

УДК 004.382.7'144:621.355-935.4

doi: 10.32620/akt.2023.5.08

А. Г. ТЕЦЬКИЙ, А. Є. ПЕРЕПЕЛИЦИН, О. В. ЖЕЛТУХІН

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ АКУМУЛЯТОРІВ НОУТБУКІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

Предметом вивчення в даній статті і дослідженні виступають процеси повторного використання та відновлення елементів живлення та батарей сучасної цифрової електроніки і акумулятори ноутбуків. **Метою** роботи є збільшення тривалості експлуатації та підвищення ремонтпридатності й ефективності повторного використання акумуляторів ноутбуків та портативних електронних пристроїв. **Завдання:** проаналізувати існуючі типи акумуляторів ноутбуків; проаналізувати моделі контролерів акумуляторів; проаналізувати варіанти ремонту літійових акумуляторів; запропонувати послідовність ремонту акумуляторів портативної електроніки на основі літій-іонних елементів; виконати практичне застосування результатів досліджень. Відповідно до поставлених завдань, були отримані наступні **результати**. Проаналізовані можливості і варіанти ремонту акумуляторів ноутбуків. Проаналізовані механізми захисту літій-іонних акумуляторів з різним принципом дії. Проведено аналіз можливості ремонту акумуляторів з діагностикою елементів у батареї ноутбука. Запропонована послідовність відновлення працездатності літій-іонних батарей ноутбука. Запропонована послідовність скидання прапорців помилок з використанням додаткового обладнання. Описаний процес механічного розбору пластикового корпусу батареї для заміни елементів. Наведено необхідне обладнання та інструменти для виконання розширеної діагностики. Виконано зіставлення результатів аналізу контролерів та практичного досвіду їх відновлення. Наведений опис утиліт для роботи з контролерами акумуляторів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що проведений порівняльний аналіз методів відновлення різних моделей акумуляторів від різних виробників дозволяє заздалегідь оцінити можливість успішного відновлення працездатності акумулятора із заданим контролером. Запропонований метод відновлення акумуляторів дозволяє зробити процес відновлення передбачуваним та відтворюваним для цілого ряду моделей батарей. Наведений практичний приклад використання методу демонструє можливість отримання додаткової інформації про акумулятори, навіть якщо виробник не надає документації. Використання результатів дослідження на практиці дозволяє здійснювати процес відновлення працездатності деяких акумуляторів ноутбуків без додаткових знань та інструментів, що дозволяє знизити витрати на процеси підтримки працездатності електроніки.

Ключові слова: літій-іонний акумулятор; контролер заряду; система керування батареєю; вторинний ринок; відновлення акумуляторів; повторне використання електроніки; модель акумулятора 18650.

Вступ

У наш час все ширше застосування знаходять літій-іонні акумулятори. Майже всі нові пристрої, що мають можливість заряджання, використовують літій-іонні чи літій-полімерні акумулятори.

Параметри літій-іонних акумуляторів за питомою ємністю також відповідають вимогам аерокосмічної техніки [1]. Однак необхідна подальша робота з покращення деяких параметрів літій-іонних акумуляторів: збільшення ресурсу (для низьких планетарних орбіт), збільшення максимально допустимої швидкості розряду та зниження робочих температур (для автоматичних посадкових станцій та посадкових апаратів). На багатьох супутниках використовуються літій-іонні акумулятори єм-

ністю 50 Аг. Заміна застарілих нікель-металогідридних акумуляторів на літій-іонні дозволяє знизити масу енергоустановки на 35-40%, скоротити потужність зарядних пристроїв завдяки вищій віддачі енергії, і, як наслідок, зменшити площу радіатора для відведення теплоти контролера заряду/розряду акумулятора. Обсяг використаних у космосі у 2000-х роках літій-іонних акумуляторів становить близько 12 млн шт.

До енергетичних установок для космічних досліджень пред'являється вимога високої питомої енергії, оскільки вартість запуску в космос різко зростає зі збільшенням маси. Так, наприклад, зменшення на 200 кг маси космічного апарату, що запускається, призводить до економії в середньому 30 мільйонів доларів США на 1 пуск.

Отже, висока питома ємність дозволяє використовувати такі акумулятори в усіх галузях людської діяльності. У цій роботі будуть розглянуті деякі особливості літій-іонних акумуляторів як складових батарей ноутбуків.

Сучасні ноутбуки для забезпечення можливості автономної роботи використовують літій-іонні акумулятори.

Батарея ноутбука не працює в режимі, при якому забезпечується повний заряд та повний розряд. Часто буває так, що ноутбуки використовуються як стаціонарні станції, тобто вони завжди підключені до електромережі, при цьому акумулятор завжди знаходиться в повністю зарядженому стані.

