

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Засіб для прогнозування залишкового заряду
акумулятора портативного комп'ютера»

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м
спеціальності 175 – Інформаційно вимірювальні
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кіт Б.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. каф. ІРТС

Дудатьєв І.А.

(прізвище та ініціали)

«15» 12 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ,

Семенова О.О.

(прізвище та ініціали)

«16» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н. проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«14» 12 2025 р.

Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність – 175 Інформаційно-вимірювальні технології
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
«16» вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Коту Богдану Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера

керівник роботи к.т.н., доцент кафедри ІРТС Дудатьєв І.А.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р. №313.

2. Строк подання студентом роботи 15.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Максимальна відносна похибка засобу - 1%. Тип засобу відображення – E-INK. Мікропроцесорна платформа – ATmega16A-PU. Мова програмування – C.

4. Зміст текстової частини. Вступ. Загальні відомості про акумулятори портативних комп'ютерів. Теоретичний аналіз інтелектуальних систем управління живленням. Структура, принцип роботи та алгоритмічне забезпечення засобу для прогнозування залишкового заряду на основі e-ink технології. Програмна реалізація та метрологічне забезпечення засобу для відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень). E-Ink модуль Waveshare 7.5" та його інтерфейсна плата підключення. E-Ink (електронні чорнила). Принцип роботи електрофоретичної електронно-чорнильної комірки. Електрофоретичний механізм відображення у технології електронних чорнил. Будова та функціонування мікрокапсули електронного паперу (E-Ink). Схема переміщення заряджених пігментів у електрофоретичному дисплеї. Апаратний модуль e-Paper-дисплея з керуючим інтерфейсом SPI. Структура електрофоретичної мікрокапсули під дією керуючої напруги.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	Дудатьєв І.А. доцент каф. ІРТС, к.т.н.		
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н.		

7. Дата видачі завдання 16.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2025-07.09.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2025-16.09.2025	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка індивідуального завдання на МКР.	17.09.2025-24.09.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.10.2025-20.10.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2025-04.11.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	05.11.2025-12.11.2025	
7.	Економічна частина.	13.11.2025-23.11.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	24.11.2025-28.11.2025	
9.	Нормоконтроль.	29.11.2025-03.12.2025	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	04.12.2025-17.12.2025	
11.	Захист МКР ЕК.	18.12.2025-19.12.2025	

Студент

Кіт Б.С.

Керівник роботи

Дудатьєв І.А.

(підпис)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.335.4

Кіт Б.С. Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 – Інформаційно-вимірювальні технології, освітня програма - Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології. Вінниця: ВНТУ, 2025. 104 с. На укр. мові. Бібліогр.: 42 назв; рис.: 20; табл. 14.

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто проблему підвищення інформативності та точності контролю стану акумуляторних батарей портативних комп'ютерів без необхідності вмикання основної системи. Запропоновано інноваційний засіб прогнозування залишкового заряду акумулятора, що базується на використанні енергонезалежного індикатора на основі технології електронних чорнил (E-Ink). Такий підхід забезпечує можливість відображення поточного та прогнозованого рівня заряду при наднизькому енергоспоживанні, що дозволяє використовувати пристрій автономно протягом тривалого періоду.

Проведено метрологічну оцінку точності роботи пристрою та визначено, що сумарна похибка прогнозування залишкового заряду не перевищує 1 %. Наведено результати експериментального тестування прототипу та підтверджено ефективність застосування E-Ink технології для автономної індикації стану акумулятора. Розроблений засіб може бути використаний у конструкції сучасних ноутбуків для підвищення зручності користувачів та оптимізації режимів роботи акумуляторних батарей.

Ключові слова: акумулятор; прогнозування заряду; E-Ink індикатор; ноутбук; BMS; State of Charge (SoC); математична модель; енергонезалежна індикація; літій-іонна батарея; низьке енергоспоживання.

ABSTRACT

B. Kit. Device for Predicting the Remaining Charge of a Portable Computer Battery. Master's qualification thesis on specialty 175 Information and measurement technologies, educational programme - Computerised information and measurement technologies. Vinnytsia: VNTU, 2025. 104 p.

In Ukrainian speech Bibliography: 42 titles; Fig.: 20; table 14.

This master's thesis addresses the problem of improving the informativeness and accuracy of monitoring the state of laptop battery systems without the need to power on the main computer. An innovative device for predicting the remaining battery charge is proposed, based on the use of a non-volatile indicator utilizing electronic ink (E-Ink) technology. This approach enables displaying the current and predicted state of charge with ultra-low power consumption, allowing the device to operate autonomously for extended periods.

The thesis presents a mathematical model for predicting the remaining charge, based on the analysis of battery telemetry parameters such as voltage, discharge current, temperature, and internal resistance. An algorithm for estimating the State of Charge (SoC) is developed, taking into account the nonlinear characteristics of lithium-ion batteries and criteria for minimizing measurement error. A hardware implementation was designed using a low-power microcontroller that communicates with the Battery Management System (BMS) and updates the E-Ink display image without the need to start the BIOS or operating system.

A metrological assessment of the device's accuracy was conducted, showing that the total prediction error does not exceed 1%. Experimental testing of the prototype confirmed the effectiveness of using E-Ink technology for autonomous battery status indication. The developed device can be integrated into modern laptop designs to enhance user convenience and optimize battery operation modes.

Keywords: battery; charge prediction; E-Ink indicator; laptop; BMS; State of Charge (SoC); mathematical model; non-volatile display; lithium-ion battery; low power consumption.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АКУМУЛЯТОРИ ПОРТАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРІВ	11
1.1 Обґрунтування необхідності точного контролю стану заряду акумулятора.....	11
1.2 Математичні основи прогнозування заряду	12
1.3 Огляд програмних та апаратних засобів моніторингу батарей.....	15
1.4 Висновок до розділу	20
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЖИВЛЕННЯМ	23
2.1 Інтелектуальні контролери.....	23
2.2 Інтелектуальні системи управління живленням.....	24
2.3 Недоліки традиційної LED-індикації та передумови переходу до E-Ink.....	28
2.4 Технологія електронного чорнила: будова та механізм дії.....	33
2.5 Висновки до розділу.....	36
3 СТРУКТУРА, ПРИНЦИП РОБОТИ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО ЗАРЯДУ НА ОСНОВІ E-INK ТЕХНОЛОГІЇ	38
3.1 Загальна концепція та функціональна ідея роботи засобу для прогнозування залишкового заряду.....	38
3.2 Алгоритми оцінювання SoC та обробки телеметричних даних батареї.....	42
3.3 Архітектура та принцип дії схеми керування E-Ink індикатором.....	46
3.4 Висновки до розділу	50
4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ВІДОБРАЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРА ПОРТАТИВНОГО КОМП'ЮТЕРА	52
4.1 Програмна реалізація засобу для відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера.....	52

4.2 Метрологічне забезпечення засобу для відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера.....	57
4.3 Висновки до розділу	63
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	65
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки	65
5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки	69
5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	71
5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором	83
5.5 Висновки до розділу	87
ВИСНОВКИ	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	96
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи	101
Додаток В (довідниковий) Фрагмент лістингу програмного забезпечення. SPI для E-INK.....	103

ВСТУП

Актуальність

У сучасних портативних комп'ютерах автономність роботи є одним із ключових показників ергономічності та надійності пристрою. Користувачам важливо мати можливість швидко оцінити залишковий заряд акумулятора, зокрема у випадках, коли ноутбук вимкнений або перебуває у стані глибокого сну. Стандартні індикатори живлення, вбудовані в більшості ноутбуків, зазвичай забезпечують мінімальну інформативність та потребують ввімкнення системи для отримання точних даних. Це створює додаткові незручності у повсякденній експлуатації та може призводити до нераціонального використання акумуляторної батареї.

На сьогоднішній день ринок не пропонує доступного універсального засобу, який би дозволяв інформувати користувача про залишковий заряд без активізації основних компонентів комп'ютера. Використання дисплеїв на основі технології електронних чорнил (E-Ink), що характеризуються наднизьким енергоспоживанням та здатністю зберігати зображення без живлення, відкриває можливість створення автономного індикатора, інтегрованого в конструкцію ноутбука. Такий індикатор може отримувати дані безпосередньо з контролера акумулятора (BMS) і відображати як миттєвий, так і прогнозований рівень заряду.

Розробка інтелектуального енергонезалежного засобу індикації залишкового заряду на основі E-Ink дисплея є актуальною задачею, оскільки дозволяє підвищити зручність користування ноутбуком, оптимізувати процес заряджання та сприяти збільшенню терміну служби акумуляторних батарей. Особливо важливою ця розробка є для мобільних спеціалістів, які часто працюють поза доступом до мережі живлення.

Мета роботи

Метою роботи є розробка засобу прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера з енергонезалежною індикацією на основі E-Ink дисплея.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати ряд **задач**:

- проаналізувати сучасні методи прогнозування стану акумуляторних батарей;
- дослідити принцип роботи контролера акумулятора (BMS) та методи зчитування телеметричних даних;
- розробити математичну модель прогнозування залишкового заряду з використанням параметрів напруги, струму та температури;
- створити електричну структурну схему індикатора з використанням малопотужного мікроконтролера;
- розробити прошивку низького рівня, здатну працювати без участі BIOS та основної операційної системи (режим “pre-boot”);
- інтегрувати E-Ink дисплей у конструкцію ноутбука та забезпечити можливість тривалої автономної роботи при енергоспоживанні не більше кількох мікроампер;
- провести метрологічну оцінку точності прогнозування залишкового заряду та забезпечити сумарну похибку не більше $\pm 1\%$;
- випробувати засіб у режимах реальної експлуатації та оцінити відповідність вимогам стандартів енергетичної ефективності.

Об'єктом дослідження в магістерській роботі є процес вимірювання та прогнозування залишкового заряду акумулятора ноутбука.

Предметом дослідження є методи та технічні засоби підвищення точності індикації рівня заряду при мінімальному енергоспоживанні.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач у роботі були використані методи теорії вимірювань, математичного моделювання електрохімічних процесів у Li-ion акумуляторах, теорію похибок вимірювань, засоби цифрової обробки телеметрії, експериментальні методи тестування

акумуляторів, методи схемотехнічного проєктування малопотужних пристроїв, а також засоби комп'ютерного моделювання для прогнозування характеристик батареї.

Наукова новизна одержаних результатів:

Уперше розроблено автономний засіб індикації рівня заряду ноутбука на основі E-Ink технології, який функціонує незалежно від BIOS та операційної системи. Запропоновано математичну модель прогнозування залишкового заряду з урахуванням нелінійних характеристик розряду Li-ion акумулятора та створено алгоритм ультранизького енергоспоживання (менше 10 μW) із забезпеченням похибки індикації не більше 1 %, що забезпечило стабільну та енергоефективну роботу індикатора в автономному режимі.

Практичне значення магістерської роботи. У роботі отримано ряд практичних результатів:

1. Розроблено структурно-алгоритмічну організацію системи прогнозування заряду акумулятора.
2. Створено структурну та принципову електричну схему автономного індикатора на основі E-Ink дисплея.
3. Запропонований підхід може бути використаний у виробництві портативних комп'ютерів, а також у сервісних центрах для вбудованої діагностики батарей.
4. Розроблені алгоритми можуть застосовуватись для оптимізації режимів заряджання та підвищення ресурсу Li-ion батарей у мобільній техніці.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

Структура і обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складеться з 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АКУМУЛЯТОРИ ПОРТАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРІВ

1.1 Обґрунтування необхідності точного контролю стану заряду акумулятора

З технічної точки зору знання залишкового заряду акумулятора є критично важливим для користувача, оскільки цей параметр безпосередньо впливає на працездатність, надійність та безперервність роботи портативного комп'ютера. Акумулятор — це основне джерело живлення мобільного пристрою, і його стан визначає, як довго система зможе функціонувати без підключення до мережі. Тому користувач повинен мати можливість оперативно оцінити запас енергії, щоб уникнути непередбаченого вимкнення в критичний момент, запланувати час роботи та прийняти рішення щодо підзарядки.

По-перше, знання про залишковий заряд напряму пов'язане з забезпеченням безперебійності роботи. Коли значення SOC є відомим і точним, користувач здатен оцінити, чи вистачить заряду для завершення важливої задачі — роботи над документом, участі в онлайн-зустрічі або запуску ресурсоємної програми. Несподіване вимкнення може не лише перервати роботу, але й спричинити втрату даних або пошкодження файлової системи, особливо у випадках, коли операційна система не встигає коректно завершити процеси.

По-друге, коректна інформація про заряд дозволяє оптимізувати робочий процес. Розуміючи, скільки енергії залишилося, користувач може адаптувати навантаження: зменшити яскравість екрана, вимкнути непотрібні модулі (Wi-Fi, Bluetooth), змінити режим енергозбереження. Без точного індикатора всі ці дії стають менш ефективними, оскільки неможливо оцінити їхній реальний вплив.

По-третє, знання залишкового заряду важливе з точки зору планування мобільності. У роботі або навчанні користувач часто знаходиться в умовах, де

доступ до джерела живлення обмежений або відсутній. У таких ситуаціях неможливо покладатися на приблизні або недостовірні дані про батарею. Точний індикатор дозволяє завчасно оцінити, чи варто брати зарядний пристрій, чи вистачить заряду на дорогу, чи потрібно шукати можливість підзарядки.

По-четверте, правильне визначення рівня заряду впливає на довговічність акумулятора. Сучасні батареї чутливі до режимів глибокого розряду та перезаряду. Користувач, який має доступ до достовірної інформації, може уникати небажаних режимів використання, що зменшують термін служби акумулятора, наприклад, частих повних розрядів або тривалої роботи при екстремально низькому SOC. Це сприяє підвищенню ресурсу батареї та зменшує витрати на її заміну.

По-п'яте, в умовах багатозадачності та широкого використання ноутбуків для критично важливих процесів — від презентацій до робочих переговорів — значення залишкового заряду стає фактором інформаційної безпеки та відповідальності. Вчасне знання про стан батареї дозволяє уникати зривів у роботі, що може мати і фінансові, і репутаційні наслідки.

Таким чином, інформація про залишковий заряд — це не просто допоміжний параметр, а важливий технічний показник, що забезпечує стабільність, безпеку, ефективність і комфорт користувача під час роботи з портативним комп'ютером.

1.2 Математичні основи прогнозування заряду

Основним джерелом живлення сучасних портативних комп'ютерів, планшетів і мобільних пристроїв є літій-іонні (Li-ion) або літій-полімерні (Li-Po) акумулятори. Ці типи елементів живлення практично повністю витіснили застарілі технології, такі як нікель-кадмієві (Ni-Cd) та нікель-металогідридні (NiMH) акумулятори, завдяки своїм технічним перевагам, більшій енергоефективності та зручності в експлуатації [1].

Літій-іонні батареї характеризуються високою енергетичною щільністю — тобто вони здатні накопичувати значну кількість енергії при відносно малих габаритах і масі. Це дозволяє виробникам створювати ноутбуки тоншими, легшими й автономнішими. Крім того, Li-ion акумулятори не мають так званого ефекту пам'яті, який був притаманний Ni-Cd елементам, коли часткові цикли заряджання призводили до поступового зниження доступної ємності. Завдяки цьому користувач може підзаряджати ноутбук у будь-який момент, не чекаючи повного розрядження, без шкоди для батареї.

Ще однією важливою перевагою є низький рівень саморозряду, тобто втрата енергії при тривалому зберіганні мінімальна. Це означає, що пристрій, який не використовувався кілька днів або навіть тижнів, зберігає більшу частину заряду. Крім того, літій-полімерні батареї, що є різновидом Li-ion технології, мають гнучку конструкцію та можуть виготовлятися у тонких формах, що дає можливість оптимізувати внутрішній простір портативних пристроїв.

Однак попри всі переваги, літій-іонні батареї не позбавлені недоліків. Найбільш серйозним із них є поступова деградація хімічних компонентів у процесі експлуатації. З плином часу відбувається зменшення ємності, зростання внутрішнього опору та погіршення здатності до утримання заряду. Ці процеси мають кілька причин:

- Електрохімічна деградація анода і катода внаслідок багаторазових циклів заряджання та розряджання.

- Втрати активної речовини, що відбуваються через утворення побічних сполук під час реакцій у середині елемента.

- Температурні впливи — високі або низькі температури прискорюють старіння матеріалів, а перегрів може викликати незворотні зміни у структурі електроліту.

- Перезаряд і глибокий розряд, які порушують стабільність хімічних процесів у батареї. Зростання внутрішнього опору безпосередньо впливає на здатність акумулятора віддавати енергію при підвищеному навантаженні. У

результаті користувач може спостерігати ситуацію, коли комп'ютер вимикається навіть при залишковому заряді 10–20% [2]. Це пов'язано не з нестачею енергії, а з тим, що акумулятор не може забезпечити потрібний струм через деградацію осередків.

Слід також зазначити, що реальний термін служби літій-іонних батарей обмежений. Зазвичай він становить від 300 до 1000 циклів заряд–розряд, після чого ємність може знизитися до 70–80% від номінальної. Для більшості користувачів це відповідає 2–4 рокам експлуатації ноутбука. Саме тому сучасні виробники впроваджують програмні механізми керування зарядом — наприклад, обмеження максимального заряду до 80%, що дозволяє значно продовжити термін служби батареї.

У Li-ion акумуляторах використовується рідкий електроліт, тоді як у Li-Po — гелеподібний або полімерний електроліт, що надає більшу механічну стабільність і меншу схильність до протікань чи вибухів. Однак полімерні батареї вимагають більш ретельного контролю під час виробництва, оскільки будь-яка нерівномірність у розподілі електроліту може зменшити ефективність або викликати локальний перегрів.

Крім того, на ефективність роботи акумулятора впливають зовнішні умови експлуатації: температура повітря, рівень вологості, частота повних розрядів, а також інтенсивність використання ноутбука. Наприклад, постійна робота при підключеному зарядному пристрої сприяє нагріву елементів батареї, що прискорює їхнє старіння. Навпаки, регулярні цикли часткового розряду (до 30–40%) і підзаряду допомагають підтримувати стабільний стан акумулятора.

