

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій**

До захисту допущено:

В.о. Завідувача кафедри

_____ Наталія ЗАЩЕПКІНА

«___» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології»**

спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

**на тему: «Вимірювач внутрішнього опору та ємності свинцевих
акумуляторів джерел безперебійного живлення»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПІ-22

Ганічев Святослав Кімович _____

Керівник:

доцент, PhD Дорожинська Ганна

Василівна _____

Рецензент:

професор, д.т.н., проф.

Куц Юрій Васильович

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДПБ. ПП-22.01.5390.01.001.ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБ. ПП-22.01.5390.01.001.ПЗ	Пояснювальна записка	94	
3	A3	ДПБ. ПП-22.01.5390.01.001.СхС	Структурна схема	1	
4	A3	ДПБ. ПП-22.01.5390.01.001.СхЕ	Схема електрична принципова	1	

				ДПБ.ПП-22.01.5390.01.001.ДП		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Ганічев			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Дорожинська				1	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ІВТ Гр. ПП-22	
Н/контр.						
Зав.каф.	Защепкіна					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Вимірювач внутрішнього опору та ємності
свинцевих акумуляторів джерел безперебійного
живлення»**

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційні вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Ганічеву Святославу Кімовичу

1. Тема проєкту «Вимірювач внутрішнього опору та ємності свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення», керівник проєкту Дорожинська Ганна Василівна, PhD, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2026 р. № _____
2. Термін подання студентом проєкту " 29 " травня 2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту:
 - 3.1. Конструктивні вимоги до приладу і його складових частин.
Габаритні розміри та маса виробу – мінімальні.
 - 3.2. Умови експлуатації:
 - атмосферний тиск: 84-106,7 кПа;
 - відносна вологість: 30-80% при 25°C;
 - діапазон робочих температур: 15-35°C;
 - джерело живлення: три послідовно з'єднані хімічні елементи по 1,5 В з сумарною напругою 4,5 В.
 - 3.3. Вимоги безпеки:

Прилад повинен відповідати вимогам безпеки згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75. За способом захисту людини від ураження електричним струмом - клас III з живленням від первинного джерела живлення.

3.4. Характеристики приладу:

- напруга досліджуваного акумулятора: 10...13 В;
- номінальна напруга досліджуваного акумулятора: 12 В;
- діапазон вимірювання внутрішнього опору свинцевих акумуляторів: 30-300 мОм;
- межі відносної похибки вимірювання внутрішнього опору, не більше 10%;
- діапазон вимірювання ємності свинцевих акумуляторів: 7-12 А·год;
- межі відносної похибки вимірювання ємності, не більше 10%;
- споживана приладом потужність, не більше 250 мВт.

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

- 4.1. Розглянути основні характеристики свинцевих акумуляторів.
- 4.2. Виконати огляд сучасних методів та засобів визначення внутрішнього опору та ємності свинцевих акумуляторів.
- 4.3. Обґрунтувати структуру приладу для вимірювання
- 4.4. Виконати опис конструкції.
- 4.5. Виконати розрахунок схеми електричної принципової та обґрунтувати вибір елементної бази.
- 4.6. Виконати розрахунок похибок.
- 4.7. Сформулювати висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): структурна схема, схема електрична принципова з переліком елементів, презентація доповіді.

6. Дата видачі завдання " 20 " квітня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Вибір та затвердження теми	20.04.2026	
2.	Формулювання та затвердження завдання	27.04.2026	
3.	Виконання першого та другого розділів, перевірка їх керівником	11.05.2026	
4.	Виконання 3-4 розділів, перевірка їх керівником	18.05.2026	
5.	Формування графічної частини ДП	20.05.2026	
6.	Оформлення та завершення ДП. Надання на розгляд керівнику	27.05.2026	
7.	Надання ДП (електронний варіант) відповідальному на кафедрі для перевірки на наявність запозичень (плагіату)	01.06 - 05.06.2026	
8.	Остаточна перевірка ДП керівником, надання відгуку	09.06-12.06 2026	
9.	Попередній захист ДП	10.06.2026	
10.	Рецензування	09.06-12.06 2026	
11.	Надання роботи відповідальному за організацію дипломного проєктування на кафедрі (друкований варіант)	червень 2026	
12.	Подання роботи на підпис в.о. зав. каф.	червень 2026	
13.	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	червень 2026	

Студент

Святослав ГАНІЧЕВ

Керівник

Ганна ДОРОЖИНСЬКА

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
АНОТАЦІЯ	10
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВИНЦЕВИХ АКУМУЛЯТОРІВ. 14	
1.1 Особливості застосування свинцевих акумуляторів в джерелах безперебійного живлення.	14
1.2 Електрохімічні та фізичні процеси в свинцевих акумуляторах	20
1.3 Аналіз методів та схемотехнічних рішень для контролю параметрів акумуляторних батарей	26
Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ	39
2.1 Аналіз приладів для визначення ємності акумуляторів.....	40
2.2 Аналіз приладів для оцінки стану акумуляторів за внутрішнім опором	44
2.3 Комбіновані системи тестування.....	47
2.4 Порівняльний аналіз технічних характеристик та функціональних можливостей комерційних систем	55
Висновки до розділу 2	59
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ АКУМУЛЯТОРА	6

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Ганічев.С.К.			Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш
Перев.		Дорожинська.Г.В.					13
Н. Контр.						КПІ ім. І. Сікорського,	
Затв.		Защепкіна.Н.М.					

3.1 Обґрунтування структури та вибір методу вимірювання для реалізації пристрою	60
3.2 Розробка принципової електричної схеми вимірювача.	65
3.3 Вибір елементної бази та розрахунок основних вузлів пристрою.....	74
Висновки до розділу 3	81
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ	82
Висновки до розділу 4	86
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88
ДОДАТОК А. Структурна схема	95
ДОДАТОК Б. Схема електрична принципова.....	96

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		8

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ОП – операційний підсилювач

VRLA – герметизовані свинцево-кислотні акумулятори з клапанним регулюванням

AGM – Акумулятори з абсорбованим електролітом

АБ – акумуляторна батарея

ДБЖ – джерело безперебійного живлення

МК – мікроконтролер

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція

АС – змінний струм

DC – постійний струм

ACIR – внутрішній опір, визначений методом змінного струму

DCIR – внутрішній опір, визначений методом постійного струму

BMS – система керування акумуляторною батареєю

ССА – струм холодного прокручування

DoD – глибина розряду акумулятора

EIS – електрохімічна імпедансна спектроскопія

GEL – гелевий свинцево-кислотний акумулятор

I²C – двопровідна послідовна шина обміну даними

LiFePO₄ – літій-залізо-фосфатний акумулятор

Li-ion – літій-іонний акумулятор

MOSFET – польовий транзистор із ізольованим затвором

OCV – напруга розімкнутого кола

OLED – органічний світлодіодний дисплей

PPC-CV – імпульсний піковий струм – постійна напруга

SoC – стан заряду акумулятора

Cdl – ємність подвійного електричного шару

PbO₂ – діоксид свинцю

PbSO₄ – сульфат свинцю

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						9
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

АНОТАЦІЯ

Метою дипломного проєкту є проєктування і розробка вимірювача ємності та внутрішнього опору свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення.

Об'єкт дослідження – свинцеві акумулятори.

Предметом дослідження – процес вимірювання ємності та внутрішнього опору свинцевих акумуляторів.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Розглянути основні характеристики свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення.
- Виконати огляд сучасних методів та засобів визначення ємності та внутрішнього опору свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення.
- Обґрунтувати структуру приладу для вимірювання ємності та внутрішнього опору свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення.
- Виконати опис конструкції.
- Виконати розрахунок схеми електричної принципової та обґрунтувати вибір елементної бази.
- Виконати розрахунок похибок.

Теоретичний аналіз передбачає огляд сучасних методів та засобів визначення ємності та внутрішнього опору. Розробка приладу передбачає обґрунтування його структури, опис конструкції, розрахунок схеми електричної принципової та обрахунок похибок вимірювань.

Робота складається із вступу, 4 розділів, 5 висновків, 21 рисунків, 10 таблиць, 63 списку використаних джерел із позицій. Загальний обсяг роботи – 96 сторінок, з яких основна частина викладена на 84 сторінках.

Ключові слова: свинцеві акумулятори, ємність, внутрішній опір, джерело безперебійного живлення.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		10

ABSTRACT

The purpose of the thesis project is to create a meter for measuring the capacity and internal resistance and capacity of lead-acid batteries of uninterruptible power supplies. The object of research is lead-acid batteries.

The subject of the study is the process of measuring the capacity and internal resistance of lead-acid batteries.

To achieve this goal, the following tasks need to be solved:

- To consider the main characteristics of lead-acid batteries.
- Review modern methods and means of determining the capacity and internal resistance of lead-acid batteries of uninterruptible power supplies.
- Substantiate the structure of the device for measuring the capacity and internal resistance of lead-acid batteries of uninterruptible power supplies.
- Describe the design.
- Calculate the electrical schematic diagram and justify the choice of the element base.
- Calculate the errors.

Theoretical analysis - review of modern methods and means of determining the capacity and internal resistance. Development of the device – involves substantiation of its structure, description of the design, calculating measurement errors.

The work consists of an introduction, 4 chapters, 5 conclusions, 21 figures, 10 tables, and a 63 list of references containing items. The total volume of the work is pages 96, of which the main part is presented on pages 84.

Keywords: lead-acid batteries, capacitance, internal resistance, uninterruptible power supply.

					<i>ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ</i>	Арк.
						11
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ВСТУП

Сучасний стан енергетичного сектору України, зумовлений військовими діями та масштабними руйнуваннями критичної інфраструктури генерації й розподілу електроенергії протягом 2022–2026 років, викликав гостру потребу в забезпеченні стабільного автономного та резервного енергопостачання як промислових об'єктів, так і побутових споживачів. За цих умов системи розподіленої генерації та автономні джерела безперебійного живлення стали елементом гарантування енергетичної безпеки та безперебійної роботи критично важливого обладнання. Якість функціонування, тривалість самостійної роботи та загальна експлуатаційна надійність таких систем, обумовлені фізико-хімічним станом їхнього головного елемента - акумуляторної батареї. Найбільш поширеним та фінансово обґрунтованим вибором залишаються свинцево-кислотні, які поділяються на типи акумулятори з абсорбованим електролітом (AGM) та гелеві (GEL). Забезпечення точного моніторингу параметрів, своєчасної діагностики та технічного обслуговування цих акумуляторів є важливим завданням для запобігання відмовам систем резервного живлення в момент знеструмлення мережі.

Вимірювання ємності та внутрішнього опору є тими ключовими параметрами, які дозволяють комплексно оцінити стан працездатності і ступінь деградації свинцево-кислотних акумуляторів, а внутрішній опір, безпосередньо впливає на здатність батареї приймати заряд та віддавати потужність у навантаження. Основним деградаційним чинником при експлуатації батарей в умовах частих віялових відключень та постійного недозаряду є явище сульфатації негативного електрода. Внаслідок цього інвертор домашні пристрої безперебійного живлення (ДБЖ) реєструє просідання напруги нижче критичного порогу і вимикається достроково, навіть якщо в масиві батареї ще залишається енергія.

Цей дипломний проєкт присвячений розробці приладу для вимірювання ємності та внутрішнього опору свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення. Існуючі комерційні засоби діагностики високого класу мають високу

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		12

ринкову вартість, складну схемотехніку, що обмежує їх застосування у побутових ДБЖ малої потужності. Розроблені в межах проєкту схемотехнічні рішення спрямовані на подолання цих обмежень шляхом створення приладу для вимірювання ємності й внутрішнього опору свинцево-кислотних акумуляторів. Реалізований метод вимірювання внутрішнього опору на постійному струмі із застосуванням чотирипровідної топології Кельвіна дозволяє зменшити похибки вимірювальних каналів і надійно ізолювати омичний опір самої комірки. Використання мікроконтролера ATmega328P (Arduino Pro Mini) та оптимізованої елементної бази забезпечує енергоефективність та точність обробки вимірювальної інформації.

Результати цього проєкту мають практичну цінність і можуть бути впроваджені у різних сферах. У побутовому секторі розроблений аналізатор дозволить здійснювати регулярний експрес-моніторинг акумуляторів домашніх ДБЖ малої потужності, суттєво подовжуючи їхній життєвий цикл та гарантуючи стабільність автономного живлення побутової техніки в періоди тривалих вимкнень електромережі. У промисловості, телекомунікаційних вузлах та дата-центрах, застосування подібних модулів діагностики сприятиме виявленню деградованих елементів у великих батарейних масивах і запобігатиме інфраструктурним збоям. Окрім цього, запропоновані технічні рішення можуть бути використані сервісними центрами з обслуговування свинцево-кислотних і гелевих акумуляторів, лабораторіями технічного моніторингу.

Таким чином, запропонований прилад для вимірювання внутрішнього опору та ємності свинцевих акумуляторів ДБЖ відповідає поставленим завданням. Вимірювальний пристрій за схемою Кельвіна робить цей пристрій ефективним та економічно обґрунтованим рішенням, що є важливим внеском у розвиток засобів експрес-діагностики акумуляторних систем збереження енергії.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						13
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВИНЦЕВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

1.1 Особливості застосування свинцевих акумуляторів в джерелах безперебійного живлення

У межах світових змін енергетичних систем та появи локальних криз, зумовлених пошкодженням важливої інфраструктури, суттєво збільшилася потреба у гарантуванні стабільного незалежного електропостачання. Починаючи з 2022-2024 років, внаслідок значних руйнувань об'єктів генерації та розповсюдження електроенергії, відбулося значне зростання потреби у системи резервного живлення на побутовому та виробничому рівнях [1]. За розрахунками енергетичних експертів, нестача генеруючих потужностей, спад обсягів випуску основної енергії та стійкі графікові вимкнення спричинили широке впровадження розподілених рішень, серед яких головне місце посідають ДБЖ. Якість функціонування, тривалість самостійної роботи та загальна експлуатаційна стійкість таких систем безпосередньо обумовлені фізико-хімічним станом їхнього головного елемента - акумуляторної батареї.

На практиці, для побутових потреб поширеним та фінансово обґрунтованим вибором залишаються свинцево-кислотні акумулятори. Хоча на сучасному ринку все активніше впроваджуються літій-іонні та літій-залізо-фосфатні технології, які надають вищу густину енергії та суттєво довший період служби, понад 20 років у стаціонарних умовах проти 5-12 років для свинцево-кислотних, останні зберігають своє провідне становище в сегменті ДБЖ малої потужності [2]. Це спричинено цілою низкою чинників. По-перше, первісна ціна свинцево-кислотних систем є в середньому у два-три рази меншою за вартість літійових однакової ємності, що робить їх доступними для звичайного споживача. По-друге, свинцево-кислотні акумулятори вирізняються витривалістю до складних температурних режимів та коливань напруги, їхньою повною безпекою у плані займання (на відміну від Li-ion систем, які схильні до термічного розгону та займання у разі порушення цілісності сепаратора). По-третє, світова інфраструктура забезпечує високий рівень утилізації свинцевих батарей (понад

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		14

99%), що робить їх вигідними та екологічно доцільними для застосування у концепції циклічної економіки.

Аби чітко окреслити предметну сферу цього дослідження, потрібно провести детальне зіставлення свинцевих акумуляторів, що застосовуються у ДБЖ малої потужності, з батареями, які використовуються в автомобільному транспорті, а також з альтернативними літєвими системами. Хоча електрохімічна система в автомобільних та стаціонарних акумуляторах є цілком тотожною, їхня внутрішня будова, геометрія пластин та хімічний склад легуючих домішок суттєво розрізняються через кардинально різне цільове призначення [3].

Машинні (стартерні) акумулятори створені з однією основною ціллю: дати короткочасний струм потужності, що вимірюється показником струму холодного прокручування (ССА), для пуску двигуна внутрішнього згоряння. Щоб збільшити максимальну площу контакту з електролітом та гарантувати миттєву віддачу потужності, внутрішня конструкція таких батарей містить значну кількість тонких пластин, зроблених у вигляді свинцевої губки з високим рівнем пористості. Проте такі пластини малої товщини є чутливими до глибокого розряду. Якщо стартерну батарею розрядити більш ніж на 15-20% від її номінальної ємності, активна маса починає руйнуватися, злущуватися від решіток та випадати в осад, що тягне за собою коротке замикання секцій. Тривале перебування в розрядженому стані спричиняє швидку незворотну сульфатацію. Саме тому застосування звичайних автомобільних батарей у побутових ДБЖ є недоцільним: за умов частих багатоденних вимкнень електроенергії, що передбачає глибокий розряд, даний акумулятор стрімко деградує та втрачає робочі характеристики протягом кількох місяців.

Натомість акумулятори, спеціально розроблені для ДБЖ малої потужності, розраховані на тривалу віддачу помірних струмів та здатність витримувати глибокі розряди аж до 80%, без суттєвої втрати робочих характеристик. Вони містять значно товщі суцільні свинцеві пластини, часто леговані сурмою або складними кальцієво-олов'яними сплавами для підвищення механічної міцності.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						15
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Така архітектура збільшує їхній внутрішній опір порівняно зі стартерними батареями, обмежуючи максимальний піковий струм, але водночас багаторазово підвищує їхню стійкість до деградації активної маси під час тривалих відключень [3]. Саме такі побутові акумулятори виробляються масово для потреб резервного енергозабезпечення будівель, і саме їхні електрохімічні характеристики піддаються стандартизованому вимірюванню за допомогою інтелектуальних аналізаторів.

Наступна таблиця демонструє ключові конструктивні та експлуатаційні відмінності між акумуляторами для ДБЖ та автомобільними батареями.

Таблиця 1.1 - Порівняння акумуляторів для ДБЖ та автомобільних батарей

Характеристика	Акумулятори для ДБЖ малої потужності (Deer Cycle)	Стартерні (автомобільні) акумулятори
Характеристики свинцевих пластин	Масивні, суцільні або панцирні пластини	Тонкі пластини губчастої структури
Оптимальна глибина розряду (DOD)	До 80% без суттєвої шкоди для життєвого циклу	Не більше 15-20%, глибокий розряд руйнівний
Експлуатаційне призначення	Тривала віддача стабільного помірної струму	Короткочасна віддача максимального струму (ССА)
Внутрішній опір	Помірний / Вищий	Наднизький
Легування решіток	Кальцій, олово, сурма (для стійкості до корозії)	Переважно кальцій
Термін служби в циклічному режимі	Високий (сотні або тисячі циклів)	Низький (кілька десятків циклів)

У ДБЖ малої потужності пріоритетно застосовуються герметизовані свинцево-кислотні акумулятори з клапанами. Вони є цілком безпечними для використання в закритих житлових та офісних приміщеннях, оскільки не

виділяють отруйних випарів сірчаної кислоти та вибухонебезпечного водню у звичайних режимах роботи. Це досягається завдяки внутрішньому замкнутому циклу рекомбінації газів: кисень, що виділяється на позитивній пластині наприкінці циклу заряду, дифундує до негативної пластини, де вступає в хімічну реакцію з воднем, знову утворюючи воду [3]. Клапани надлишкового тиску відкриваються лише в аварійних випадках сильного перезаряду задля запобігання розриву пластикового корпусу. Акумулятори типу герметизовані свинцево-кислотні акумулятори з клапанним регулюванням (VRLA) структурно поділяються на дві головні категорії за способом іммобілізації електроліту: AGM та GEL [4].

В основі технології AGM лежить застосування пористих розділювачів, зроблених з надтонких скляних ниток. Ці скловолоконні прокладки виконують важливе подвійне завдання. Насамперед, вони функціонують як капілярний абсорбент, повністю втягуючи рідкий електроліт і підтримуючи його як найтісніший зв'язок з активним матеріалом на свинцевих пластинах. По-друге, вони гарантують міцність усієї конструкції, не допускаючи обсіпання активного шару. Ключовою інженерною характеристикою AGM-матеріалу з його мікропористою будовою є те, що пори не насичуються електролітом. Близько 5-10% об'єму зарезервовано як незаповнений простір, формуючи мікроскопічні шляхи. Саме цими газовими каналами кисень безперешкодно переміщується від позитивного електрода до негативного для подальшої рекомбінації [3]. Завдяки такій архітектурі, акумулятори AGM демонструють малий внутрішній опір, що дає їм здатність видавати потужні струми короткочасної дії. Це позиціонує їх як вдалий і затребуваний варіант для малопотужних стандартних джерел безперебійного живлення, які типово обслуговують обладнання для обчислювальної техніки та навантаження індуктивного характеру [4].

Гелеві (GEL) акумулятори також належать до класу герметичних VRLA батарей, однак принцип утримання електроліту в них відрізняється. У гелевих системах електроліт згущений до желеподібного (тиксотропного) стану завдяки доданню дрібнодисперсного діоксиду кремнію (силікагелю) [4]. Під час

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						17
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

заводського заливання та на початковому етапі використання гелевий електроліт являє собою суцільну масу, яка повністю заповнює увесь вільний простір між пластинами. У цей період пряма міграція кисню неможлива, тому нові гелеві батареї можуть мати трохи нижчу ефективність рекомбінації. Проте, у процесі подальшої експлуатації гель втрачає частину вологи, зазнає усадки і в його масиві утворюються просторові мікротріщини. Ці тріщини починають повноцінно виконувати функцію газових каналів для рекомбінації кисню [3]. Завдяки щільному обволіканню пластин гелем, такі батареї вирізняються стійкістю до глибоких розрядів, не потерпають від розшарування електроліту і значно краще витримують інтенсивні циклічні навантаження порівняно з AGM. Однак їхній внутрішній опір є трохи вищим, тому вони мають нижчу здатність віддачі великих граничних струмів і чутливі до перевищення напруги заряду [4].

Для комплексного розуміння вибору технології для ДБЖ малої потужності, нижче наведена детальна порівняльна характеристика свинцево-кислотних та альтернативних акумуляторних систем.