При відключенні зовнішнього джерела живлення ноутбук переходить на живлення від батареї, користувач працює деякий час і вимикає ноутбук, при появі можливості підключення зовнішнього джерела живлення відбувається дозаряд батареї до повного рівня заряду.

При цьому варто зазначити, що при відключенні зовнішнього живлення на незначний час контролер не поновлюватиме процес заряджання. Щоб контролер батареї дозволив початок процесу заряду, необхідно розрядити батарею приблизно до 90%. В разі такої дозарядці контролер не збільшуватиме лічильник циклів заряду/розряду.

Умовою збільшення цього лічильника є показник близько 10-15% залишкової ємності батареї при розряді. Для калібрування процесу підрахунку реальної ємності, що накопичується при заряді батареї, необхідно повністю розрядити і потім повністю зарядити батарею.

У залежності від технічних рішень, акумулятори можуть бути знімними або інтегрованими в корпус самого пристрою.

Для будь-якої з реалізацій є можливість заміни акумуляторної батареї. Така необхідність виникає через зниження тривалості роботи пристрою від повністю зарядженого акумулятора або через блокування контролера батареї. Такі акумулятори після заміни відправляються на утилізацію чи потрапляють на вторинний ринок.

Навіть використані оригінальні акумулятори для ноутбуків представляють цікавість для повторного використання. Їх ємність вище, а ціна в рази менше навіть нових неоригінальних Li-ion акумуляторів. Оригінальний виріб виготовлено без економії матеріалів. Це відкриває можливість використання акумуляторів із вторинного ринку з пріоритетом застосування лише оригінальної продукції [2].

Як правило, акумуляторні батареї ноутбуків складаються з плати контролю та елементів живлення – літій-іонних або літій-полімерних акумуляторів. Часто буває так, що контролер блокується, а самі елементи залишаються працездатними.

Виробники акумуляторів для ноутбуків часто не надають технічну документацію щодо деталей конструкції своїх акумуляторів. Виробники зазвичай шифрують алгоритми прошивки контролера, щоб потрібно було купувати нову батарею, а не просто перепрошивати існуючу, використовуючи інтерфейс I2C. Для цього одним із доступних рішень є конвертер USB-SMBus-I2C на мікросхемі CP2112 [3].

Для читання і запису даних в пам'ять мікроконтролера можна використовувати ліцензійне програмне забезпечення, але таке програмне забезпечення має високу вартість і доступне лише у спеціалізованих постачальників.

Існують безкоштовні варіанти програмного забезпечення для комунікації з мікроконтролером акумулятора для Linux [4]. Ці рішення вимагають допрацювання та вдосконалення для простого та відтворюваного використання.

Слід пам'ятати, що мікроконтролер використовує прошивку виробника і не може записувати довільні дані за потрібною адресою. Перед тим, як це зробити, необхідно знайти спосіб змінити режим доступу для окремого виробника.

Тому важливо знайти загальні концепції процесу повторного використання батарей. Зворотний інжиніринг є одним із можливих способів отримати інформацію про літій-іонні елементи та контролер акумулятора.

Батареї на основі літію можуть спричинити пожежу, якщо з ними не обережно поводитися [5]. Тому дослідження можливості ремонту та правил їх повторного використання є актуальними для пошуку методики ремонту акумуляторів портативних пристроїв в умовах обмежених ресурсів.

Метою даної роботи є збільшення тривалості експлуатації та підвищення ремонтпридатності й ефективності повторного використання акумуляторів ноутбуків та портативних електронних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**: проаналізувати існуючі типи акумуляторів ноутбуків, проаналізувати різні моделі контролерів акумуляторів, проаналізувати варіанти ремонту літійових акумуляторів, запропонувати методику ремонту акумуляторів портативної електроніки на основі літій-іонних елементів, виконати практичне застосування результатів досліджень.

1. Аналіз можливих варіантів ремонту акумуляторів

Компонування акумуляторів ноутбуків різняться різноманітністю. Існують різні види та конструкції акумуляторів. Навіть для однієї і тієї ж моделі ноутбука можуть бути конструктивно схожі акумулятори з різним компонуванням елементів. Акумулятори можуть відрізнятися в залежності від різних процесорів одного виду ноутбуків. Це призводить до того, що у них різне споживання та різна ціна, як наслідок, і різна потужність у акумуляторів в одному корпусі.

Це призводить до існування акумуляторів з різною напругою та кількістю елементів в одному корпусі, що пов'язано з різними вимогами до батарей. Батареї з меншою кількістю елементів призначені для моделі з малою потужністю процесора. Це дозволяє залишати вільні місця, знижуючи вагу пристрою та вартість.

Загальне влаштування, принцип роботи та причини помилок визначають можливість відновлення акумулятора ноутбука.

Як вже зазначалося, майже завжди батареї ноутбуків складаються з плати контролю та безпосередньо літій-іонних або літій-полімерних елементів живлення. Плата контролю містить мікроконтролер із вбудованою Flash-пам'яттю.