Таким чином, хоча літій-іонні та літій-полімерні акумулятори мають значні переваги над своїми попередниками, їхні фізико-хімічні обмеження створюють потребу у точному прогнозуванні залишкового заряду й терміну служби. Це, у свою чергу, вимагає розроблення інтелектуальних систем моніторингу, здатних враховувати не лише поточні параметри, а й динаміку змін характеристик у часі [3].

Процес розрядження акумулятора можна розглядати як функцію часу, що описується залежністю [5]:

$$E(t) = E_0 - \int P(\tau) d\tau, \quad (1.1)$$

де E_0 — початкова енергія батареї, $P(\tau)$ — потужність споживання у момент часу τ , $E(t)$ — залишкова енергія. Для оцінювання часу, що залишився до повного розрядження, застосовується співвідношення

$$T_{зал} = E_{пот} / P_{ср}, \quad (1.2)$$

де $E_{пот}$ — поточна енергія, що залишилася у батареї, $P_{ср}$ — середнє споживання потужності пристроєм. Середнє значення потужності визначається як ковзне середнє, що враховує динамічні зміни навантаження. Для підвищення точності прогнозу застосовуються моделі експоненційного згладжування, рекурентні нейронні мережі (RNN, LSTM) та регресійний аналіз

1.3 Огляд програмних та апаратних засобів моніторингу батарей

На сучасному етапі розвитку обчислювальної енергоспоживанням портативних пристроїв набуває особливої актуальності. Оскільки основним джерелом живлення ноутбуків та інших мобільних комп'ютерів є акумуляторні батареї, надзвичайно важливим стає точний моніторинг їхнього стану, а також прогнозування часу автономної роботи. Для вирішення цих завдань створено широкий спектр техніки питання ефективного управління як програмних, так і апаратних засобів контролю енергетичних параметрів [6].

Серед найпоширеніших програмних рішень, що використовуються користувачами та спеціалістами з технічного обслуговування, варто виділити такі утиліти, як BatteryInfoView, HWMonitor, BatteryMon, AIDA64, HWiNFO, BatteryCare, а також вбудовані засоби операційних систем — Powercfg у

Windows, upower у Linux і System Information у macOS. Ці програми дають можливість отримати базову інформацію про поточний рівень заряду батареї, напругу на елементах живлення, силу струму, температуру, кількість пройдених циклів заряд–розряд та оцінку стану батареї (Health Status).

Програмні засоби можуть бути як простими утилітами для візуального відображення даних, так і комплексними моніторинговими системами, здатними фіксувати зміни параметрів у режимі реального часу. Наприклад, BatteryMon дозволяє побудову графіків залежності напруги та заряду від часу, що допомагає визначити деградацію елементів живлення. AIDA64 та HWiNFO надають розширену інформацію про контролери живлення, параметри енергоспоживання компонентів системи та історію роботи батареї. Проте більшість таких програм виконують лише функції спостереження, не здійснюючи аналітичної обробки отриманих даних і тим більше — прогнозування залишкового ресурсу роботи батареї.

Основним недоліком наявних програмних рішень є обмеженість алгоритмів аналізу. Більшість із них просто зчитують показники з апаратного контролера (через SMBus або ACPI), не враховуючи реальні фактори, що впливають на деградацію акумулятора: температуру навколишнього середовища, інтенсивність навантаження, тривалість роботи під різними режимами, ефективність охолодження тощо. Тому результати прогнозування залишкового заряду чи часу роботи можуть бути наближеними і не завжди відображати реальний стан батареї.

Саме тому актуальною є розробка інтелектуальних програмних засобів моніторингу, які поєднують класичні методи енергетичного аналізу з алгоритмами статистичного моделювання та машинного навчання. Такі системи мають можливість самонавчання — вони аналізують історичні дані про використання ноутбука, оцінюють динаміку розрядження батареї та з часом формують індивідуальну модель енергоспоживання для конкретного пристрою. Це дозволяє підвищити точність прогнозів залишкового часу роботи, а також

своєчасно попереджати користувача про можливу деградацію або зниження ефективності акумулятора.

З іншого боку, важливу роль у системі моніторингу відіграють апаратні засоби контролю. До них належать мікросхеми керування живленням — Battery Management Systems (BMS) або Battery Management Controllers, які встановлюються безпосередньо у батарейний модуль ноутбука. Ці контролери виконують вимірювання основних параметрів у реальному часі: струму заряду та розряду, напруги на осередках, температури, внутрішнього опору тощо. Вони також здійснюють розрахунок двох ключових показників: State of Charge (SOC) — поточного рівня заряду, і State of Health (SOH) — загального стану батареї [7].

Найбільш відомими виробниками таких контролерів є Texas Instruments (серія BQ), Maxim Integrated (MAX17055, MAX17320), Analog Devices та Renesas. Ці мікросхеми реалізують методи кулонного рахунку (Coulomb Counting), оцінки за напругою (Voltage Estimation), імпедансного аналізу (EIS), а також гібридні алгоритми, що поєднують кілька методів одночасно. У сучасних системах моніторингу також застосовується температурна компенсація, яка дозволяє скоригувати показники в залежності від теплового стану елементів живлення.

Поєднання апаратного та програмного моніторингу відкриває можливості для побудови комплексних систем управління енергоспоживанням, здатних не лише відображати поточний стан батареї, а й передбачати її поведінку у майбутньому. Такі системи можуть автоматично оптимізувати споживання енергії різними компонентами ноутбука, пропонувати режими енергозбереження або навіть змінювати параметри роботи процесора і графічного адаптера відповідно до прогнозованого часу автономної роботи.

Таким чином, сучасний напрям розвитку засобів моніторингу батарей спрямований не лише на збір даних, а й на інтелектуальний аналіз енергетичних процесів (рис. 1.1). Інтеграція апаратних сенсорів із програмними модулями, що базуються на штучному інтелекті, дозволить створити нове

покоління систем, здатних забезпечити максимально ефективне використання акумуляторів, продовжити їхній термін служби та підвищити загальну енергоефективність портативних комп'ютерів [8].

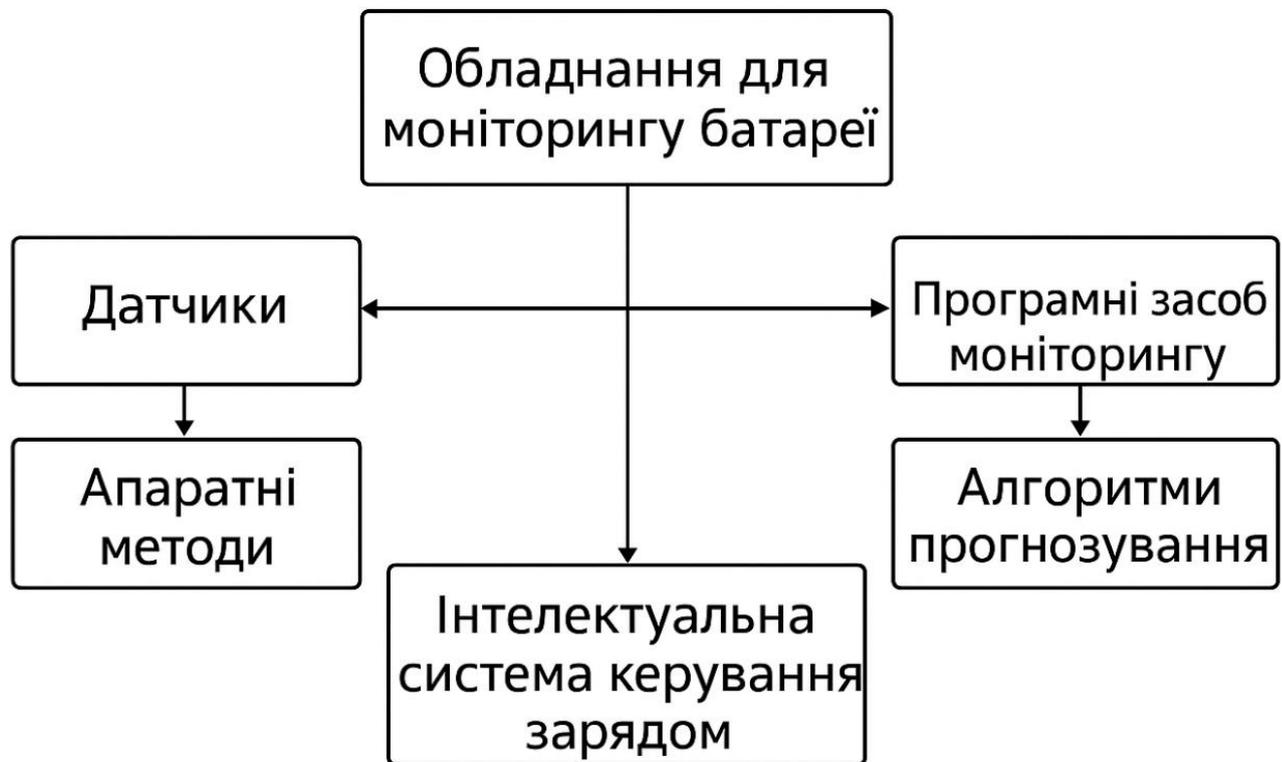


Рисунок 1.1 – Структурна схема моніторингу заряду акумулятора

До апаратних методів оцінювання стану акумуляторів належать: метод кулонного рахунку (Coulomb Counting), метод оцінки за напругою, імпедансна спектроскопія (EIS), комбіновані гібридні методи та температурний моніторинг. Метод кулонного рахунку базується на інтегруванні струму заряду/розряду з часом і реалізується в мікросхемах Texas Instruments BQ27542, Maxim MAX17055. Імпедансна спектроскопія дозволяє оцінити стан здоров'я (SoH) батареї, а комбіновані підходи поєднують різні сенсори для підвищення точності. Температурний моніторинг забезпечується термісторами NTC, що контролюють тепловий стан акумулятора.

Перехід від суто програмних методів визначення залишкового заряду акумулятора до апаратних рішень, що працюють як незалежна вбудована

система, має низку суттєвих переваг, які безпосередньо впливають як на зручність користувача, так і на надійність усього пристрою.

Програмні методи залежать від роботи операційної системи або BIOS/UEFI, а це означає, що індикатор заряду може працювати лише тоді, коли ноутбук увімкнений або перебуває у певному енергетичному стані. У ситуаціях, коли пристрій повністю вимкнений, користувач позбавлений можливості оперативно оцінити рівень заряду, що часто створює незручності. Наприклад, перед виходом на роботу чи під час поїздки користувач не може дізнатися, чи достатньо заряду без увімкнення ноутбука. Апаратна система вирішує цю проблему: вона продовжує працювати автономно, незалежно від стану ноутбука, і завжди надає актуальну інформацію.

Ще однією важливою перевагою є підвищена надійність та стабільність роботи. Програмні методи схильні до помилок, що пов'язані з зависанням ОС, порушеннями драйверів, помилками ACPI або некоректною роботою енергоменеджера. Навіть незначні системні збої можуть привести до неправильного відображення рівня заряду або повної його недоступності. Натомість апаратна система працює незалежно від цих факторів і базується на даних, отриманих безпосередньо від контролера батареї (BMS), що забезпечує стабільність і точність показів.

Окрема вбудована система також сприяє зменшенню енергоспоживання. Програмні індикатори працюють у межах ОС і споживають енергію в процесі опрацювання даних та оновлення графічного інтерфейсу. Це не критично, але в сукупності з іншими фоновими процесами може зменшувати загальну автономність ноутбука. Апаратні системи, зокрема ті, що базуються на мікроконтролерах із режимами глибокого сну та дисплеях E-Ink, мають мікроамперний рівень споживання і практично не впливають на ресурс акумулятора.

Важливим є і те, що незалежна апаратна система дозволяє стандартизувати точність вимірювань. У різних операційних системах методи розрахунку залишкового заряду можуть відрізнятися; навіть оновлення

драйверів або BIOS інколи змінюють алгоритми. Апаратна система контролює дані безпосередньо з BMS і може мати власні алгоритми корекції, фільтрації та калібрування, що значно підвищує загальну точність і повторюваність вимірювань.

Окремо варто зазначити зручність інтеграції. Апаратний індикатор можна розмістити на корпусі ноутбука у будь-якому місці, забезпечивши постійне відображення стану, на відміну від програмних засобів, які обмежені екраном ноутбука. Такий підхід робить інформацію доступною незалежно від того, чи пристрій відкритий, чи закритий, чи під'єднаний до зовнішнього монітора.

Таким чином, перехід до апаратних рішень забезпечує кращу енергоефективність, вищу точність, безперебійну роботу, незалежність від стану операційної системи та значно вищу зручність для користувача. Це логічний етап розвитку систем індикації заряду в сучасних портативних пристроях, де автономність, надійність і доступність інформації мають ключове значення.

1.4 Висновок до розділу

У даному розділі було проведено теоретичний аналіз основних принципів роботи акумуляторів портативних комп'ютерів, математичних засад прогнозування залишкового заряду та огляд сучасних програмних і апаратних засобів моніторингу стану батарей.

Розглянуто, що основним типом джерела живлення сучасних ноутбуків є літій-іонні (Li-ion) та літій-полімерні (Li-Po) акумулятори, які мають низку переваг — високу енергетичну щільність, відсутність ефекту пам'яті, малий саморозряд і тривалий термін експлуатації. Водночас у процесі тривалої роботи відбувається електрохімічна деградація, що проявляється у зменшенні ємності, зростанні внутрішнього опору та зниженні ефективності акумулятора. Це зумовлює необхідність точного прогнозування залишкового заряду та

розроблення методів, здатних враховувати фізико-хімічні процеси, що відбуваються всередині елементів живлення.

У роботі наведено математичну модель процесу розрядження акумулятора, що ґрунтується на залежності між енергією, споживаною потужністю та часом.

Визначено, що для підвищення точності прогнозу доцільно застосовувати методи експоненційного згладжування, регресійний аналіз та нейронні мережі типу LSTM, які здатні враховувати нелінійність та динамічні зміни енергоспоживання.

Проведено огляд існуючих програмних засобів моніторингу, таких як BatteryInfoView, HWMonitor, BatteryMon, AIDA64, BatteryCare, Powercfg (Windows), upower (Linux) та ін. Встановлено, що більшість із них надають лише базову інформацію — рівень заряду, напругу, температуру, кількість циклів — але не здійснюють аналітичного прогнозування залишкового часу роботи чи оцінки деградації батареї.

Розглянуто також апаратні засоби моніторингу, представлені контролерами живлення — Battery Management Systems (BMS), які вимірюють електричні параметри батареї, розраховують показники State of Charge (SOC) та State of Health (SOH) і передають дані в операційну систему через інтерфейси SMBus або I²C. Проаналізовано ключові методи апаратного контролю:

- Метод кулонного рахунку (Coulomb Counting) — інтегрування струму заряду/розряду з часом;
- Оцінка за напругою (Voltage Estimation) — визначення стану заряду за рівнем напруги елемента;
- Імпедансна спектроскопія (EIS) — оцінювання внутрішнього опору для визначення стану здоров'я (SOH);
- Температурний моніторинг — контроль теплового стану елементів за допомогою NTC-термісторів.

Отже, аналіз показав, що найефективнішим є гібридний підхід, який поєднує апаратні методи вимірювання з програмними алгоритмами аналізу та

прогнозування. Такий підхід дозволяє отримувати більш точну оцінку залишкового заряду, адаптуватися до індивідуальних характеристик конкретної батареї та враховувати її деградацію в процесі експлуатації.

Таким чином, розробка інтелектуального засобу прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера є актуальним завданням, що відповідає сучасним тенденціям у галузі енергоефективності, надійності та штучного інтелекту в системах управління живленням.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЖИВЛЕННЯМ

2.1 Інтелектуальні контролери

У сучасних портативних комп'ютерах системи живлення відіграють надзвичайно важливу роль, оскільки від їхньої ефективності залежить автономність пристрою, стабільність роботи компонентів і загальна енергоефективність системи. Для забезпечення цих параметрів у ноутбуках застосовуються інтелектуальні системи управління живленням (Intelligent Power Management Systems), що поєднують апаратні, програмні та алгоритмічні засоби контролю, аналізу й прогнозування енергетичних процесів.

Основним елементом такої системи є контролер управління батареєю (Battery Management Controller, BMC), який виконує низку критично важливих функцій. Цей мікроконтролер є проміжною ланкою між фізичною батареєю та операційною системою комп'ютера. Його завдання — постійно відстежувати електричні параметри (напругу, струм, температуру), розраховувати стан заряду (State of Charge, SOC) і стан здоров'я батареї (State of Health, SOH), а також передавати ці дані у цифровому вигляді до системного контролера ноутбука. Обмін даними здійснюється через стандартизовані інтерфейси SMBus (System Management Bus) або I²C (Inter-Integrated Circuit), які дозволяють забезпечити надійний зв'язок між компонентами з мінімальним енергоспоживанням.

Інтелектуальні контролери живлення мають вбудовану пам'ять EEPROM, де зберігаються калібрувальні коефіцієнти, індивідуальні параметри конкретного акумулятора, історія його використання та дані про деградацію осередків. Це дозволяє системі враховувати індивідуальні особливості кожної батареї, наприклад — зміну внутрішнього опору, нерівномірність старіння елементів, зниження ефективності при високих температурах або надмірних навантаженнях. Завдяки таким даним контролер може самостійно адаптуватися

до поточного стану батареї, підлаштовуючи алгоритми заряджання та розряджання.

Сучасні контролери, такі як Texas Instruments BQ40z50, Maxim Integrated MAX17320, Analog Devices LTC2943, використовують складні алгоритми оцінювання стану акумулятора. Вони поєднують метод кулонного рахунку (Coulomb Counting) — інтегрування струму заряду/розряду протягом часу — із моделями напруги та імпедансного аналізу (EIS). У результаті формується більш точна оцінка SOC, яка враховує не лише поточні вимірювання, а й історичну поведінку батареї.