Таблиця 1.2 - Характеристика свинцево-кислотних та альтернативних акумуляторних систем

Технологія / Параметр	Свинцево-кислотні AGM	Свинцево-кислотні GEL	Літій-іонні (LiFePO ₄)
Внутрішня структура	Електроліт у скловолоконі	Електроліт у формі силікагелю	Іони літію в кристалічній решітці
Рівень саморозряду	Вищий (2-3%)	Нижчий (1-2%)	Наднизький (<1%)
Експлуатаційний ресурс	300-500 глибоких циклів	500-800 глибоких циклів	2000-5000 глибоких циклів
Чутливість до перезаряду	Середня	Висока (руйнування гелю)	Критична (потребує складної системи управління батареями (BMS))

Таблиця 1.2 - Характеристика свинцево-кислотних та альтернативних акумуляторних систем (продовження)

Циклічний ресурс (при 50%/80% DoD)	400-600 циклів 200-300 циклів	600-1000 циклів 300-500 циклів	4000-5000+ циклів 2000-3000 циклів
Внутрішній опір (12 В, 100 А·год)	4,0-6,0 мОм	5,0-6,0 мОм	10,0-30,0 мОм
Ефективність циклу	80-85%	80-85%	95-98%
Струм заряду (рекомендований)	0,1С – 0,2С	0,1С – 0,2С	0,5С – 1,0С
Вартість інтеграції	Низька (базовий контролер)	Помірна	Висока (обов'язкова наявність BMS)
Оптимальна роль у ДБЖ	Буферний режим, короткі збої	Циклічний режим, тривалі збої	Універсальне застосування
Питома густина енергії (масова)	30-50 Вт·год/кг	25-50 Вт·год/кг	90-160 Вт·год/кг
Оптимальна глибина розряду (DoD)	≤ 80%	≤ 80%	≤ 80-100%

Таким чином, актуальність застосування побутових ДБЖ зі свинцевими акумуляторами залишається на стабільно високому рівні. Масове виробництво, економічна доступність, високий рівень безпеки та передбачуваність електрохімічної поведінки роблять AGM та GEL технології оптимальним вибором для більшості користувачів. Проте, їхня довговічність обмежена законами фізичної хімії, що робить розробку та впровадження інтелектуальних

аналізаторів стану батарей критично важливим завданням для забезпечення енергонезалежності.

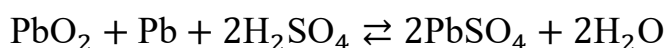
1.2 Електрохімічні та фізичні процеси в свинцевих акумуляторах

Функціонування свинцево-кислотного акумулятора як ключового елемента ДБЖ малої потужності базується на оборотних електрохімічних реакціях перетворення електричної енергії в хімічну під час заряду, і навпаки - під час розряду. Теоретична основа цих процесів фундаментально описується макроскопічною теорією подвійного сульфатоутворення, яка була підтверджена численними термодинамічними та кінетичними дослідженнями.

Активною масою позитивної пластини (анода під час розряду) у зарядженому стані є високопористий діоксид свинцю (PbO_2), який має характерний темно-коричневий колір. Негативна пластина (катод під час розряду) складається з чистого губчастого свинцю (Pb) сірого кольору. Електролітом слугує водний розчин сірчаної кислоти (H_2SO_4), густина якого в повністю зарядженому акумуляторі зазвичай становить від 1,28 до 1,30 г/см³ залежно від кліматичного виконання батареї [3].

Під час підключення зовнішнього навантаження (режим розряду ДБЖ) починається спрямований рух електронів по зовнішньому колу від негативної пластини до позитивної. У цей час всередині батареї протікає складна гетерогенна хімічна реакція. На негативному електроді атоми свинцю віддають електрони і взаємодіють з сульфат-іонами (SO_4), утворюючи сульфат свинцю (PbSO_4). Одночасно на позитивному електроді діоксид свинцю приймає електрони, приєднує іони водню (H) та сульфат-іони, також перетворюючись на сульфат свинцю з паралельним вивільненням молекул води (H_2O).

Сумарна електрохімічна реакція процесу описується наступним рівнянням:



Прямий напрямок реакції відповідає розряду, зворотний - заряду. З цього рівняння видно дві важливі фізичні закономірності. По-перше, під час розряду

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						20
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

активні маси обох електродів хімічно перетворюються на одну і ту ж речовину - сульфат свинцю. По-друге, в процесі розряду сірчана кислота активно витрачається (зв'язується в сульфат), а замість неї генерується вода. Це призводить до падіння густини електроліту в процесі втрати ємності. Молярний об'єм утвореного сульфату свинцю є значно більшим, ніж молярні об'єми вихідних Pb та PbO₂. Відповідно, в процесі розряду пластини акумулятора зазнають суттєвого механічного розширення, що створює внутрішню фізичну напругу в свинцевій решітці [3]. Під час заряду струм від зовнішнього джерела (зарядного пристрою ДБЖ) змушує реакцію протікати у зворотному напрямку: сульфат свинцю розкладається, відновлюючи первинні губчастий свинець та діоксид свинцю, а іони SO₄ повертаються у розчин, відновлюючи початкову високу густину сірчаної кислоти.

Головною проблемою, яка експоненціально скорочує термін служби свинцево-кислотних акумуляторів в системах резервного живлення, є незворотна сульфатація негативного електрода. Цей процес набуває високого ступеня деградації при експлуатації батарей в режимах високошвидкісного часткового заряду-розряду, що є типовим сценарієм для сучасних умов віялових відключень, коли ДБЖ не встигає повністю зарядити акумулятор між знеструмленнями [5].

Кінетичний механізм сульфатації розвивається у кілька послідовних етапів. Під час нормального розряду на поверхні та в порах негативної пластини формуються дрібнодисперсні кристали PbSO₄. Ці первинні кристали мають значну сумарну площу поверхні, високу термодинамічну активність і, як наслідок, порівняно легко розчиняються під дією зарядного струму. Однак, якщо акумулятор тривалий час залишається у розрядженому стані, регулярно піддається глибоким розрядам або експлуатується в умовах постійного недозаряду, в дію вступає процес так званого Оствальдівського дозрівання [5].

Суть цього фізичного процесу полягає в тому, що дрібні кристали сульфату свинцю є термодинамічно менш стабільними за великі. Тому частина іонів свинцю (Pb) розчиняється в електроліті і відразу ж перекристалізовується, осідаючи на поверхні більших кристалів. Утворюються макрокристали розміром

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						21
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

до кількох макрометрів, які характеризуються низькою розчинністю та виконують роль потужних діелектриків [5]. Оскільки ці макрокристали PbSO_4 мають мінімальну площу контакту з електролітом і практично нульову електропровідність, вони не можуть бути повністю перетворені назад у губчастий свинець під час стандартного циклу заряду ДБЖ. Це призводить до фізичної, незворотної втрати активної маси негативного електрода. З кожним циклом макрокристали накопичуються, зростаються між собою і формують суцільний щільний пасиваційний шар на поверхні електрода. Цей шар механічно блокує дифузію молекул сірчаної кислоти вглиб пластини, різко збільшує внутрішній опір і суттєво обмежує їхню корисну ємність [5].

Окрім сульфатації негативного електрода, втрата ємності та вихід з ладу зумовлюються деградацією позитивної маси та корозією струмовідвідної решітки. Фундаментальні дослідження показують, що анодна корозія є одним із головних процесів старіння акумуляторів VRLA: свинцеві решітки позитивних пластин, що фізично утримують активний діоксид свинцю, під дією високого анодного потенціалу та кислоти з часом окислюються до діоксиду свинцю [3]. Цей процес супроводжується значним збільшенням об'єму матеріалу, що призводить до механічного розтягування решітки, втрати її міцності та остаточного руйнування. Крім того, явище глибокого перерозряду суттєво підвищує ймовірність ініціації корозії та сприяє відшаруванню активної маси від струмовідводів у вигляді шламу, що пришвидшує остаточний вихід акумулятора з ладу [3].

Додавання високодисперсних вуглецевих матеріалів (таких як активоване вугілля, графіт, сажа або одностінні вуглецеві нанотрубки) створює розгалужену тривимірну електропровідну мережу всередині свинцевої губки [5]. Поєднання структурних, провідних і ємнісних механізмів сприяє ефективності цієї мережі [5]. Однак фізично ізолюючи зерна свинцю, частинки вуглецю змушують сульфат формуватися у вигляді легкорозчинного дисперсного пилу, що запобігає йому спіканню в макрокристалі. Однак навіть після часткової трансформації свинцю в непровідний PbSO_4 розгалужений вуглецевий каркас забезпечує

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						22
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

високу електропровідність системи. Зниження поляризаційного опору дозволяє акумулятору приймати високі струми, не нагріваючи його надмірно. Конденсаторний ефект надмірно пористого вуглецю є останнім елементом. Утворюючи подвійний електричний шар, він діє як суперконденсатор, який миттєво компенсує різкі імпульсні навантаження та знімає напругу з більш інерційних електрохімічних процесів Фарадея [5].

Існує ефективність застосування інноваційних вуглецевих спінених матеріалів, отриманих завдяки екологічно чистим синтезам із доступної сахарози. Ретельне експериментальне моделювання виявило, що введення лише 1,0% вуглецевої піни (CF) до негативного електрода подовжує життєвий цикл акумулятора до 3642 повних циклів за складних умов експлуатації. Цей показник є в 2,87 рази вищим за ті, що демонструють еталонні акумулятори без будь-яких домішок, та значно (у 2,39 рази) перевершує продуктивність систем з типовим активованим вугіллям [5]. Така пориста архітектура формує сприятливі, багаторівневі шляхи для безперешкодного руху електроліту. При цьому, вона здатна нівелювати основний недолік вуглецевих домішок - низький поріг перенапруги для виділення водню: виняткова структура CF сприяє рекомбінації водневих радикалів, що істотно уповільнює випаровування рідини з електроліту [5].

Саморозряд - це мимовільна і неминуча втрата електричного заряду накопичувачем енергії, коли він не використовується для живлення. У свинцево-кислотних накопичувачах це явище зумовлене фундаментальною термодинамічною нестійкістю вищих оксидів свинцю та тими повільними електрохімічними процесами, що відбуваються через незначні домішки різних металів (наприклад, заліза чи сурми), присутні у рідині-електроліті. У сучасних герметичних AGM-батареях, цей відсоток місячної втрати заряду коливається в межах 2-3% за умови кімнатної температури 20°C. Гелеві ж акумулятори демонструють ще менші втрати на саморозряд, оскільки густіша консистенція їхнього середовища знижує рух іонів [4]. З іншого боку, спираючись на рівняння Арреніуса, що описує швидкість хімічних перетворень, збільшення температури

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						23
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

навколишнього середовища спричиняє стрімке прискорення цієї втрати: щоразу, коли температура підіймається на 10 градусів Цельсія, темп саморозряду майже подвоюється [3].

Повний опір акумулятора не варто розглядати як фіксоване число. Це змінний показник, що складається з двох частин: дійсної (активної) та уявної (реактивної). Найточніше його можна зобразити, застосувавши еквівалентну електрохімічну схему Рендлса, яка дає змогу детально відокремити загальний опір на складові, що відповідають фізичним явищам [6]. Омичний опір, опір переносу заряду та конденсатор подвійного шару складають еквівалентну модель. Омичний опір (R_1) - це активний електронний і іонний опір, який створюється металевими клемами, зварними з'єднаннями, свинцевою решіткою та електролітом. Зміна цього параметра зазвичай вказує на фізичні дефекти, такі як зниження рівня електроліту через висихання, стратифікацію кислоти, глибоку корозію пластин або порушення внутрішніх контактів. З іншого боку, опір переносу заряду (R_2) описує процеси на мікроскопічній межі поділу фаз твердий електрод - рідкий електроліт. Це показує енергетичний бар'єр активації, який іони повинні подолати, щоб здійснити електрохімічну реакцію. Він підключений до конденсатора паралельно в класичній моделі Рендлса. Високе значення R_2 є найточнішим індикатором втрати хімічної ємності [6]. В свою чергу конденсатор подвійного шару (C_{dl}) відображає паразитну ємність, що виникає на межі електродів та електроліту внаслідок просторового розділення зарядів. Для свинцево-кислотних систем ця ємність є значною і становить приблизно 1,5 Фарад на кожні 100 А·год ємності батареї [6]. Додатково модель може містити імпеданс Варбурга, який описує опір дифузії іонів углиб пористих структур на наднизьких частотах.

Результати досліджень свідчать, що сумарний внутрішній опір сучасних свинцевих акумуляторів не збільшується лінійно пропорційно зниженню їхньої ємності. Завдяки використанню антикорозійних добавок та легуванню решіток, опір залишається стабільно низьким протягом майже всього корисного терміну служби батареї. Він починає експоненціально і різко зростати лише наприкінці

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						24
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

життєвого циклу [6]. Зростання опору веде до втрати здатності приймати заряд та забезпечувати заявлений струм розряду, який обмежує доставку енергії: під навантаженням він викликає надмірне джоулеве нагрівання батареї та миттєве падіння напруги на клеммах. Через це інвертор підключеного ДБЖ реєструє просідання напруги нижче критичного порогу і вимикається достроково, навіть якщо в масиві батареї ще залишається хімічно доступна енергія [6].

Тривалість життя акумулятора ДБЖ критично залежить від двох експлуатаційних основ: температурного режиму та глибини регулярних розрядів. Підвищення температури навколишнього середовища тимчасово прискорює хімічні реакції, знижує внутрішній опір і тимчасово збільшує доступну ємність. Проте в довгостроковій перспективі це має критичний вплив: кожне підвищення температури на 10°C вище номінальних 20°C скорочують загальний термін служби батареї VRLA вдвічі через різке прискорення анодної корозії та інтенсивне висихання електроліту через клапани. З іншого боку, сильне зниження температури збільшує в'язкість електроліту та внутрішній опір, суттєво обмежуючи струмовіддачу, хоча й подовжуючи експлуатацію системи.

Експлуатація акумулятора в режимі постійного недозаряду, коли ДБЖ працює у графіку віялових відключень (наприклад, 4 години роботи, 2 години заряду), призводить до того, що батарея ніколи не досягає 100% ємності. Згідно з дослідженнями, це суттєво деградує здатність батареї ефективно приймати зарядний струм без надмірного виділення газу і збільшує внутрішній опір [7]. Регулярне, хоча б щотижневе проведення повних стабілізаційних циклів заряду з використанням інтелектуальних алгоритмів та контролем по фактору заряду є необхідним заходом для компенсації цих явищ, розчинення первинних сульфатів та відновлення параметрів зарядної здатності батареї до базових заводських значень [7].

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						25
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

1.3 Аналіз методів та схемотехнічних рішень для контролю параметрів акумуляторних батарей

Для забезпечення гарантованої та надійної роботи ДБЖ малої потужності необхідно здійснювати безперервний інтелектуальний контроль стану батареї та її поточного рівня заряду. Оскільки пряме миттєве вимірювання ємності без проведення тривалого та руйнівного для ресурсу повного розряду є фізично неможливим через глибоку нелінійність хімічних процесів, індустрією та науковцями розроблено ряд математичних методів. Більшість з них базуються на високоточному аналізі внутрішнього опору та інтерпретації динамічного відгуку батареї на штучні збурення.

Методологія вимірювання внутрішнього імпедансу концептуально поділяється на дві великі домінуючі категорії: вимірювання реакції на постійному струмі та спектроскопія на змінному струмі.

Метод постійного струму - цей метод є історично найстарішим, найпростішим в апаратній реалізації, але водночас найближчим до реальних умов експлуатації ДБЖ, оскільки він змушує батарею віддавати реальну фізичну потужність [8]. Суть методу полягає у підключенні каліброваного навантажувального резистора на короткий проміжок часу та вимірюванні різниці між напругою розімкнутого кола і напругою під навантаженням. Внутрішній опір (R_i) розраховується за класичним законом Ома для повного кола[9]:

$$R_i = \frac{\Delta U}{I_{\text{load}}},$$

де ΔU - падіння напруги;

I_{load} – струм навантаження.

Однак цей метод приховує в собі фундаментальні обмеження. По-перше, падіння напруги (ΔU) при підключенні навантаження струму (I_{load}) не відбувається миттєво. Спостерігається складний електрохімічний ефект як спад напруги з подальшим невеликим відновленням, зумовлений затримкою активації гідратованих зон PbO_2 на поверхні позитивної маси [8]. Тому для отримання достовірних даних система повинна витримати час стабілізації, який може

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		26

становити від кількох секунд до 30 секунд. По-друге, класичний метод постійного струму не дозволяє сепарувати омичний опір та опір переносу заряду, Об'єднуючи всі компоненти у загальне значення без можливості їх диференціації в міліомах [6]. Розширеною, значно точнішою версією є метод двоступеневого навантаження, який стандартизований нормами міжнародної електротехнічної комісії (IEC) 61951. Він використовує два послідовні імпульси різного струму, спочатку струм для стабілізації, потім потужний імпульс для вимірювання ΔU , що дозволяє частково відфільтрувати вплив конденсатора подвійного шару [6].

Метод змінного струму (АС), замість розряду акумулятора струмом, передбачає подання невеликого синусоїдального сигналу змінного струму та прецизійне вимірювання зсуву фаз між напругою та струмом [8]. Ефективність цього методу критично залежить від обраної частоти сканування. Наприклад, при використанні частоти близько 90 Гц для стандартних свинцевих акумуляторів (ємністю 70-90 А·год) внутрішні ємнісні та індуктивні реактенси математично компенсують один одного. Це призводить до нульового зсуву фаз і дозволяє виміряти активний компонент провідності батареї [6]. Іншим популярним варіантом є стрес-тест на частоті 1000 Гц. Він генерує суто реактивні показники опору і використовується для оцінки поведінки акумулятора при високочастотних імпульсних навантаженнях [6].

Варто зазначити, що абсолютні значення опору, отримані методами змінного струму (АС) та постійного струму (DC), відрізняються. Для однієї і тієї ж батареї розрахований DC - опір може становити близько 350 мОм, тоді як АС-імпеданс - лише 3,5 мОм. Вони сходяться в єдину точку лише в умовах короткого замикання (струми понад 3000 А) [8]. Це пояснюється тим, що метод АС аналізує мікроскопічний протонний релейний механізм передачі заряду молекулами води (H_2O), який відбувається на порядки швидше, ніж дифузія сульфат-іонів SO_4 під час справжнього DC-розряду [8].

Інформативним методом є електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS). Цей метод виконує розгортку частот від мілігерц до кілогерц, генеруючи комплексні діаграми Найквіста. Завдяки математичній апроксимації спектра до

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						27
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

моделі Рендлса, EIS дозволяє чітко розмежувати омичний опір електроліту та опір переносу заряду, що є критерієм оцінки ступеня сульфатації [6].

Традиційні активні методи вимагають генерації штучних тестових сигналів, що ускладнює схемотехніку. Під час нормальної роботи ДБЖ, при підключенні потужних споживачів, виникають перехідні пускові струми. Акумулятор реагує на них різким короткочасним просіданням напруги [10]. Сучасні алгоритми використовують дискретне вейвлет-перетворення та багатороздільний аналіз для декомпозиції цієї кривої просідання напруги на набір енергетичних ознак [10]. Ці ознаки формують вектори, які передаються в заздалегідь навчені штучні нейронні мережі. Серед найефективніших архітектур виділяють Fuzzy Cerebellar Model Neural Network та мережі довгої короткочасної пам'яті, оптимізовані за допомогою ройових алгоритмів, наприклад, Levy Bat Algorithm - LevyBA [10]. Ці моделі здатні з точністю понад 95% прогнозувати поточний стан роботоздатності акумулятора у фоновому режимі, повністю виключаючи необхідність застосування дорогих електрохімічних імпедансних спектроскопічних - аналізаторів або проведення руйнівних тестів глибокого розряду [10].

Для створення доступного побутового аналізатора параметрів батарей найчастіше застосовують сучасні мікроконтролерні архітектури, наприклад, платформи Arduino Uno, мікросхеми ATtiny85 або сімейство PIC12F. Архітектура типового вимірювального блоку аналізатора складається з трьох вузлів. Першим є обчислювальне ядро, а точніше мікроконтролер. Він оснащується багатоканальним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) з роздільною здатністю не менше 10 біт. Завданням мікроконтролера є високоточне вимірювання напруги та генерація керуючих імпульсів (ШІМ). Другим є вимірювальний навантажувальний ланцюг який відповідає за реалізацію методу DC Load. Складається з надійного потужного резистора з низьким опором (наприклад, 1 Ом або 0.1 Ом з допуском 1% і потужністю 20-50 Вт) та швидкодіючого польового транзистора (MOSFET) з низьким опором відкритого каналу [9]. MOSFET відіграє роль електронного ключа, який

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		28

керується ШІМ-сигналом мікроконтролера. Третім є блок масштабування, а саме вимірювальний підсилювач. Оскільки падіння напруги на вимірювальному шунті може становити малі значення (наприклад, 81 мілівольт при струмі 10 А), подавати такий сигнал безпосередньо на АЦП неможливо через квантизаційні шуми. Для вирішення цієї проблеми використовують операційні підсилювачі, для прикладу можуть взяти прецизійні збірки на базі LM358 або інструментальні підсилювачі, які лінійно масштабують мілівольтний сигнал до робочого діапазону АЦП який становить 0-5 В.

Алгоритм вимірювання внутрішнього опору на мікроконтролері реалізується наступним чином. Спочатку АЦП вимірює напругу холостого ходу. Далі мікроконтролер формує логічну одиницю на затворі MOSFET-транзистора, миттєво підключаючи навантажувальний шунт до клем акумулятора. Для нівелювання температурного дрейфу опору самого шунта (оскільки струми можуть досягати десятків ампер, резистор нагрівається), тривалість цього імпульсу жорстко обмежується програмним таймером і зазвичай становить близько 100 мілісекунд [9]. В кінці імпульсу АЦП фіксує напругу під навантаженням. Відразу після цього транзистор закривається, і мікроконтролер, використовуючи зашиті в пам'ять формули закону Ома та калібрувальні коефіцієнти, вираховує загальний внутрішній опір і виводить його на OLED-дисплей.

Враховуючи, що незворотна кристалічна сульфатація є першопричиною передчасного списання понад 70% акумуляторів в ДБЖ, сучасні аналізатори преміум-класу обов'язково оснащуються активною функцією відновлення. Найефективнішим методом фізичного руйнування діелектричного ізолюючого шару макрокристалів сульфату свинцю є метод імпульсного ударного заряджання [11].

Відмова від використання класичного постійного струму заряду на користь подачі коротких, але потужних імпульсів напруги та струму створює умови для руйнування макрокристалів. Згідно з передовими дослідженнями, свинцево-кислотні акумулятори, як фізичні коливальні системи, мають власну структурну

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						29
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

резонансну частоту, яка лежить у високочастотному радіодіапазоні від 2 до 6 МГц [12]. Відповідно, подача на клеми акумулятора гострих високовольтних імпульсів, гармоніки яких збігаються з цією частотою, викликає явище механічного резонансу на молекулярному рівні. Це явище руйнує молекулярні зв'язки в структурі макрокристалів сульфату свинцю, дозволяючи важким іонам SO_4 розірвати кристалічну решітку і повернутися в рідкий електроліт без побічного надмірного підвищення загальної температури батареї [12].