Така пам'ять містить системну інформацію: модель, дата виробництва, номінальна ємність акумулятора, фактична ємність (розраховується під час заряду/розряду), струм і напруга заряду, прапорці стану акумулятора. Зазвичай для зберігання цих даних достатньо 256 байт пам'яті, на попередніх версіях акумуляторів використовувалася зовнішня схема Flash-пам'яті. На акумуляторах планшетів і телефонів використовується аналогова схема без мікроконтролера, що дозволяє або забороняє протікання струму.

Таким чином, за рахунок цих плат забезпечується захист від перезаряду та перерозряду. Для більшості літій-іонних акумуляторів це робота в діапазоні від 3 до 4.2 В. У планшетах і телефонах використовується один або кілька паралельно включених елементів живлення, що не вимагає додаткового використання мікроконтролера.

Батареї ноутбуків містять від двох до чотирьох каскадів, з'єднаних послідовно. Контролер батареї відстежує напругу на кожному каскаді акумулятора і керує розрядом/зарядом. Під час цих процесів фіксуються показники на струмовимірному резисторі і фіксується накопичена або віддана ємність, що дозволяє отримати прогнозований час роботи від батареї при відключенні зовнішнього джерела живлення.

2. Аналіз механізмів захисту літій-іонних акумуляторів

Оригінальна батарея ноутбука має три рівні забезпечення захисту безпечного функціонування.

Перший рівень – контроль напруги кожного каскаду. При досягненні граничного значення будь-якому каскаді контролер закриває ключі розряду чи заряду залежно від виконуваного процесу. Бувають аварійні ситуації, після виникнення яких у пам'ять контролера записується прапорець помилки (або кілька прапорів), контролер не відкриватиме ключі заряду/розряду, доки у пам'яті є прапорець помилки [6].

Прикладом такої ситуації є втрата контакту контролера з будь-яким каскадом акумулятора, тобто контролер не може отримати значення напруги каскаду. Це позаштатна ситуація, і для забезпечення безпеки необхідно відключити акумулятор. У такому разі ноутбук виявлятиме підключений акумулятор, проте статус такого акумулятора буде "підключений, не заряджається". При відключенні зовнішнього блока живлення ноутбук не буде переходити на роботу від акумулятора.

Прикладом ще однієї аварійної ситуації може бути перегрівання акумулятора.

Другий рівень захисту може спрацювати в деяких аварійних ситуаціях – керований запобіжник [7]. Прикладом є чотириконтактний елемент, який встановлюється на платі контролера акумулятора, але бувають і триконтактні запобіжники. При подачі живлення на керуючий контакт усередині запобіжника перегорає перемичка, такий акумулятор не заряджатиметься і не розряджатиметься незалежно від стану ключів заряду/розряду. Такий акумулятор може бути повторно використаний при створенні портативних джерел живлення [8].

Третім рівнем захисту в зборках з циліндричних літій-іонних акумуляторів є механічний клапан, здатний розімкнути контакт під дією тиску.

Якщо відбувається перезаряд акумулятора, то, як правило, ушкоджується сепараторна сітка всередині елемента живлення і спостерігається утворення металевого літію. Відповідно, при пошкодженій сепараторній сітці металевий літій миттєво входить у реакцію з рідиною. Це може призвести до вибуху.

Якщо металевого літію було утворено навіть мінімальну кількість, він також вступає у реакцію, виділяється газ, підвищується тиск в акумуляторі і спрацьовує мембранний елемент захисту. Це механічний захист самого елемента живлення, тобто за рахунок внутрішнього тиску розривається контакт усередині елемента живлення.

3. Аналіз можливості ремонту акумуляторів ноутбуків

Оригінальні акумуляторні батареї зазвичай виробляються разом з пристроями, для яких вони призначені. Як правило, вони мають високу якість виробництва. Сумісні копії зазвичай випускаються іншими виробниками для заміни несправної батареї. Часто плата контролера неоригінального акумулятора має набагато менше електронних компонентів у порівнянні з оригінальною. На таких платах також може бути відсутнім плавкий запобіжник, про який згадувалося вище.

Акумулятори з вторинного ринку представляють інтерес для повторного використання. Ціна нових акумуляторів і оригінальних з вторинного ринку може відрізнятись в кілька разів.

Втрата ємності елементи живлення всередині акумулятора в процесі експлуатації представляє собою процес деградації. Швидкість втрати ємності у літій-іонних акумуляторів суттєво залежить від температури і може відрізнятись в рази [9].

Також на швидкість природної деградації впливає кількість циклів заряду та розряду, а також напруга на елементі. Перебування у розрядженому стані призводить до прискореної деградації літій-іонних акумуляторів. Висока напруга, близька до повної напруги заряду також сприяє деградації. Істотний внесок у прискорення деградації вносять великі струми розряду, і особливо заряду акумулятора.