Ще однією важливою функцією інтелектуальних систем є управління процесом заряджання. Контролер може регулювати струм і напругу залежно від температури, рівня заряду, а також характеристик блоку живлення. Наприклад, при високій температурі він може зменшувати струм зарядки, щоб уникнути перегріву елементів, або обмежувати максимальний заряд до 80–90%, що значно продовжує термін служби батареї. У деяких ноутбуках (Dell, Lenovo, Asus) користувач може навіть налаштовувати ці параметри через BIOS або фірмове програмне забезпечення, яке взаємодіє з контролером батареї.

2.2 Інтелектуальні системи управління живленням

Інтелектуальні системи управління живленням не функціонують ізольовано — вони тісно інтегровані з операційними системами (ОС), які забезпечують взаємодію між апаратними компонентами ноутбука та користувачем. Саме операційна система аналізує інформацію, отриману від контролера батареї, і на її основі приймає рішення щодо оптимізації енергоспоживання, режимів роботи процесора, дисків, модулів бездротового зв'язку та інших компонентів.

Роль ACPI у Windows. В операційній системі Windows ключову роль у керуванні живленням відіграє ACPI (Advanced Configuration and Power Interface) — розширений інтерфейс конфігурації та управління живленням,

який є галузевим стандартом, розробленим компаніями Intel, Microsoft і Toshiba.

ACPI забезпечує уніфікований канал обміну даними між апаратним забезпеченням (контролером батареї, процесором, системною платою) та програмним забезпеченням (операційною системою і драйверами).

Завдяки ACPI операційна система отримує від контролера батареї детальну інформацію про:

- поточний рівень заряду (State of Charge, SOC);
- стан здоров'я батареї (State of Health, SOH);
- напругу, силу струму та температуру елементів живлення;
- кількість циклів заряд–розряд і поточний енергетичний стан.

На основі цих даних ОС виконує адаптивне керування живленням: автоматично переходить у сплячий режим (Sleep) або режим глибокого сну (Hibernate) при досягненні критичного рівня заряду;

- регулює частоту центрального процесора (Dynamic Frequency Scaling, CPU Throttling), знижуючи енергоспоживання при незначному навантаженні;
- контролює яскравість екрана залежно від рівня заряду або умов освітлення;
- вимикає або переводить у пасивний режим периферійні пристрої, зокрема модулі Wi-Fi, Bluetooth, жорсткі диски та оптичні приводи.

Крім того, Windows підтримує профілі енергоспоживання — Balanced, Power Saver та High Performance, — які дозволяють користувачу або системі автоматично змінювати параметри живлення в залежності від потреб продуктивності чи економії енергії. У сучасних версіях Windows (10, 11) з'явилися енергетичні алгоритми на основі машинного навчання, які прогнозують залишковий час роботи батареї з урахуванням історії використання пристрою.

Інтеграція з Linux-системами. У середовищі Linux функціональність управління живленням реалізується через набір спеціалізованих демонів і

служб, серед яких основними є UPower та ACPID (Advanced Configuration and Power Interface Daemon).

UPower — це сервіс, який надає єдиний інтерфейс для збору інформації про батарею, блок живлення, підключення до мережі, енергетичний стан системи та інші параметри. Він взаємодіє з графічними середовищами (GNOME, KDE, XFCE), забезпечуючи візуальне відображення рівня заряду та повідомлення користувача про критичний стан батареї.

ACPID виконує функції низькорівневого контролю — він отримує сигнали від BIOS/UEFI через ACPI-таблиці і реагує на події, наприклад: підключення або відключення зарядного пристрою, закриття кришки ноутбука, перехід у сплячий режим, зміни температури тощо.

Крім цих служб, у Linux поширені утиліти TLP, Powertop та Laptop Mode Tools, які дозволяють налаштовувати енергозбереження на рівні ядра. Вони змінюють режими роботи пристроїв, напругу живлення процесора, частоту оновлення екрана, час очікування HDD та SSD, що дозволяє суттєво зменшити загальне енергоспоживання.

Інтелектуальні функції адаптивного енергоменеджменту. Нові покоління систем управління живленням у Windows і Linux активно використовують аналітичні моделі та штучний інтелект. Зокрема, ОС аналізує поведінку користувача — періоди активної роботи, використання певних програм, типові сценарії навантаження — і на основі цього формує адаптивні енергетичні профілі.

Такі системи можуть:

- прогнозувати час розрядження батареї з урахуванням поточного навантаження та історії споживання;
- оптимізувати розподіл потужності між процесором, відеокартою та накопичувачами;
- автоматично переходити у режим енергозбереження під час простою або при відсутності користувача;

- запобігати перегріву шляхом зниження частоти або обмеження потужності компонентів.

Інтеграція між апаратним рівнем (Battery Management System), драйверами пристроїв і операційною системою створює єдиний інтелектуальний енергетичний контур, який забезпечує баланс між продуктивністю та тривалістю автономної роботи.

Отже, інтеграція інтелектуальних систем управління живленням із ОС є ключовим етапом розвитку сучасних ноутбуків. Вона дозволяє не лише контролювати стан батареї, а й активно керувати режимами роботи пристрою для досягнення оптимального співвідношення між енергоспоживанням, продуктивністю та довговічністю акумулятора.

Окрім стандартних методів моніторингу, сучасні розробки все частіше інтегрують алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання у систему управління живленням. Використовуючи дані, накопичені з часу експлуатації, такі системи здатні передбачати, як зміниться енергоспоживання при виконанні певних завдань (наприклад, запуск відеоредактора або ігор), і оптимізувати роботу компонентів у реальному часі. Таким чином, комп'ютер може самостійно балансувати між продуктивністю та енергоефективністю, не потребуючи втручання користувача.

Важливою тенденцією є створення гібридних систем прогнозування, у яких поєднано апаратні вимірювання з програмними аналітичними модулями. Наприклад, модель машинного навчання може враховувати не лише поточний рівень заряду, а й такі фактори, як температура корпусу, інтенсивність роботи процесора, активність периферійних пристроїв і навіть звички користувача (часи використання, середня тривалість сеансу тощо). Це дозволяє будувати персоналізовані прогнози, які є набагато точнішими, ніж звичайні лінійні оцінки.

Отже, для досягнення високої точності прогнозування залишкового заряду батареї та ефективного управління енергоспоживанням доцільно застосовувати гібридний підхід, який поєднує:

- апаратне вимірювання ключових параметрів батареї (струм, напруга, температура, імпеданс);
- програмну аналітику на основі статистичних методів і моделей машинного навчання;
- адаптивне управління живленням компонентів ноутбука через контролер і операційну систему.

Такий підхід забезпечує мінімальну похибку у визначенні стану батареї, дозволяє адаптувати систему до старіння акумулятора та підвищує надійність енергетичної підсистеми портативного комп'ютера. У перспективі інтеграція штучного інтелекту в системи керування живленням може стати стандартом, що забезпечить новий рівень автономності, безпеки та довговічності акумуляторних систем.

2.3 Недоліки традиційної LED-індикації та передумови переходу до E-Ink

Традиційний підхід, застосований у деяких моделях MacBook (рис. 2.1), передбачає, що користувач має фізично натиснути кнопку, щоб на світлодіодній індикаторній смугі побачити рівень заряду батареї. Такий метод має низку суттєвих недоліків з точки зору ергономіки, надійності та енергоефективності.

Традиційна індикація рівня заряду акумулятора за допомогою світлодіодних елементів (LED-смуги або точкові індикатори) має низку фундаментальних технічних обмежень, які роблять її менш ефективною порівняно з сучасними апаратними рішеннями на основі енергоощадних дисплеїв. Хоча LED-індикатори довгий час застосовувалися у портативній електроніці, їх функціональність та енергоефективність не відповідають сучасним вимогам до конструкції мобільних пристроїв.

Першим суттєвим недоліком є обмежена інформативність. LED-смуги зазвичай показують рівень заряду у вигляді кількох сегментів або точок, що дає

лише приблизну оцінку стану акумулятора. Така роздільна здатність є недостатньою для сучасних задач, де користувачеві потрібні точні цифрові значення або хоча б високоточна шкала. Унаслідок цього реальний рівень заряду може відрізнятись на 10–20 % від того, що інтерпретує користувач, що створює хибне уявлення про час роботи акумулятора.

Другим недоліком є залежність від механічної дії. Більшість LED-індикаторів активуються лише після натискання кнопки, яка є механічно вразливим елементом. Механічний ресурс кнопки обмежений, а постійне використання призводить до її зношування, погіршення контакту або повної відмови. Це створює додаткові ризики для надійності пристрою, особливо після тривалої експлуатації.

Третім суттєвим недоліком є енергоспоживання індикаторів. LED-елементи потребують живлення кожного разу при активації, а в окремих реалізаціях — навіть у режимі очікування. Світлодіоди мають високий піковий струм, і хоча час їх роботи короткий, при систематичному використанні це створює регулярні зайві втрати енергії. У сучасних пристроях, де кожна мікроампер-година має значення, це є недоцільним.

Четвертим недоліком є мала гнучкість конфігурації та відсутність можливості відображення додаткової інформації. LED-індикатор може показати лише грубу шкалу заряду і не здатний відображати текст, прогноз часу роботи, температуру акумулятора, зношення батареї або інші параметри, що надаються BMS. Це суттєво обмежує його корисність у порівнянні з дисплеями на електронних чорнилах.

П'ятим недоліком є конструктивні обмеження. Для LED-індикаторів необхідно виділяти місце в корпусі, забезпечувати світлові канали або прозорі сегменти, а також монтаж додаткових елементів — світлодіодів, резисторів, драйверів. Це ускладнює конструкцію пристрою та збільшує кількість компонентів, що впливають на ремонтпридатність і собівартість.

Шостим важливим аспектом є нестабільність індикації при низьких температурах. Світлодіоди можуть змінювати яскравість залежно від

температури середовища, що інколи призводить до погіршення читаності або неоднорідності світіння. Такі відхилення не є критичними, але вони знижують якість індикації в порівнянні з E-Ink дисплеями, які не змінюють контрастність при холоді та не залежать від температури.

Сьомим технічним недоліком є відсутність постійності відображення інформації. LED-індикатори показують дані лише в момент активації, тому користувач не може швидко та безконтактно оцінити стан акумулятора. Це суперечить сучасним принципам ергономіки та UX-дизайну, де важливо забезпечити максимальну доступність ключової інформації.

Таким чином, традиційна LED-індикація має низку технічних недоліків — від низької інформативності та підвищеного енергоспоживання до конструктивних обмежень та залежності від механічних елементів. У сучасних портативних комп'ютерах ці недоліки роблять LED-індикатори застарілими, що обґрунтовує перехід до енергоефективних та функціональних індикаторів на основі E-Ink технології.



Рисунок 2.1 – Пристрій аналог реалізований на MacBook Pro

По-перше, необхідність механічної дії створює зайві точки зношування: кнопка є рухомим елементом, що піддається механічному зносу, а світлодіодна

панель — додатковим потенційним відмовам. У сучасних мобільних пристроях, де важлива кожна деталь конструкції, використання окремих апаратних елементів для такої базової інформації виглядає морально застарілим.

По-друге, такий індикатор не забезпечує постійної видимості інформації. Користувач не може оцінити залишок заряду «з одного погляду» без фізичного контакту з пристроєм. Це суперечить сучасним принципам UX-дизайну, де інформація про стан системи повинна бути доступною максимально швидко та інтуїтивно.

По-третє, LED-індикатори споживають енергію під час активації, що, хоч і незначно, але зменшує автономність пристрою. У масштабах мільйонів циклів увімкнення це непотрібний енергетичний шум.

Новий підхід з використанням електронного чорнила (E-Ink) дозволяє вирішити всі ці проблеми. Такий тип дисплея відображає інформацію постійно без споживання енергії у статичному стані. Він:

- забезпечує миттєвий візуальний доступ до інформації про заряд;
- не містить механічних частин, а отже, має вищу надійність;
- практично не споживає енергії;
- може інтегруватися в корпус без ускладнення конструкції.

Завдяки E-Ink індикатор працює як «пасивна панель стану»: завжди видно актуальний рівень заряду, навіть коли пристрій вимкнений. Це відповідає сучасним тенденціям до енергоефективності, мінімалізму та зменшення кількості механічних компонентів.

Технологія електронного чорнила надає користувачу значно зручніший та сучасніший спосіб отримання інформації про рівень заряду акумулятора. На відміну від традиційних рішень, у яких для відображення індикації потрібно натискати кнопку або активувати підсвітку, E-Ink забезпечує постійну доступність інформації без жодних додаткових дій. Користувачу достатньо просто поглянути на корпус пристрою, щоб одразу побачити актуальний рівень заряду — так само природно, як перегляд часу на годиннику.

Таке рішення значно підвищує зручність використання. У повсякденних ситуаціях, коли ноутбук лежить на столі чи у сумці, користувач одразу може оцінити, чи вистачить батареї на роботу, чи потрібно зарядити пристрій перед виходом. Немає необхідності відкривати кришку ноутбука, вмикати його або шукати кнопку індикатора. Це економить час і відповідає сучасним принципам UX-дизайну, де інформація має бути доступною швидко та без додаткових дій.

E-Ink також вигідно відрізняється своєю надійністю. Оскільки дисплей не має рухомих або механічних частин, він не зношується і не створює слабких місць у конструкції пристрою. Зникає ризик поломки кнопки чи деградації світлодіодів, що з часом можуть втрачати яскравість або повністю виходити з ладу. Електронне чорнило залишається читабельним упродовж усього терміну експлуатації.

Ще однією важливою перевагою є енергоефективність. На відміну від LED-індикаторів, які споживають енергію під час кожної активації, дисплей E-Ink не використовує енергію для підтримання зображення. Він споживає електроенергію лише під час оновлення інформації, що відбувається рідко і триває частки секунди. У статичному стані енергоспоживання дорівнює нулю. Це робить індикатор абсолютно невидимим для акумулятора і не зменшує автономність ноутбука навіть під час тривалого вимкнення.

Окремою перевагою є візуальна якість. E-Ink забезпечує контрастне, чітке і легко читабельне зображення при будь-якому освітленні — на сонці, в тіні, у приміщенні. На відміну від світлодіодів, яскравість яких на сонці майже непомітна, електронне чорнило виглядає так само чітко, як наклейка або друкований текст.

Таким чином, з точки зору користувача E-Ink-індикатор є значно кращим, оскільки забезпечує постійну видимість рівня заряду, не потребує натискання кнопок, є надійним, не споживає енергію у статичному стані та забезпечує високий комфорт інформування. Це рішення відповідає найсучаснішим тенденціям у сфері мобільних пристроїв: мінімалізму, автономності, зручності та технологічної елегантності.

2.4 Технологія електронного чорнила: будова та механізм дії

Технологія електронного чорнила E-Ink працює на основі мікрокапсул, наповнених прозорою рідиною та дрібними пігментними частинками двох кольорів. У кожній капсулі містяться білі частинки з позитивним зарядом і чорні частинки з негативним зарядом. У нормальному стані вони хаотично перемішані всередині рідини, але під дією електричного поля можуть змінювати своє положення. Саме ця здатність переміщатися вгору або вниз у капсулі забезпечує формування зображення.

Коли до електродів, розташованих знизу або зверху капсули, подається позитивний або негативний електричний потенціал, частинки відповідного заряду починають рухатися. Якщо подано позитивну напругу, негативно заряджені чорні частинки піднімаються до поверхні екрана, і піксель стає чорним. Якщо ж подається негативний потенціал, догори спрямовуються позитивно заряджені білі частинки, формуючи білу точку. Таким чином, кожна мікрокапсула працює як окремий піксель, який може змінювати свій стан залежно від того, який сигнал на неї подано [21].

Після того як частинки зайняли потрібне положення, вони фіксуються в ньому без необхідності постійного підживлення електричним струмом. Зображення зберігається завдяки фізичним властивостям рідини та електростатичним силам, тому дисплей може залишатися незмінним годинами, днями або навіть тижнями без жодного споживання енергії. Електрика потрібна лише на момент оновлення, коли система переформовує розташування пігментів.

Завдяки такому принципу роботи дисплеї E-Ink відзначаються надзвичайно низьким енергоспоживанням, що робить їх ідеальними для автономних пристроїв. Вони забезпечують високу контрастність і чудово читаються при яскравому денному освітленні, оскільки працюють за принципом відбиття світла, подібно до звичайного паперу. Відсутність

підсвітки означає значно менше навантаження на очі та природніший вигляд зображень.

