacity = (Capacity * Current[PWM_Value / 5]) / 3600;
display.setCursor(2, 55);
display.print("Capacity:" + String(Capacity) + "mAh");
display.display();

if (BAT_Voltage < Low_BAT_level)
{
    Capacity = (Hour * 3600) + (Minute * 60) + Second;
    Capacity = (Capacity * Current[PWM_Value / 5]) / 3600;
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(2);
    display.setCursor(2,15);
    display.print("Capacity:");
    display.setCursor(2,40);
    display.print(String(Capacity) + "mAh");
    display.display();
    Done = true;
    PWM_Value = 0;
    analogWrite(PWM_Pin, PWM_Value);
    digitalWrite(Buzzer, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(Buzzer, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(Buzzer, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(Buzzer, LOW);
    delay(100);
}
    delay(1000);
}
}

```