Ремонт є доцільним, якщо збережено достатній ресурс самих елементів. Має сенс відновлювати оригінальний акумулятор, якщо в ньому зношені елементи живлення, але він продовжує працювати хоча б нетривалий час. Деякі операційні системи можуть рекомендувати замінити акумулятор, якщо рівень зносу батареї перевищує 60%, тобто, під час останнього заряду акумулятором було накопичено менше 40% від початкової ємності (позначається у джерелах як *rated capacity*).

Одним із показників стану батареї, який можна отримати після читання пам'яті контролера це кількість циклів заряду/розряду батареї. Як правило, виробники елементів живлення стандарту 18650 у своїх специфікаціях вказують, яку кількість циклів заряду/розряду повинен гарантовано витримати елемент для збереження мінімум 80% від номінальної ємності. У середньому, при проведенні 200 циклів заряду/розряду, елемент живлення не повинен втратити більше 20% своєї номінальної ємності.

Також бувають ситуації, коли акумулятор тривалий час перебував на зберіганні в розрядженому стані після підключення до ноутбука такий

акумулятор може не заряджатися. Такий акумулятор також є сенс відновлювати, адже він фізично справний, елементи живлення можуть бути з невеликим зносом.

Заміна елементів із високим зносом на нові дозволяє відновити оригінальну ємність акумуляторної батареї. Цей процес передбачає перезбирання такої батареї. Зношені елементи живлення можуть бути замінені на нові. Після розбирання корпусу акумулятора можна паралельно припаяти нові елементи, потім видалити зношені елементи.

При паралельному з'єднанні напруга елементів має бути однаковою. Потрібно паралельно підпаяти нові, а потім відпаяти старі зношені елементи. У цьому випадку процес заміни не визначається контролером як позаштатна ситуація та у пам'яті мікроконтролера не записуються прапорці помилок. Після такої заміни необхідно кілька разів розрядити та зарядити акумулятор. На кожному циклі контролер перераховує накопичену ємність та рівень зносу батареї зменшується. Повторення цього циклу дозволяє щоразу наблизити значення розрахунку ємності до фактичного.

Також значення номінальної та фактичної ємності можуть бути перезаписані з використанням зовнішнього програматора, що детально розглядається в наступних розділах.

Головне при такому ремонті – не відірвати контролер від ліній, що йдуть до самих елементів, інакше контролер може заблокуватись. Також блокування може спричинити різкий стрибок напруги. Ризик блокування при відключенні ліній залежить від контролера.

Іноді складно зрозуміти причину блокування, це одна з причин, чому непрацюючі батареї так масово з'являються на вторинному ринку. При цьому деякі контролери допускають відключення ліній, які з'єднують їх з окремими елементами.

Заміна елементів із повним відключенням плати контролера від елементів живлення також можлива. У такому разі відключення старих елементів живлення варто проводити в напрямку від мінусу до плюсу. Підключати нові елементи необхідно у зворотному напрямку, тобто від плюсу до мінуса. Але в такому випадку є ризик того, що мікроконтролер встигне записати в пам'ять прапорці помилок, поки живлення відбувається за рахунок запасної енергії в конденсаторах ланцюга живлення.

Підзарядка окремих елементів батареї є обов'язковою частиною процесу відновлення літій-іонного акумулятора. Зарядити елементи можна від зовнішнього пристрою. Існує ймовірність того, що не знадобиться подальших дій і контролер розпочне штатну роботу.

4. Запропонована послідовність відновлення працездатності батареї

Якщо такого не сталося, тобто контролер не почав функціонування в штатному режимі, необхідно виконати такі дії.

До плюсу та мінусу акумуляторів підключається невелике навантаження, що забезпечує протікання струму до 1 А, потім з'єднується плюс акумулятора та плюс на роз'ємі, через який відбувається контакт акумулятора з материнською платою ноутбука. Через кілька секунд відключається живлення від плюса акумулятора.

Якщо контролер увійшов у режим нормальної роботи, через навантаження продовжити далі протікати струм. Візуально це можна визначити без додаткових приладів, якщо використовувати лампочку або кулер в якості наочного варіанту навантаження.

Якщо струм не протікає, необхідно перевірити цілісність плавкого запобіжника на схемі контролера. Потім необхідно перевірити наявність прапорців помилок у пам'яті контролера, їх потрібно очистити, щоб мікроконтролер зміг відкрити ключі розряду/заряду.

Також бувають акумулятори, де на роз'ємі є окремий контакт, який необхідно з'єднати з мінусом на роз'ємі для того, щоб на плюсовому і мінусовому контакті роз'єму з'явилася напруга.

Варто пам'ятати, що кількість можливих варіантів мікросхем контролерів у складі акумуляторів ноутбуків та інших пристроїв обчислюється десятками найменувань.