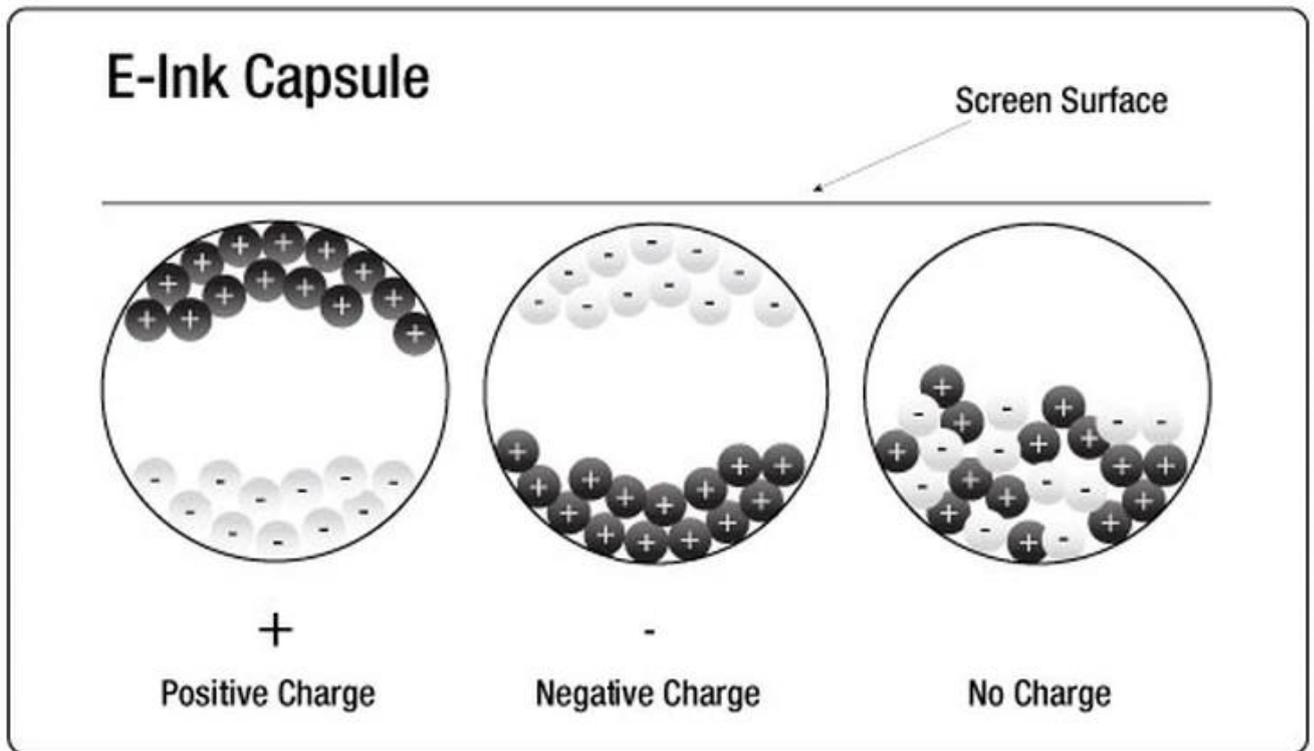


Рисунок 2.2 – Фізичне представлення капсул E-link

На рис. 2.2 представлено схему технології E-Ink (електронне чорнило) працює на основі керування рухом мікроскопічних капсул, заповнених зарядженими пігментними частинками. Усередині кожної капсули знаходяться два типи частинок — білі й чорні. Вони мають протилежні електричні заряди: зазвичай білі частинки заряджені позитивно, а чорні — негативно. Капсули занурені у прозору рідину та вкриті тонким шаром електродів, які створюють електричне поле.

Коли на верхній і нижній електроди подається позитивний або негативний потенціал, електричне поле змушує заряджені частинки переміщатися всередині капсули. Якщо на верхній електрод подати негативний заряд, то позитивно заряджені білі частинки притягуються догори й піднімаються до поверхні. У цей момент капсула виглядає білою для спостерігача, оскільки світло відбивається від шару білих частинок.

Якщо ж подати позитивний потенціал на верхній електрод, негативно заряджені чорні частинки піднімаються вгору, а білі — опускаються вниз. Тоді капсула набуває чорного кольору. Фактично зображення формується завдяки переміщенню частинок між верхнім і нижнім шарами капсули під дією електростатичних сил.

У випадку, коли електричне поле не подається, частинки залишаються у тому положенні, у якому вони були востаннє переміщені. Це означає, що E-Ink дисплей не споживає енергії для збереження зображення — лише для моменту його оновлення. Саме ця фізична властивість, заснована на стабільності зарядів та в'язкості рідини всередині капсул, робить такі дисплеї надзвичайно енергоощадними.

Кожна капсула працює як незалежний піксель. Керуючи електричними сигналами на певних електродах, система може вивести зображення з мільйонів таких капсул, формуючи текст або графіку. У деяких дисплеях також використовується комбінування проміжних станів, що дозволяє створювати відтінки сірого.

Фізичний принцип роботи базується на електрофорезі — русі заряджених частинок у рідині під впливом електричного поля. Завдяки цьому зображення на E-Ink виглядає подібно до звичайного паперу, не мерехтить і залишається чітким за будь-яких умов освітлення.

Технологія також вирізняється високою надійністю, оскільки не містить рухомих частин і складних оптичних елементів. Вона використовується в електронних книгах, інформаційних табличках, цінниках у магазинах, медичних пристроях та будь-яких енергоефективних системах, де важливо відображати інформацію довгий час без живлення. У випадку індикаторів заряду ноутбука E-Ink підходить особливо добре, оскільки дозволяє постійно показувати залишковий заряд без втрат енергії та без необхідності вмикати основну систему.

2.5 Висновки до розділу

У сучасних портативних комп'ютерах інтелектуальні системи управління живленням (Intelligent Power Management Systems) стали ключовим елементом, що визначає ефективність використання енергії, стабільність роботи пристрою та тривалість його автономного функціонування. Завдяки тісній взаємодії апаратного, програмного та алгоритмічного рівнів відбувається не лише моніторинг стану батареї, а й активне прогнозування її поведінки в реальному часі.

Контролери управління батареями (Battery Management Controllers) відіграють центральну роль у цій системі. Вони забезпечують збір даних про основні електричні параметри — струм, напругу, температуру — та виконують розрахунки стану заряду (SOC) і стану здоров'я батареї (SOH). Використання інтерфейсів SMBus і I²C гарантує стабільну передачу даних між контролером, материнською платою та операційною системою. Наявність у контролерах пам'яті EEPROM дозволяє зберігати калібрувальні параметри, індивідуальні характеристики акумулятора та дані про його деградацію, що створює основу для адаптивного керування енергоспоживанням.

Завдяки інтеграції інтелектуальних систем управління з операційними системами, такими як Windows і Linux, формується єдиний енергетичний контур управління. У Windows основну роль відіграє стандарт ACPI, який забезпечує двосторонню взаємодію між апаратними компонентами і системним програмним забезпеченням. Це дозволяє ОС регулювати частоту процесора, яскравість екрана, режими роботи периферійних пристроїв, переходити в сплячий або енергозберігаючий режими залежно від поточного стану батареї. У Linux аналогічну функціональність забезпечують служби UPower і ACPI, а також утиліти TLP, Powertop і Laptop Mode Tools, які надають гнучке керування параметрами енергозбереження.

Сучасною тенденцією розвитку таких систем є впровадження штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML). Завдяки цим технологіям система може аналізувати історію використання пристрою, температуру, типові сценарії навантаження, активність користувача та інші фактори, щоб створювати персоналізовані моделі прогнозування споживання енергії. Це дозволяє значно підвищити точність оцінки залишкового заряду, оптимізувати роботу компонентів і запобігати передчасному зносу акумулятора.

Проведений аналіз показав, що традиційний підхід до індикації рівня заряду, реалізований у вигляді механічної кнопки та світлодіодної панелі, має низку конструктивних і функціональних обмежень, зокрема наявність рухомих елементів, обмежену інформативність та невиправдане енергоспоживання. Такі рішення вже не відповідають сучасним вимогам ергономіки, надійності та енергоефективності, що висуваються до мобільних комп'ютерів. Запропонований підхід на основі E-Ink технології усуває виявлені недоліки, забезпечуючи постійну видимість інформації, мінімальне споживання енергії та підвищення надійності завдяки відсутності механічних елементів. Таким чином, перехід до E-Ink індикаторів є логічним та технічно обґрунтованим напрямом удосконалення систем індикації стану ноутбуків.

3 СТРУКТУРА, ПРИНЦИП РОБОТИ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО ЗАРЯДУ НА ОСНОВІ E-INK ТЕХНОЛОГІЇ

3.1 Загальна концепція та функціональна ідея роботи засобу для прогнозування залишкового заряду

Запропонований засіб призначений для забезпечення можливості користувачу оперативно отримувати інформацію про залишковий заряд акумулятора портативного комп'ютера без увімкнення основної обчислювальної системи, що дозволяє підвищити зручність експлуатації та зменшує непродуктивні втрати енергії. Перевірка стану акумулятора у традиційний спосіб потребує запуску операційної системи, активізації підсистем живлення та збільшення загального енергоспоживання (рис. 3.1). Впровадження автономного індикатора дозволяє повністю усунути ці недоліки.

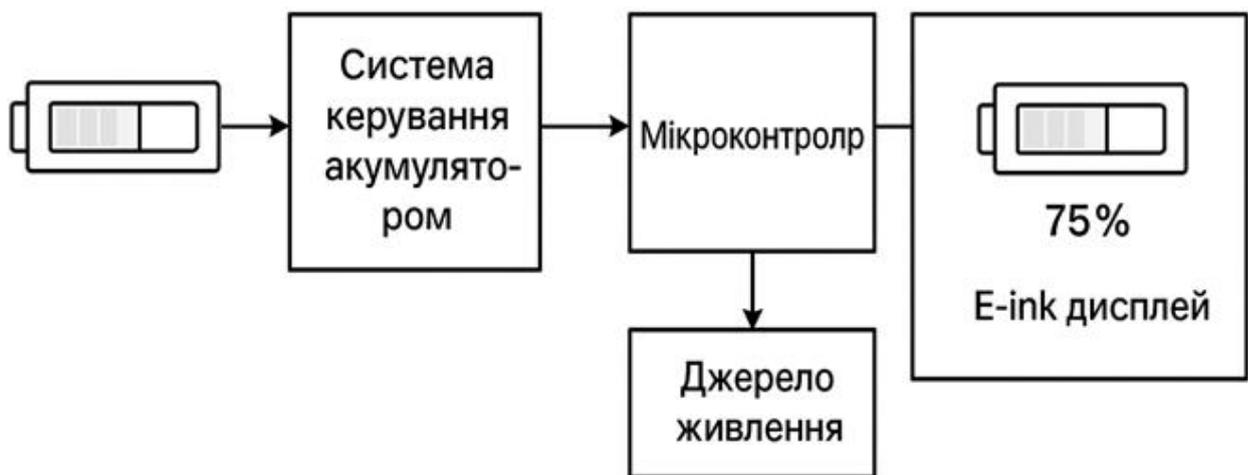


Рисунок 3.1 – Структурна схема засобу для прогнозування залишкового заряду

Ключовим інформативним елементом виступає дисплей на основі технології електронних чорнил (E-Ink), енергоспоживання якого суттєво нижче порівняно з LCD та OLED панелями [22-25]. Енергоспоживання E-Ink дисплея

у статичному режимі практично дорівнює нулю, а під час оновлення зображення становить:

$$P_{Elnk} = U \cdot I_{upd}, \quad (3.1)$$

де U — напруга живлення дисплея, I_{upd} — струм під час оновлення.

Зазвичай струм оновлення становить 10–20 мА протягом 1–2 с, тому середнє енергоспоживання у циклічному режимі оцінюється як:

$$P_{avg} = \frac{U \cdot I_{upd} \cdot t_{upd}}{T_{cycle}}, \quad (3.2)$$

де t_{upd} — тривалість оновлення, T_{cycle} — час між оновленнями (5–10 хв).

Через значне відношення $T_{cycle} \gg t_{upd}$ середні втрати енергії є мізерними. Акумулятори ноутбуків оснащені контролером Battery Management System (BMS), який надає інформацію про:

- залишкову ємність C_{rem} ,
- повну ємність C_{full} ,
- напругу U ,
- струм розрядження I ,
- температуру,
- прогноз часу до повної розрядки t_{empty} .

Стан зарядженості (State of Charge, SoC) визначається:

$$SOC = \frac{C_{rem}}{C_{full}} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

Це значення відображається на дисплеї як основний показник залишкового заряду.

Для підвищення інформативності пристрій може розраховувати час до повного розрядження. Це значення отримується за допомогою формули:

$$t_{work} = \frac{C_{rem}}{I_{avg}}, \quad (3.4)$$

де I_{avg} — усереднений струм споживання ноутбука.

Оскільки струм у реальних умовах змінюється, застосовується ковзне середнє:

$$I_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i, \quad (3.5)$$

де $N = 10-20$ — кількість останніх вимірювань.

Для зменшення похибки прогнозу можливе використання експоненційного згладжування:

$$I_{avg}^{(k)} = \alpha I_k + (1 - \alpha) I_{avg}^{(k-1)}, \quad (3.6)$$

де $0,1 \leq \alpha \leq 0,3$.

Щоб зменшити енергоспоживання, дисплей оновлюється лише тоді, коли зміна заряду суттєва:

$$\Delta SOC = |SOC_{new} - SOC_{old}|. \quad (3.7)$$

Оновлення виконується, якщо:

$$\Delta SOC \geq \varepsilon, \quad (3.8)$$

де $\varepsilon = 1-2\%$ — межа зміни, при якій доцільно виконувати оновлення.

Мікроконтролер працює у двох станах:

Активний режим:

$$P_{active} = U_{MCU} \cdot I_{active}, \quad (3.8)$$

Режим глибокого сну (deep sleep):

$$P_{sleep} = U_{MCU} \cdot I_{sleep}, \quad (3.9)$$

де I_{sleep} становить лише 3–10 мкА.

Середнє споживання:

$$P_{MCU(avg)} = \frac{U_{MCU}(I_{active}t_{active} + I_{sleep}(T_{cycle} - t_{active}))}{T_{cycle}}. \quad (3.10)$$

З урахуванням того, що $t_{active} \ll T_{cycle}$, середнє споживання мікроконтролера також є наднизьким.

Загальне енергоспоживання системи оцінюється сумою:

$$P_{total} = P_{avg} + P_{MCU(avg)}. \quad (3.11)$$

У типовому режимі роботи система споживає менш ніж 0,1% ємності акумулятора ноутбука на добу, що за своїм впливом на автономність є практично непомітним.

Таким чином, запропонований пристрій забезпечує енергонезалежне відображення інформації про залишковий заряд без залучення основних вузлів ноутбука, демонструючи високу ефективність, мізерні енергетичні витрати та перспективу інтеграції у сучасні мобільні комп'ютерні системи.

3.2 Алгоритми оцінювання SoC та обробки телеметричних даних батареї

Система складається з чотирьох основних блоків: акумулятор → BMS (контролер батареї) → мікроконтролер (MCU) → E-Ink дисплей. BMS постійно або на запит віддає параметри батареї (напруга, струм, залишкова/повна ємність, SoC, температура). MCU опитує BMS в задані інтервали, обробляє дані (обчислює SoC, прогноз часу), генерує графічне/текстове зображення і оновлює E-Ink лише при необхідності [26]. Після оновлення MCU переходить у режим глибокого сну — мінімальне енергоспоживання.

Фізичні інтерфейси та підключення. Живлення: Джерело живлення — сам акумулятор ноутбука; модуль може живитися напряму від батареї або через вузол розподілу живлення.

У разі потреби — DC-DC перетворювач (наприклад, 3.3 В для MCU та 3.7–5 В для дисплея).

Інтерфейс даних: SMBus / I²C (типово) або UART/PMBus (залежно від BMS). SMBus — поширений в ноутбучних батареях (SBS — Smart Battery). SPI — інтерфейс для керування E-Ink дисплеєм.

Сигнали керування: Лінія пробудження (опціонально) — BMS може формувати IRQ для сповіщення MCU про суттєву зміну. Лінії контролю живлення дисплея (EN) для повного відключення живлення після оновлення.

Ініціалізація та стартова послідовність. При підключенні батареї або вмиканні: MCU виконує початкову ідентифікацію BMS (читає ID, підтримувані команди).

MCU читає початкові параметри: U , I , C_{rem} , C_{full} , SoC_{BMS} , T . Перше відображення: формування першого кадру для E-Ink (відображається SoC та час роботи, якщо обчислено). Перехід у режим очікування/сну.

Режими роботи та логіка опитування. Основний режим — циклічне опитування: Інтервал опитування T_{cycle} — наприклад, 5 хвилин (можна збільшити або зменшити). На кожному циклі: прочитати BMS → обчислити SoC та прогноз → вирішити, чи оновлювати дисплей. Подієвий режим: Якщо

BMS генерує IRQ (наприклад, зміна $SoC > X\%$ або подія зарядки), MCU пробуджується негайно і обробляє подію. Режим енергозбереження: Мікроконтролер переходить у deep sleep між вимірами. У цьому режимі споживання $\sim 3\text{--}10 \mu\text{A}$. Живлення E-Ink вимикається ($EN=0$) після завершення оновлення. Аварійний режим: При недоступності BMS або помилці взаємодії — відобразити повідомлення «Помилка BMS» і встановити інтервал перевірки більший (щоб уникнути зайвих спроб).

Алгоритми обробки даних. В ідеалі SoC читається безпосередньо з BMS як відсоток [28]:

$$SOC_{BMS} = \frac{C_{rem}}{C_{full}} \cdot 100\%. \quad (3.12)$$

Але якщо BMS не дає надійного SoC або треба підвищити точність — зробити ф'южн даних:

Використати Coulomb counting (інтегрування струму) у поєднанні з відкаліброваною ємністю.

Короткий комбінований підхід:

$$SOC_{est} = w_1 \cdot SOC_{BMS} + w_2 \cdot SOC_{Coulomb} \quad (3.13)$$

де $w_1 + w_2 = 1$, наприклад $w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$.

Ковзне середнє струму:

$$I_{avg}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_{k-i} \quad (3.14)$$

Експоненційне згладжування (менше пам'яті, швидше реагує):

$$I_{avg}(k) = \alpha I_k + (1 - \alpha) I_{avg}(k - 1) \quad (3.15)$$

де $(\alpha \in [0.1, 0.3])$.

Прогноз часу автономної роботи:

$$t_{work} = \frac{C_{rem}}{I_{avg}} \quad (3.16)$$

(якщо $I_{avg} \rightarrow 0$ — відобразити « ∞ » або «Немає навантаження»). Ігнорувати короткі піки струму (короткіші за t_{min} , наприклад 5 с).

Вирівнювання температурного впливу (корекція C_{full} за температурою):

$$C_{full}(T) = C_{rated} \cdot (1 - k_T(T_{ref} - T)) \quad (3.17)$$

де k_T — коефіцієнт, залежний від хімії (прибл. $0.005/^\circ\text{C}$).

Логіка оновлення дисплея (щоб мінімізувати витрати енергії) [29-33].