Окрім мегагерцового діапазону, практичного поширення набули класичні ШІМ-десульфататори, що оперують потужними струмами на значно нижчих і доступніших для реалізації частотах - від 1,5 кГц до 64 кГц [13]. Найкращі результати під час тривалих наукових тестувань продемонстрували алгоритми заряду типу імпульсний піковий струм - постійна напруга (PPC-CV) зі шпаруватістю імпульсу на рівні 25% та тривалістю активного імпульсу понад 100 мілісекунд. Такі параметри забезпечують максимальний ударний вплив на сульфати [11]. Під час контрольованих лабораторних тестів цей підхід показав результати: він не лише скорочував час критичної повної зарядки батареї з 10 годин до 1 години, але й збільшував фінальний циклічний ресурс батареї в 3-4 рази порівняно зі стандартним зарядом постійним струмом [11]. Окрім руйнування сульфатів, імпульсний заряд перешкоджає утворенню паразитного резистивного шару напівпровідникового 'PbO' на поверхні решіток складних сплавів Pb-Ca-Sn і ефективно затримує небажану кристалізацію позитивної маси, зберігаючи її первісну мікропористу, високоактивну структуру [11].

Ще однією перспективною технологією є рефлексивний заряд. У цьому алгоритмі інтенсивні позитивні імпульси заряду миттєво чергуються зі ще коротшими мікро-імпульсами глибокого розряду (зворотний струм). Зворотний імпульс знімає іонну поляризацію (скупчення іонів біля електродів), звільняючи простір для нової порції зарядного струму. Однак розробники повинні бути вкрай обережними: якщо неоптимально підібрати ширину цих імпульсів, рефлексивний заряд спричиняє потужне тепловиділення, яке може розплавити сепаратори або призвести до теплового розгону акумулятора [14].

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						30
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Розробляються також системи електроакустичного заряду, які комбінують зарядні алгоритми з ультразвуковим впливом для прискорення дифузії в електроліті, проте вони залишаються на стадії експериментальних розробок.

Апаратно принципова схема ефективного десульфататора може бути реалізована на базі поширеного аналогового таймера NE555, або спеціалізованих мікроконтролерів, запрограмованих на генерацію жорстких високочастотних ШІМ-сигналів [15]. Класична індуктивна топологія зворотного ходу включає потужні накопичувальні індуктивності. Під час відкритого стану MOSFET-транзистора через дросель протікає струм, запасаючи енергію у вигляді магнітного поля. При різкому, мікросекундному закритті транзистора, магнітне поле дроселя спадає. Згідно з законом електромагнітної індукції Фарадея, це створює короткий високовольтний сплеск (імпульс напруги ЕРС самоіндукції, який може сягати 50-80 Вольт), який долає діелектричний опір шару сульфату і вганяє струм у клеми підключеної батареї.

Критичні системи балансування багатоелементних акумуляторних збірок. Абсолютно окремою, але не менш важливою проблемою тривалої експлуатації батарей в потужніших моделях ДБЖ, наприклад, топологіях з напругою шини 24 В, 48 В або 96 В, є прогресуюче розбалансування послідовно з'єднаних 12-вольтових акумуляторних блоків. Навіть в партії акумуляторів з одного конвеєра існують мікроскопічні заводські допуски внутрішнього опору та ємності. В процесі експлуатації, особливо під впливом градієнта температур (один акумулятор в стійці ДБЖ нагрівається сильніше за інший), ці відхилення лавиноподібно накопичуються. Виникає критичний дисбаланс стану заряду. Під час загального заряду стійки напругою від ДБЖ, акумулятор з меншою ємністю швидко заряджається і переходить у стан глибокого перезаряду (починається електроліз, википання електроліту через клапани, руйнування гелю). Водночас акумулятор з більшою ємністю недоотримує заряд, залишаючись недозарядженим, що призводить до його швидкої і тотальної сульфатації [16]. Без зовнішнього втручання така збірка виходить з ладу.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						31
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Для вирішення цієї проблеми сучасні аналізатори та системи управління батареями в обов'язковому порядку інтегрують модулі покомпонентного балансування. В інженерній практиці існує дві фундаментально різні концептуальні топології. Першим є пасивне балансування, воно працює за принципом розсіювання надлишкового заряду. Мікроконтролер постійно вимірює напругу кожного окремого 12-вольтового блоку. Коли напруга найслабшої комірки під час заряду перевищує встановлений безпечний поріг (наприклад, 14,4 В), алгоритм замикає електронний ключ, підключаючи паралельно до цієї батареї потужний шунтуючий резистор. Цей резистор бере на себе частину зарядного струму, перетворюючи електричну енергію у звичайне тепло, дозволяючи решті батарей у ланцюзі продовжити процес заряду. Цей метод є найпростішим в апаратній реалізації, винятково надійним і найдешевшим. Саме тому він є абсолютним стандартом для більшості недорогих BMS. Однак, його головним недоліком є втрата енергії, перегрів корпусу ДБЖ та неможливість збільшити загальну віддану ємність під час розряду [17]. Другим є активне балансування, яке вже на відміну від пасивного працює за принципом перекачування енергії. Замість безглузлого спалювання енергії на резисторах, ця топологія використовує складні імпульсні перетворювачі на базі індуктивностей, системи конденсаторів, що перемикаються, або багатообмоткові високочастотні трансформатори. Контролер бере енергію від найбільш зарядженого акумулятора в ланцюзі, накопичує її в проміжному магнітному або електричному полі, і цілеспрямовано направляє її в найменш заряджений акумулятор [17]. Такі системи працюють з енергоефективністю понад 90%. Вони генерують мінімум побічного тепла та, що найважливіше, здатні проводити балансування не лише під час заряду, але й під час розряду, Дозволяючи максимально та безпечно використати всю доступну ємність батарейного масиву [18]. У сучасних професійних аналізаторах батарейних збірок дедалі частіше використовують саме активні топології, бо впровадження активного балансування здатне подовжити реальний термін життя акумуляторного масиву ДБЖ на 40-60% порівняно з системами без балансування [19].

					<i>ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ</i>	Арк.
						32
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Методика визначення внутрішнього опору розпадається на два основні підходи: метод постійного струму, коли застосовуються стрімкі, потужні імпульси навантаження, та метод імпедансної спектроскопії змінного струму, який ґрунтується на введенні синусоїдального сигналу фіксованої частоти [7].

Передові світові виробники вимірювального обладнання представили портативні високоточні прилади, спеціально розроблені для тестування як систем безперебійного живлення (ДБЖ), так і стаціонарних VRLA-акумуляторів. Першим можна виділити такий прилад як Hioki BT3554-50 який був винайдений в Японії. Hioki BT3554-50 здобув статус галузевого еталону для перевірки батарей ДБЖ без необхідності їхнього від'єднання від робочого навантаження. Він функціонує за принципом чотирипровідного вимірювання змінного струму при частоті 1 кГц ключовою комерційною перевагою є використання фірмової технології фільтрації сторонніх шумів, що гарантує стабільну роботу приладів навіть під час значних перешкод, створюваних активним інвертором ДБЖ. Тривалість одного вимірювання не перевищує 2 секунди. Пристрій автоматично зіставляє отримані показники внутрішнього опору та напруги із заданими виробником межами, видаючи кінцевий результат, з можливістю передачі інформації через Bluetooth на мобільний пристрій для генерування звітів. Другим таким прикладом можна виділити низку серій приладів Fluke 500 Series з якою розглянемо саме Fluke BT521, виробником якої є США. Цей аналізатор призначений для комплексного багатопараметричного обстеження протяжних батарейних масивів. На відміну від базових моделей, BT521 здатний вимірювати не тільки опір внутрішнього типу та напругу, але й амплітуду пульсацій, що надходить від зарядного блоку, а також безпосередньо реєструвати опір з'єднань між окремими секціями. Інноваційним рішенням є наконечники, які інтегрують інфрачервоний термодатчик, що дозволяє синхронно фіксувати температурний стан кожної окремої комірки. Прилад підтримує функцію автоматичного послідовного тестування цілого ряду акумуляторних шаф. Останніми прикладами які будуть розглянуті є Cadex Electronics, виробником якої є Канада та Midtronics, виробником якої є США. Аналізатори від Cadex (як-от

					<i>ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ</i>	Арк.
						33
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

C7000/C8000) націлені на більш глибоке технічне обслуговування, застосовуючи режими заряду/розряду за стандартами постійний струм (CC), постійна напруга (CV), постійна потужність (CP), і часто використовуються в критично важливих ДБЖ для медичного сектору та телекомунікацій. Midtronics концентрується на розробці алгоритмів оцінки провідності, пропонуючи швидкісні процедури тестування з мінімальним відбором енергії від самої досліджуваної батареї.

Для ведення усунення наслідків сульфатації, що не підлягає зворотному процесу, використовують техніку імпульсного заряджання на високих частотах. Принцип цього підходу полягає у поданні стислих за тривалістю, але високоенергетичних імпульсів напруги. Ці імпульси можуть бути налаштовані на резонансну частоту утворення кристалів сульфату свинцю (в діапазоні 2-6 МГц) або ж це можуть бути чітко визначені ШІМ-імпульси, що працюють у частотному діапазоні від 1,5 кГц до 64 кГц [9]. Завдяки такому мікроскопічному навантаженню руйнується діелектричний прошарок, змушуючи сульфатні іони повертатися у рідку фазу.

На ринку присутні спеціалізовані десульфататори та розумні зарядні пристрої, які реалізують цей алгоритм. Зокрема BatteryMINDer (моделі 128CEC1, 2012) – це комерційні пристрої які не просто заряджають батарею, але й постійно генерують високочастотні імпульси для підтримки чистоти пластин. Вони обладнані функціями авто-відключення при виявленні короткого замикання в елементі та температурною компенсацією. Іншим рішенням є PulseTech Xtreme Charge / F16 Pulse King робота яких базується на запатентованих алгоритмах імпульсної подачі струму без надмірного нагрівання батареї. За даними практичних тестувань, вони здатні покращити показник пускового струму та розрядної ємності, однак ефективні лише для сульфатації і не здатні відновити акумулятори з механічно зруйнованими решітками або висохлим електролітом.

Схема автономного пристрою десульфатації зображено на рис 1.1. [43].

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						34
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

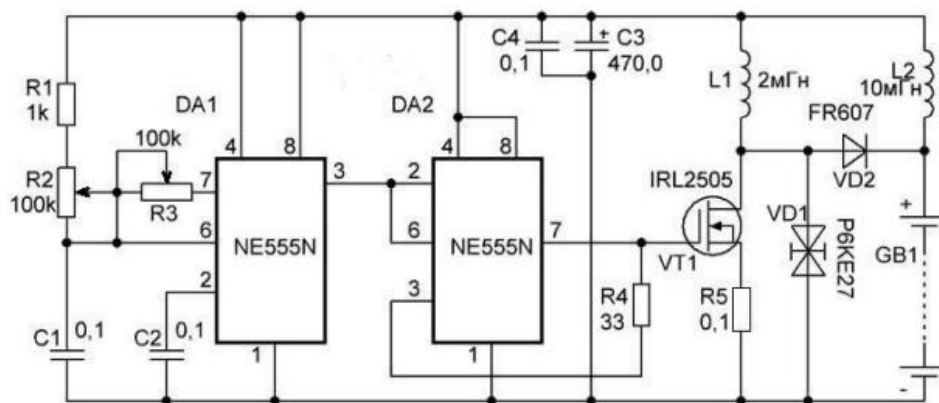


Рисунок 1.1 - Автономний пристрій десульфатації

Принципова електрична схема десульфатора показана на (рис. 1.1.). Генератор імпульсів (рисунок 1.1) створений на інтегральному таймері 555. Він генерує короткі імпульси із частотою декількох кілогерц. Частота коливань задається резистором R2, а тривалість імпульсу - резистором R3. На мікросхемі DA2 скомплектовано інвертуючий тригер Шмітта, який керує функціонуванням польового транзистора VT1. Обраний польовий транзистор IRL2505 типу, що має граничну напругу 1,5 В і керується логічними рівнями.

Використання інтегрального таймера DA2 як інвертуючого тригера Шмітта дає змогу вдосконалити роботу приладу. Затвор транзистора VT1 підключений до виводу 7 DA2, що дає можливість шунтувати затвор безпосередньо до загального проводу за низького вихідного рівня (рівень лог. “0”), що покращує стійкість роботи пристрою. Та й сам тригер DA2 володіє гістерезисом входних напруг у 1/3 і 2/3 від значення напруги живлення. Коли транзистор VT1 на нетривалий час відчиняється, починає текти струм через індуктивність L1.

У магнітному полі цієї індуктивності накопичується енергія, яка після припинення дії імпульсу формує високовольтний сплеск напруги (його величина залежить від швидкості зміни струму в індуктивності). “Плюс” цього сплеску подається на “плюс” акумулятора, а “мінус” через конденсатори C3, C4 спрямовується на загальний провід приладу (“мінус” акумулятора). Якщо конденсатори з невеликими втратами й мають низький еквівалентний послідовний опір, а дроти від пристрою до акумулятора короткі, то піковий

струм у сплеску може досягати приблизно 10 А. Водночас споживаний струм від акумулятора становить близько 50 мА.

Розробка актуального побутового або промислового приладу для аналізу чи десульфатації акумуляторів вимагає застосування підібраних компонентів. Якщо раніше в подібних пристроях застосовувалися прості таймери типу NE555, то сьогоднішня архітектура будується на основі високопродуктивних мікроконтролерних пристроїв.

Замість базових мікроконтролерів (як Arduino/ATtiny85), комерційні пристрої використовують потужні платформи типу Texas Instruments (серія C2000), STMicroelectronics (STM32 з ядрами ARM Cortex-M4) або спеціалізовані аналогові інтерфейси, наприклад ADuCM360 від Analog Devices. Вони містять вбудовані 16-бітні АЦП (аналого-цифрові перетворювачі) та високоточні ШІМ-генератори. Це дозволяє генерувати десульфатуючі імпульси та одночасно зчитувати напругу реакції з похибкою менше $\pm 0.05\%$ без застосування дорогих зовнішніх ЦАП.

Для забезпечення міліомної точності вимірювання омичного опору застосовується 4-провідна схема Кельвіна. На (рис. 1.2) зображено приклад схеми вимірювання опору 4-провідної схеми Кельвіна [44].

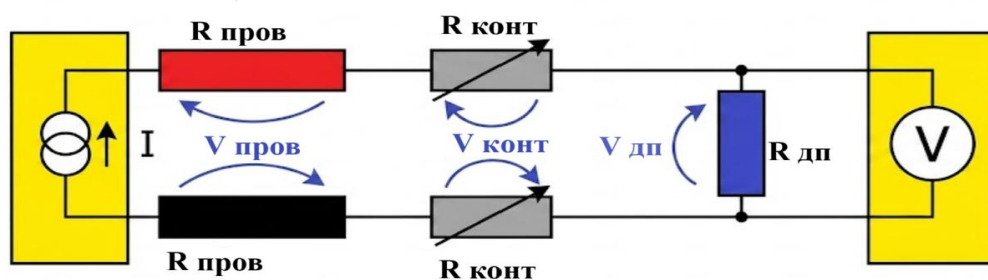


Рисунок 1.2 - Приклад схеми вимірювання опору 4-wire Kelvin

Два дроти передають стабільний струм через масивний шунт та MOSFET-ключ, а два інші безпосередньо знімають мілівольтне падіння напруги на клеммах. Це повністю виключає похибку від опору вимірювальних проводів (яка в звичайних щупах може складати 100-200 мОм) та перехідного опору контактів.

Комерційні системи обов'язково відповідають жорстким стандартам (наприклад, Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) 1188 для VRLA батарей).

Використання звичайного діода є неприпустимим через падіння напруги (0,6 В), що спотворює результати вимірювання та знижує енергоефективність. У сучасній схемотехніці використовують Р-канальні або N-канальні MOSFET транзистори. При неправильному підключенні транзистор закривається, а при правильному - відкривається з мінімальним опором відкритого каналу ($R_{DS(on)}$).

При тестуванні потужних батарейних масивів використовуються швидкодіючі реле та кола попереднього заряду. Вони ізолюють батарею від вимірювальних кіл пристрою у стані спокою, унеможлиблюючи паразитний розряд батареї або небезпечне іскріння при підключенні.

Вбудовані компаратори миттєво знеструмлюють ШІМ-ключі десульфататора, якщо напруга на клеммах перевищує безпечний поріг (зазвичай >14.8 В для 12-вольтових VRLA систем), запобігаючи тепловому розгону акумулятора та википанню клапанів VRLA.

Аби впоратися з керуванням акумуляторними блоками ДБЖ, що складаються з багатьох елементів, використовують метод активного вирівнювання. На противагу пасивному підходу, де зайвий заряд із найбільш повних елементів просто розсіюється у вигляді тепла на резисторах, активні ж схеми задіюють котушки індуктивності та комутовані конденсатори для переміщення енергії від краще заряджених акумуляторів до тих, що мають менший заряд. Даний процес відбувається з коефіцієнтом корисної дії, що перевищує 90%, і дає змогу подовжити термін служби всього батарейного комплексу на 40-60%, що є ключовим моментом для забезпечення стабільності роботи ДБЖ у бізнес-секторі.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		37

Висновки до розділу 1

У даному розділі проаналізовано особливості застосування свинцевих акумуляторів, зокрема технологій AGM та GEL, у джерелах безперебійного живлення (ДБЖ). Основним висновком є те, що незважаючи на активний розвиток та впровадження літій-іонних технологій, свинцево-кислотні акумулятори залишаються найоптимальнішим вибором для побутових ДБЖ завдяки їхній економічній доступності, високій пожежній безпеці та здатності витримувати складні температурні режими. Значну увагу приділено електрохімічним процесам деградації, серед яких головною причиною передчасної втрати ємності є незворотна сульфатація негативного електрода. Цей процес інтенсифікується через постійний недозаряд та регулярні глибокі розряди, що призводить до утворення стійких макрокристалів сульфату свинцю. Ці кристали виконують роль діелектриків, які блокують доступ електроліту, різко підвищують внутрішній опір акумулятора та обмежують його корисну ємність. Це вимагає впровадження розумних систем експрес-діагностики та активного відновлення для подовження експлуатаційного ресурсу батарей. Розглянуто методи вимірювання внутрішнього опору та загального стану акумуляторів: за постійним струмом та змінним струмом. Метод змінного струму полягає в поданні слабкого синусоїдального сигналу та вимірюванні зсуву фаз, що дозволяє математично компенсувати реактивні опори та виділити активний компонент провідності батареї. Однак цей метод фіксує мікроскопічні швидкі процеси, і абсолютні значення такого імпедансу суттєво відрізняються від реальної поведінки батареї під фізичним навантаженням. Метод постійного струму, навпаки, базується на короткочасному підключенні каліброваного навантажувального резистора та вимірюванні різниці напруг розімкнутого кола й під навантаженням. Хоча він і потребує часу на стабілізацію та є складнішим у визначенні міліомних значень окремих компонентів опору, цей метод є найбільш наближеним до реальних умов експлуатації ДБЖ. Для спрощення апаратної реалізації вимірювального ланцюга як базовий для подальшої розробки було обрано метод тестування за постійним струмом.

					<i>ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ</i>	Арк.
						38
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ

Стійкість систем безперебійного живлення залежить від стану їхнього акумуляторного блоку. У сучасних інфраструктурних умовах, коли зупинки центрів обробки даних, телекомунікаційних вузлів, лікарень або виробничих об'єктів спричиняють фінансові втрати, діагностика та поновлення батарей перетворюються на необхідну складову експлуатаційних норм. Згідно з розробками інституту Roneton, вихід з ладу акумуляторів є головною причиною більш ніж 55% випадків збою систем ДБЖ під час перебоїв в центральній електромережі.

На ринку стаціонарного резервного живлення переважають свинцево-кислотні акумулятори з клапанним регулюванням, а також батареї з рідким електролітом, проте останніми роками помітний інтенсивний зсув до літій-іонних технологій. Літій-іонні рішення, особливо на основі літій-залізо-фосфатної хімії, надають вищу густину енергії, довший експлуатаційний термін та інтегровані системи управління, але паралельно потребують особливих методів контролю та вирівнювання. Ця технологічна різноманітність породжує нові технологічні виклики для розробників діагностичних пристроїв, зумовлюючи потребу у формуванні багатоцільових систем або ж вузькофокусованих високоефективних комплексів.

Розуміння технічного стану акумулятора не може ґрунтуватися на вимірюванні лише одного показника. Акумуляторна батарея за своєю суттю є складною електрохімічною системою, чия поведінка залежить від температури, струму навантаження, історії циклів та внутрішньої деградації. У цьому розділі проведено основний та детальний аналіз сучасних приладів для оцінювання потужності, вимірювання внутрішнього опору, а також розширених суміщених систем тестування, які впроваджують функції активного відновлення.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						39
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

2.1 Аналіз приладів для визначення ємності акумуляторів

Ємність акумуляторної батареї є її ключовим експлуатаційним параметром, котрий визначає загальну кількість електричної енергії, що може бути віддана в навантаження за певний період до досягнення граничної кінцевої напруги розрядження. Цей показник прямо корелює із часом автономного функціонування захищеного устаткування. Згідно світовим стандартам, як ІЕС 62040-1 та настанов ведучих виробників інфраструктурних рішень, єдиним цілком надійним та еталонним способом визначення дійсної ємності є виконання повного контрольного розряду на відкаліброване еквівалентне навантаження. Однак, використання цього способу в умовах сталої цілодобової роботи важливих систем є складним. Виведення батарейних блоків з експлуатації для глибокого розрядження створює загрози для стійкості об'єкта, вимагає значних часових витрат, виробляє велику кількість теплової енергії та, що найбільш важливо, кожен такий глибокий розряд зменшує її загальний термін служби. Ця складова стимулювала стрімкий розвиток неруйнівних, алгоритмічних та імпульсних методів оцінки ємності та стану акумуляторів.

Стан роботоздатності акумулятора відображає відношення поточної максимальної ємності до початкової номінальної ємності, задекларованої виробником. Сучасні наукові способи неінвазивної оцінки цих параметрів без здійснення повного розряду, згідно з дослідженнями, поділяються на чотири головні групи: методи прямого вимірювання, адаптивні фільтраційні методи, підходи на базі аналізу великих даних (машинне навчання) та гібридні системи [20].

Методи прямого вимірювання, такі як підрахунок кількості заряду та метод напруги розімкнутого кола, є основними, але мають значні недоліки. Насамперел, це накопичення помилок інтегрування через неточність датчиків струму, тоді як метод напруги розімкнутого кола (OCV) потребує тривалих періодів стабілізації батареї (іноді до кількох годин) для досягнення електрохімічної рівноваги, що робить його невідповідним для динамічних систем ДБЖ [20].

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						40
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Задля подолання цих недоліків, сучасні аналізатори та BMS впроваджують адаптивні алгоритми, поширеним з яких є розширений фільтр Калмана та його варіації, як-от алгоритми подвійного адаптивного фільтра. Розширений фільтр Калмана залучає еквівалентну електричну схему батареї, динамічно спроектувавши її внутрішню поведінку. Алгоритм звіряє виміряну напругу з передбаченою, оперуючи матрицями коваріації похибок для покрокового виправлення оцінки стану заряду (SoC) та стану роботоздатності акумулятора (SoH) у реальному часі, беручи до уваги нелінійну криву OCV-SoC та зміни ємності через деградацію [20].