Для оцінки можливості відновлення працездатності контролера необхідно прочитати документацію конкретної мікросхеми.

Виявлено, що кожен виробник використовує обмежений ряд мікроконтролерів при виробництві акумуляторів ноутбуків. При вивченні ряду акумуляторів Lenovo було виявлено, що акумулятори L09S6Y14, L08O6C02, 42T4504 використовують мікроконтролер bq8030 і прошивку від SANYO. Різні постачальники прошивок також можуть випускати свої продукти для одних і тих же мікроконтролерів.

Моделі акумуляторів SB10K97575, 45N1126, 45N1146 використовують мікроконтролер 51F51, акумулятор 45N1760 використовує мікроконтролер 045A20.

Також було експериментально встановлено, що ноутбук Lenovo, який працює з акумуляторами на мікроконтролері bq8030, також може працювати з акумуляторами IBM на мікроконтролерах bq8020 та M37512.

5. Запропонована послідовність скидання прапорців помилок

Процедура скидання прапорців помилок, записаних у пам'ять мікроконтролера (для прикладу використовується bq8030, для інших мікроконтролерів може трохи відрізнятись) [10].

1. Для отримання повного знімку (dump) вмісту пам'яті мікроконтролера необхідно перейти в режим завантаження (boot mode). Для цього може знадобитися фізичний вплив на контакти NC або BOOT – цей контакт може бути з'єднаний з GND або +3.3 В з використанням резистора.

2. Збільшення кількості комірок пам'яті контролера, доступних до читання/запису, є успішною ознакою виконання пункту 1, але контролер ще не перейшов у режим завантаження. Для захисту даних від несанкціонованого перезаписування виробник прошивки використовує певний алгоритм, після якого відбувається зміна режиму роботи. Опис алгоритму виглядає так:

- 1) записати КЛЮЧ1 в КОМІРКА1;
- 2) зчитати ЗНАЧЕННЯ1 з КОМІРКА2;
- 3) записати (КОНСТАНТА - ЗНАЧЕННЯ1) в КОМІРКА1;
- 4) записати КЛЮЧ2 в КОМІРКА3.

Як показує практика, кожен акумулятор має унікальне ЗНАЧЕННЯ1, інші змінні можуть не змінюватися. Конкретна процедура для кожного мікроконтролера може бути описана після аналізу асемблерного коду прошивки. Також такий аналіз дозволяє отримати значення ключів та адрес комірок для виконання вищевказаної процедури.

3. Коли контролер знаходиться в режимі завантаження, він не може відображати дані батареї, також буде відсутня напруга на роз'ємі. Після цього з'являється можливість зробити повний знімок пам'яті мікроконтролера.

4. Отриманий знімок можна редагувати у шістнадцятковому редакторі. Тут міститься вся інформація: ім'я батареї, дата створення, кількість циклів використання, напруга та струм заряду, а також інші значення. Тут же знаходяться і прапорці помилок, адреси яких необхідно знайти і замінити порожніми значеннями (FF). При такому аналізі допомагає наявність знімків пам'яті з різних акумуляторів, що мають той самий мікроконтролер.

5. Модифікований знімок пам'яті записується в мікроконтролер, який все ще продовжує перебувати в режимі завантаження. Повернення мікроконтролеру до штатного робочого режиму відбувається шляхом запису певного значення за певною адресою.

6. У разі успіху на роз'ємі батареї з'являється напруга, акумулятор при підключенні до ноутбука визначається і починається його заряд.

Подана процедура може нашкодити акумулятору, мікроконтролер може перестати відповідати на зовнішні впливи.

Експеримент проводився виключно в дослідних цілях для вивчення можливості відновлення працездатності неробочих акумуляторів у критичних ситуаціях.

Варто пам'ятати, що якщо в пам'яті мікроконтролера з'явилися помилки, це означає, що була аварійна ситуація і контролер відключив можливість взаємодії з батареєю з метою забезпечення безпеки.

Виробник забороняє розкривати акумулятор ноутбука, про що свідчить відповідне попередження на наклейці батареї.

6. Запропонована послідовність розбору пластикового корпусу батареї

Для заміни елементів акумулятора необхідно розібрати пластиковий корпус. Оскільки виробником не передбачена можливість ремонту акумулятора (зношений акумулятор підлягає заміні повністю шляхом купівлі нового акумулятора), це може викликати деякі труднощі.

Вкотре варто нагадати про вказівку виробника не розкривати батарею. Деякі виробники роблять дуже міцне і надійне з'єднання двох пластикових частин корпусу на застібках, що унеможливує роз'єднання цих частин так, щоб їх можна було знову з'єднати в цілий виріб. Також виробники можуть використовувати тонкий шар клею для герметизації з'єднання.