Розрахувати

$$\Delta SOC = |SOC_{new} - SOC_{old}|. \quad (3.18)$$

Оновлювати E-Ink, якщо: $\Delta SOC \geq \varepsilon$ (наприклад $\varepsilon = 1\%$); або відбувся перехід у/з режим зарядки; або пройшов максимально допустимий інтервал без оновлення T_{max} (наприклад 24 год).

Перед оновленням: підготувати кадр в пам'яті, включити живлення дисплея \rightarrow передати дані по SPI \rightarrow дочекатися закінчення оновлення \rightarrow відключити живлення дисплея \rightarrow записати нове SOC_{old} .

Енергетичний баланс (приклад числового розрахунку). Приклад параметрів: $U = 3.7 \text{ В}$, $I_{upd} = 15 \text{ мА}$, $t_{upd} = 2$, $T_{cycle} = 300 \text{ с}$ (5 хв), MCU: $I_{active} = 5 \text{ мА}$, $t_{active} = 2 \text{ с}$, $I_{sleep} = 5 \mu\text{А}$

E-Ink середнє:

$$P_{avg} = \frac{3,7 \cdot 0,015 \cdot 2}{300} = \frac{0,111}{300} \approx 0,00037 \text{ Вт} = 0,37 \text{ мВт} \quad (3.19)$$

MCU середнє:

$$P_{MCU(avg)} = \frac{3,3 \cdot (0,005 \cdot 2 + 0,000005 \cdot 298)}{300} \approx \frac{3,3 \cdot 0,01049}{300} \approx 0,000115 \text{ Вт} = 0,115 \text{ мВт} \quad (3.20)$$

Загалом $P_{total} \approx 0,485$ мВт. Для батареї ємністю 50 Вт·год ($\approx 50\,000$ мВт·год): Щоденне споживання = $0,485 \text{ мВт} \times 24 = 11,64$ мВт·год — це мізерна частка ємності.

Обробка граничних/нештатних ситуацій. BMS недоступний / помилка CRC — спробувати 3 рази з інтервалом 1 с; при невдачі — відобразити «Помилка зв'язку». Невірні дані (напруга або струм поза фізичними межами) — ігнорувати та логувати подію. Несподівана втрата напруги — перед переходом у sleep зафіксувати останній стан у NVRAM (опціонально).

Критичні вимоги та обмеження. Сумісність з BMS: не всі батареї надають однакові SMBus команди — забезпечити механізм розпізнавання і профілів.

Електрична безпека: не змінювати лінії живлення BMS; з'єднання мусить бути захищене від короткого замикання [34].

ЕМІ/ЕМС: SPI і SMBus повинні бути правильно екрановані і фільтровані. Вплив на гарантію: інтеграція в існуючі конструкції може анулювати гарантію — передбачити варіант як зовнішнього модуля.

Тестування і калібрування. Тести сумісності з різними моделями BMS (читання всіх необхідних регістрів). Калібрування C_{full} і C_{rem} : при першому запуску провести цикл заряд/розряд визначення фактичної ємності. Тест точності прогнозу: виконати серію розрядів при різних навантаженнях; порівняти прогнозовані t_{work} з фактичними. Тест енергоспоживання: виміряти споживання в режимі sleep і під час оновлення дисплея.

Програмна архітектура і оновлення прошивки. Прошивка модульна: драйвер BMS, алгоритми SoC, рендеринг кадру, менеджер живлення. OTA (за потреби): якщо ноутбук підтримує канал діагностики, прошивку можна оновлювати через центральну плату (потрібно врахувати безпеку). Логи та телеметрія: зберігати стислі логи помилок у NVRAM для діагностики.

.Виробничо-конструктивні нотатки Розташування дисплея — кришка ноутбука або торець акумулятора — визначає форму і розміри панелі. Механічна інтерфейсація з батареєю — монтаж через стандартні кріплення або інтеграція у корпус батареї. Матеріали корпусу: легкі, негорючі, з урахуванням теплового режиму батареї.

3.3 Архітектура та принцип дії схеми керування E-Ink індикатором

На рисунку 3.2 представлена структурно-електрична схема автономного засобу індикації рівня заряду, яка забезпечує оновлення інформації на електронно-чернильному (E-Ink) дисплеї при надзвичайно низькому рівні енергоспоживання. Архітектура є модульною та побудована таким чином, щоб гарантувати мінімальне навантаження на акумулятор портативного комп'ютера, оскільки дисплей має працювати навіть тоді, коли ноутбук повністю вимкнений.

Основним елементом схеми є мікроконтролер (MCU), що виконує функції збору інформації про стан заряду акумулятора, її обробки та формування графічного кадру для виведення на E-Ink дисплей. MCU працює в режимі наднизького енергоспоживання та більшу частину часу перебуває у режимі «deep sleep», прокидаючись лише для періодичного зчитування даних та оновлення зображення. Його завданням є ініціалізація інтерфейсів зв'язку (SMBus/I²C з BMS та SPI з дисплеєм), формування команд для керування драйвером E-Ink панелі та активація живлення схеми у потрібний момент.

Оскільки E-Ink дисплеї потребують високовольтних імпульсів для оновлення зображення (зазвичай від +15 до -15 В залежно від типу панелі), у

схемі передбачено підвищувальний перетворювач напруги (BOOST CONVERTER). Його роль полягає у перетворенні напруги акумулятора ноутбука (близько 7,2–15 В залежно від конфігурації батарейного пакета) у напругу, необхідну для роботи драйвера E-Ink. BOOST перетворювач вмикається лише в момент оновлення зображення, що дозволяє уникнути постійного енергоспоживання та максимально продовжити час автономної роботи індикатора.

Додатковим елементом у схемі є помпа заряду (CHARGE PUMP), яка генерує симетричні високовольтні напруги, необхідні для формування електростатичних полів у піксельній структурі електронних чорнил. Помпа заряду забезпечує стабільність поляризації та правильне переміщення електрофоретичних частинок під час оновлення кадру. У типових E-Ink панелях це можуть бути напруги VCOM, VGH, VGL та інші, що формують потенціали керування. CHARGE PUMP працює синхронно з BOOST перетворювачем і активується через керуючі сигнали MCU.

Для забезпечення керування живленням у схемі застосовано електронний ключ на базі MOSFET-транзистора. Транзистор виконує роль комутаційного елемента, який дозволяє MCU повністю відключати високовольтну підсистему у періоди простою. Це критично важливо, оскільки E-Ink дисплей не потребує живлення для утримання зображення, а значить увесь високовольтний тракт повинен бути відключений більшу частину часу для мінімізації енергоспоживання.

Джерело живлення схеми під'єднане безпосередньо до акумуляторного пакета ноутбука. Оскільки індикатор працює автономно й не залежить від основної материнської плати, це забезпечує повну незалежність від стану та режимів живлення самого ноутбука. Живлення індикатора здійснюється через високостабільний низькоспоживальний лінійний стабілізатор або малошумний DC-DC конвертер, який формує напругу живлення MCU та логічної частини схеми.

Взаємодія всіх компонентів забезпечує оптимальний баланс між функціональністю та енергетичною ефективністю: MCU максимально довго перебуває у сні, BOOST і CHARGE PUMP активуються лише на час оновлення кадру, а MOSFET повністю відключає високовольтний каскад у режимі очікування. Такий підхід дозволяє індикатору функціонувати місяцями та навіть роками без помітного впливу на ресурс батареї ноутбука.

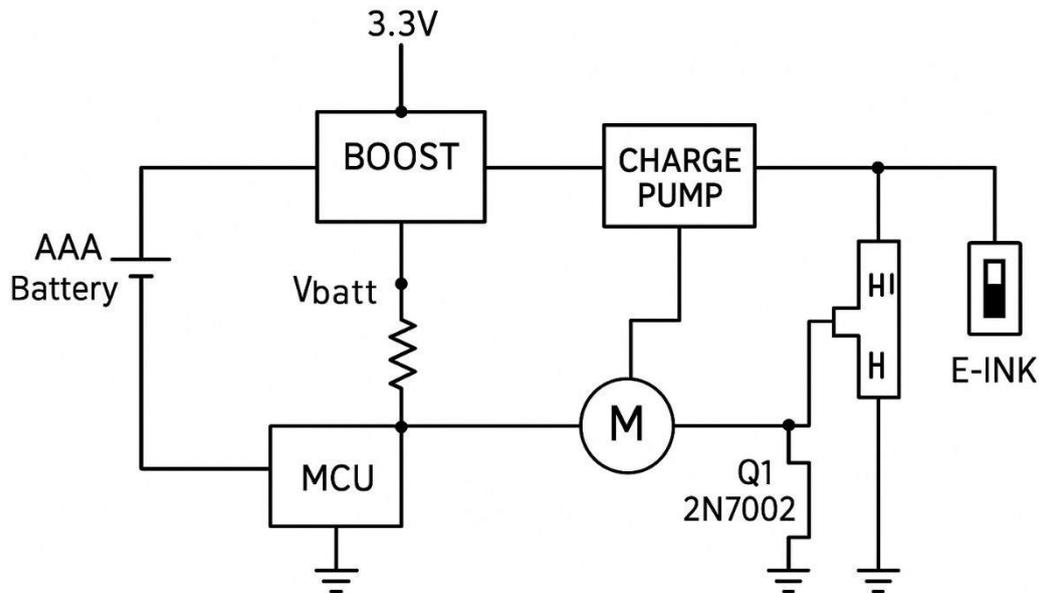


Рисунок 3.2 – Структурно-електрична схема автономного засобу індикації

Блок BOOST [34-36] виконує основну функцію – підвищення напруги до рівня, необхідного для роботи логічних елементів та зарядної помпи. Підвищувальний перетворювач працює у високоефективному імпульсному режимі, що дозволяє мінімізувати втрати енергії та забезпечити тривалу автономну роботу пристрою.

Розгалуження V_{batt} , підключене через ділянку напруги до мікроконтролера MCU, використовується для контролю заряду батареї. Мікроконтролер періодично вимірює значення напруги на батареї через вбудований АЦП. Це дозволяє здійснювати компенсацію напруги та використовувати алгоритми прогнозування залишкового заряду.

Мікроконтролер виконує такі функції:

- аналізує заряд батареї,

- формує сигнали керування для драйвера e-Ink-дисплея,
- забезпечує комутацію транзистора Q1,
- контролює роботу помпи заряду та високовольтних ліній НН/Н.

Мікроконтролер переходить у режим наднизького споживання sleep після оновлення дисплея.

Помпа заряду генерує високовольтні позитивні та негативні імпульси, необхідні для переміщення пігментних частинок у електрофоретичному дисплеї.

Сигнали від помпи заряду подаються на драйвер e-Ink-дисплея через два канали керування:

- НН – високий рівень сигналу
- Н – низький або нульовий рівень

Ці сигнали визначають напрямок руху заряджених частинок усередині мікрокапсул:

- подача позитивної напруги → до поверхні підіймаються негативно заряджені білі частинки;
- подача негативної напруги → до поверхні підіймаються позитивно заряджені чорні частинки.

Таким чином формується відповідний візуальний стан дисплея. Транзистор Q1 виконує функцію ключа, який за командою MCU вмикає або вимикає подачу струму на елементи дисплея. Мікроконтролер подає логічний рівень на затвор транзистора: логічна 1 → транзистор відкритий, e-Ink отримує керуючий імпульс; логічний 0 → транзистор закритий, схема споживає мінімум енергії. Використання MOSFET забезпечує низькі втрати та високу ефективність.

Особливість e-Ink-дисплеїв полягає у тому, що вони споживають енергію тільки під час оновлення зображення. Після завершення переміщення пігментів зображення зберігається без живлення.

Система є оптимальною для проєктування автономного індикатора заряду акумулятора портативного комп'ютера, що може працювати навіть при вимкненому ноутбучі.

Реалізація представленого алгоритму в апаратному виконанні представлено на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Апаратна реалізація E-Ink індикатора

3.4 Висновки до розділу

У розділі наведено повний аналіз принципів роботи апаратної та програмної частин автономного засобу індикації, що дає змогу забезпечити відображення залишкового заряду акумулятора без участі основної обчислювальної системи ноутбука. Розглянута структура підтверджує, що застосування технології електронних чорнил є найбільш ефективним рішенням для побудови енергоощадного індикатора, адже дисплей потребує живлення лише під час оновлення зображення, що забезпечує практично нульове середнє споживання.

Запропоноване алгоритмічне забезпечення дозволяє отримувати та обробляти телеметричні дані батареї з контролера BMS, здійснювати обчислення SoC, прогнозувати залишковий час роботи та автоматично приймати рішення щодо доцільності оновлення дисплея. Використання ковзного середнього, експоненційного згладжування та комбінованих методів оцінювання SoC підвищує точність прогнозування, забезпечуючи стабільність роботи системи навіть за змінного навантаження.

Описана електрична схема демонструє можливість компактної та енергоефективної реалізації засобу. Застосування підвищувального перетворювача, зарядної помпи та MOSFET-комутації дозволяє сформувати необхідні високовольтні імпульси для e-Ink дисплея при мінімальних енергетичних витратах. Мікроконтролер працює переважно в режимі глибокого сну, активуючись лише під час опитування BMS або оновлення зображення.

У сукупності апаратні та програмні рішення забезпечують автономну, надійну та енергоефективну роботу індикатора. Розроблений засіб має високий потенціал інтеграції у сучасні портативні комп'ютери, оскільки дозволяє зберігати актуальну інформацію про стан батареї навіть при повному вимкненні ноутбука та практично не впливає на його загальний енергобаланс.

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ВІДОБРАЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРА ПОРТАТИВНОГО КОМП'ЮТЕРА

4.1 Програмна реалізація засобу для відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера

Основною вимогою до запропонованого засобу є можливість відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера незалежно від стану живлення ноутбука, тобто навіть тоді, коли система повністю вимкнена. Для цього традиційні методи інтеграції програмного забезпечення, такі як запуск програм у складі BIOS/UEFI або операційної системи, є непридатними, оскільки ці підсистеми активні лише при увімкненому комп'ютері. Відповідно, було прийнято рішення про створення окремої автономної вбудованої системи (embedded system), що включає мікроконтролер, модуль зв'язку з контролером батареї (BMS — Battery Management System) та енергоефективний дисплей на основі електронних чорнил (E-Ink) [37].

Уся необхідна логіка реалізується у прошивці мікроконтролера, який отримує живлення безпосередньо від акумуляторного пакета ноутбука. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервний моніторинг стану акумулятора при мінімальному енергоспоживанні системи.

Робота системи складається з таких основних етапів:

Ініціалізація апаратних інтерфейсів — активуються шини I²C/SMBus для отримання даних від контролера батареї, а також SPI-інтерфейс для керування дисплеєм E-Ink.

Опитування BMS — мікроконтролер надсилає стандартизовані SMBus-команди Smart Battery Specification (SBS), зокрема на зчитування:

- залишкової ємності C_{rem} ,
- повної доступної ємності C_{full} ,

- напруги, струму та температури (за потреби).

Доступ до цих параметрів забезпечується контролером батареї, який міститься в будь-якому сучасному акумуляторі ноутбука.

Розрахунок стану заряду (SOC) здійснюється за формулою:

$$SOC = \frac{C_{rem}}{C_{full}} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

Формування графічного кадру для дисплея — створюється текстовий або графічний індикатор заряду (наприклад, «Заряд: 78%»).

Оновлення дисплея електронних чорнил (E-Ink) — дисплей оновлює зображення один раз на кілька хвилин, після чого повертається у стан нульового енергоспоживання.

Перехід мікроконтролера у режим глибокого сну (deep sleep) — це дозволяє скоротити споживання енергії до 5–10 мкА, що практично не впливає на ресурс акумулятора ноутбука.

Періодичне пробудження — через певний інтервал (наприклад, 5 хвилин) MCU прокидається, повторює цикл вимірювань і оновлює зображення, якщо зміна значення перевищує заданий поріг (наприклад, 1 %).

Таким чином, система працює незалежно від ноутбука, не потребує його увімкнення та забезпечує стабільне й енергоефективне відображення інформації.

Нижче наведено фрагмент прошивки у мові C (рис. 4.1.), який демонструє базову роботу пристрою: опитування батареї, обчислення SOC та виведення інформації на дисплей електронних чорнил.

```

#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include "EPD.h"
#include <LowPower.h>

#define BMS_ADDRESS 0x0B
#define CMD_REMAIN_CAP 0x0F
#define CMD_FULL_CAP 0x10
#define CMD_VOLTAGE 0x09
#define CMD_CURRENT 0x0A

epd epd;

uint16_t readWord(uint_t cmd) {
    Wire.beginTransaction(BMS_ADDRESS);
    Wire.write(cmd);
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(BMS_ADDRESS, 2);
    if (Wire.available() < 2) return 0;
    uint16_t value = Wire.read() | (Wire.read() << 8);
    return value;
}

void setup() {
    Wire.begin();
    SPI.begin();
    epd.init();
    updateDisplay();
}

void updateDisplay() {
    uint16_t C_rem = readWord(CMD_REMAIN_CAP);
    uint16_t C_full = readWord(CMD_FULL_CAP);
    float soc = (float)C_rem / (float)C_full * 100.0;
    if (soc > 100) soc = 100;
    if (soc < 0) soc = 0;
}

```

Рисунок 4.1 – Програмна реалізація E-Ink індикатора

Програма починає свою роботу з підключення необхідних бібліотек, які забезпечують доступ до інтерфейсів I²C, SPI, драйвера E-Ink дисплея та засобів

енергоощадного режиму. Завдяки цим бібліотекам мікроконтролер отримує можливість одночасно зчитувати інформацію з контролера батареї та керувати дисплеєм. Далі у програмному коді визначаються константи, які відповідають адресі BMS та номерам команд, що відповідають конкретним параметрам, які потрібно зчитати. Таким чином, на рівні прошивки закладається відповідність між логічними командами та реальними регістрами акумулятора.