Значущим напрямком у розробці систем діагностики є застосування моделей глибокого навчання. Дослідження показують, що архітектури на базі рекурентних нейронних мереж, зокрема мереж з довгою короткостроковою пам'яттю та вентильних рекурентних блоків, мають здатність виявляти приховані нелінійні просторово-часові взаємозв'язки в даних про напругу, струм та температуру [21]. Наприклад, гібридна модель мережі з довгою короткостроковою пам'яттю продемонструвала можливість оцінювати стан заряду із середньоквадратичною похибкою лише 2% та SoH із похибкою 0.65% у температурному інтервалі від -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$. При цьому система зовсім не використовує заздалегідь калібровані таблиці OCV-SoC, покладаючись винятково на динамічний спад напруги під навантаженням [21]. Спроможність таких алгоритмів самостійно вдосконалюватися та нівелювати зашумлені дані робить їх ефективними для уникнення хибних спрацювань у великих масивах ДБЖ.

У сфері переносної апаратної апаратури для швидкого визначення потужності у польових умовах переважає методика короткочасного точного імпульсного тестування. Замість математичної екстраполяції чи тривалого розряджання, ці пристрої застосовують потужний струмовий імпульс та аналізують тимчасові зміни просідання й повернення напруги. Ця реакція зіставляється із зашитими в пам'ять емпіричними схемами деградації певних хімічних систем.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						41
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Прикладом цього типу діагностичного обладнання є розумний тестер АСТ Chrome. Прилад був розроблений спеціально для роботи з свинцево-кислотними акумуляторами 12 В, потужністю від 1.2 А·год до 200 А·год. Провівши дослідження матеріалу, можемо помітити, що АСТ Chrome являє собою компактний ручний тестер у міцному пластиковому корпусі з цифровим дисплеєм та двома вимірювальними проводами з "крокодилами". Зовнішній вигляд зображено на рис. 2.1. [22].



Рисунок 2.1 - Тестер "АСТ Chrome"

Його робота полягає в імітації стандартного 20-годинного режиму розвантаження через застосування диференційованого імпульсного навантаження: 6 ампер для батарей малої потужності (1.2-7.9 А·год) та 18 ампер для потужних блоків (8-100 А·год) [22]. Аналізуючи реакцію напруги на це навантаження в діапазоні мілісекунд, мікропроцесор тестера розраховує ємність в ампер-годинах, автоматично коригуючи показники залежно від поточної температури акумулятора та його рівня заряду [22]. Прилад має програму для видачі сповіщення про необхідність заміни елемента, якщо обчислена

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		42

потужність знижується нижче критичної межі у 65% від нормативної. Заявлена виробником базова неточність вимірювання сталої напруги складає $\pm 5\%$, а точність розрахунку потужності для повністю заряджених батарей еталонної якості за звичайних температурних умов (20-25°C) лежить у межах $\pm 10\%$ [22].

Іншою можливістю для швидкої оцінки є багатофункціональний аналізатор ZTS Mini-MBT. ZTS Mini-MBT являє собою невеликий прямокутний прилад кишенькового формату із контактними майданчиками на передній панелі та рядом світлодіодних індикаторів, які показують рівень заряду у відсотках. Зовнішній вигляд зображено на рис. 2.2. [23].



Рисунок 2.2 - Аналізатор "ZTS Mini-MBT"

ZTS реалізує запатентований метод імпульсного навантаження для понад 15 різних типів хімічних джерел живлення, включаючи NiMH, літій-іонні, лужні та олів'яно-кислотні акумулятори [23]. Пристрій створює безпечний, неінвазивний тестовий цикл, що триває близько двох секунд. Протягом цього мікроциклу рівень імпульсного навантаження змінюється динамічно за алгоритмом залежно від обраного типу батареї. Це дозволяє аналізатору вимірювати не просто фіксовану напругу чи внутрішній опір, а реальну

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		43

продуктивність джерела живлення під час імітації складних робочих умов, обчислюючи стан заряду з високою відтворюваністю [24].

Незважаючи на високу швидкість та зручність імпульсних тестерів ємності, їхнім основним недоліком є суворя прив'язка до усереднених математичних шаблонів батарей. Хімічний склад пластин, щільність електроліту та конструкція сепараторів різняться у кожного виробника, що спричиняє похибки у розрахунках експрес-тестерів. Тому для детального технічного обслуговування критичних ланцюжків ДБЖ відповідно до стандартів IEEE, оцінка ємності обов'язково має бути доповнена регулярним контролем мікрозмін внутрішнього опору та імпедансу кожної окремої секції.

2.2 Аналіз приладів для оцінки стану акумуляторів за внутрішнім опором

Внутрішній опір є показником, що окреслює спроможність акумуляторного елемента видавати максимальну потужність, його сукупну ефективність використання енергії та обсяг енергетичних втрат, які обертаються на теплову енергію в процесі циклів заряджання-розряджання [25]. Будь-яку батарею можна представити як еталонне джерело електрорушійної сили, яке з'єднане послідовно з внутрішнім опором [25]. Опір не є незмінною скалярною величиною; він має змінний, комплексний характер і складається із трьох ключових елементів. Перший - це лінійний омичний опір, спричинений провідністю рідини-електроліту, матеріалом свинцевих каркасів, розділювачів і місць з'єднання. Другий - це опір, пов'язаний із перенесенням заряду, або поляризаційний, який відображає швидкість електрохімічних перетворень на поверхні розділу "електрод - електроліт". Третій же - це опір, викликаний дифузією (також відомий як імпеданс Варбурга), що описує швидкість переміщення іонів через пористу структуру робочого матеріалу [26]. Стрімке наростання будь-якої з цих складових однозначно свідчить про наявність процесів старіння: утворення сульфатів на пластинах, руйнування токопровідних

					<i>ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ</i>	Арк.
						44
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

частин, висихання гелю чи порушення фізичного зв'язку активної речовини з основою.

Обґрунтування показника, і згідно з міжнародним стандартом IEEE 1188 (який є вказівкою щодо обслуговування, випробувань та заміни стаціонарних свинцево-кислотних акумуляторів із клапанним регулюванням), процедура вимірювання опору чітко прописана [27]. Цей стандарт полягає в тому, щоб для кожної окремої комірки встановити еталонне значення (базову лінію) через півроку після того, як акумуляторну систему ввели в роботу [28]. За правилами IEEE 1188, якщо вимірний показник опору відхиляється від еталонного омічного на 25-30%, це вважається сигналом для діагностики, чому сталася та чи інша деградація, або ж розпочати заміну цього елемента [27]. Стандарт також підкреслює важливість єдиного підходу: усі наступні вимірювання мусять виконуватися тим самим апаратом для контролю та вимірювання, а щупи тестера необхідно прикладати виключно до свинцевих виводів самої комірки, уникаючи при цьому будь-яких проміжних металевих з'єднань, аби не отримати хибних даних через опір контактів [28]. Що ж до періодичності таких перевірок, вони мають відбуватися щонайменше раз на рік, проте цей інтервал скорочується до півроку, якщо акумулятор вже використав 85% свого запланованого ресурсу або його фактична ємність впала нижче позначки 90% [29].

У галузі інженерії та при проектуванні сучасних апаратно-діагностичних засобів застосовуються три головні підходи до визначення внутрішнього опору, кожен з яких має свої власні значні переваги та недоліки. Першим таким методом є метод стрибка постійного струму який передбачає прикладання до батареї короткочасного каліброваного навантаження постійним струмом великої амплітуди з паралельним високоточним вимірюванням просідання напруги. Класичний розрахунок опору базується на модифікованому законі Ома: $R = \Delta U / \Delta I$, де ΔU є змінна напруга, ΔI змінна струму. Дослідження, проведені в галузі деградації великих накопичувачів, доводять, що метод вимірювання опору постійному струму є ефективним інструментом для ізоляції та діагностики деградації самої хімічної комірки, абстрагуючись від зовнішніх факторів. Було

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		45

доведено, що статистичний розподіл вимірювань DC IR за умов зношених міжкоміркових з'єднань показує похибку зростання менше ніж на 1% незалежно від стану заряду, що дозволяє чітко диференціювати внутрішню проблему батареї від проблеми поганого болтового контакту [26]. Другим таким методом є метод внутрішнього опору на змінному струмі. Прилади цього типу генерують і пропускають через акумуляторну стійку сигнал змінного струму малої амплітуди. Система реєструє зсув фаз та амплітуду падіння напруги змінного струму. Застосовується частота 1 кГц, бо на цій частоті вплив реактивних складових імпедансу мінімізується, що дозволяє виділити переважно чистий омичний опір компонентів. Фундаментальною перевагою цього методу є його неінвазивність: вимірювання можна проводити в режимі онлайн, без відключення зарядних пристроїв та інверторів ДБЖ. Порівняльні дослідження вказують на надзвичайну чутливість методу змінного струму (ACIR) до якості фізичних з'єднань: за наявності деградованих контактів значення ACIR може демонструвати стрибок до 319% [26]. Це робить метод актуальним для швидкого пошуку ослаблених перемичок. Останнім методом є метод який має назву електрохімічна імпедансна спектроскопія, він передбачає спектральне сканування батареї змінним струмом у широкому діапазоні частот для побудови комплексної площини - діаграми Найквіста або Боде. Завдяки математичному фітінгу отриманих кривих під еквівалентні схеми, цей підхід дозволяє розділити омичний опір, опір кінетики переносу заряду на електродах та опір дифузійних процесів електроліту [26].

Одним із визнаних у всьому світі промислових зразків, розроблених спеціально для задоволення суворих вимог стандарту IEEE 1188, є аналізатор Alber Cellcorder CRT-400. Цей апарат є високоточним приладом, здатним виконувати надточні заміри напруги, внутрішнього опору хімічного елемента та опору міжкоміркових з'єднань для акумуляторних модулів з номінальною напругою від 1 В до 16 В. Провівши дослідження матеріалу, можемо помітити, що Alber Cellcorder CRT-400 являє собою масивний портативний пристрій у формі кейса, з графічним дисплеєм, навігаційною панеллю та міцними роз'ємами

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						46
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

для підключення тестових щупів Кельвіна. Зовнішній вигляд зображено на рис. 2.3. [30].

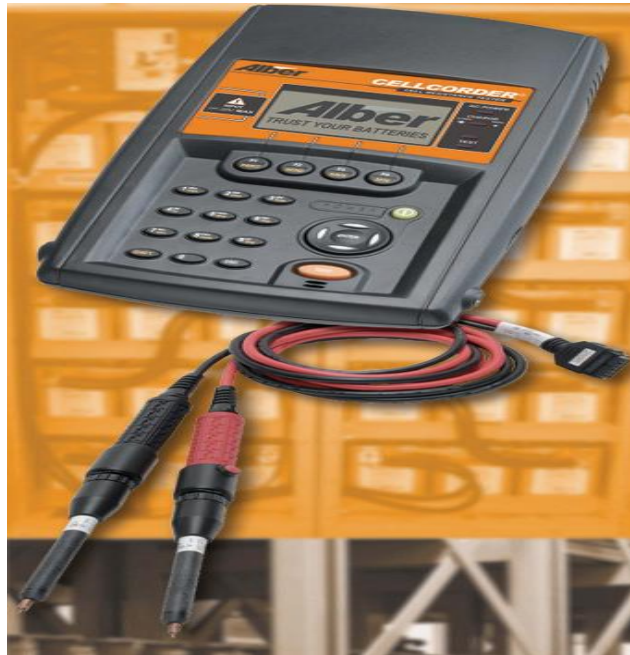


Рисунок 2.3 - Тестер "Alber Cellcorder CRT-400"

Ключовою архітектурною перевагою CRT-400 є використання запатентованого методу стрибка постійного струму. На відміну від АС-тестерів, що використовують міліамперні сигнали, Alber генерує випробувальний струм силою до 50 ампер для 2-вольтових елементів [32]. Такий потужний імпульс створює великий сигнал відгуку, який легко відокремити від електричних шумів, гармонік інверторів та завад, що присутні у складних промислових умовах та серверних приміщеннях. Ця технологія забезпечує пристрою точність замірів: у базовому робочому діапазоні 2 мОм прилад надає роздільну здатність на рівні 20 мікроом ($\mu\Omega$) з абсолютною похибкою не більше $\pm 0.1\%$ [30]. Окрім апаратних переваг, Alber CRT-400 глибоко інтегрований із програмним забезпеченням Battery Analysis Software. Його вмонтований твердотільний накопичувач спроможний зберігати масиви даних обсягом до 1 МБ, що еквівалентно 71 рядкам по 256 елементів у кожному, гарантуючи збереження базових ліній для аналізу протягом 10 років [30].

2.3 Комбіновані системи тестування

Потреба оптимізації процесів обслуговування масивів ДБЖ призвело до

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		47

появи на ринку складних комбінованих систем. Сучасні портативні платформи об'єднують в єдиному корпусі функції міліомметра, аналізатора спектра гармонік, мультиметра, інфрачервоного термометра, а інші стаціонарні комплекси включають інтелектуальні підсистеми для відновлення акумуляторів.

Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer - прилад вимірювальної техніки, що охоплює спектр тестових функцій. Він спроектований не лише для фіксації напруги постійного струму та омичного опору, але й для проведення автоматизованих циклічних перевірок акумуляторних ланцюгів. Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer нагадує своїм виглядом промисловий мультиметр з великим РК-дисплеєм, але його головною візуальною особливістю є унікальні інтерактивні щупи BTL21 з вбудованими міні-дисплеями та світлодіодними індикаторами. Зовнішній вигляд промислового мультиметру зображено на рис. 2.4. [33]. Зовнішній вигляд Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer зображено на рис. 2.5. [32].



Рисунок 2.4 - Цифровий мультиметр "UNI-T UT15B MAX"



Рисунок 2.5 - Прилад "Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer"

Конкурентною перевагою серії BT521 є апаратна здатність вимірювати пульсації змінної напруги на клеммах батареї. Прилад здатний захоплювати паразитні гармоніки частотою до 20 кГц у діапазоні від 600 мВ до 6000 мВ [32]. Це критично важлива функція, оскільки високий рівень пульсацій свідчить про вихід з ладу конденсаторів фільтра у випрямлячі або зарядному пристрої самого ДБЖ. Щодо безпосереднього вимірювання опору, Fluke BT521 використовує метод внутрішнього опору на змінному струмі. Точність вимірювань складає $0.5\% + 8$ одиниць молодшого розряду в широкому каскаді діапазонів (від 3 мОм до 3000 мОм) [32].

Ніокі BT3554-50 - японський портативний тестер внутрішнього опору фокусується на максимізації швидкості роботи та подоланні просторових обмежень у тісних серверних стійках. Провівши дослідження матеріалу, можемо помітити, що Ніокі BT3554-50 має ергономічний дизайн у формі міцного захищеного блоку з цифровим екраном та вирізняється використанням специфічних L-подібних зондів. Зовнішній вигляд зображено на рис. 2.6.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						49
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



Рисунок 2.6 - Тестер "Hioki BT3554-50"

Процес вимірювання опору та напруги однієї комірки займає близько 2 секунд. BT3554-50 генерує вимірювальний змінний струм стандартизованою частотою 1 кГц. Діапазон вимірювання імпедансу покриває від 3 мОм до 3 Ом із похибкою $\pm 0.8\%$ від виміряного значення (rdg) ± 6 розряд (dgt) (на найменшому діапазоні точність становить $\pm 1.0\%$) [34].

Британський аналізатор Megger BITE3 визнається потужним інструментом для діагностики великогабаритних промислових свинцево-кислотних елементів ємністю до 2000 А·год. Megger BITE3 являє собою аналізатор, який має форму масивного ручного приладу з ручкою або мають форму сканеру, з інформаційним дисплеєм на верхній панелі та масивними струмовими кліщами. Зовнішній вигляд зображено на рис. 2.7.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		50



Рисунок 2.7 - Аналізатор "Megger BITE3"

Він реалізовує вимірювання імпедансу змінним струмом [35]. Основною перевагою BITE3 над попередніми приладами є його спроможність надійно працювати за умов сильних електричних завад, звичних для тягових підстанцій та енергоблоків. Прилад створює тестовий сигнал змінного струму в межах від 0,5 до 9,99 А і не обмежується лише імпедансом: він оцінює напругу постійного струму комірок, опір міжкомірних з'єднань, а також фіксує струм підзаряду та спектр гармонік струму [35]. Межі вимірювання імпедансу лежать у діапазоні від 0,05 до 1000 МОм із базовою точністю $\pm(5\%$ від виміру + 1 одиниця наймолодшого розряду (lsd)) [35].

Німецький комплекс METRACELL BT PRO - мобільний пристрій, що не лише вимірює напругу та загальний імпеданс, але й має функціонал повноцінного логера для проведення тривалих тестів розряду. METRACELL BT PRO має вигляд мультиметру у захисному гумовому бампері з великим дисплеєм для графіків. Зовнішній вигляд зображено на рис. 2.8 [36].



Рисунок 2.8 - Пристрій "METRACELL BT PRO"

Під час контрольного розряду прилад безперервно реєструє струм та будує криві падіння напруги, зберігаючи масив до 300 000 записів [36]. Особливістю METRACELL є застосування алгоритмів зондування, які здатні розділяти загальний опір на опір переносу заряду та опір електроліту, що дозволяє діагностувати не просто факт старіння батареї, а конкретну електрохімічну причину виходу з ладу [36].

Основою деградації герметизованих свинцево-кислотних акумуляторів з клапанним регулюванням та свинцево-кислотних акумуляторів з рідким електролітом є сульфатація. У процесі стандартного розряду на свинцевих пластинах формується дрібнокристалічний сульфат свинцю ($PbSO_4$), який під час заряджання розчиняється. Проте, якщо батарея надто довго залишається у недозарядженому стані, ці малі кристали перетворюються на великі, міцні, хімічно та електрично неактивні макроструктури. Ця незворотна сульфатація закупорює пори активної маси, унеможлиблює доступ електроліту та критично підвищує внутрішній опір [37].

Новітні наукові та інженерні дослідження показують, що застосування технології імпульсного заряду або вплив високовольтних імпульсів високої частоти є дієвим та екологічним методом руйнування цих макрокристалів [38]. Кінетичний механізм десульфатації полягає в тому, що високочастотні електричні імпульси, підібрані в резонанс із кристалічною решіткою сульфату,

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						52
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

забезпечують достатню кількість зосередженої енергії для розриву жорстких молекулярних зв'язків між іонами свинцю та сульфату [38]. Під час розриву цих зв'язків іони повертаються в розчин електроліту, відновлюючи його щільність, а свинцеві пластини повертають свою губчасту структуру та провідність [38]. Обробка сильно сульфатованих батарей імпульсним струмом здатна збільшити ємність з 68% до 99% від номінальної [38].

Впровадження цих технологій у комерційному секторі потребує точного обладнання. Для цього сегменту є комплекс Cadex C7400ER. Це 4-канальна аналітично-відновлювальна станція, спроектована для глибокого обслуговування широкого спектра акумуляторних систем з номінальною напругою до 36 В (до 28.8 В для нікелевих сплавів). Cadex C7400ER являє собою велику настільну станцію, яка на передній панелі містить екран, навігаційні кнопки та 4 незалежні контактні гнізда для підключення акумуляторів через адаптери SnapLock [39]. Для аналізатора Cadex C7400ER система SnapLock™ є стандартним інтерфейсом підключення змінних адаптерів. Ці адаптери містять спеціальні С-коди, які автоматично налаштовують аналізатор на потрібні параметри акумулятора [40]. З універсальних адаптерів можна перерхувати такі адаптери як: RigidArm (07-110-0192), що має фіксовані пружинні контакти, що значно спрощує оперативне тестування невеликих батарей, FlexArm (07-110-0180), що оснащений гнучкими щупами, Smart Cable (07-110-0115) з проводом, обладнаним затискачами типу "крокодил", призначений для приєднання потужних акумуляторних батарей [41], 18650/21700 Universal Adapter (07-111-6410), що призначений спеціально для фіксації поширених циліндричних літієвих акумуляторів [42].

Зовнішній вигляд комплексу зображено на рис. 2.9. Для прикладу адаптера зображено зовнішній вигляд адаптеру Smart Cable (07-110-0115) на рис. 2.10.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						53
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



Рисунок 2.9 - Станція "Cadex C7400ER"



Рисунок 2.10 - Адаптер Smart Cable (07-110-0115) для "Cadex C7400ER"

Установка обладнана силовими модулями, котрі забезпечують точно контрольований струм заряду/розряду від 100 мА до 6 А. Cadex C7400ER спроможний генерувати максимальну потужність заряду на рівні 75 Вт на кожную станцію (до 170 Вт загалом у безперервному режимі) та потужність розряду до 100 Вт для об'єднаних парних каналів [39]. Окрім класичних методів вимірювання місткості шляхом еталонного контрольного розряду, інтелект Cadex містить 18 автоматизованих програм, сфокусованих на відновленні [39]. Універсальність системи підкреслюється її здатністю взаємодіяти з понад 3200 типами спеціалізованих адаптерів SnapLock, що робить її універсальним експериментальним центром.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		54

2.4 Порівняльний аналіз технічних характеристик та функціональних можливостей комерційних систем

Для обґрунтування технічних рішень щодо апаратної основи чи розробки архітектури прототипу в межах завдань дипломної роботи, постає потреба у аналізі, що має охоплювати технічні характеристики та функціональні можливості існуючих комерційних систем (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Порівняння технічних характеристик та функціональних можливостей комерційних систем

Виробник / Модель	Основний метод вимірювання	Діапазон вимірювання опору	Похибка вимірювання (Опір)	Функція десульфатації / відновлення	Додаткові спеціалізовані функції	Орієнтовна ціна
Alber Cellcorder CRT-400	Імпульс постійного струму (DC Load до 50 A)	2 мОм - 20 мОм	±0.1%	Відсутня (тільки пасивна діагностика)	Апаратна відповідність IEEE 1188, пам'ять 1 МБ на 10 років трендів	\$3,695
Fluke BT521 Advanced	Інжекція змінного струму (AC Impedance, 1 кГц)	3 мОм - 3000 мОм	0,5% + 8 dgt	Відсутня	Вимірювання пульсацій змінної напруги до 20 кГц, ІЧ-термометрія, Bluetooth інтеграція	€6,387 / £5,591
Hioki BT3554-50	Інжекція змінного струму (AC Impedance, 1 кГц)	3 мОм - 3 Ом	±0,8% rdg ±6 dgt (до ±1.0%)	Відсутня	Унікальні L-подібні зонди, шумозаглушення, 2-секундний тест комірки, GENNECT Cross App	\$2,000 - \$3,000

Megger BITE3	Прохідний змінний струм	0.05 МОм - 1000 МОм	±(5% від показань + 1 lsd)	Відсутня	Аналіз гармонік струму, вимірювання струму підзаряду (float), інтерфейс для денситометра	\$6,500 - \$12,685
Cadex C7400ER	Динамічний аналіз падіння напруги / Контрольний імпульс	Не спеціалізується на МОм (сфокусований на А·год)	N/A (оцінка SoC/SoH)	Наявна (Імпульсний резонансний заряд, Boost™ для Li-ion)	4 незалежні силові канали (по 75 Вт), QuickSort™ (30 сек), 18 програм тестування	€5,471 / \$4,310
METRAC ELL BT PRO	Розділення Rct та Rel (Гібридний AC+DC аналіз)	До 1000 МОм (роздільна здатність 10 мкОм)	Похибка напруги ±2.45В з роздільною здатністю 0.00001В	Відсутня (можливість проведення глибокого розряду)	Інтегрований RFID-транспондер (125 кГц), IrDA-порт для щільноміра, безперервний логер	248,922 грн (\$6,000)

Дані про можливі відхилення надано відповідно до технічної документації виробників, отриманої під час випробувань на еталонних джерелах живлення в умовах стандартної температури. Вартість вказана як приблизна оцінка, що відображає поточну ситуацію в офіційних каналах збуту.