Пластик може дуже відрізнитися за своїми фізичними якостями, деякі корпуси починають кришитися і їх неможливо роз'єднати на дві частини.

Необхідно мінімізувати пошкодження частин корпусу акумулятора під час розбирання, щоб після заміни елементів корпус акумулятора можна було зафіксувати та встановити в ноутбук.

Пропонована послідовність процесів розбирання пластикового корпусу батареї:

1. Прогрівання пластику по шву. При нагріванні підвищується гнучкість пластику, що призводить до зменшення кількості зламаних застібок на частинах корпусу акумулятора.

2. Прикладання сили на згортання корпусу по діагоналі. Розхитуючи рухами можна отримати невелике зміщення частин корпусу відносно одна однієї.

3. Якщо є пластикові гачки, що виступають на корпусі, що забезпечують фіксацію батареї в корпусі ноутбука, то можна спробувати трохи їх відігнути для отримання зазору. Якщо ні, то такий зазор часто можна знайти на протилежній від роз'єма стороні.

4. У зазор поміщається відповідний інструмент у вигляді твердого пластикового шпателя або широкої плоскої викрутки без гострих граней, щоб не деформувати пластик.

5. Робиться прохід по всій довжині шва, одна з частин корпусу трохи відгинається від іншої. Можна повторити кілька разів. Під час цього можна почути клацання від розкриття чи розламування застібок.

6. Після цього повторюється процедура розкриття шва для розкриття всього ряду застібок.

7. Вищезазначені дії повторюються по всьому периметру корпусу акумулятора.

Після отримання доступу до елементів і плати контролера необхідно їх витягти, часто виробники закріплюють елементи в корпусі за допомогою двостороннього скотчу або компаунду.

При заміні елементів рекомендується використовувати спосіб паралельного підпаювання нових елементів. Варто пам'ятати, що в корпусі батареї немає вільного місця, всі провідники від елементів до плати повинні бути такою ж довжиною, як і до ремонту (довші провідники просто не помістяться в корпусі).

При такому ремонті можна використовувати тимчасові провідники для збереження контакту. Тимчасові провідники вільної довжини припаюються до нових елементів, потім видаляються старі елементи.

Провідники, які йшли до старих елементів, припаюються до нових, після цього можна видалити тимчасові провідники. При ремонті важливо не залишити на платі краплі припою з гострими вершинами, оскільки плата контролера може бути у фізичному контакті з елементами, що призведе до псування ізоляції на елементі та можливого замикання.

Не можна залишати обрізки нікельованої стрічки без ізоляції, оскільки вони можуть порушити ізоляцію елементів і викликати замикання елементів. Під час ремонту необхідно заздалегідь планувати місце паяння, щоб не втратити контакт плати контролера з елементами. Втрата контакту може бути розпізнана як критична ситуація, і контролер заблокується.

Таким чином, запропонована послідовність дозволяє здійснити заміну елементів із збереженням працездатності контролера.

7. Необхідне обладнання та інструменти

Необхідне обладнання для взаємодії з контролерами батарей включає в себе перетворювач інтерфейсів. Мікроконтролер акумулятора комунікує з материнською платою ноутбука за протоколом I2C, тому для читання/запису даних у пам'ять мікроконтролера необхідний відповідний конвертер [11]. Одним із доступних рішень є конвертер USB-SMBus-I2C на мікросхемі CP2112. Цей конвертер підключається до відповідних контактів на роз'ємі батареї. Розташування контактів залежить від компонування, у різних виробників електронні схеми не збігаються.

На рисунку 1 показано фрагмент плати контролера одного з акумуляторів Lenovo на мікроконтролері R2J240. Контакти на цьому роз'ємі мають таке призначення (зліва направо): 1, 2 – VCC, 3 – SCL, 4 – SDA, 5 – NTC, 6, 7 – GND. VCC та GND – контакти для передачі струму, SCL та SDA – контакти двонаправлених ліній зв'язку інтегральних схем, NTC – термістор. Для підключення конвертера на базі мікроконтролера CP2112 використовуються контакти SCL, SDA та GND.

Існує ліцензійне програмне забезпечення для читання/запису даних у пам'ять мікроконтролера, але вартість такого програмного забезпечення є доступною тільки для спеціалізованих компаній, що займаються ремонтом акумуляторів.

Одним з варіантів безкоштовного програмного забезпечення для комунікації з мікроконтролером акумулятора є бібліотека i2c-dev в Linux-дистрибутивах [4].

Варто пам'ятати, що мікроконтролер використовує прошивку від постачальника (firmware), яка не дозволить записати довільні дані за потрібними адресами. Перед цим необхідно знайти спосіб зміни режиму доступу (access mode), який є унікальним для кожного постачальника.

Експеримент з відновлення акумуляторів від виробника Lenovo показав, що існує відтворюваність результатів у процесі відновлення.