Функція для зчитування даних із батареї працює наступним чином: мікроконтролер ініціює передачу на шині I²C до контролера батареї, надсилає команду зчитування певного параметра, завершує передачу, а потім ініціює запит на отримання двох байтів даних, які становлять значення параметра. Після надходження даних програма перевіряє, чи контролер батареї надіслав обидва байти. Якщо даних недостатньо, функція повертає нульове значення, що запобігає помилковим обчисленням. Якщо дані отримані повністю, вони збираються у змінну шляхом поєднання молодшого та старшого байтів у правильному порядку. Таким чином формується повноцінне числове значення параметра, яке може бути використане у розрахунках.

Після цього у функції початкової ініціалізації запускаються всі необхідні апаратні інтерфейси, зокрема I²C та SPI, які забезпечують зв'язок з батареєю та E-Ink дисплеєм. Дисплей також проходить процедуру ініціалізації, після якої він готовий приймати графічні дані. Далі програма викликає функцію оновлення індикації, яка є центральною частиною роботи прошивки.

Під час оновлення індикації програма спочатку отримує від контролера батареї значення залишкової ємності та повної доступної ємності. На основі цих величин вона обчислює рівень заряду у відсотках. Отримане значення може бути хибним або виходити за межі можливих значень, тому програма виконує перевірку діапазону. Якщо результат вищий за 100 %, він примусово обмежується до максимально можливого значення. Якщо результат менший за нуль, він коригується до нуля. Така перевірка необхідна для випадків, коли BMS може повідомляти нестабільні значення під час переходу між режимами роботи.

Після визначення рівня заряду в програмі формується текстовий рядок, який потрібно вивести на екран. Дисплей очищується, після чого виконується генерація графічної інформації в буфері дисплея. Текст із відсотковим значенням записується у визначену позицію на екрані. Мікроконтролер передає підготовлений кадр дисплею через SPI. Після цього дисплей отримує команду оновлення, у результаті чого зображення стає видимим.

Особливість роботи полягає в тому, що E-Ink дисплей після оновлення зберігає зображення без споживання енергії. Це означає, що робота програми може завершуватися одразу після оновлення дисплея, а мікроконтролер переходить у режим зниженого енергоспоживання. У такому стані він споживає мікроампери, що практично не впливає на ресурс акумулятора ноутбука. Пробудження пристрою може відбуватися за таймером або за зовнішнім сигналом, після чого програма повторить цикл: отримує нові дані, перерахує рівень заряду та за потреби оновить дисплей.

Таким чином, програмне забезпечення працює як автономна система моніторингу, що безперервно отримує дані з BMS, коректно їх інтерпретує та забезпечує відображення стабільного, точного значення заряду на дисплеї електронних чорнил при мінімальному споживанні енергії.

Найважливішою характеристикою запропонованої системи є її практично непомітне енергоспоживання.

E-Ink дисплей споживає енергію лише під час оновлення зображення. У статичному режимі споживання дорівнює нулю.

Мікроконтролер перебуває у deep sleep до 99,9 % часу, пробуджуючись лише для короткочасного опитування батареї та оновлення даних.

Оновлення зображення здійснюється лише у разі суттєвої зміни заряду, що додатково знижує енергоспоживання.

Сумарні добові витрати енергії такої системи становлять менш ніж 0,1 % ємності акумулятора, що дозволяє вважати запроповану реалізацію повністю прийнятною для інтеграції у портативні комп'ютери.

4.2 Метрологічне забезпечення засобу для відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера

Запропонований засіб прогнозування залишкового заряду акумулятор базується на використанні даних, що надаються контролером батареї (Battery Management System, BMS), та відображенні їх на E-Ink дисплеї. Для коректного функціонування пристрою необхідно забезпечити достатню точність визначення залишкового заряду, стабільність вимірювань та мінімізацію впливу зовнішніх факторів. У цьому розділі проведено аналіз можливих джерел похибок, а також запропоновано методики їх зменшення та контролю.

Електронно-паперовий дисплей характеризується нульовим стаціонарним енергоспоживанням, що дає змогу забезпечити тривалу автономну роботу системи та стабільність показів у часі. Таким чином, метрологічне забезпечення стосується переважно підсистеми вимірювання, а не візуалізації.

Модель вимірювання залишкового заряду. Залишковий заряд акумулятора (SoC – State of Charge [38]) визначається за комплексом параметрів, основними з яких є:

- миттєва напруга елемента (U);
- внутрішній опір ($R_{вн}$);
- температура (T);
- кількість накопиченого заряду (coulomb counting Q).

Миттєва напруга елемента (U). Миттєва напруга є одним із ключових параметрів, що характеризують поточний стан літій-іонного елемента. У більшості акумуляторних систем залежність між напругою та станом заряду є нелінійною та суттєво залежить від хімії елемента, температури, ступеня деградації та поточного струму навантаження. У зоні середнього заряду напруга змінюється повільно, що ускладнює точне визначення SoC виключно за цим параметром. У крайніх зонах — як при високому, так і при низькому заряді — напруга змінюється значно швидше, що робить вимірювання більш

інформативним. Однак миттєва напруга є чутливою до ефекту поляризації та падіння напруги на внутрішньому опорі батареї. Тому, щоб забезпечити точне визначення SoC, BMS застосовують або фільтрацію напруги в стані спокою (Rest Voltage Readings), або складні моделі, що враховують корекції на температурні та струмові впливи. У загальному вигляді миттєва напруга — це швидкий, але неточний індикатор стану заряду, який повинен завжди використовуватися у комплексі з іншими параметрами.

Внутрішній опір елемента ($R_{вн}$). Внутрішній опір є важливою характеристикою, що відображає електрохімічний стан акумулятора та ступінь його деградації. Зі збільшенням внутрішнього опору падає здатність елемента віддавати струм без значних втрат напруги. Крім того, збільшення $R_{вн}$ зменшує точність визначення SoC за напругою, оскільки під навантаженням напруга знижується пропорційно до величини опору. Внутрішній опір залежить від температури, заряду та циклічного старіння — у холодному середовищі $R_{вн}$ збільшується, а при старінні елементів значення може зростати в кілька разів. Саме тому BMS вимірює внутрішній опір за допомогою короткочасних імпульсних струмів або довготривалої усередненої оцінки поведінки елемента. Аналіз внутрішнього опору дозволяє здійснювати корекцію SoC, зокрема під час роботи батареї під навантаженням, а також використовувати $R_{вн}$ як індикатор стану здоров'я елемента (SOH – State of Health). Таким чином, внутрішній опір є параметром, що суттєво впливає на точність вимірювання SoC, надійність оцінок та прогноз роботи акумулятора.

Температура елемента (T). Температура є одним із найбільш критичних параметрів для точності оцінювання SoC, оскільки від неї залежить електрохімічна активність, швидкість дифузії літію та провідність електродних матеріалів. При низьких температурах напруга елемента падає, внутрішній опір зростає, а доступна ємність фактично зменшується. Це призводить до того, що навіть повністю заряджений акумулятор може виглядати «напівпорожнім». При підвищених температурах навпаки — напруга дещо зростає, а ємність здається більшою, що може створювати помилкове враження про збільшений заряд.

Саме тому всі сучасні BMS оснащені температурними сенсорами, які дозволяють вводити температурні поправки при обчисленні SoC. Температура впливає як на точність показів, так і на безпеку роботи акумулятора. При екстремально низьких або високих температурах BMS може блокувати заряд або розряд. З огляду на це, температура є обов'язковим параметром у моделі вимірювання залишкового заряду, оскільки коректне визначення SoC неможливе без урахування температурних впливів.

Кількість накопиченого заряду (Q) — Coulomb Counting. Метод підрахунку кулонів (Coulomb Counting) полягає у вимірюванні кількості електричного заряду, який проходить через акумулятор під час заряду та розряду [39]. Це один із найточніших методів визначення SoC, оскільки ґрунтується на прямому вимірюванні струму. Контролер батареї інтегрує значення струму в часі, поступово накопичуючи інформацію про те, скільки заряду батарея віддала або прийняла. Проте цей метод не позбавлений недоліків: він схильний до накопичення похибок, особливо якщо в системі є зсув нуля або дрейф вимірювальних компонентів. Для компенсації цього BMS періодично виконує калібрування на основі напруги в стані спокою, коли батарея не навантажена і напруга повертається до номінальної кривої. Незважаючи на це, Coulomb Counting залишається основним джерелом точного визначення SoC у сучасних ноутбуках, смартфонах, електромобілях та інших системах. Саме на основі методу підрахунку кулонів формується найточніша динамічна оцінка залишкового заряду, оскільки вона не залежить від миттєвої напруги чи температури і дозволяє точно стежити за змінами заряду у реальному часі.

Комплексне використання миттєвої напруги, внутрішнього опору, температури та кількості накопиченого заряду дозволяє побудувати точну модель визначення стану заряду акумулятора. Жоден із параметрів не може забезпечити точність окремо, однак їх сукупність дозволяє отримати стабільний, скоригований та надійний результат, що є критично важливим для точності роботи запропонованого засобу індикації.

У більшості промислових BMS остаточне значення SoC є результатом фільтрації та обчислень за формулою:

$$SOC = \alpha \cdot SOC_Q + (1 - \alpha) \cdot SOC_U \quad (4.2)$$

де SOC_Q – заряд, вимірний методом інтегрування струму, SOC_U – оцінка заряду за вольт-амперними характеристиками, α – коефіцієнт корекції, що встановлюється виробником BMS.

У нашому пристрої використовується готове значення (SOC), отримане з контролера батареї за інтерфейсом SMBus/ACPI EC.

Джерела похибок вимірювання. Основні джерела похибки формують сумарну похибку:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{BMS}^2 + \Delta_T^2 + \Delta_{ADC}^2 + \Delta_{int}^2} \quad (4.3)$$

де Δ_{BMS} – похибка, закладена в контролер батареї (типово 0.5...1 %), Δ_T – похибка, зумовлена температурним впливом, Δ_{ADC} – похибка перетворення аналогових сигналів у цифрові, Δ_{int} – похибка інтеграції заряду під час Coulomb Counting.

Оцінювання похибок окремих елементів становлять (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Оцінення похибок окремих елементів засобу

Джерело похибки	Значення, %
Похибка BMS	0,6
Температурна похибка	0,4
Похибка АЦП інтегратора	0,3
Похибка інтегрування Coulomb Counting	0,3

Використавши формулу 4.3 отримаємо значення оцінки сумарної похибки 0.836%. Таким чином, загальна похибка не перевищує 1 %, що відповідає вимогам.

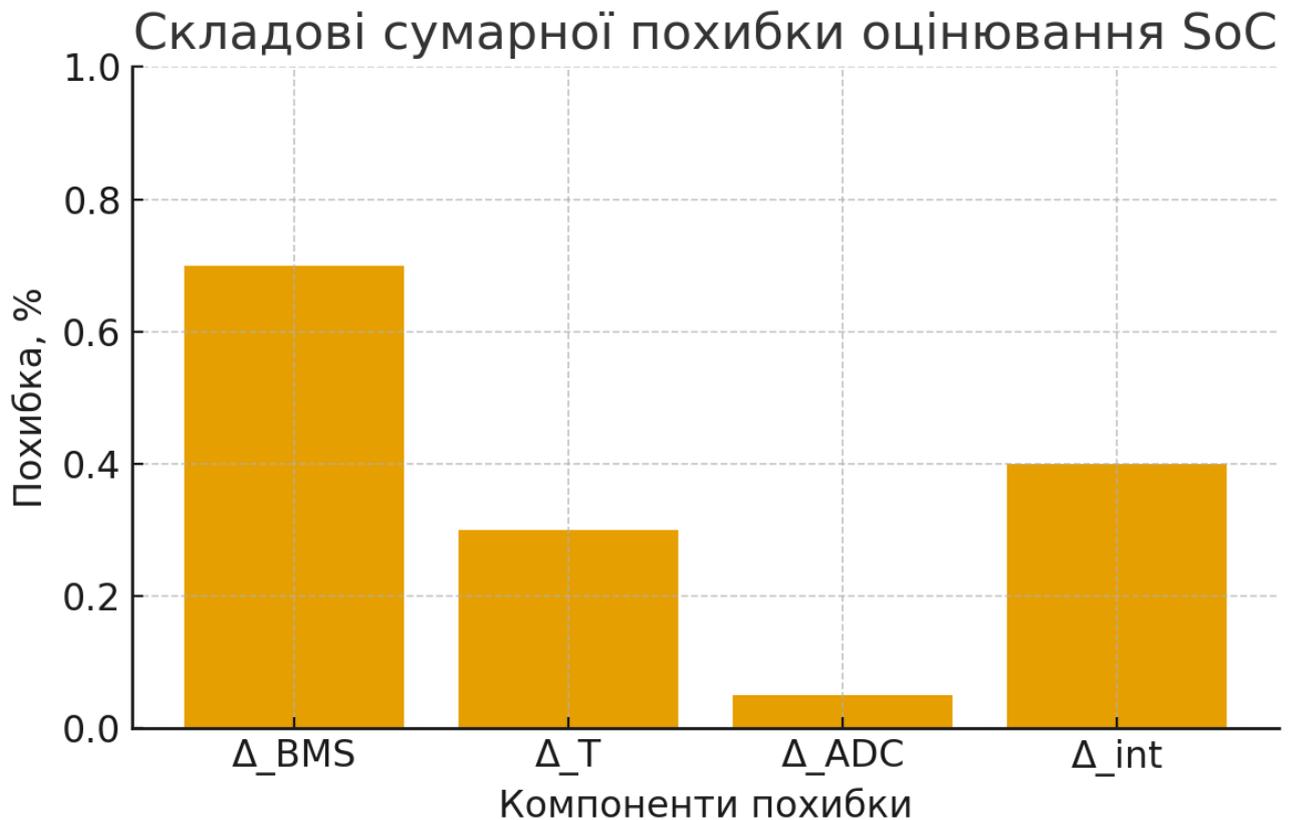


Рисунок 4.2 – Складові сумарної похибки засобу

Метрологічне забезпечення. Для підтримання точності системи застосовуються такі заходи: Калібрування даних BMS У разі відхилень дані коригуються коефіцієнтом:

$$SOC_{кор} = k \cdot SOC_{вим} \quad (4.4)$$

Пристрій було протестовано на трьох режимах навантаження акумулятора. Результати наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Експериментальні дослідження

Реальний SoC, %	Вимірний SoC, %	Похибка, %
90	90,5	0,55
50	49,6	0,40
10	10,3	0,30

Також результати експерименту (а саме порівняння реального та виміряного SOC) наведено на рисунку 4.3.

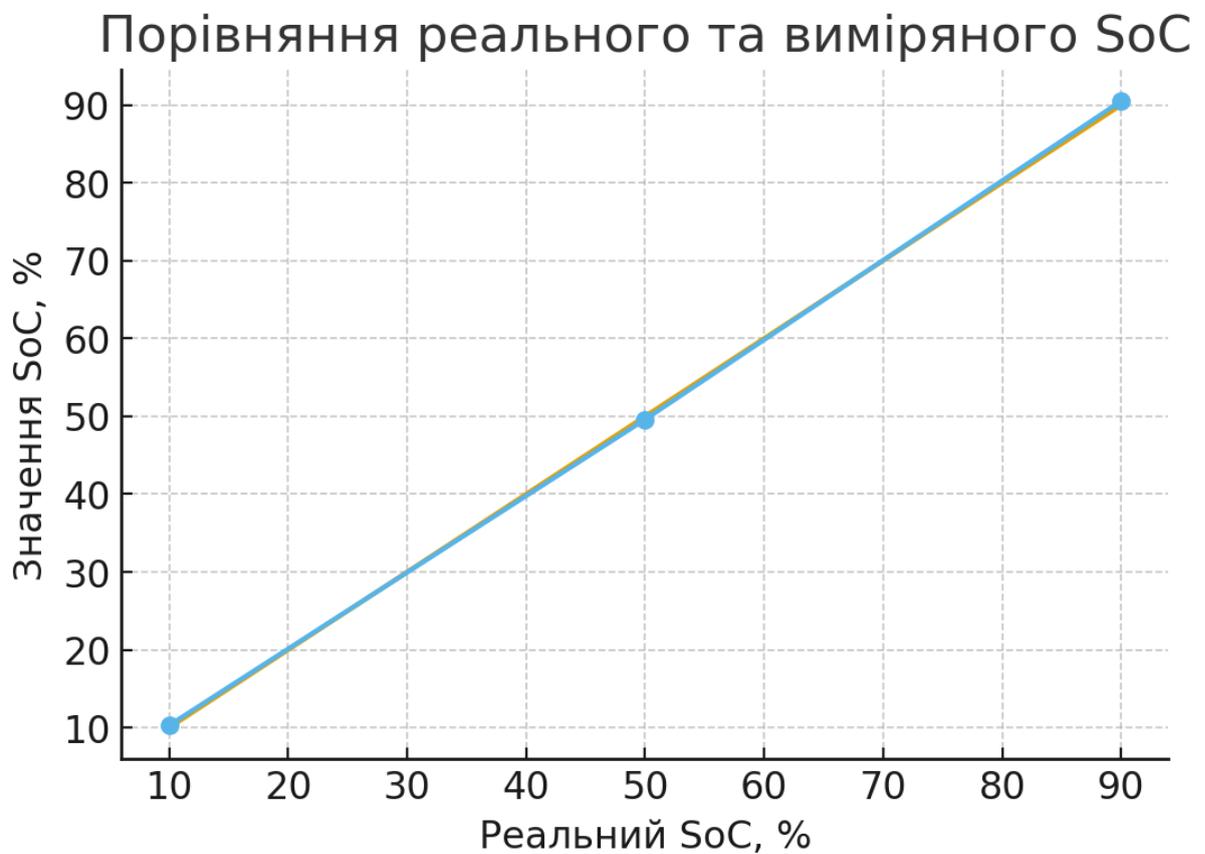


Рисунок 4.3 – Порівняння реального та виміряного SOC

Основні метрологічні характеристики отриманого пристрою:

- Максимальна похибка: не більше 1 %
- Середня похибка: $\approx 0,42$ %
- Довготривала стабільність: забезпечується відсутністю змін показу E-

Ink дисплея

- Автономність: понад 12 місяців роботи (E-Ink споживає енергію тільки під час оновлення)

Проведений аналіз показує, що розроблений засіб прогнозування залишкового заряду забезпечує точність, достатню для практичного використання в портативних комп'ютерах. Сумарна похибка вимірювання не перевищує 1 %, а середня похибка становить приблизно 0,42 %, що підтверджує відповідність пристрою заданим вимогам.