Таблиця 2.2 - Порівняння систем тестування ємності та відновлення батарей

Модель системи	Основний метод	Макс. електричні параметри	Функціональні можливості відновлення	Ключові технологічні переваги	Сумісність з типами акумуляторів
Cadex C7400ER	Контрольований прецизійний цикл Заряд/Розряд	6 А на станцію (до 170 Вт загалом), 1.2В - 36В	Функція Recondition (розряд для руйнування кристалів); Функція Boost	4 незалежні станції, тест Li-ion за 30 с (QuickSort), ПЗ BatteryShop	Li-ion, SLA (VRLA), NiCd, NiMH
BattRec on Model 8000	Високочастотний імпульсний струм резонансу	N/A (генерує потужні десульфатуючі імпульси)	5-хвилинна активна імпульсна десульфатація з адаптивним AI	Живиться від батареї, хмарна аналітика	Свинцево-кислотні (VRLA, Flooded)

**Таблиця 2.2 - Порівняння систем тестування ємності та відновлення
батарей (продовження)**

Megger Torkel 930	Розряд постійним струмом/напругою/опором	Розрядний струм: до 220 А; Напруга: до 300 В	Відсутня (виключно глибокий сертифікаційний тест ємності)	Динамічний розряд (повна потужність на всіх напругах), моніторинг кожної комірки (через монітор напруги батареї)	Всі типи масивів (ДБЖ, Телеком)
West Mountai n CBA V	Електронно-регульований розряд постійним струмом	Розрядний струм: до 40 А (потужність до 150 Вт); до 57 В	Відсутня	Підключення до ПК, графічне профілювання, висока точність контролю струму (0,5% для Pro)	Всі типи, від дискових елементів до автомобільних

**Таблиця 2.3 - Порівняльна характеристика методів вимірювання стану
акумуляторних батарей**

Назва методу вимірювання	Переваги	Недоліки
Метод внутрішнього опору на змінному струмі (AC Impedance, 1 кГц)	Висока швидкість вимірювання (до 2 секунд). Можливість проведення тестування в режимі "online" (без відключення батареї від інвертора ДБЖ) Надзвичайна чутливість до деградації міжкоміркових з'єднань та ослаблених контактів.	Потребує складної апаратної та програмної фільтрації для відсікання гармонік і шумів від інвертора ДБЖ. Отримане значення імпедансу відрізняється від реального опору постійному струму під навантаженням. Має нижчу ефективність у виявленні глибокої сульфатації.
Метод потужного стрибка постійного струму (DC Load)	Прецизійна ізоляція омичного опору самої хімічної комірки, абстрагуючись від зовнішніх факторів. Найвища стійкість до промислових електромагнітних завад. Результати прямо відображають здатність батареї віддавати реальну потужність, імітуючи роботу ДБЖ.	Значно складніша силова схемотехніка (потребує надійних ключів для комутації імпульсних струмів до 50 А). Надмірне теплове навантаження на вимірювальний шунт під час тесту. Потребує додаткового часу на стабілізацію виміру через електрохімічний ефект.

Таблиця 2.3 - Порівняльна характеристика методів вимірювання стану акумуляторних батарей (продовження)

Метод профілювання провідності (Conductance Profiling)	Повна неінвазивність діагностичного процесу. Мінімальне споживання енергії від самої акумуляторної батареї під час проведення тесту. Швидка та ефективна оцінка проблем із загальною резервною ємністю.	Жорстка прив'язка до заводських еталонних значень провідності. Ймовірність значної похибки при тестуванні нестандартних акумуляторів або за відсутності попередньо збереженого еталонного профілю.
---	---	--

Таблиця 2.4 - Порівняння портативних та мікропроцесорних систем тестування

Модель / Виробник	Метод тестування та Аналізу	Діапазон тестування / Напруга	Наявність функцій відновлення	Комунікації та Збереження даних	Орієнтовна ціна (USD)
Konnwei KW600	Динамічне навантаження, вимірювання зміни ΔU , розрахунок струму холодного прокручування (CCA) та SoH	100-2000 CCA (30-200 А·год), Робоча напруга 8V - 16V	Відсутні	Підключення до ПК через USB (для оновлень та друку), кольоровий РК-дисплей	\$43 - \$66
PCE-CBA 20	Оцінка напруги та струму під навантаженням, тестування зарядних систем	Автомобільні та ДБЖ (Свинцеві 12В)	Відсутні	Базовий USB інтерфейс для перенесення даних	За запитом (до \$200)
Midtronics DSS-5000 (HD)	Conductance Profiling (Профілювання провідності)	12В та 24В системи (паралельні та послідовні збірки)	Діагностика проблем з резервною ємністю (запобігання відмовам)	Wi-Fi, Бездротове оновлення ПЗ, інтегрована БД, відправка звітів через додатки	Професійний корпоративний сегмент

**Таблиця 2.4 - Порівняння портативних та мікропроцесорних систем
тестування (продовження)**

Hitec AD380	Контрольований розряд, кулонометрія	До 40 А (до 380 Вт), Напруга 3.0V - 30.0V	Балансування та виведення Li-Po/Li-ion комірок у режим зберігання	Bluetooth інтеграція, додаток Link Power X (iOS/Android)	За запитом
------------------------	---	--	--	--	---------------

Висновки до розділу 2

У розділі представлено порівняльний аналіз сучасних методів діагностики та комерційних приладів, призначених для оцінки стану свинцево-кислотних акумуляторів у джерелах безперебійного живлення. Головним висновком є те, що класичний метод контрольного розряду для визначення ємності, хоча й залишається еталонним, є руйнівним для батареї та економічно недоцільним для безперервно працюючих критичних інфраструктур. З огляду на це, сучасна інженерія змістила фокус на розробку експрес-методів, що базуються на високоточному вимірюванні комплексного внутрішнього опору та аналізі динамічного відгуку батареї.

Порівняння існуючих рішень показало, що метод подачі змінного струму (ACIR) є ефективним для експрес-діагностики, оскільки дозволяє оцінити динамічні параметри електрохімічної системи (зокрема, ємність подвійного електричного шару). Проте для оцінки ресурсу акумуляторів у буферних режимах роботи джерел безперебійного живлення критично важливим є вимірювання загального омичного опору під реальним навантаженням. У зв'язку з цим у проєкті обґрунтовано вибір методу, що враховує спад напруги на внутрішньому опорі при максимальних струмах розряду та забезпечує високу точність прогнозування реальної здатності акумулятора віддавати енергію в навантаження.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ АКУМУЛЯТОРА

3.1 Обґрунтування структури та вибір методу вимірювання для реалізації пристрою

Відомо, що деградація свинцево-кислотних акумуляторів у джерелах безперебійного живлення призводить до збільшення внутрішнього опору батареї та пропорційне зниження її ємності [45]. Брак точного та вчасного спостереження за цими показниками найчастіше спричиняє несподівану відмову ДБЖ у момент знеструмлення [46]. Отже, постає завдання створення апаратно-програмного комплексу, здатного реєструвати стан акумулятора.

У сучасній практиці вимірювань та промислових нормативах виділяють два способи визначення цієї характеристики: метод введення змінного струму та метод внутрішнього опору на постійному струмі (DCIR) [6]. Метод внутрішнього опору на змінному струмі (ACIR) базується на пропущенні крізь акумулятор невеликого синусоїдального змінного струму еталонної частоти та вимірюванні відповідного зсуву фаз та амплітуди змінного падіння напруги на клеммах. Промисловим зразком для портативних тестерів стала частота 1 кГц [47]. Причина обрання саме цієї частоти полягає у внутрішній будові акумулятора. Акумуляторна комірка має суттєву паразитну ємність подвійного електричного шару (Cdl), яка формується на величезній площі пористих свинцевих пластин [48].

Ємнісний опір обернено пропорційний частоті сигналу:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C},$$

Де X_c - ємнісний опір;

f - частота сигналу змінного струму;

C - паразитна ємність подвійного електричного шару.

При частоті 1 кГц, ємнісний опір подвійного шару падає до таких низьких значень, що змінна складова струму протікає крізь нього практично без обмежень, не провокуючи повільні електрохімічні реакції Фарадея [47].

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						60
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Внаслідок цього, виміряне значення ACIR відображає лише омичний опір - сукупність опору свинцевих ґраток, сепараторів, з'єднувальних перемичок та безпосередньо електролітної рідини [6].

Однак, метод ACIR має суттєвий недолік. Цей метод не помічає початкові етапи сульфатування, оскільки кристали сульфату свинцю в основному впливають на кінетику реакції та площу активної поверхні, що значно трансформує опір перенесення заряду, який ACIR на частоті 1 кГц не в змозі зареєструвати [47].

Враховуючи обмеження, притаманні методу ACIR, для створення приладу було прийнято рішення скористатися методом визначення внутрішнього опору на постійному струмі (DCIR). Принцип цього методу полягає в короткочасному навантаженні акумуляторної батареї таким опором, який забезпечив би максимально допустимий струм. Для визначення внутрішнього опору застосовують по чергові приєднання двох навантажень різного опору R1 та R2, з одночасним вимірюванням протікаючого через ці резистори струмів I₁, I₂ та напруги на акумуляторі для кожного навантаження U₁, U₂. Внутрішній опір розраховується як співвідношення між різницями напруги та сил струму:

$$R_{DC} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2},$$

де ΔU - зміщення (падіння) у напрузі;

ΔI - зміщення у силі струму;

U₁ - напруга на акумуляторі при навантаженні R1

U₂ - напруга на акумуляторі при навантаженні R2;

I₁ - напруга на акумуляторі при навантаженні R1;

I₂ - напруга на акумуляторі при навантаженні R2.

Відомо, що реакція батареї на розряд залежить від тривалості розрядного процесу. Як тільки навантаження підключається, спостерігається миттєве зменшення напруги. Цей початковий спад спричинений омичним опором, що характеризує провідники та електроліт. Протягом наступних кількох сотень мілісекунд напруга продовжує знижуватися відповідно до експоненційного

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						61
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

закону. Цей етап відображає проходження енергетичного бар'єра електрохімічної реакції на межі електродів та розряд паразитних ємностей, що формують подвійний шар, математично еквівалентний опору переносу заряду. Якщо ж продовжувати подачу імпульсу протягом кількох секунд, падіння напруги триватиме внаслідок явища, відомого як концентраційна поляризація - опір, пов'язаний із дифузією іонів у порах активної маси [6].

Таблиця 3.1 - Порівняння методів визначення внутрішнього опору

Характеристика	ACIR (1 кГц Змінний струм)	DCIR (Імпульс постійного струму)	EIS (Імпедансна спектроскопія)
Тип опору	Активний опір (R_{Ω})	Повний опір ($R_{\Omega} + R_{ct} + R_p$)	Активний та реактивний опір
Чутливість до сульфатації	Низька	Висока (реєструє падіння напруги)	Найвища
Режим роботи	При підключеному акумуляторі до навантаження	Імпульсний, імітація навантаження	Лабораторний, вимагає часу

Обираємо метод DCIR як базовий для визначення стану батареї. При застосуванні двопровідної схеми в даному методі дроти виконують подвійну функцію: по них тече струм навантаження, і вони ж передають потенціал напруги акумулятора до мікроконтролера. Загальний вимірюваний опір у такому колі обчислюється за формулою:

$$R_{meas} = R_{battery} + 2R_{wire} + 2R_{contact} + R_{shunt_traces},$$

де R_{meas} - загальний вимірюваний опір;

$R_{battery}$ - опір самої батареї;

R_{wire} - опір дротів;

$R_{contact}$ - опір контактів;

R_{shunt_traces} - опір вимірювальних доріжок і шунта.

Сумарний паразитний опір дротів та контактів може перевищувати опір самої батареї у 10-20 разів. Відповідно, при формуванні випробувального

імпульсу струму в 10 А, спад напруги відбуватиметься не лише на внутрішньому опорі батареї, але й на проводах. АЦП мікроконтролера реєструє просідання у 500 мВ замість дійсних 50 мВ, що спричинить велику похибку [44].

Для усунення проблеми паразитної провідності у розроблюваному аналізаторі обґрунтовано використання чотирипровідної системи вимірювання, яка відома у метрології як схема Кельвіна. Ця топологія спирається на фізичне відокремлення силового контуру та сенсорного контуру.

Для коректної роботи схема вимагає застосування спеціалізованих щупів Кельвіна (чотирипровідної схеми підключення), які розділяють коло на силову та сенсорну лінії. Силова лінія складається з двох товстих провідників, через які протікає весь багатоамперний струм навантаження. На цих провідниках і перехідних контактах виникає суттєве падіння напруги, що розсіюється у вигляді тепла. Сенсорна лінія складається з двох провідників, які підключаються до свинцевих полюсів батареї і йдуть на входи АЦП.

Перевага методу Кельвіна у наступному: вхідний опір аналогово-цифрових перетворювачів вимірюється гігаомами. Згідно з законом Кірхгофа, відгалуження струму у сенсорну лінію (I_{sense}) є незначним. Оскільки величина струму становить $I_{\text{sense}} = 0$, то і спад напруги на лініях сенсора ($U_{\text{drop_sense}}$) та контактних з'єднаннях:

$$U_{\text{drop_sense}} = I_{\text{sense}} \cdot (R_{\text{sense_wire}} + R_{\text{sense_contact}}),$$

де $U_{\text{drop_sense}}$ - спад напруги на лініях сенсора;

I_{sense} - відгалуження струму у сенсорну лінію;

$R_{\text{sense_wire}}$ - власний опір провідника;

$R_{\text{sense_contact}}$ - перехідний опір у місці підключення.

Де використовується власний опір провідника ($R_{\text{sense_wire}}$) і перехідний опір у місці підключення ($R_{\text{sense_contact}}$). Тому падіння напруги також прагне до нульового значення. Отже, потенціал, який досягає мікроконтролера, є ідентичним до потенціалу, що існує безпосередньо на хімічних джерелах живлення.

У таблиці 3.2 наведено показники для відомих моделей акумуляторів ДБЖ, а саме: CSB GP1272, Yuasa NP7-12, Leoch DJW12-7.0, Long WP7-12, Vision CP1270 [48-52].

Таблиця 3.2 - Порівняння технічних характеристик деяких акумуляторів

Модель акумулятора (Виробник)	Ємність (А·год)	Напруга заряджання (Буферний/Циклічний режим), В	Макс. струм заряду (А)	Макс. струм розряду (А)	Внутрішній опір (мОм)
CSB GP1272	7,2	13,5 – 13,8 / 14,4 – 15,0	2,80	100 - 130 (5 сек)	19,8
Yuasa NP7-12	7,0	13,65 / 14,5	1,75	40 (тривал.) / 210 (КЗ)	25,0
Leoch DJW12-7.0	7,0	13,5 – 13,8 / 14,4 – 15,0	2,10	105 (5 сек)	23
Long WP7-12	7,0	13,5 – 13,8 / 14,4 – 15,0	2,10	105	19,0
Vision CP1270	7,0	13,5 – 13,8 / 14,4 – 14,7	2,80	105	30

Відомо, що рівень заряду батареї корелює з напругою холостого ходу (табл. 3.3). Визначення діапазону допустимої напруги на акумуляторі визначає тривалість вимірювання її ємності при постійному струмі навантаження [54].

Таблиця 3.3 – Зв'язок між напругою холостого ходу та рівнем заряду акумулятора

Рівень заряду (%)	Напруга без навантаження (В)	Стан батареї та електрохімічні процеси
100%	12,7 – 12,9	Повністю заряджений, оптимальний стан для зняття еталонних показників.
80%	12,5	Нормальний робочий стан.
60%	12,3	Прийнятний стан. Бажано підзарядити для збереження життєвого циклу.
40%	12,1	Розряджений. Рекомендується термінова зарядка струмом 0.1С.
20%	11,9	Глибокий розряд.
0%	11,7 і нижче	Критично розряджений. Можливе незворотне руйнування активної маси пластин.

3.2 Розробка принципової електричної схеми вимірювача

На рисунку 3.1 наведено структурну схему приладу “вимірювач внутрішнього опору та ємності свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення“. Дана структурна схема складається з блоків таких як: АБ, К, ВС, СС, ВН, АЦП, МК, І.

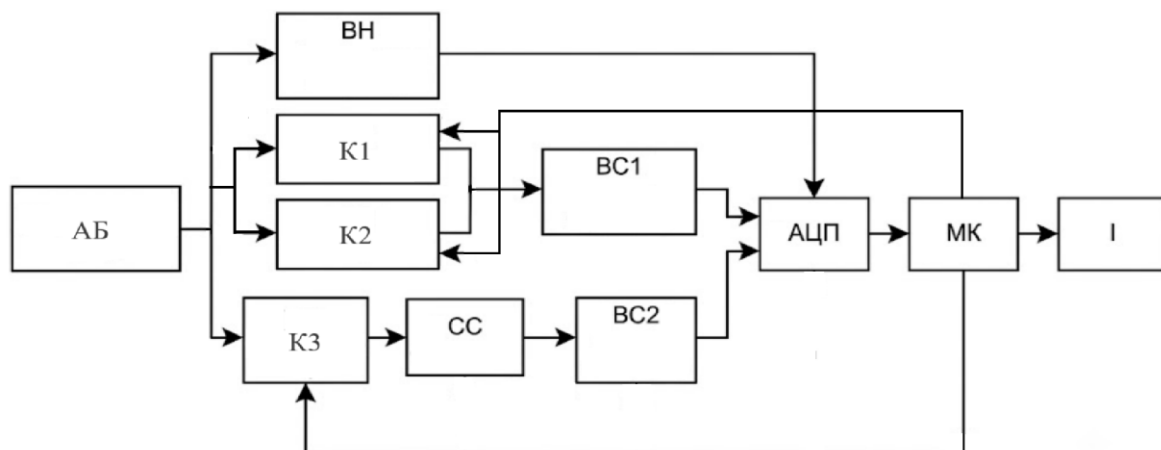


Рисунок 3.1 - Структурна схема приладу

Опис компонентів структурної схеми:

АБ (Акумуляторна Батарея) - об'єкт дослідження, а точніше свинцево-кислотний акумулятор, який використовують у ДБЖ.

К1, К2 (Комутатори 1 та 2) - електронні ключі, які побудовані на польових транзисторах, які формують канал опору. За командою від мікроконтролера вони по черзі підключають різні еталонні навантаження для створення тестових імпульсів струму, необхідних для обчислення внутрішнього опору батареї.

К3 - електронний ключ на польовому транзисторі, який активує канал ємності. Відповідає за підключення кола стабільного розряду акумулятора. Керується сигналами від мікроконтролера.

ВС1 (Вимірювач струму) вимірює струм, що проходить через акумулятор під час визначення його внутрішнього опору. Отримує струм від комутаторів К1/К2 та передає відповідний аналоговий сигнал до АЦП.

СС – стабілізатор струму, який забезпечує постійний струм розряду акумулятора протягом усього процесу вимірювання ємності. Працює в парі з К3, є важливим для забезпечення точності інтегрування.

ВН (Вимірювач напруги) вимірює кількість напруги під час роботи акумулятора. Приймає напругу від комутатора та передає аналоговий сигнал до АЦП для подальшої обробки.

АЦП (Аналого-цифровий перетворювач) перетворює аналогові сигнали блоків вимірювача напруги і вимірювача струму на цифрові сигнали, які обробляє мікроконтролер (МК).

МК (Мікроконтролер) обробляє дані всієї системи, розраховує внутрішній опір, виконує математичне інтегрування, щоб знайти ємність.

І (Індикатор) використовується для індикації поточних значень напруги, струму розряду, а також фінальних результатів тестування акумулятора. Загалом відображає потрібну інформацію, завдяки тому, що він реалізується на базі цифрового дисплею.

Схема електрична принципова наведена в додатку Б. Схема електрична має всього три аналогові вимірювальні канали: канал контролю напруги на акумуляторі, канал вимірювання імпульсного струму для обчислення опору, канал вимірювання стабілізованого розрядного струму для обчислення ємності.

Блок обчислення та індикації

Головним обчислювальним, алгоритмічним та керуючим ядром розробленого вимірювального комплексу є мікроконтролер DD3 на базі модуля Arduino Pro Mini. Відповідно до ТЗ схема живиться від постійної напруги 4,5 В, яка формується трьома хімічними елементами. Живлення каскадів схеми, а саме операційних підсилювачів та мікроконтролера ATmega328P забезпечується напругою 3,3 В, яка формується понижуючим перетворювачем напруги, який входить до складу модулю. Він базується на 8-бітному мікроконтролері AVR ATmega328P. Це рішення було вибрано, оскільки воно не має великих розмірів, не потребує багато енергії та відповідає всім вимогам щодо кількості аналогових каналів АЦП і цифрових ліній введення-виведення. АЦП в цьому мікроконтролері 10-ти розрядне, а це означає, що при опорній напрузі рівній напрузі живлення 3,3 В роздільна здатність (крок квантування) становить $\Delta U_{adc} = 3,3/1023 = 0,003225806 \text{ В} \approx 3,226 \text{ мВ}$. Для стабілізації тактової частоти

					<i>ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ</i>	Арк.
						66
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

обчислювального ядра використано зовнішній кварцовий резонатор XC3, який має номінальну частоту 8 МГц. Він був паралельно підключений до фільтруючих конденсаторів C2 та C3. Всі компоненти модуля Arduino Pro Mini мають номінали визначені виробником (SparkFun Electronics), а сам модуль має у своєму складі крім пасивних компонентів (резистори, конденсатори, кварци та світлодіоди) ще й активні компоненти – це мікроконтролер AVR ATmega328P та мікросхема понижуючий стабілізатор напруги MIC5205. Для ручного скидання програми та перезапуску вимірювального циклу використовується тактова кнопка S4 яка підписана “Reset”. Інтерфейсні лінії послідовного порту UART (TX0, RXI) і лінія синхронізації DTR виведено для надання можливості внутрішньосхемного програмування, калібрування та обміну даними з ЕОМ на схемі. ЕОМ забезпечує автоматичне скидання пристрою, коли процес прошивки починається через зовнішній програматор USB-UART.