У процесі дослідження можливостей відновлення акумуляторів було успішно здійснено заміну елементів живлення в акумуляторі Lenovo. Номінальна ємність оригінальних зношених елементів живлення становила 47 Втг, рівень зносу акумулятора становив 80%, зношені елементи живлення замінили новими з ємністю 52 Втг.

З кожним циклом розряду/заряду акумулятора мікроконтролер підвищував рівень здоров'я акумулятора, після 10 циклів показник здоров'я становив 110%. Це сталося через те, що у пам'ять мікроконтролера не було записано нове значення номінальної ємності.

Також був проведений експеримент з відновлення 8 неробочих розряджених акумуляторів Lenovo. Для акумуляторів з трьома каскадами мінімальною робочою напругою є 9 В, в експерименті використовувалися акумулятори з напругою 4-8 В. Виконувалися дії за описаним вище алгоритмом відновлення акумуляторів.

У результаті відновлення робочими виявилися 7 з 8 акумуляторів. На акумуляторі, де не з'явилася напруга на роз'ємі, плавкий запобіжник виявився перегорілим.

Під час встановлення перемички поверх плавкого запобіжника з плати контролера вийшов білий дим. Після цього акумулятор не визначався ноутбуком.

Аналізуючи подію, можна зробити висновок, що в минулому з цим акумулятором сталася критична аварія і мікроконтролер перепалив плавкий запобіжник. Причина аварії невідома, а також невідомо, що перегоріло після встановлення перемички.

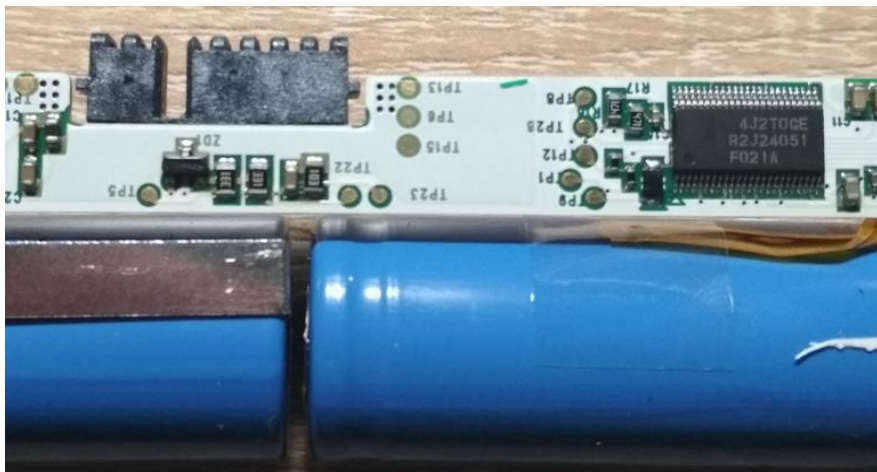


Рис. 1. Фрагмент плати контролера

Усі хімічні джерела струму є предметами підвищеної небезпеки, робота з ними потребує певних знань та умінь, описані вище експерименти проводились у безпечному оточенні.

8. Узагальнене зіставлення результатів аналізу контролерів та практичного досвіду їх відновлення

Запропонована послідовність відновлення акумуляторів ноутбуків була апробована практично при експериментальних спробах відновити батареї на основі конкретної моделі контролера від різних виробників. Проведений аналіз та практичне дослідження дозволяє зробити висновок, що та сама модель контролера заряду використовується різними виробниками для побудови батарей ноутбуків. Цей досвід дозволяє зробити припущення про можливість відновлення батареї від іншого виробника, якщо є успішний результат відновлення для конкретної моделі контролера.

Успішність процесу відновлення за допомогою запропонованої послідовності залежить від набору умов, до яких належить працюючий запобіжник у складі схеми контролю батареї. Перепалювання запобіжника супроводжується записом прапорця помилки у пам'ять мікроконтролера. Якщо не скинути помилку і замінити запобіжник, то він знову намагатиметься перегоріти. Тому можна при ремонті акумуляторів відпаювати елементи, замість них ставити резистори 470 Ом, на плату подається напруга 9 В з обмеженням струму до 50 мА. Цього буде достатньо, щоб зберегти керуваний запобіжник у разі якоїсь помилки під час ремонту.

У таблиці 1 представлені успішні результати відновлення акумуляторних батарей на основі контролерів bq8030, bq8020, bq8011 та M37512.

Спроби відновлення акумуляторних батарей для ноутбуків на основі контролера bq30z55 не принесли результатів для 3 з 4 екземплярів, залучених до дослідження. Ще один акумулятор на основі цього контролера був успішно відновлений за допомогою дозарядки малими струмами з обмеженням струму через роз'єм акумулятора, а значить його контролер не був заблокований. Контролери цих акумуляторів були заблоковані за різних умов, що дозволяє зробити припущення про непридатність пропонованої послідовності для цієї моделі.