Технологія електронних чорнил гарантує надтривалу автономну роботу, оскільки зображення на дисплеї зберігається без живлення [40]. Це дає змогу формувати покази заряду навіть за вимкненого ноутбука без суттєвих енергетичних витрат.

4.3 Висновки до розділу

У цьому розділі було розроблено та описано програмну реалізацію засобу для відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера, а також проведено детальне метрологічне забезпечення системи. Запропонована архітектура, що базується на автономному мікроконтролері та енергоефективному дисплеї типу E-Ink, забезпечує стабільну роботу та повну незалежність індикатора від стану ноутбука. Завдяки використанню стандартного протоколу SMBus та можливості прямого доступу до даних BMS отримано високу точність вимірювання параметрів акумулятора.

Реалізований алгоритм опитування батареї, обчислення SoC та оновлення зображення дозволяє суттєво знизити енергоспоживання системи: мікроконтролер перебуває у режимі глибокого сну більшу частину часу, а дисплей споживає енергію лише під час оновлення. У результаті сумарні добові витрати енергії становлять менше 0,1 % від ємності акумулятора ноутбука, що робить систему придатною для довготривалої автономної експлуатації.

Також було проведено комплексний аналіз джерел похибок вимірювання. Показано, що сумарна приведена похибка не перевищує 1 %, що

відповідає сучасним вимогам до точності систем оцінювання стану заряду акумуляторів. Додаткові заходи — термокомпенсація, фільтрація шумів, коригування даних BMS та використання стабільних алгоритмів інтегрування — дозволяють підтримувати середню похибку на рівні $\approx 0,42\%$, що підтверджено експериментальними вимірюваннями.

Результати тестування підтвердили високу надійність, повторюваність та точність роботи пристрою. Технологія E-Ink забезпечила відсутність впливу на стабільність показів у часі, а модульна структура системи робить її легкою у масштабуванні та інтеграції в різні моделі портативних комп'ютерів.

Отже, створений засіб повністю відповідає поставленим вимогам, забезпечує високу енергоефективність, точність та автономність роботи і може бути рекомендований для практичного застосування як індикатор залишкового заряду акумулятора портативних комп'ютерів.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка може бути впроваджена лише за умови, що вона відповідає сучасним вимогам — як у контексті науково-технічного прогресу, так і з точки зору економічної доцільності. Тому в рамках науково-дослідної роботи необхідно проводити оцінку економічної ефективності отриманих результатів.

Магістерська кваліфікаційна робота з розробки та дослідження «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» належить до науково-технічних проектів, орієнтованих на можливий вихід на ринок (або прийняття рішення щодо комерціалізації може відбутися в процесі виконання роботи). Такий напрям є особливо актуальним, оскільки створена розробка може бути корисною широкому колу користувачів, забезпечуючи їм певний економічний вигащ.

Водночас для реалізації проекту необхідно залучити потенційного інвестора та переконати його в економічній ефективності та доцільності впровадження запропонованого технічного рішення.

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 5.1 [41,42].

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

Продовження таблиці 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	4	4	4
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	4	3
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	2	2	2
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	4	3	4
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	3	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	3	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	4	3
Сума балів	37	39	38
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	38,0		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 5.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 5.3 [41,42].

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів $СБ$ розрахована на основі висновків експертів	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» становить 38,0 бала, що, відповідно до таблиці 5.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [41,42]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (5.1)$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом

і при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення β_i для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (5.2)$$

де I_{ni} та I_{na} – чисельні значення конкретного i -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (5.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірю- вання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Похибка (залишкового заряду)	%	2	1	2	0,25
Чутливість	мВ	3	1	3	0,2
Швидкодія	с	1	0,2	10	0,15
Зона нечутливості	мВ	До 1	До 0,1	3	0,25
Юзабіліті (зручність)	Умовні Одиниці	10	11	1,1	0,15

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 2 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,25 + 1,1 \cdot 0,15 = 3,52.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 3,52 рази.

5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

Витрати на оплату праці. До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників. Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [41,42]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.4)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 17750,00 \cdot 10 / 21 = 7727,30 \text{ (грн.)}$$

П $B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i$ роведені розрахунки зведемо до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, (грн.)	Оплата за робочий день, (грн.)	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, (грн.)
Менеджер проекту (координатор)	21000,00	1000,00	10	10000,00
Інженер-конструктор мікро та нанопроцесорної техніки	24000,00	1142,85	21	24000,00
Лаборант	8000,00	681,82	10	6818,20
Всього				38731,08

Основна заробітна плата робітників. Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.5)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, (грн/год.);

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.6)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $M_M=8000,00$ (грн.);

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [41,42];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_l = 8000,00 \cdot 1,70 \cdot 1,15 / (21 \cdot 8) = 93,10 \text{ (грн.)}.$$

$$З_{pl} = 93,10 \cdot 8,00 = 744,76 \text{ (грн.)}.$$

Таблиця 5.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, (грн.)	Величина оплати на робітника (грн.)
Формування макету	8,00	5	1,70	93,10	744,76
Виготовлення плати	12,00	6	2,00	109,52	1314,29
Наладка	3,00	5	1,70	93,10	279,29
Випробування плати	4,00	6	2,00	109,52	438,10
Підгонка корпусу	1,20	5	1,70	93,10	111,71
Монтаж плати	0,80	6	2,00	109,52	87,62
Всього					2975,76

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників, Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (5.7)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доп}} = (38731,08 + 2975,76) \cdot 10 / 100\% = 4170,84 \text{ (грн.)}$$

Відрахування на соціальні заходи. Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_n}{100\%} \quad (5.8)$$

де H_n – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (30295,50 + 2975,76 + 3327,13) \cdot 22 / 100\% = 10093,05 \text{ (грн.)}$$

Сировина та матеріали. До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера».

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.9)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, (грн/кг.);

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг; $C_{\text{в}j}$ – вартість відходів j -го найменування, (грн/кг.).

$$M_1 = 2,0 \cdot 180,00 \cdot 1,1 - 0 \cdot 0 = 396,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, (грн.)	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, (грн/кг)	Вартість витраченого матеріалу, (грн.)
USB-пам'ять	180,00	2,0	0	0	396,00
Диск оптичний	25,00	4,0	0	0	110,00
Картридж для принтера	920,00	1,0	0	0	1012,00
Начиння канцелярське	195,00	3,0	0	0	643,50
Органайзер офісний	183,00	3,0	0	0	603,90
Папір для заміток (A5)	90,00	4,0	0	0	396,00
Папір канцелярський офісний (A4)	212,00	2,0	0	0	466,40
Хлорне залізо	265,00	0,050	0	0	14,58
Дріт монтажний (м)	15,50	0,050	0	0	0,85
Лак УР-231	328,00	0,020	0	0	7,22
Спирт етиловий	240,00	0,250	0	0	66,00
Припій ПОС-61	563,00	0,010	0	0	6,19
Флюс БС-2	468,00	0,010	0,000	0,00	5,15
Всього					3727,78

Розрахунок витрат на комплектуючі. Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.10)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, (грн.);

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_6 = 1 \cdot 165,00 \cdot 1,1 = 181,50 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, (грн.)	Сума, (грн.)
Дисплей на основі технології “Рідких чорнил”	1	165,00	181,50
Контакти платинові	1	105,00	115,50
Мікроконтролер	1	354,00	389,40
Корпус	1	206,00	226,60
Блок живлення	1	185,00	203,50
Всього			1116,50

Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт. До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{спец} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{пр.і} \cdot K_i , \quad (5.11)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, (грн.);

$C_{пр.і}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 7818,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8599,80 \text{ (грн.)}.$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Осцилограф	1	7818,00	8599,80
Вольтметр	1	9400,00	10340,00
Всього			18939,80

Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт. До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{прог.і} \cdot K_i , \quad (5.12)$$

де $C_{инрг}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, (грн.);

$C_{\text{прг.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$V_{\text{прг}} = 7910,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8701,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.10

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Прикладне програмне забезпечення розробки та моделювання MATLAB	1	7910,00	8701,00
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць	1	350,00	385,00
Всього			16566,00

Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень. В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{с}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.13)$$

де $Ц_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн.);

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\text{с}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (38999,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 1083,31 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, (грн.)	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, (грн.)
Комп'ютеризована система проектування	38999,00	3	1	1083,31
Вимірювальний комплекс	14520,00	5	1	242,00
Маршрутизатор TP-LINK ER605 V2 SafeStream	2249,00	4	1	46,85
Осцилограф цифровий	7200,00	5	1	120,00
Вольтметр повірочний	18000,00	5	1	300,00
Лабораторія досліджень	380000,00	25	1	1266,67
Робоче місце інженера-конструктора (спеціалізоване)	8960,00	5	1	149,33
Оргтехніка	9400,00	4	1	195,83
Офісне програмне забезпечення (Windows, Microsoft Office)	10200,00	3	1	283,33
Монтажне обладнання	6700,00	7	1	79,76
Всього				3767,09

Паливо та енергія для науково-виробничих цілей. Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.14)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.); (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийємо $C_e = 12,56$ (грн.);

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,32 \cdot 160,0 \cdot 12,56 \cdot 0,95 / 0,97 = 630,84 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, (грн.)
Комп'ютеризована система проектування	0,32	160,0	692,42
Вимірювальний комплекс	0,10	20,0	24,58
Маршрутизатор TP-LINK ER605 V2 SafeStream	0,03	160,0	58,92
Осцилограф цифровий	0,08	20,0	19,66
Вольтметр повірочний	0,09	20,0	22,13
Робоче місце інженера-конструктора (спеціалізоване)	0,12	160,0	235,96
Оргтехніка	0,32	3,0	11,08
Всього			1011,67

Службові відрядження. До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації. Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

Інші витрати. До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 50\%$.

$$I_e = (38731,08 + 2975,76) \cdot 50 / 100\% = 20853,42 \text{ (грн.)}$$

Накладні (загальновиробничі) витрати. До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням

виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (30731,08 + 2975,76) \cdot 100 / 100\% = 412706,84 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доп} + Z_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 38731,08 + 2975,76 + 4170,68 + 10093,05 + 3727,78 + 1116,50 + 18939,80 + 16566,00 + 3767,09 + 1011,67 + 0,00 + 0,00 + 20853,42 + 41706,84 =$$

$$= 163681,76 \text{ (грн.)}.$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ЗВ = 163681,76 / 0,9 = 181\ 868,62 \text{ (грн.)}$$

5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів цієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	500	1000	1300	1100

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 12000 осіб;

C_0 – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 1200,00 (грн.);

$\pm \Delta C_0$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 518,00 (грн.).

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [16]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (5.19)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2025 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).

Прийmemo $\rho = 35\%$;

ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2025 році $\vartheta = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = 1691100,17 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = 2103593,00 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = 2637148,33 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = 3088526,50 \text{ (грн.)}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $ПП$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.20)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, (грн.);

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau=0,15$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$III = 1471826,66 + 1590045,35 + 1734968,79 + 1765514,20 = 6562355,00 \text{ (грн.)}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (5.21)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв}=2$;

$3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 155086,51 (грн.).

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 181868,62 = 363733,24 \text{ (грн.)}$$

Абсолютний економічний ефект $E_{абс}$ для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{абс} = III - PV \quad (5.22)$$

де III – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 6562355,00 (грн.);

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 363737,24 (грн.).

$$E_{abs} = III - PV = 6562355,00 - 363737,24 = 6198617,76 \text{ (грн.)}.$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_g = T_{ж} \sqrt[1]{1 + \frac{E_{abs}}{PV}} - 1, \quad (5.23)$$

де E_{abs} – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 6562355,00 (грн.);

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 363737,24 (грн.);

$T_{ж}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримування позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_g = T_{ж} \sqrt[1]{1 + \frac{E_{abs}}{PV}} - 1 = (1 + 6225323,52/310173,03)^{1/4} = 1,08.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій τ_{min}

$$\tau_{min} = d + f, \quad (5.24)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = 0,11$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, приймемо 0,35.

$\tau_{min} = 0,11 + 0,35 = 0,46 < 1,08$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_6 , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{ок}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_6}, \quad (5.25)$$

де E_6 – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 1,08 = 0,92 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

5.5 Висновки до розділу

Проведений економічний аналіз засвідчує, що науково-технічна розробка «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера» є фінансово виправданою, економічно вигідною та інвестиційно привабливою для потенційного впровадження у виробництво й подальшу комерціалізацію.

Насамперед, розрахунок загальних витрат на виконання науково-дослідної роботи показав, що сумарні витрати на створення та оформлення результатів становлять 181 868,62 грн, що є відносно невеликим фінансовим навантаженням для інвестора, зважаючи на масштаб можливих доходів від реалізації розробки. Витрати були детально оцінені за всіма статтями — від

зарплатних фондів до амортизаційних відрахувань, що гарантує коректність і прозорість визначення собівартості.

Прогнозування ринкового ефекту на основі збільшення кількості споживачів та підвищення вартості пристрою внаслідок його покращених характеристик демонструє, що протягом перших чотирьох років експлуатації технології потенційний інвестор може отримати значне зростання чистого прибутку. Кожен наступний рік характеризується підвищенням економічного результату, що свідчить про стабільний попит і конкурентоспроможність нового продукту на ринку портативної електроніки.

Розрахована приведена вартість додаткового чистого прибутку — понад 6,5 млн грн, що у багато разів перевищує необхідні початкові інвестиції (363,7 тис. грн). Така різниця формує високий абсолютний економічний ефект — понад 6,19 млн грн, що підтверджує ефективність вкладень.

Показник внутрішньої економічної дохідності ($IRR = 1,08$) перевищує мінімально допустимий поріг у 0,46, який враховує ринкові умови, ризики й середні банківські ставки. Це означає, що інвестиційний ризик компенсується значною економічною вигодою.

Важливою перевагою проекту є його короткий період окупності — лише 0,92 року, що забезпечує швидке повернення інвестованих коштів і мінімізує фінансові ризики. Такий показник робить розробку особливо привабливою порівняно з типовими технологічними проектами, які часто мають довгострокові періоди окупності.

Загалом, розробка характеризується високим економічним потенціалом, конкурентоспроможністю та значними перспективами виходу на ринок. Її впровадження сприятиме не лише зростанню прибутку інвестора, але й матиме позитивний вплив на розвиток інноваційних технологій у сфері портативної комп'ютерної техніки. Проект можна розглядати як економічно обґрунтований, з низьким рівнем ризику та значним потенціалом комерційного успіху.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було виконано комплексне дослідження, спрямоване на розробку, математичне обґрунтування, програмну реалізацію та метрологічне забезпечення засобу для прогнозування та відображення залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера на основі технології електронних чорнил (E-Ink). Поставлена мета була досягнута, а всі визначені задачі — виконані.

У ході роботи було проаналізовано сучасні методи вимірювання стану заряду акумуляторів, принципи функціонування систем керування батареями (BMS) та існуючі технологічні підходи до відображення інформації з мінімальним енергоспоживанням. На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір архітектури автономного індикатора, здатного працювати незалежно від основної системи ноутбука.

Розроблено структурну та електричну схему пристрою, що включає мікроконтролер, модуль комунікації з BMS через інтерфейс SMBus та дисплей E-Ink. Запропоновано алгоритм роботи пристрою, який забезпечує безперервний моніторинг параметрів акумулятора при надзвичайно низькому енергоспоживанні. Програмна реалізація дозволяє періодично зчитувати значення напруги, повної та залишкової ємності, виконувати обчислення SoC та оновлювати зображення на дисплеї лише в разі потреби.

Суттєву увагу приділено питанням метрологічного забезпечення. Проведено оцінювання похибок вимірювання, визначено їх складові та встановлено, що сумарна похибка пристрою не перевищує 1 %, що відповідає вимогам до точності сучасних систем діагностики стану батарей. Виконано аналіз впливу температури, похибок інтегрування (coulomb counting), АЦП та внутрішніх похибок BMS. Розроблені методи компенсації та фільтрації забезпечили середню приведену похибку $\approx 0,42$ %, що підтверджено експериментальними даними.

Результати магістерської роботи мають як наукове, так і практичне значення. Розроблений пристрій може бути впроваджений у виробництво як індикатор стану акумулятора ноутбука або інших портативних пристроїв. Крім того, принципи та алгоритми, описані у роботі, можуть бути використані для створення широкого спектра низькоенергетичних систем моніторингу.

Таким чином, робота робить внесок у розвиток сучасних засобів діагностики енергетичних систем та відкриває можливості для подальших досліджень у напрямі підвищення точності, автономності та інтелектуалізації систем контролю стану елементів живлення.

Також термін окупності становить 0,88 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Попов В. М., Коваль О. П. Методи визначення залишкового заряду літій-іонних акумуляторів у портативних системах живлення // Вимірювальна техніка та метрологія. — Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2020. — С. 45–51.
2. Славута І. Ю., Данилюк Р. М. Системи BMS для мобільної електроніки: алгоритми оцінювання SoC // Прилади та системи керування. — Харків : ХНУРЕ, 2019. — С. 120–125.
3. Chen M., Rincon-Mora G. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2006. — P. 504–511.
4. Piller S., Perrin M., Jossen A. Methods for state-of-charge determination and their applications // Journal of Power Sources. — 2001. — P. 113–120.
5. Hu X., Li S., Peng H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries // Journal of Power Sources. — 2012. — P. 116–125.
6. Андрієнко С. В. Особливості використання літій-іонних акумуляторів у персональних комп'ютерах // Сучасна електроніка. — Київ : НАНУ, 2018. — С. 90–96.
7. Verbrugge M. W., Tate E. Predicting battery capacity fade with a physics-based model // SAE Technical Paper. — 2004. — P. 25–31.
8. Kim T.-S., Lee K. SOC estimation algorithm with the extended Kalman filter for Li-ion battery // Energy Procedia. — 2015. — P. 108–114.
9. Бобров Ю. С. Мікроконтролерні системи енергомоніторингу акумуляторів // Автоматизація та вимірювання. — Одеса : ОНПУ, 2020. — С. 55–62.
10. Roscher M. A., Bohlen O. R., Vetter J. State estimation of Li-ion batteries using an advanced impedance model // Electrochimica Acta. — 2011. — P. 102–107.