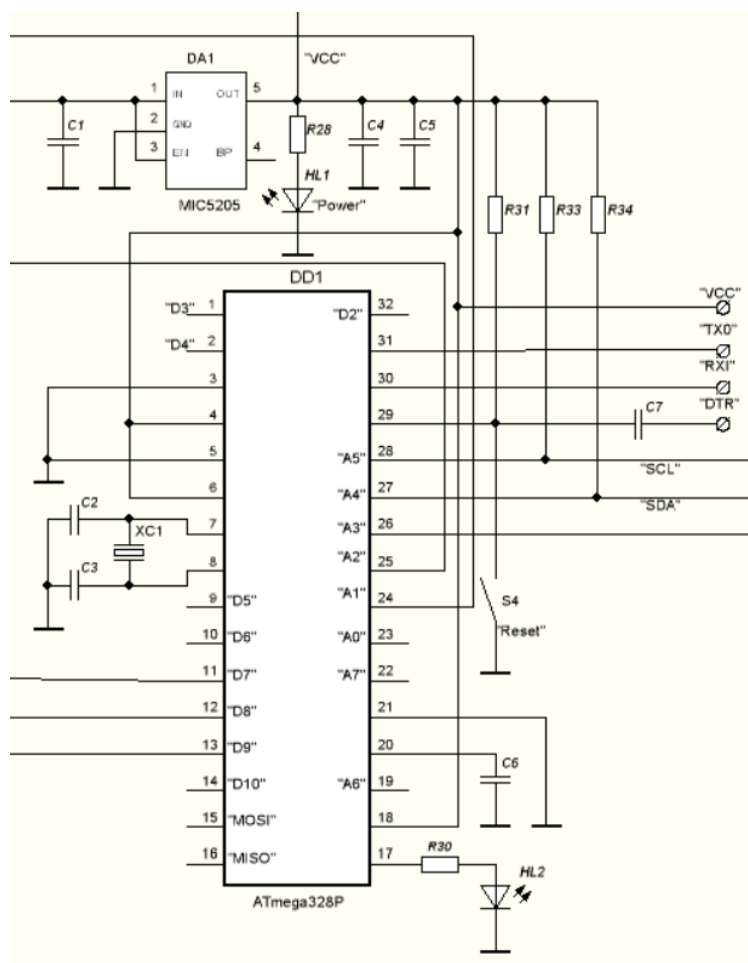
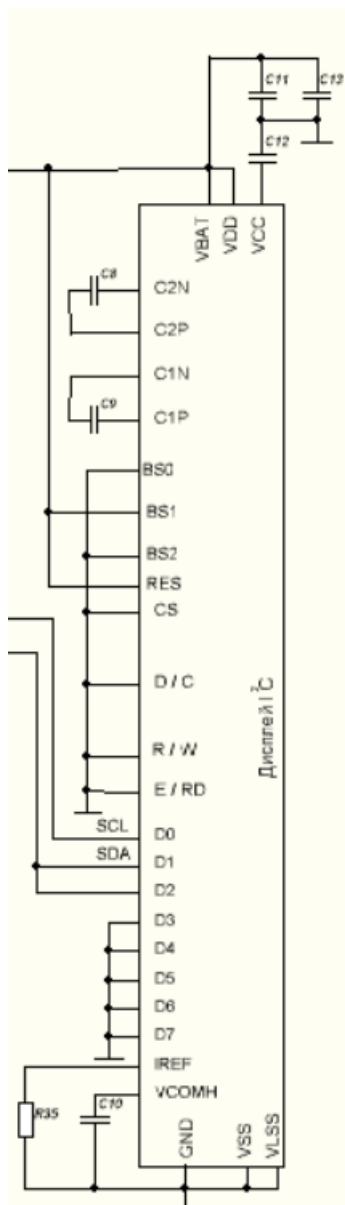


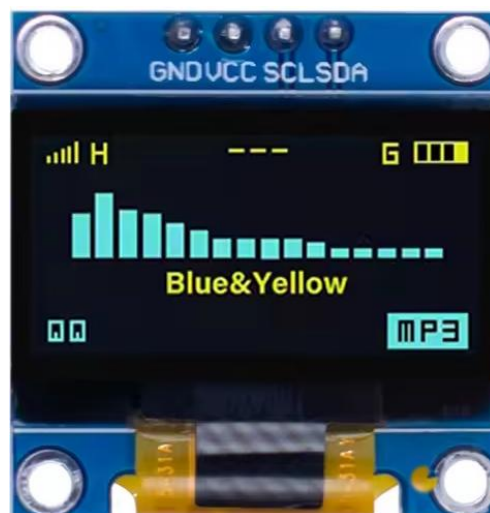
Рисунок 3.2 – Схема електрична принципова модуля AVR ATmega328P на основі мікроконтролера ArduinoProMini 328

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		67

Модуль цифрового дисплея діагоналю 0,96 дюйми побудований на контролері SSD1315 з OLED матрицею 128x64 пікселі. Цифровий дисплей інтегрується до системи через послідовну двопровідну шину I2C, яка включає лінії синхронізації SCL та даних SDA. Це дозволяє переглядати поточні метеорологічні параметри, проміжні дані розряду та кінцеві результати обчислення внутрішнього опору та ємності АБ.



А)



Б)

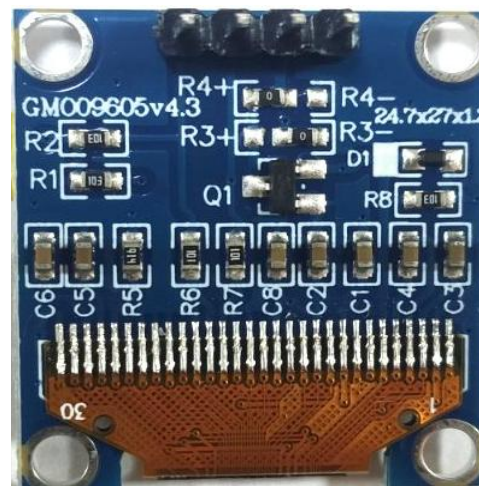


Рисунок 3.3 – Схема електрична принципова (а) та зовнішній вигляд (б) модуля цифрового дисплея діагоналю 0,96 дюйми на контролері SSD1315 з OLED матрицею 128x64 пікселі

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		68

Канал вимірювання струму розряду акумулятора

В свою чергу блок вимірювання струму можна побачити на рисунку 3.4. Він містить в собі навантажувальні резистори R8 і R17, які в свою чергу виконують навантаження. Ці резистори та електронні комутатори короткочасно під'єднуються до акумуляторної батареї, що призводить до протікання струму через резистори та внутрішній опір акумулятора. Напруга на навантаженні менша за напругу холостого ходу акумулятора через падіння напруги на внутрішньому опорі акумулятора. Струм розряджання акумулятора протікає через вимірювальний резистор-шунт R9, який встановлений послідовно з комутаційним вузлом.

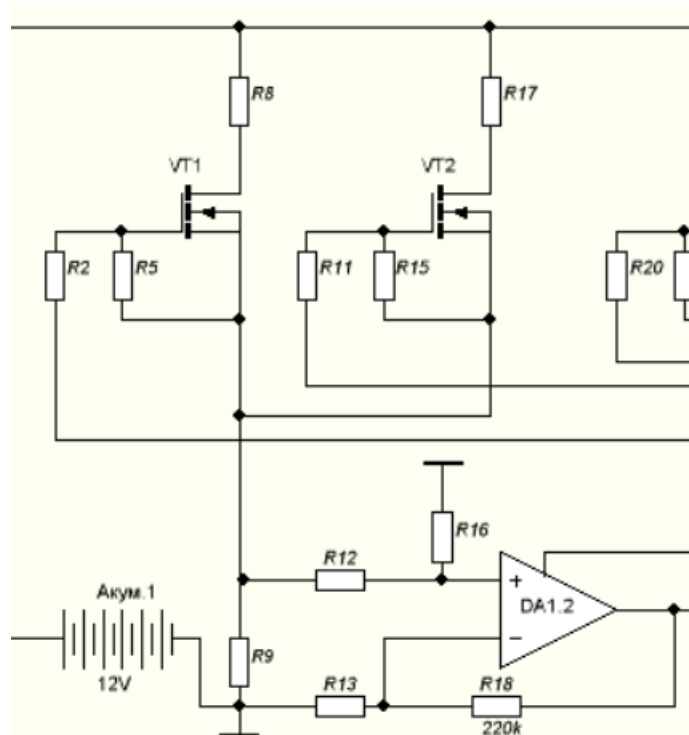


Рисунок 3.4 - Блок вимірювання струму

VT1, VT2 являються польовими транзисторами з індукованим каналом. В даній схемі вони використовуються як комутатори. Напруга резистора-шунта R9, пропорційна струму розряджання, і підсилюється операційним підсилювачем на мікросхемі DA1.2. На виході операційного підсилювача напруга за значенням дорівнює значенню струму розряджання акумулятора для відповідного навантаження. Резистори між витоком та затвором, які називають стічними або підтягуючими резисторами, потрібні для того, щоб надійно "закрити" або

"відкрити" транзистори. Вони забезпечують умову, що потенціал затвора не зависне у повітрі, захищають від хибних спрацьовувань через електромагнітні перешкоди та запобігати виходу транзисторів з ладу.

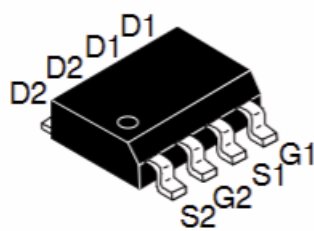
Значення навантажувальних опорів вибирають, виходячи з ТЗ на проєктування та вимог до максимальних значень струму, який залежить від величини ємності. Оскільки, згідно ТЗ мінімальний діапазон вимірювання ємності становить 7 А·год.

Згідно з наданою технічною інформацією про акумулятори AGM та GEL типу (розміщеною в таблиці 3.2), рекомендоване значення струму для зарядки становить приблизно $0,2C \dots 0,4C$. Водночас, максимальний короточасний струм, який акумулятор може віддати, а саме струм розряду, коливається в межах 100–130 А, при цьому час такого розряду не перевищує 5 секунд. Новий повністю заряджений 12-вольтовий свинцево-кислотний акумулятор типу AGM (Absorbent Glass Mat) у стані спокою повинен мати напругу в межах 12,6 В - 12,8 В. Деякі преміум-моделі можуть показувати 13,0 В.

Тестові струми будемо розраховувати виходячи з мінімальної ємності вимірювального діапазону розроблюваного приладу, а саме 7 А·год, для якої рекомендовані струми відповідно становлять 1,4...2,8 А. Базуючись на законі Ома та враховуючи максимальну стандартну напругу повністю зарядженого акумулятора свинцевого акумулятора у 13 В, розрахункові значення резисторів для навантаження такі: $R_8 = 13/1,4 = 9,29$ Ом для струму навантаження $I_8 = 1,4$ А та $R_{17} = 13/2,8 = 4,64$ Ом для струму навантаження $I_{17} = 2,8$ А.

Щоб керувати розрахованими струмами обираємо польові n-канальні транзистори FDS9926A, які витримують струм понад 6,5 А. Також і резистори при напрузі на затворі 3,3 В мають опір стік–витік у відкритому стані менше 30 мОм, що є малим порівняно зі струмом навантаження і не вносить значної похибки. Зовнішній вигляд та схематичне позначення зображено на рис. 3.5 та рис. 3.6 [53].

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						70
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



**SOIC8
CASE 751EB**

Рисунок 3.5 - Зовнішній вигляд FDS9926A

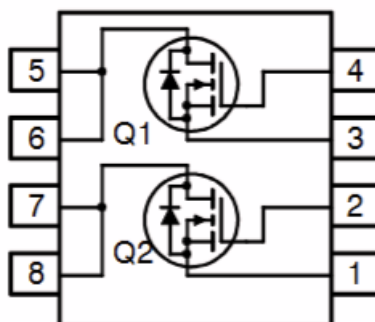


Рисунок 3.6 - Схематичне позначення збірки з двох польових n-канальних транзисторів FDS9926A

Далі обираємо опір шунта каналу вимірювання струму R₉ опором 0,01 Ом, щоб не впливати на роботу акумулятора. Потужність, що розсіюється на ньому при максимальному тестовому струмі 2,8 А, становить [62]:

$$P_9 = I_{\max}^2 \cdot R_9 = 2.8^2 \cdot 0.01 = 0.0784 \text{ Вт}.$$

Обираєм операційний підсилювач DA1, для даної схеми підходить мікросхема чотирьох каналного операційного підсилювача MCP6024 (рис.3.7) [63]. З характеристик операційного підсилювача MCP6024 можна зазначити, що його напруга живлення від 2,5 В до 5,5 В, струм споживання становить 1,0 мА на канал, напруга зміщення нуля $\pm 0,5$ мВ, смуга пропускання 10 МГц, коефіцієнт підсилення 100000. Вибір саме цього підсилювача обґрунтовується тим, що по-перше він має низьку напругу зміщення, що є важливою умовою для точного підсилення мікрвольтових падінь напруги на вимірювальному шунті (R₉), а по-друге його архітектура дозволяє підсилювачу видавати напругу, що практично дорівнює напрузі живлення, максимально ефективно використовуючи весь динамічний діапазон АЦП мікроконтролера при одно полярному живленні 3,3 В.

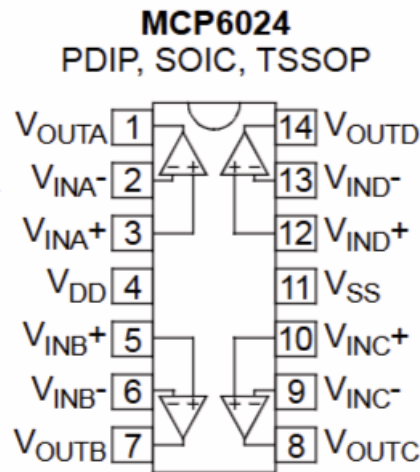


Рисунок 3.7 - Операційний підсилювач MCP6024

Широка смуга пропускання гарантує відсутність фазових затримок та спотворень фронтів під час вимірювання коротких струмових імпульсів.

Канал вимірювання напруги акумулятора

Канал вимірювання напруги складається з вимірювального мосту з опорним джерелом напруги на діоді TL431A та підсилювача напруги. Вигляд зображено на рис. 3.8.

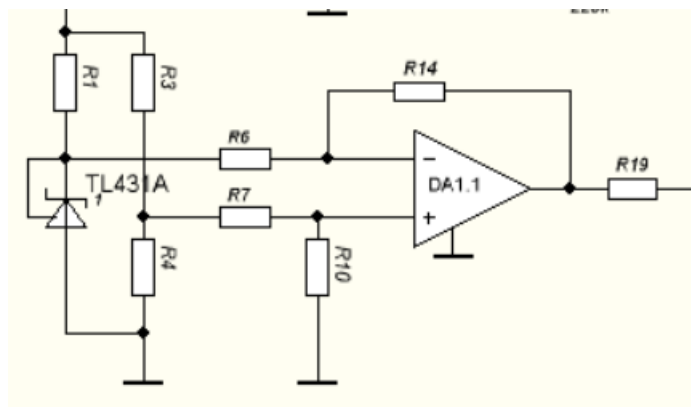


Рисунок 3.8 - Блок вимірювання напруги

Міст складається з двох подільників: R1 - VD1 та R3 – R4. Канал вимірювання напруги складається з вимірювального мосту з опорним джерелом напруги на діоді TL431A та підсилювача напруги. Принцип роботи цього вузла полягає у масштабуванні високої напруги акумулятора до рівня, який безпечно та точно може бути виміряний АЦП мікроконтролера. Міст складається з двох гілок. Ліва гілка, R1 та TL431A, працює як високоточне джерело опорної напруги, генеруючи еталонні $U_{ref} = 2,495 \pm 0,025$ В. Відповідно до технічного

опису опорного джерела діапазон робочих струмів становить від 1 мА до 100 мА, причому оптимальним струмом є струм 10 мА. Діапазон допустимих напруг між анодом та катодом від $U_{ref} = 2,495$ до 36 Вольт. Права гілка, R3 і R4, є резистивним дільником, який пропорційно знижує напругу акумулятора, та може сягати 13 В під час заряду. Нижня межа напруги акумулятора становить 10 В. Операційний підсилювач, друга половина МСР6024, увімкнений після дільника, працює як нормуючий підсилювач.

Канал вимірювання ємності акумулятора

Канал вимірювання ємності, виконаний на польовому n-канальному транзисторі VT3, стабілізаторі струму DA2 та нормуючому підсилювачі DA1.3 (Рисунок 3.9).

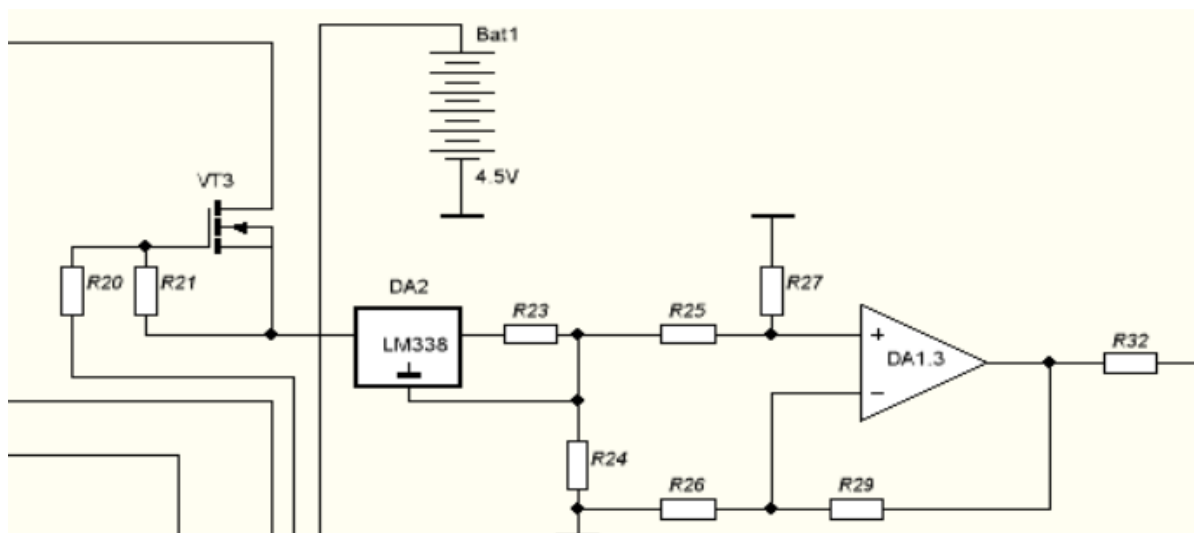


Рисунок 3.9 - Канал вимірювання ємності

Послідовно з польовим транзистором та резистором підключено стабілізатор струму для забезпечення постійного значення розрядного струму акумулятора в процесі вимірювання його ємності. Стабілізатор струму DA2 виконаний на мікросхемі LM338, що дозволяє працювати зі струмами до 5 А. Для контролю вимірювання струму розряду акумулятора застосовується шунт R23, який підключений послідовно з стабілізатором струму і акумулятором. Напруга на шунті R23, що пропорційна струму розряду, підсилюється

мікросхемою DA1.3 та подається на вхід АЦП мікроконтролера. Побудований на операційному підсилювачі DA1.3 (MCP6024), використовується для вимірювання та контролю сили струму розряду в цьому каналі. Для подальшої обробки з виходу підсилювача на один із каналів аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера надходить нормований аналоговий сигнал, амплітуда якого лінійно пропорційна реальному розрядному струму.

3.3 Розрахунок основних вузлів пристрою та компонентів

У цьому розділі наведено обґрунтування вибору основних компонентів для реалізації вимірювального пристрою та розрахунок їх номіналів.

Для керування навантаженнями використовуються електронні ключі на базі польових транзисторів, збірку з двох N-канальних польових транзисторів з індукованим каналом типу FDS9926A, розміщених у єдиному компактному корпусі SOIC-8. Максимальна допустима напруга становить 30 В, максимальний безперервний струм стоку становить 6,5 А при 25 °С. Опір відкритого каналу ($R_{DS(on)}$) гарантовано становить не більше 30 мОм при напрузі на затворі $V_{GS} = 3,3$ В. Час затримки вмикання $t_{D(on)}$ дорівнює лише 4,5 нс.

В якості елемента стабілізації розрядного струму обрано регулятор напруги LM338 який безперервно пропускає струм до 5 А та має високостабільну внутрішню опорну напругу ($V_{ref} = 1,25$ В), максимальна робоча температура переходу становить 125 °С.

Підсилювач був обраний MCP6024 у корпусі SOIC-14, він підтримує низьковольтне однополярне живлення 2,5 В - 5,5 В, коефіцієнт придушення синфазних завад становить понад 74 дБ. За джерело опорної напруги було обрано TL431A програмований шунтовий стабілізатор, який забезпечує напругу 2,495 В з високою початковою точністю ($\pm 1\%$). Динамічний вихідний опір становить лише 0,22 Ом, а температурний коефіцієнт - близько 50 ppm/°С.

Головним обчислювальним ядром було обрано мікроконтроллер Arduino Pro Mini з кварцовим резонатором на 8 МГц та логічною напругою живлення 3,3

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						74
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

В. Вбудований 10-бітний АЦП відповідає за оцифрування аналогових сигналів, а інтерфейс I2C забезпечує передачу даних на зовнішній дисплей.

Розрахункова частина:

а) Блок обчислення та індикації

Блок обчислення та індикації побудовано на готових модулях, а саме Arduino Pro Mini та контролері SSD1315 з OLED матрицею 128x64 пікселі, тому їх компоненти не розраховуються. Лише обираються номінали резисторів, які з'єднують цифрові та аналогові порти мікроконтролера з іншими блоками схеми. Обмежуючи резистори R2, R11, R19, R20, R22, R32 були обрані опором 1 кОм точністю 5% типорозміром 0603 (RC0603FR-1KR-Hitano).

б) Канал вимірювання струму розряду акумулятора

Обираємо опори стічних резисторів R5, R15 та R21 рівні 10 кОм. При напрузі 3,3 В через резистор 10 кОм буде протікати струм всього 0,33 мА, коли транзистор відкритий. Це не перевантажує вихід мікроконтролера. Обираємо резистори типорозміру 0603 точністю 5% (RC0603JR-0710KL – Yageo). Розрахунок потужності, яка розсіюється на резисторах R8 та R17 при напрузі на акумуляторі 13 В (значення напруги при повністю зарядженому акумуляторі) та максимальному значенні обраного тестового струму 2,8 А, показав наступне: за 1 с розсіюється потужність 36,4 Вт, що є досить великою потужністю та потребуватиме досить великих типорозмірів і системи охолодження. Тому враховуючи інерційність теплових процесів, для зменшення розсіювальної потужності треба зменшувати час вимірювання, тобто час протягом якого через резистори протікає тестовий струм. Обираємо типи навантажувальних резисторів. Зменшення тривалості вимірювання в 100 разів з 1 с до 10 мс дозволить зменшити розсіювану потужність до величини 0,36 Вт та застосовувати в цьому випадку менші типорозміри елементів. Обираємо R8 резистор 9,1 Ом 1% 1 Вт (RC2512JK-9R1-Hitano), а R17 резистор 4,7 Ом 1% 1 Вт (RC2512JK-4R7-Hitano). Використовуємо як резистор R9 прецизійний SMD резистор типорозміру 1206 з опором 0.01 Ом, допуском 1% та потужністю розсіювання 1 Вт (WW12RR010FTL-WALSIN).

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						75
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Розрахуємо опори резисторів зворотного зв'язку R12, R13, R16, R18 підсилювача на мікросхемі DA1.2. Для цього задаємо рівень вхідної напруги АЦП мікроконтролера, до рівня якої повинен буде підсилювача на мікросхемі DA1.2 збільшити напругу, яка буде на шунті R9 при розрядженні акумулятора на резистори R8 та R17. Спочатку визначимо напругу на шунті при підключенні резисторів:

$$U_9 = I_8 \cdot R_9 = 1.4 \cdot 0.01 = 0.014 \text{ В.}$$

$$U_9 = I_{17} \cdot R_9 = 2.8 \cdot 0.01 = 0.028 \text{ В.}$$

Щоб не перевантажувати вхід АЦП задаємо рівень напруги на вході АЦП нижчий за напругу живлення та рівна за абсолютним значенням силі струму, що протікає через відповідний резистор. Необхідний коефіцієнт підсилення при роботі акумуляторної батареї на резистор R8 становить: $K_u = 1,4 / 0,014 = 100$ рази. Необхідний коефіцієнт підсилення при роботі акумуляторної батареї на резистор R17 становить: $K_u = 2,8 / 0,028 = 100$ рази. Для неінвертуючого підсилювача симетричного коефіцієнт розраховується як $K_u = R18 / R13$. Приймаємо вхідний резистор $R13 = R12 = 1 \text{ кОм}$, тоді резистор зворотного зв'язку $R16 = R18 = 100 \text{ кОм}$. Обираємо плівковий смд резистор 0603 та точністю 1% RC0603FR-100K-Hitano. Як резистори R13 та R12 обираємо плівковий смд резистор 0603 та точністю 1% RC0603FR-1KR-Hitano.

в) Канал вимірювання напруги акумулятора

Розрахунок баластного резистора R1 для TL431A: Опорна напруга $U_{ref} = 2,495 \text{ В}$, напруга акумуляторної батареї номінальна $U_{BAT} = 12 \text{ В}$. Для виходу стабілітрона на робочий режим його струм катода повинен бути близько 10 мА для номінального режиму.

$$R1 = \frac{U_{BAT} - U_{ref}}{I} = \frac{12 - 2.495}{0.010} = 950.5 \text{ Ом.}$$

Зі стандартного ряду номіналів обираємо найближчий резистор $R1 = 953 \text{ Ом}$. Обираємо точний резистор 1% (RC0603FR-953R-Hitano). Уточнюємо струм для обраного номіналу резистора, який приймає значення 9,97 мА. При

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						76
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

максимальній напрузі акумулятора $U_{batmax} = 13$ В струм через TL431A становить 11,02 мА. При мінімальній напрузі акумулятора $U_{batmin} = 10$ В струм через TL431A становить 7,88 мА. Щоб подільник напруги на резисторах R3 та R4 не навантажував акумуляторну батарею, обираємо струм подільника на порядок нижчий за мінімальний струм через TL431A, а саме $I_d = 0,8$ мА. При виборі опорів резисторів треба врахувати умову, що при мінімальній прийнятій напрузі на акумуляторі на резисторі R4 має падати напруга рівня опорній напрузі $U_{ref} = 2,495$ В. Враховуючи вище наведене розраховуємо опори подільника для мінімальної напруги акумуляторної батареї $U_{batmin} = 10$ В :

$$R3 = \frac{U_{batmin} - U_{ref}}{I_d} = \frac{10 - 2.495}{0.0008} = 9,38 \text{ кОм}.$$

$$R4 = \frac{U_{ref}}{I_d} = \frac{2.495}{0.0008} = 3,12 \text{ кОм}.$$

Обираємо точні резистори 1% опором 9,53 кОм (RC0603FR-9K53-Hitano) та 3,16 кОм (RC0603FR-3K16-Uni-Ohm). Для обраних номіналів резисторів на вході операційного підсилювача DA1.1 буде наступні напруги при відповідних напругах акумуляторної батареї:

- а) Для $U_{batmax} = 13$ В напруга на вході $U_{DA1.1} = 0,742$ В;
- б) Для $U_{BAT} = 12$ В напруга на вході $U_{DA1.1} = 0,494$ В;
- в) Для $U_{batmin} = 10$ В напруга на вході $U_{DA1.1} = -0,0049 \text{ В} \approx 0\text{В}$.

Для оптимального оцифрування цю напругу потрібно підсилити до рівня 3,226 В. Необхідний коефіцієнт підсилення при максимальній напрузі акумуляторної батареї становить: $K_u = 3,226 / 0,742 = 4,35$ рази. Приймаємо найближче ціле значення в меншу сторону, а саме $K_u = 4$. Для неінвертуючого підсилювача симетричного коефіцієнт розраховується як $K_u = R_{14} / R_6$. Приймаємо вхідний резистор $R_6 = R_7 = 3$ кОм, тоді резистор зворотного зв'язку $R_{10} = R_{14} = 12$ кОм. Обираємо плівкові смд резистори 0603 та точністю 1% RC0603FR-0712KL-Yageo. Як резистори R6 та R7 обираємо плівкові смд резистори 0603 та точністю 1% RC0603FR-3K0-Hitano.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		77

Для обраних номіналів резисторів на виході операційного підсилювача DA1.1 буде наступні напруги при відповідних напругах акумуляторної батареї:

а) Для $U_{batmax} = 13$ В напруга на виході $U_{DA1.1} = 2,968$ В;

б) Для $U_{BAT} = 12$ В напруга на вході $U_{DA1.1} = 1,976$ В;

в) Для $U_{batmin} = 10$ В напруга на вході $U_{DA1.1} = 0$ В.

Визначимо функцію перерахунку для вимірювального каналу, яка буде реалізована програмним чином, а саме:

$$U_{BAT\text{вим}} = 1.004 \cdot U_{uAЦП} + 10.02 .$$

Де, $U_{uAЦП} = U_{DA1.1}$

З використанням наведеної функції перерахунку отримаємо:

а) $U_{batmax} = 13$ В, на виході $U_{DA1.1} = 2,968$ В, тоді $U_{BAT\text{вим}} = 12,9998$ В;

б) $U_{BAT} = 12$ В, на вході $U_{DA1.1} = 1,976$ В, тоді $U_{BAT\text{вим}} = 12,0039$ В;

в) $U_{batmin} = 10$ В, на вході $U_{DA1.1} = 0$ В, тоді $U_{BAT\text{вим}} = 10,02$ В.

Таким чином, похибка перерахунку не перевищуватиме 0,2%.

г) Канал вимірювання ємності акумулятора

Струмозадавальний резистор R23: Згідно з методикою, оптимальний стабільний розрядний струм для акумулятора 7 А·год становить $I_{dis} = 1,5$ А (Наприклад, для акумулятора Logic Power LP3864). Інтегральний стабілізатор LM338 підтримує між своїми виводами (OUT та ADJ) фіксовану опорну напругу $V_{ref} = 1,25$.

$$R23 = \frac{V_{ref}}{I_{dis}} = \frac{1,25}{1,5} = 0,83(3) \text{ Ом} ,$$

де R23 - опір струмозадавального резистора, Ом;

V_{ref} - опорна напруга стабілізатора (1.25 В);

I_{dis} - розрядний струм, А.

Обираємо стандартний дрововий резистор $R23 = 1$ Ом. Фактичний струм розряду складе: $I_{dis}(fact) = 1,25/1,0 = 1,25$ А. Для вибору резистора розрахуємо, яка потужність на ньому виділяється при протіканні струму в 1,25 А:

$$P_{23} = I_{max}^2 \cdot R23 = 1.25^2 \cdot 1 = 1.56 \text{ Вт} .$$

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						78
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Обираємо керамічний резистор 1 Ом, 5Вт та точністю 5% SQP50JB-1R-Hitano.

Струмівий шунт R24 та обв'язка DA1.3: Обираємо шунт $R_{24} = 0,01$ Ом. Падіння напруги на ньому під час стабільного розряду складе:

$$V_{\text{shunt}} = I_{\text{dis(fact)}} \cdot R_{24} = 1.25 \cdot 0.01 = 0.0125 \text{ В (12.5 мВ)}.$$

Для оптимального оцифрування цю напругу потрібно підсилити до рівня 3,226 В. Необхідний коефіцієнт підсилення операційного підсилювача: $K_u = 3,226 / 0,0125 = 258$. Для неінвертуючого підсилювача коефіцієнт розраховується як $K_u = R_{29} / R_{26}$. Приймаємо вхідний резистор $R_{26} = R_{25} = 1$ кОм, тоді резистор зворотного зв'язку $R_{29} = R_{27} = 258$ кОм. Найближчий номінал резистора становить 261 кОм. Обираємо плівковий смд резистор 0603 та точністю 1% RC0603FR-261K-Hitano. Фактичний коефіцієнт $K_u = 261$, що формує напругу на виході підсилювача DA1.3 на рівні $U_{\text{DA1.3}} = 3.275$ В, що задовольняє вимірювальний діапазон АЦП.

Визначимо функцію перерахунку для вимірювального каналу, яка буде реалізована програмним чином, а саме:

$$I_{\text{BAT вим}} = 0.38168 \cdot U_{\text{АЦП}}.$$

Де, $U_{\text{АЦП}} = U_{\text{DA1.3}}$

З використанням наведеної функції перерахунку отримаємо:

$I_{\text{batmax}} = 1,25$ А, на виході $U_{\text{DA1.3}} = 3,275$ В, тоді $I_{\text{BAT вим}} = 1,250002$ В;

Таким чином, похибка перерахунку не перевищуватиме 0,0002%.

Ємність акумулятора визначатиметься як добуток виміряного струму на час розряду акумуляторної батареї зі значення $U_{\text{batmax}} = 13$ В до значення $U_{\text{batmin}} = 10$ В. Мікроконтролер буде щосекунди вимірювати значення струму, доти доки на виході мікросхеми DA1.3 рівень напруги не знизиться до нуля.

Термічний розрахунок мікросхеми LM338:

Для аналізу теплофізичних процесів та розрахунку параметрів охолодження використано класичну методологію еквівалентних теплових схем, що базується на електротепловій аналогії [58] [59]. Потужність, що розсіюється на кристалі LM338 (Preg):

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						79
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$P_{\text{reg}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{ref}} - V_{\text{dropFET}}) \cdot I_{\text{dis(fact)}} ,$$

де P_{reg} - потужність, що розсіюється на кристалі;

V_{in} - вхідна напруга;

V_{ref} - опорна напруга стабілізатора;

V_{dropFET} - падіння напруги на польовому транзисторі;

$I_{\text{dis(fact)}}$ - фактичний струм розряду.

$$P_{\text{reg}} = (13.0 \text{ В} - 1.25 \text{ В}) \cdot 0,694 \text{ А} = 8,15 \text{ Вт} .$$

Згідно з документацією на теплові метрики напівпровідникових корпусів [60], якщо експлуатувати регулятор без радіатора ($R_{\theta JA} \approx 35 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$), температура кристала (T_J) при навколишній температурі $T_A = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ сягне:

$$T_J = T_A + P_{\text{reg}} \cdot R_{\theta JA} = 25 + 8.15 \cdot 35 \approx 310 \text{ }^{\circ}\text{C} ,$$

де T_J - температура кристала;

T_A - температура навколишнього середовища;

P_{reg} - розсіювана потужність на кристалі;

$R_{\theta JA}$ - тепловий опір між кристалом і середовищем.

Це перевищує ліміт $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Необхідно розрахувати радіатор, щоб T_J не перевищувала $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при жорстких умовах $T_A = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Необхідний загальний тепловий опір системи ($R_{\theta\Sigma}$):

$$R_{\theta\Sigma} = \frac{(T_J - T_A)}{P_{\text{reg}}} = \frac{(90 - 35)}{8.15} = 6.74 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт} ,$$

де $R_{\theta\Sigma}$ - загальний тепловий опір системи;

T_J - цільова (максимально допустима) температура кристала;

T_A - температура навколишнього середовища;

P_{reg} - розсіювана потужність.

Шуканий тепловий опір радіатора ($R_{\theta SA}$) [61], де $R_{\theta JC} = 4 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$ та $R_{\theta CS} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$:

$$R_{\theta SA} = R_{\theta\Sigma} - R_{\theta JC} - R_{\theta CS} = 6.74 - 4 - 1 = 1.74 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт} ,$$

де $R_{\theta SA}$ - тепловий опір радіатора;

$R_{\theta\Sigma}$ - загальний тепловий опір системи;

R_{JC} - тепловий опір "кристал-корпус";

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						80
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

R_{CS} - тепловий опір "корпус-радіатор".

Отже, потрібен радіатор із тепловим опором не більше 1,74 °C/Вт.

Висновки до розділу 3

У розділі розроблено та теоретично обґрунтовано структурну і принципову електричну схеми приладу для вимірювання внутрішнього опору та ємності свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення. На основі аналізу електрохімічних процесів для визначення стану працездатності батарей було обрано метод вимірювання внутрішнього опору на постійному струмі (DCIR), який найкраще імітує реальні умови експлуатації, а використання чотирипровідної топології підключення Кельвіна дозволило повністю нівелювати методичні похибки від власного опору вимірювальних ліній і перехідного опору контактів. Обрано мікроконтролер Arduino Pro Mini. Силова частина вимірювального тракту реалізована на базі здвоєної збірки потужних n-канальних польових транзисторів FDS9926A з малим опором відкритого каналу та прецизійних дровових навантажувальних резисторів, тривалість тестового імпульсу струму програмно обмежується, що зменшує нагрівання навантажувальних резисторів і силових ключів та підвищує стабільність результатів вимірювання. Для надійного масштабування низьковольтних аналогових сигналів струму та напруги застосовано здвоєні операційні підсилювачі MCP6024 з архітектурою Rail-to-Rail. Обрано джерела опорної напруги на базі програмованого стабілітрона TL431A. Канал вимірювання ємності спроектовано із залученням інтегрального лінійного стабілізатора струму LM338. Завдяки впровадженню керованого польовими транзисторами комутаційного ключа у ланцюзі живлення цифрового дисплея, що працює по послідовній шині I2C, забезпечено виконання вимог технічного завдання щодо енергоефективності приладу із обмеженням споживаної потужності в режимі очікування на рівні не більше 250 мВт. Обрані схемотехнічні рішення повністю оптимізовані за критеріями метрологічної точності, надійності та завадостійкості в умовах промислових завод від інвертора ДБЖ.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						81
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

4 АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

Функція перетворення для визначення внутрішнього опору визначається з формули:

$$R_{DC} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2},$$

де ΔU - зміщення (падіння) у напрузі;

ΔI - зміщення у силі струму;

U_{BAT1} - напруга на акумуляторі при навантаженні $R17=4,7$ Ом;

U_{BAT2} - напруга на акумуляторі при навантаженні $R8=9,1$ Ом;

I_1 - напруга на акумуляторі при навантаженні $R17=4,7$ Ом;

I_2 - напруга на акумуляторі при навантаженні $R8=9,1$ Ом.

Для подання функції перетворення, яка характеризує залежність внутрішнього опору акумулятора від його напруги, спочатку сформулюємо функції перетворення для каналів вимірювання струму та напруги у вигляді напруг на входах АЦП.

$$U_{uAЦП} = K_{DA1,1} \left[U_{BAT} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} - U_{TL} \right],$$

де $U_{uAЦП}$ – напруга на виході аналогової частини каналу вимірювання напруги, В;

$K_{DA1,1}$ – коефіцієнт підсилення підсилювача, $K_{DA1,1} = R10/R7$;

$U_{ак}$ – величина напруги на акумуляторі, В;

U_{TL} – опорна напруга на діоді TL431A, $U_{TL} = 2,495$ В.

Після врахування функції перерахунку отримаємо наступний вираз функції перетворення:

$$U_{BAT\text{ вим}} = 1.004 \cdot \frac{R_{10}}{R_7} \left[U_{BAT} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} - U_{TL} \right] + 10.02.$$

Для каналу вимірювання струму маємо наступну функцію перетворення:

$$U_{IAЦП} = K_{DA1,2} \cdot R_9 \cdot \frac{U_{BAT}}{R_H},$$

де $U_{IAЦП}$ – напруга на виході аналогової частини каналу вимірювання струму, В;

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						82
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$K_{DA1.2}$ – коефіцієнт підсилення підсилювача DA1.2, $K_{DA1.2} = R_{18}/R_{13}$;

U_{BAT} – величина напруги на акумуляторі, В;

R_n – опір відповідного навантаження R8 або R17.

Підставивши наведені вище функції перетворення у формулу розрахунку внутрішнього опору, отримаємо наступний вираз функції перетворення:

$$R_{DC} = 1.004 \cdot \frac{R_4 \cdot R_{13} \cdot R_8 \cdot R_{17}}{R_9 \cdot R_6 \cdot (R_3 + R_4)} \cdot \frac{U_{BAT.1} - U_{BAT.2}}{U_{BAT.2} \cdot R_8 - U_{BAT.1} \cdot R_{17}}.$$

Оскільки всі опори, які входять до функції перетворення мають точність 1%, то з врахуванням похибки номіналу можна записати функцію перетворення з врахуванням абсолютних похибок для максимального та мінімального значення внутрішнього опору акумулятора.

$$R_{DCmax} = 1.004 \cdot \left[\frac{(R_4 + \Delta R_4) \cdot (R_{13} + \Delta R_{13}) \cdot (R_8 + \Delta R_8) \cdot (R_{17} + \Delta R_{17})}{(R_9 - \Delta R_9) \cdot (R_6 - \Delta R_6) \cdot ((R_3 - \Delta R_3) + (R_4 + \Delta R_4))} \right] \cdot \left[\frac{U_{BAT1} - U_{BAT.2}}{U_{BAT.2} \cdot (R_8 - \Delta R_8) - U_{BAT.1} \cdot (R_{17} - \Delta R_{17})} \right],$$

$$R_{DCmin} = 1.004 \cdot \left[\frac{(R_4 - \Delta R_4) \cdot (R_{13} - \Delta R_{13}) \cdot (R_8 - \Delta R_8) \cdot (R_{17} - \Delta R_{17})}{(R_9 + \Delta R_9) \cdot (R_6 + \Delta R_6) \cdot ((R_3 + \Delta R_3) + (R_4 - \Delta R_4))} \right] \cdot \left[\frac{U_{BAT.1} - U_{BAT.2}}{U_{BAT.2} \cdot (R_8 + \Delta R_8) - U_{BAT.1} \cdot (R_{17} + \Delta R_{17})} \right].$$

За результатами розрахунків в попередньому розділі маємо наступні номінали опорів:

$R_3 = 9,53 \text{ кОм}, \Delta R_3 = 95,3 \text{ Ом};$

$R_4 = 3,16 \text{ кОм}, \Delta R_4 = 31,6 \text{ Ом};$

$R_6 = 3 \text{ кОм}, \Delta R_6 = 30 \text{ Ом};$

$R_8 = 9,1 \text{ Ом}, \Delta R_8 = 0,091 \text{ Ом};$

$R_9 = 0,01 \text{ Ом}, \Delta R_9 = 0,0001 \text{ Ом};$

$R_{13} = 1 \text{ кОм}, \Delta R_{13} = 10 \text{ Ом};$

$R_{17} = 4,7 \text{ Ом}, \Delta R_{17} = 0,047 \text{ Ом};$

Відносна похибка результату вимірювання розраховується за таким співвідношенням:

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						83
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$\delta_{DCmax} = \frac{R_{DCmax} - R_{DC}}{R_{DC}} \cdot 100\%,$$

або

$$\delta_{DCmin} = \frac{R_{DC} - R_{DCmin}}{R_{DC}} \cdot 100\%$$

Для визначення числових значень похибки вимірювання виконаємо розрахунок на конкретному прикладі. Припустимо, що в результаті вимірювань отримано такі значення напруги акумулятора при двох значеннях навантаження: $U_{BAT.1}=12,41$ В; $U_{BAT.2}=12,34$ В.

Номінальне значення опору становить:

$$R_{DC} = 39,6 \text{ мОм};$$

$$\text{Максимальне відхилення: } R_{DCmax} = 42,9 \text{ мОм};$$

$$\text{Мінімальне відхилення: } R_{DCmin} = 36,5 \text{ мОм};$$

$$\text{Абсолютна похибка: } \Delta R_{DC} = R_{DCmax} - R_{DC} = 42,9 - 39,6 = 3,3 \text{ мОм};$$

$$\text{Абсолютна похибка: } \Delta R_{DC} = R_{DCmin} - R_{DC} = 36,5 - 39,6 = -3,1 \text{ мОм};$$

$$\text{Відносна похибка: } \delta R_{DC} = 8,33 \%;$$

$$\text{Відносна похибка: } \delta R_{DC} = 7,69 \%;$$

Таблиця 4.1 - Складові сумарної похибки вимірювання струму

Джерело похибки	Абсолютне значення	Опис і метрологічний зміст складової
Вимірювальний шунт R15 (1%)	18,38 мА	Відхилення реального опору шунта від номіналу 0,01 Ом.
Резистори обв'язки підсилювача	2,59 мА	Похибка коефіцієнта підсилення через відхилення резисторів (0,141%).
Джерело опорної напруги (1.14%)	20,95 мА	Систематичний зсув шкали через відхилення напруги стабілізатора TL431A.
Похибка квантування АЦП	4,87 мА	Власна некомпенсована похибка перетворення мікроконтролера (± 2 OMP).