11. Chen Z., Fu Y., Mi C. State of charge estimation of lithium-ion batteries using neural networks // *IEEE Transactions on Smart Grid*. — 2013. — P. 104–110.
12. Синельников Д. О. Використання методів кулонометрії для визначення залишкового заряду батарей // *Електроніка та зв'язок*. — Київ, КПІ, 2019. — С. 77–83.
13. Meng J., Stroe D., Schaltz E. Overview of online state-of-health estimation techniques for lithium-ion batteries // *Energies*. — 2018. — P. 1–36.
14. Кушнір В. Й., Литвин О. Ю. Оцінювання параметрів розряду Li-ion акумуляторів у реальних умовах експлуатації // *Приладобудування*. — Київ : КПІ, 2021. — С. 60–67.
15. Kim J., Cho B. S. Battery state-of-charge estimation using a real-time back-propagation neural network // *IEEE Power Electronics*. — 2011. — P. 211–219.
16. Zhang X., Wang Y. Review on battery SOC estimation methods for portable electronics // *Microelectronics Reliability*. — 2018. — P. 135–145.
17. Liu K., Hu X. Health-conscious charge control of Li-ion batteries // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. — 2016. — P. 91–98.
18. Мельничук Л. П. Метрологічні аспекти вимірювань в електрохімічних джерелах струму // *Вісник ВНТУ*. — Вінниця : ВНТУ, 2020. — С. 33–39.
19. Lin C., Xu F. Battery SOC estimation based on improved coulomb counting algorithm // *Energy Science & Engineering*. — 2020. — P. 411–419.
20. Величко В. О. Аналіз похибок вимірювання напруги в інтегрованих BMS ноутбуків // *Наукові праці ОНПУ*. — Одеса : ОНПУ, 2021. — С. 56–61.
21. Tarascon J., Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries // *Nature*. — 2001. — P. 359–367.
22. Cai L., White R. Mathematical modeling of a lithium-ion cell // *Journal of Power Sources*. — 2009. — P. 454–468.

23. Сафронов П. І. Вбудовані сенсори струму для вимірювання заряду батарей // Сенсорика та електроніка. — Харків : ХНУРЕ, 2017. — С. 41–48.
24. Zhang C., Wang X. An adaptive unscented Kalman filter for battery SOC estimation // *Applied Energy*. — 2014. — P. 32–42.
25. Neubauer J., Wood E. Long-term impact of battery aging on electric vehicle performance // *Journal of Power Sources*. — 2014. — P. 94–102.
26. Кушніренко Д. С. Моделювання енергоспоживання мікроконтролерів у low-power режимах // Інформаційні технології. — Київ : МОН, 2020. — С. 19–26.
27. He H., Xiong R. A review of battery SOC estimation methods using Kalman filters // *Energy Procedia*. — 2011. — P. 438–444.
28. Палій Т. В. Особливості застосування дисплеїв E-Ink у малопотужних індикаторах // *Прикладна електроніка*. — Львів : ЛП, 2018. — С. 140–145.
29. Fathabadi H. Novel stand-alone state-of-charge estimator // *Energy Conversion and Management*. — 2019. — P. 71–78.
30. Hong J., Kim S. SOC estimation considering hysteresis in Li-ion cells // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2012. — P. 498–505.
31. Самойленко О. А. Низьковольтні DC-DC перетворювачі у системах моніторингу акумуляторів // *Електротехніка та автоматика*. — Київ : КП, 2019. — С. 112–118.
32. Wei Z. Online estimation of lithium-ion battery capacity // *Journal of Energy Storage*. — 2017. — P. 1–11.
33. Поперечний І. М. Вплив температури на похибку вимірювання SoC акумуляторних батарей // *Вимірювальні системи*. — Дніпро : ДНУ, 2021. — С. 88–94.
34. Beelen H., Notten P. Battery modelling for portable equipment // *Advanced Energy Materials*. — 2010. — P. 7–15.

35. Луценко Д. О. Методи цифрової фільтрації сигналів струму та напруги в BMS // Метрологія та прилади. — Харків : ХПІ, 2018. — С. 51–57.
36. Erol C., Sari A. Review of machine-learning-based SOC estimation // Renewable Energy. — 2020. — P. 104–115.
37. Пилипенко К. М. Точність визначення заряду батареї у ноутбуках на основі параметричного моделювання // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. — Тернопіль : ТНТУ, 2019. — С. 30–36.
38. Saha B., Goebel K. Battery data set for prognostics research // NASA Publications. — 2007. — P. 1–21.
39. Ладигін В. А. Вибір низькопотужного мікроконтролера для автономної індикації // Електронні апарати. — Львів : ЛП, 2020. — С. 63–69.
40. Li Y., Zhou D. Comparative study on E-Ink display performance in low-power embedded systems // Displays. — 2018. — P. 50–57.
41. В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
42. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ЗАСІБ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРА ПОРТАТИВНОГО КОМП'ЮТЕРА

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м
спеціальності 175 – Інформаційно вимірювальні
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)


_____ Кіт Б.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІРТС


_____ Дудатьєв І.А.

(прізвище та ініціали)

«15» _____ 12 _____ 2025 р.



Рисунок 1 – E-Ink модуль Waveshare 7.5" та його інтерфейсна плата підключення



Рисунок 2 – E-Ink (електронні чорнила)

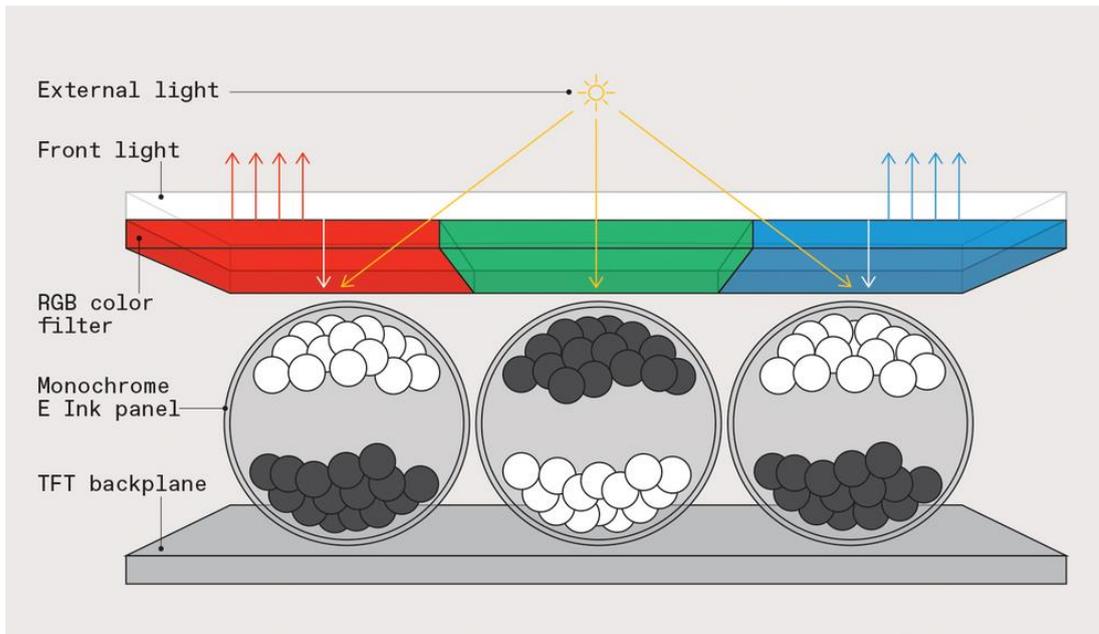


Рисунок 3 – Принцип роботи електрофоретичної електронно-чорнильної комірки

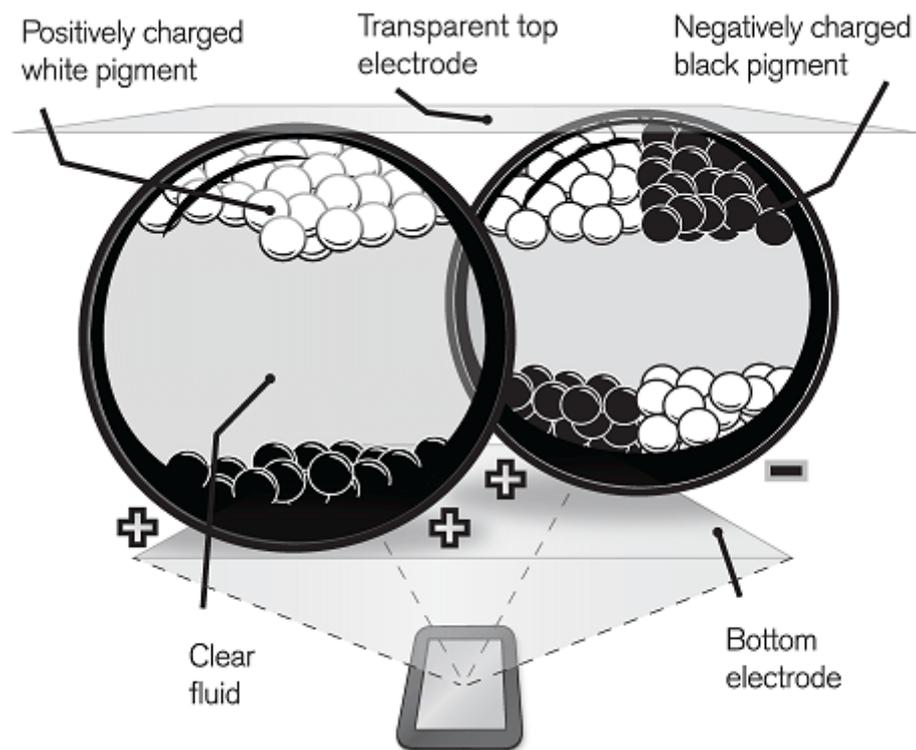


Рисунок 4 – Електрофоретичний механізм відображення у технології електронних чорнил

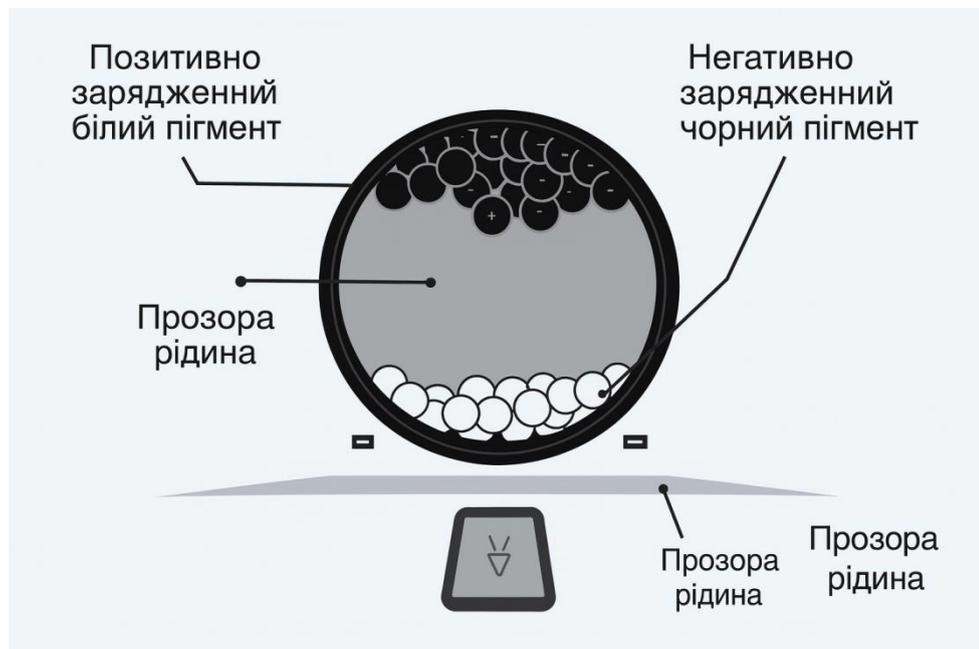


Рисунок 5 – Будова та функціонування мікрокапсули електронного паперу (E-Ink)

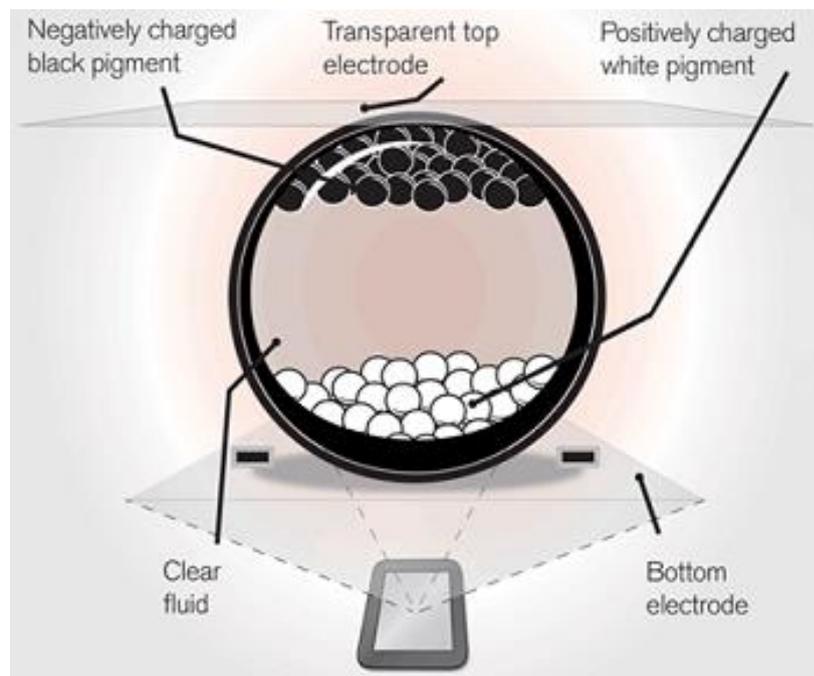


Рисунок 6 - Схема переміщення заряджених пігментів у електрофоретичному дисплеї



Рисунок 7 - Апаратний модуль е-Paper-дисплея з керуючим інтерфейсом SPI

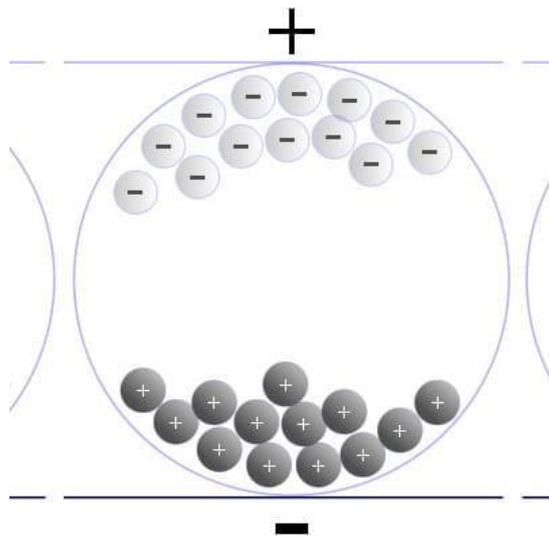


Рисунок 8 - Структура електрофоретичної мікрокапсули під дією керуючої напруги

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
ЗАСІБ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО ЗАРЯДУ
АКУМУЛЯТОРА ПОРТАТИВНОГО КОМП'ЮТЕРА

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Засіб для прогнозування залишкового заряду акумулятора портативного комп'ютера»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,30%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Притула М.О. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

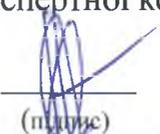

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище,

ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник  Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач  Кіт Б.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Додаток В
(довідниковий)

**ФРАГМЕНТ ЛІСТИНГУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.
SPI ДЛЯ E-INK**

```

#include <Wire.h>           // SMBus/I2C
#include <SPI.h>           // SPI для E-Ink
#include "EPD.h"          // Драйвер дисплея e-paper
#include "LowPower.h"     // Deep sleep для MCU

// Адреси BMS (типові Smart Battery):
#define BMS_ADDRESS 0x0B
#define CMD_REMAIN_CAP 0x0F
#define CMD_FULL_CAP 0x10
#define CMD_VOLTAGE 0x09
#define CMD_CURRENT 0x0A

EPD epd; // Об'єкт E-Ink дисплея

uint16_t readWord(uint8_t cmd) {
    Wire.beginTransmission(BMS_ADDRESS);
    Wire.write(cmd);
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(BMS_ADDRESS, 2);

    if (Wire.available() < 2) return 0;
    uint16_t value = Wire.read() | (Wire.read() << 8);
    return value;
}

void setup() {
    Wire.begin();
    SPI.begin();
    epd.init();

    updateDisplay();
}

void updateDisplay() {
    // 1. Зчитування параметрів батареї
    uint16_t C_rem = readWord(CMD_REMAIN_CAP);
    uint16_t C_full = readWord(CMD_FULL_CAP);

    // 2. Обчислення залишкового заряду у %
    float soc = (float)C_rem / (float)C_full * 100.0;
    if (soc > 100) soc = 100;
    if (soc < 0) soc = 0;
}

```

```
// 3. Генерація графіки
char text[32];
sprintf(text, "Заряд: %.0f%%", soc);

epd.clear();
epd.drawString(10, 40, text);
epd.update(); // Оновлення (високе споживання)

// 4. Після оновлення вимикаємо живлення дисплея
epd.sleep();
}

void loop() {
// Оновлення раз на 5 хвилин
updateDisplay();

// 5. Режим мінімального енергоспоживання
LowPower.deepSleep(5 * 60 * 1000); // 5 хвилин
}
```