За методом середньоквадратичного додавання загальна абсолютна похибка вимірювання струму становить:

$$\Delta I_{\Sigma} = \sqrt{18.38^2 + 2.59^2 + 50.00^2 + 20.95^2 + 4.87^2} = 57.5 \text{ мА}.$$

Відносна сумарна похибка вимірювання максимального струму становить:

$$\delta I_{\Sigma} = \frac{57.5 \text{ мА}}{1838 \text{ мА}} \cdot 100\% = 3.13\%.$$

Використання чотирипровідної схеми підключення (метод Кельвіна) повністю нівелює методичну похибку, яка могла б виникнути через опір з'єднувальних дротів і перехідних контактів.

Для розряджання акумулятора стабільним струмом застосовано апаратний лінійний стабілізатор LM338, налаштований на струм 0,7 А. Джерела нестабільності апаратного вузла: розкид внутрішньої опорної напруги мікросхеми LM338: до $\pm 4,03\%$. Нестабільність за входною напругою (вплив просідання батареї): 0,03%. Тепловий дрейф під час розсіювання потужності (до 8,5 Вт): близько 0,6%. Гранична сумарна нестабільність струму за методом найгіршого випадку сягає 5,66%.

Аналіз апаратної частини показав, що пряме використання лінійного стабілізатора струму на базі мікросхеми LM338 супроводжується його інтенсивним тепловим розігрівом під час розряду, що призводить до температурного дрейфу вихідного струму та збільшення статичної похибки вимірювання ємності. Для вирішення цієї проблеми в приладі реалізовано динамічний програмний моніторинг фактичного струму за допомогою прецизійного вимірювального шунта та операційного підсилювача. Завдяки алгоритму чисельного інтегрування миттєвих значень струму в часі, тепловий дрейф мікросхеми LM338 не чинить деструктивного впливу на кінцевий результат обчислень. Це дозволило нівелювати вплив нестабільності розрядного струму на точність визначення ємності акумулятора та забезпечити результуючу відносну похибку на рівні, що задовольняє вимогам технічного завдання.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
						85
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Висновки до розділу 4

У цьому розділі проведено комплексний метрологічний аналіз вимірювального тракту розробленого аналізатора свинцево-кислотних акумуляторів. Оцінку інструментальних та методичних похибок виконано на основі комбінованого підходу, що поєднує метод граничних похибок (найгіршого випадку) для локальних вузлів та метод середньоквадратичного додавання випадкових і систематичних складових. Завдяки використанню прецизійної елементної бази, зокрема еталонного джерела опорної напруги TL431A, вимірювального шунта з опором 0,01 Ом та операційних підсилювачів з малим зміщенням нуля, встановлено, що загальна похибка вимірювання напруги становить близько 1,65%, а сумарна відносна похибка вимірювання максимального імпульсного струму дорівнює 3,13%. Застосування чотирипровідної топології Кельвіна дозволило повністю нівелювати методичну похибку від власного опору вимірювальних ліній і перехідного опору контактів. Водночас апаратне обмеження тривалості тестового імпульсу струму до 100 мс дозволяє усунути додаткові похибки від нагрівання компонентів під час протікання великих струмів.

Щодо каналу вимірювання ємності, розрахункова гранична нестабільність струму розряду лінійного стабілізатора LM338 сягає 5,66%, проте ця апаратна похибка успішно нівелюється на програмному рівні. Реалізація алгоритму безперервного моніторингу фактичного струму з його чисельним інтегруванням дозволила компенсувати тепловий дрейф стабілізатора й зменшити кінцеву похибку обчислення ємності до значення менше ніж 0,3%. Підсумовуючи результати аналізу, доведено, що кінцева відносна похибка вимірювання як внутрішнього опору в цільовому діапазоні 30–300 мОм, так і ємності свинцевих акумуляторів не перевищує 10%. Це підтверджує, що обрані структурні, схемотехнічні та алгоритмічні рішення повністю відповідають усім метрологічним критеріям, заданим у ТЗ на розробку приладу.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		86

ВИСНОВКИ

В даній роботі проведено аналіз методів діагностики свинцево-кислотних акумуляторів джерел безперебійного живлення. На основі теоретичного та порівняльного аналізу комерційних рішень обґрунтовано доцільність застосування методу вимірювання внутрішнього опору на постійному струмі (DCIR), який забезпечує найвищу достовірність оцінки стану працездатності батареї під навантаженням.

У проектно-конструкторській частині реалізовано чотирипровідну вимірювальну топологію за схемою Кельвіна. Розроблено структурну та принципову електричну схеми приладу на базі енергоефективного мікроконтролера Arduino Pro Mini, де силовий тракт побудовано з використанням n-канальних польових транзисторів та інтегрального лінійного стабілізатора струму LM338. Для забезпечення достовірного контролю стану акумулятора в приладі реалізовано вимірювальні канали напруги, струму розряду та внутрішнього опору, а також канал розряду для визначення ємності. Проведений метрологічний аналіз вимірювального каналу підтвердив доцільність обраних інженерних рішень: апаратне обмеження тривалості тестового імпульсу струму до 100 мс дозволило усунути додаткові похибки від теплового нагрівання компонентів, а програмна компенсація теплового дрейфу за допомогою чисельного інтегрування фактичного струму знизилася інструментальну похибку обчислення ємності до рівня менше ніж 0,3%.

У підсумку, спроектований пристрій забезпечує надійний контроль акумуляторів з номінальною напругою 12 В, вимірювання внутрішнього опору в діапазоні від 30 до 300 мОм та ємності до 7,2 А·год із загальною відносною похибкою вимірювань, що не перевищує 10%. Запропоновані технічні рішення повністю відповідають усім вимогам технічного завдання, гарантуючи точність вимірювань та енергоефективність пристрою із загальною споживаною потужністю не більше 250 мВт.

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		87

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ukraine's energy sector is a key battleground in the war with Russia [Електронний ресурс] // Brookings Institution. URL: <https://www.brookings.edu/articles/ukraines-energy-sector-is-a-key-battleground-in-the-war-with-russia/> (дата звернення: 03.06.2026).
2. Technical Comparison of Lead-Acid and Lithium-ion Batteries [Електронний ресурс]. URL: <https://www.baebatteriesusa.com/wp-content/uploads/2019/03/Technical-Comparison-of-Lead-Acid-and-Lithium-ion-Batteries-Schiemann-2016.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
3. Development of an algorithm for estimating Lead [Електронний ресурс] // DiVA Portal. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:830232/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
4. Гелеві та AGM акумулятори: в чому різниця та який краще для ДБЖ? [Електронний ресурс]. URL: <https://rbc.sm.ua/geleevi-ta-agm-akumulyatory-dlya-dbzh-ua> (дата звернення: 03.06.2026).
5. Effect of sucrose-based carbon foams as negative electrode additive [Електронний ресурс] // PubMed Central. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11133821/> (дата звернення: 03.06.2026).
6. BU-902: How to Measure Internal Resistance [Електронний ресурс] // Battery University. URL: <https://www.batteryuniversity.com/article/bu-902-how-to-measure-internal-resistance/> (дата звернення: 03.06.2026).
7. Novel Test Procedure for Assessing Lead-Acid Batteries for Partial-State-of-Charge Duty Using Internal Resistance Charge Acceptance Technique [Електронний ресурс] // Batteries. URL: <https://www.mdpi.com/2313-0105/11/4/131> (дата звернення: 03.06.2026).
8. Lead Acid Battery and Its Internal Resistance [Електронний ресурс] // Actec. URL: <https://actec.dk/media/documents/68F4B35DD5C5.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).

					<i>ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ</i>	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		88

9. Lead Acid Battery Desulfator [Електронний ресурс] // AeroElectric. URL: http://www.aeroelectric.com/Reference_Docs/Battery/Desulfator/Lead%20Acid%20Battery%20Desulfator.pdf (дата звернення: 03.06.2026).
10. Non-Invasive Method-Based Estimation of Battery State-of-Health [Електронний ресурс] // Energies. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/3/583> (дата звернення: 03.06.2026).
11. Pulsed-current charging of lead/acid batteries - a possible means for... [Електронний ресурс] // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/393436812_Desulfation_of_Lead_Acid_Battery_with_Pulse_Charging (дата звернення: 03.06.2026).
12. Impact of Pulse Voltage as Desulfator to Improve Automotive Lead Acid Battery Capacity [Електронний ресурс] // Semantic Scholar. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/7b5c/1386a350a784fbdb7f8784fb9ed7ca57435a.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
13. Desulfation of Lead Acid Battery with Pulse Charging [Електронний ресурс] // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/393436812_Desulfation_of_Lead_Acid_Battery_with_Pulse_Charging (дата звернення: 03.06.2026).
14. Revitalizing lead-acid battery technology: a comprehensive review on material and operation-based interventions with a novel sound-assisted charging method [Електронний ресурс] // Frontiers in Batteries and Electrochemistry. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/batteries-and-electrochemistry/articles/10.3389/fbael.2023.1268412/full> (дата звернення: 03.06.2026).
15. Simple Battery Desulfator Circuits Explored [Електронний ресурс] // Homemade Circuit Projects. URL: <https://www.homemade-circuits.com/battery-desulfator-circuit-explained/> (дата звернення: 03.06.2026).
16. Active Balancing: How It Works and Its Advantages [Електронний ресурс] // Monolithic Power Systems. URL:

<https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/active-balancing-how-it-works-and-its-advantages> (дата звернення: 03.06.2026).

- 17.Active vs. Passive Cell Balancing: A Functional Safety and Risk Perspective [Електронний ресурс] // LiBat. URL: <https://li-bat.com/insights/active-vs-passive-cell-balancing-functional-safety> (дата звернення: 03.06.2026).
- 18.Active vs Passive Balancing: Which Protects LiFePO4 Best? [Електронний ресурс] // Anern Store. URL: <https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar-guides/active-vs-passive-balancing-lifepo4> (дата звернення: 03.06.2026).
- 19.Active vs Passive Cell Balancing: Which is Right for Your Application? [Електронний ресурс] // XBattery. URL: <https://xbattery.energy/learn/active-vs-passive-cell-balancing> (дата звернення: 03.06.2026).
- 20.Battery State of Health Estimation Methods: Implementation and Comparison of 11 Algorithms [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10820123/10944710.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 21.Battery State of Charge and State of Health Estimation Using a New Hybrid Deep Neural Network Approach [Електронний ресурс] // IEEE Xplore. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10820123/10738796.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 22.ACT CHROME 12V SLA Intelligent Battery Tester [Електронний ресурс] // RS Online. URL: <https://docs.rs-online.com/0710/0900766b8134fb86.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 23.MINI-MBT Data Sheet [Електронний ресурс]. URL: https://www.sauseng.at/download/prospekte/zts/MINIMBT_ds.pdf (дата звернення: 03.06.2026).
- 24.ZTS Mini Multi-Battery Tester (MINI-MBT) [Електронний ресурс] // ZTS, Inc. URL: <https://www.ztsinc.com/minimbt.html> (дата звернення: 03.06.2026).
- 25.A Straightforward Method to Estimate Battery's Condition Based on Its Internal Resistance Value [Електронний ресурс] // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/384260175_A_Straightforward_Method_to

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		90

- Estimate Battery's Condition Based on Its Internal Resistance Value (дата звернення: 03.06.2026).
26. Evaluation Method of Internal Resistance for Repurposing Using Middle and Large-Sized Batteries [Електронний ресурс] // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/372732617_Evaluation_Method_of_Internal_Resistance_for_Repurposing_Using_Middle_and_Large-Sized_Batteries (дата звернення: 03.06.2026).
27. Advanced Battery Internal Resistance Measurement & IEEE 485 Sizing for Absolyte AGP [Електронний ресурс] // Critical Power Battery Solutions. URL: <https://criticalpowerbatterysolutions.com/battery-internal-resistance-measurement-ieee-485-sizing/> (дата звернення: 03.06.2026).
28. Tech Note: Ohmic Measurements and IEEE Standard 1188-2005 [Електронний ресурс] // EE Power Solutions. URL: <https://eepowersolutions.com/resources/tech-notes/ohmic-measurements-and-ieee-standard-1188-2005/> (дата звернення: 03.06.2026).
29. Standard Battery Testing Requirements Summary [Електронний ресурс] // Megger. URL: https://media.megger.com/mediacontainer/medialibraries/meggerus/images/std_bat_t_est_reqsum_dal_v1.pdf (дата звернення: 03.06.2026).
30. Alber CRT-400 Specs [Електронний ресурс] // AAATesters. URL: https://www.aaatesters.com/pub/media/datasheets/alber_crt-400_specifications_spec_sheet.pdf (дата звернення: 03.06.2026).
31. Alber CELLCORDER CRT-400 Cell Resistance Tester [Електронний ресурс] // Puerto Rico Suppliers. URL: <https://literature.puertoricosupplier.com/024/NF24059.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
32. Fluke 500 Series Battery Analyzer [Електронний ресурс]. URL: <https://v6-file.globalso.com/upload/p/4228/file/2025-11/fluke-500-series-battery-analyzer-bt521-datasheet.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		91

- 33.UNI-T UT15B MAX [Електронний ресурс]. URL: <https://uni-t.com.ua/ut-15b-max/> (дата звернення: 03.06.2026).
- 34.Battery Tester BT3554-50 [Електронний ресурс] // Hioki. URL: https://www.hioki.com/global/products/resistance-meters/battery/id_6828 (дата звернення: 03.06.2026).
- 35.Megger BITE3 - Battery Impedance Test Equipment [Електронний ресурс] // TEquipment. URL: <https://www.tequipment.net/MeggerBITE3.html> (дата звернення: 03.06.2026).
- 36.Купити тестер акумуляторів та ДБЖ METRACELL BT PRO в Києві [Електронний ресурс]. URL: <https://www.evm.ua/elektrichieskie-testery/vyprobuvalnyj-prylad-metracell-btpro> (дата звернення: 03.06.2026).
- 37.Desulfation of Lead Acid Battery with Pulse Charging [Електронний ресурс] // IJIRT. URL: https://ijirt.org/publishedpaper/IJIRT177858_PAPER.pdf (дата звернення: 03.06.2026).
- 38.Maintenance techniques for rechargeable battery using pulse charging [Електронний ресурс] // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/224694540_Maintenance_techniques_for_rechargeable_battery_using_pulse_charging (дата звернення: 03.06.2026).
- 39.CADEX C7400ER-C Battery Analyzer up to 36V 6A 170W, 4 stations [Електронний ресурс] // Batter Fly. URL: <https://www.batterfly.com/shop/en/cadex-c7400er> (дата звернення: 03.06.2026).
- 40.CADEX Adaptors [Електронний ресурс] // Cadex. URL: <https://www.cadex.com/battery-adapters> (дата звернення: 03.06.2026).
- 41.CADEX Universal Adaptors [Електронний ресурс]. URL: <https://www.lgt.pt/CADEX/datasheets/adaptors.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 42.18650 / 21700 Universal Adapter [Електронний ресурс] // Cadex. URL: <https://shop.cadex.com/shop/products/18650-21700-universal-adapter> (дата звернення: 03.06.2026).
- 43.Десульфатор [Електронний ресурс]. URL: <https://meandr.org/uk/archives/30352> (дата звернення: 03.06.2026).

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		92

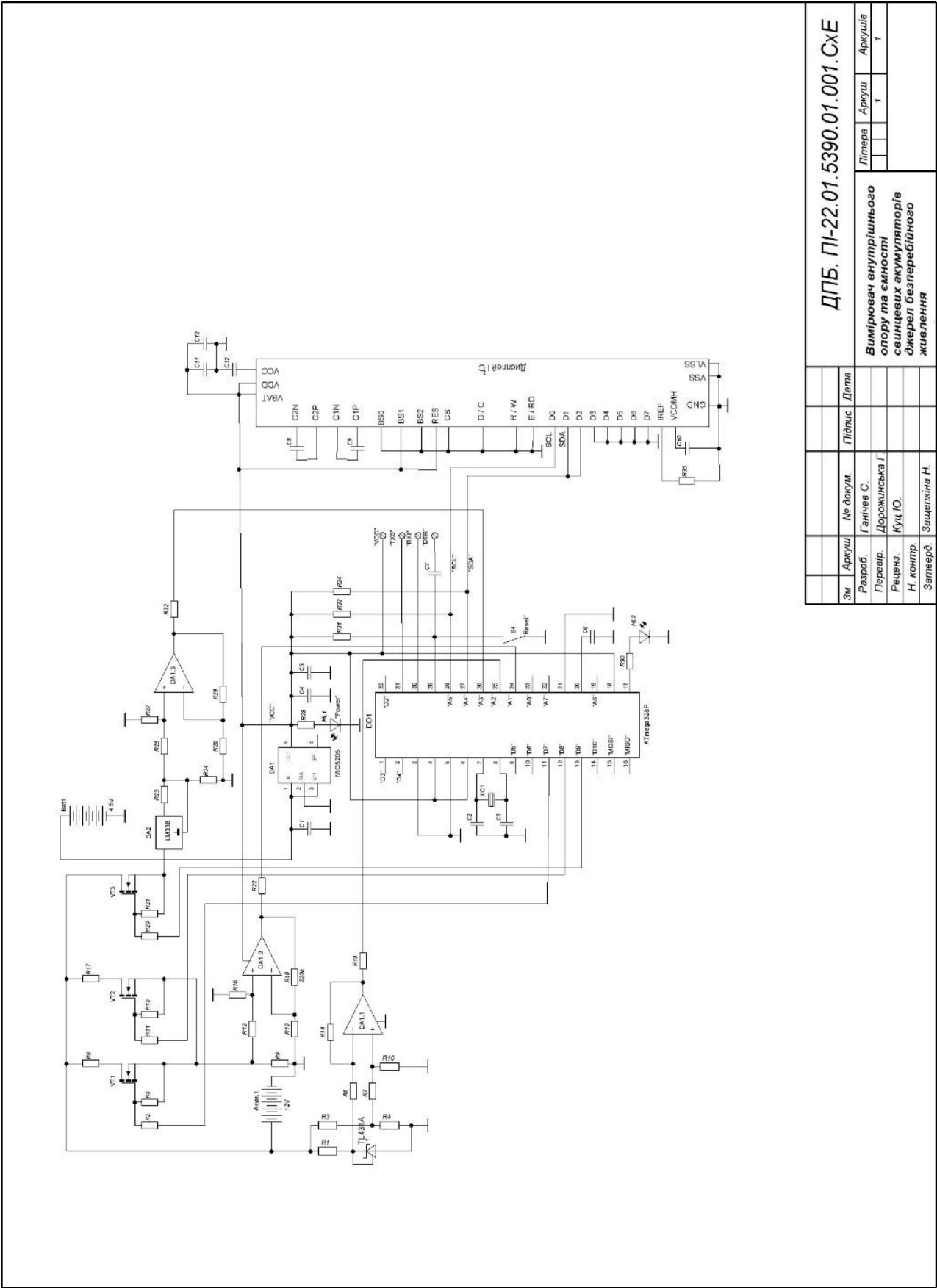
- 44.Kelvin (4-Wire) [Електронний ресурс] // element14 Community. URL: <https://community.element14.com/technologies/test-and-measurement/b/blog/posts/building-kelvin-4-wire-test-leads> (дата звернення: 03.06.2026).
- 45.Battery State Estimation for Lead-Acid Batteries under Float Charge [Електронний ресурс] // Applied Sciences. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1308> (дата звернення: 03.06.2026).
- 46.Battery Management System for Electric Vehicles: Comprehensive Review of Circuitry Configuration and Algorithms [Електронний ресурс] // Vehicles. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/16/8/451> (дата звернення: 03.06.2026).
- 47.Internal Resistance of a Battery: AC vs DC Explained [Електронний ресурс] // Bonnen Battery. URL: <https://www.bonnenbatteries.com/the-internal-resistance-of-a-battery-ac-impedance-vs-dc-resistance-simplified/> (дата звернення: 03.06.2026).
- 48.CSB Datasheet GP1272 12V28W [Електронний ресурс]. URL: <https://csb-battery.com/wp-content/uploads/2024/07/CSB-Datasheet-GP1272-12V28W-%E2%80%93-053124.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 49.Yuasa NP7-12 Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mdsbattery.co.uk/user/DATASHEETS/yuasa/NP7-12.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 50.Yuasa Leoch DJW12-7.0 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.roussakis.eu/images/pdf/BP/VRLA/DJW12-7.0.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 51.WPS7-12 [Електронний ресурс] // Kung Long Batteries. URL: <https://www.klb.com.tw/products-detail/WPS7-12/> (дата звернення: 03.06.2026).
- 52.Vision Battery product page [Електронний ресурс] // Vision Group. URL: <https://www.vision-batt.com/en/product/show/post-68.html> (дата звернення: 03.06.2026).
- 53.FDS9926A Datasheet [Електронний ресурс] // onsemi. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fds9926a-d.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		93

- 54.BU-903: How to Measure State-of-Charge [Електронний ресурс] // Battery University. URL: <https://www.batteryuniversity.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge/> (дата звернення: 03.06.2026).
- 55.LM338 Datasheet [Електронний ресурс] // Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm338.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).
- 56.TL431A Datasheet [Електронний ресурс] // AllDataSheet. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/415109/FAIRCHILD/TL431A.html> (дата звернення: 03.06.2026).
- 57.Arduino Pro Mini [Електронний ресурс]. URL: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/ProMini> (дата звернення: 03.06.2026).
- 58.Texas Instruments. Maximum Power Enhancement Techniques for Power ICs : Application Report AN-1028 (SNVA036A). Dallas : Texas Instruments, 2013. 12 p.
- 59.Texas Instruments. Semiconductor and IC Package Thermal Metrics : Application Report SPRA953C. Dallas : Texas Instruments, 2016. 31 p.
- 60.Коваль Ю. О., Мартяш Ю. І., Черних О. П. Конструювання радіоелектронної апаратури : підручник. Львів : Новий Світ-2000, 2018. 412 с.
- 61.Борисов О. В., Ковальчук О. А. Теплові режими та системи охолодження електронної апаратури : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 184 с.
- 62.0,01 Ohm 1% 1W 1206 (WW12RR010FTL), резистор SMD WALSIN [Електронний ресурс] // RCS Components. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/0-01-ohm-1-1w-1206-ww12rr010ftl-rezystor-smd_112454.html (дата звернення: 03.06.2026).
- 63.MCP6024 Datasheet [Електронний ресурс] // Microchip Technology Inc. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MSLD/ProductDocuments/DataSheets/MCP6021-Data-Sheet-DS20001685.pdf> (дата звернення: 09.06.2026).

					ДПБ.ПІ-22.01.5390.01.001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		94

ДОДАТОК Б. Схема електрична принципова



ДПБ. ПІ-22.01.5390.01.001.СхЕ				Вимірювач внутрішнього опору та ємності свинцевих акумуляторів джерел безперебійного живлення	
Зм	Архув	Не докум	Підпис	Дата	
Разроб.	Ганчєв С.	Перевір.	Дорожинська Г		
Реценз.	Куц Ю.	Н. контр.	Защепкина Н.		
Запверд.					
				Літера	Архув
				1	1
				Архув	