Вірогідною причиною неможливості застосування запропонованої послідовності для цієї моделі акумулятора може бути перепалювання запобіжника контролером при спробі заряду повністю

розрядженого акумулятора через занадто великий струм.

Таблиця 1
Експериментальне дослідження успішності застосування запропонованого методу відновлення

Контролер	Виробник батареї ноутбука	Відновлення із зовнішнім навантаженням
bq8030	Lenovo, Acer, Dell	вдало
bq8020	Lenovo, IBM	вдало
bq8011	IBM	вдало
bq20z45	HP	
bq20z75	HP	
bq30z55	Asus	невдало
M37512	HP, IBM	вдало
bq8050	HP	
bq8055	Lenovo, Acer	
bq9000	Acer	
MAX1789	HP	
A2168	Dell (сумісна копія)	

9. Опис пакета утиліт для роботи з контролерами акумуляторів

Нижче наведені можливості утиліт, які використовуються для роботи з мікроконтролерами акумуляторів під час їх відновлення.

smbusb_sbsreport – утиліта виводить повний звіт за підключеним акумулятором. У звіті міститься інформація про назву акумулятора, дату створення, номінальна та фактична ємності, напруги на кожному каскаді, кількість циклів заряду/розряду та інша інформація.

smbusb_scan – утиліта сканує діапазон адрес на можливість виконання певної команди.

smbusb_comm – утиліта виконує читання або запис даних за заданою довжиною та адресою.

smbusb_bq8030flasher – утиліта для читання/запису дампа пам'яті мікроконтролера bq8030.

smbusb_m37512flasher – утиліта для читання/запису дампа пам'яті мікроконтролера M37512. Має різні пресети під час запису даних у пам'ять мікроконтролера.

smbusb_r2j240flasher – утиліта для читання/запису дампа пам'яті мікроконтролера R2J240. Має різні пресети під час запису даних у пам'ять мікроконтролера.

Процедура читання інформації з контролера дозволяє знизити трудовитрати під час первинної діагностики батареї. Ця інформація дозволяє визначити кількість циклів заряду (рис. 2 і рис. 3), назву виробника (рис. 4), і розміщення бітів (рис. 5).

Manufacturer Name:	LGC
Device Name:	LNV-01AV41
Device Chemistry:	LiO
Serial Number:	6533
Manufacture Date:	2017.02.21
Manufacturer Access:	0018
Remaining Capacity Alarm:	410 mAh(/10mWh)
Remaining Time Alarm:	10 min
Battery Mode:	e0a4
At Rate:	0 mAh(/10mWh)
At Rate Time To Full:	65535 min
At Rate Time To Empty:	65535 min
At Rate OK:	1
Temperature:	17.75 degC
Voltage:	13868 mV
Current:	0 mA
Average Current:	0 mA
Max Error:	0 %
Relative State Of Charge	89 %
Absolute State Of Charge	79 %
Remaining Capacity:	3272 mAh(/10mWh)
Full Charge Capacity:	3692 mAh(/10mWh)
Run Time To Empty:	65535 min
Average Time To Empty:	65535 min
Average Time To Full:	65535 min
Charging Current:	1276 mA
Charging Voltage:	16600 mV
Cycle Count:	156
Cell 0 voltage:	3463 mV
Cell 1 voltage:	3460 mV
Cell 2 voltage:	3478 mV
Cell 3 voltage:	3467 mV

Рис. 2. Інформація про батарею 2017-го року

Manufacturer Name:	LGC
Device Name:	L12L4A0
Device Chemistry:	LiO
Serial Number:	19504
Manufacture Date:	2014.11.24
Manufacturer Access:	0008
Remaining Capacity Alarm:	317 mAh(/10mWh)
Remaining Time Alarm:	10 min
Battery Mode:	e010
At Rate:	0 mAh(/10mWh)
At Rate Time To Full:	65535 min
At Rate Time To Empty:	65535 min
At Rate OK:	1
Temperature:	21.45 degC
Voltage:	15837 mV
Current:	0 mA
Average Current:	0 mA
Max Error:	0 %
Relative State Of Charge	0 %
Absolute State Of Charge	0 %
Remaining Capacity:	0 mAh(/10mWh)
Full Charge Capacity:	2070 mAh(/10mWh)
Run Time To Empty:	65535 min
Average Time To Empty:	65535 min
Average Time To Full:	65535 min
Charging Current:	1075 mA
Charging Voltage:	16400 mV
Cycle Count:	56
Cell 0 voltage:	4089 mV
Cell 1 voltage:	4030 mV
Cell 2 voltage:	4063 mV
Cell 3 voltage:	3655 mV

Рис. 3. Інформація про батарею 2014-го року

Висновки

Це дослідження вирішує проблеми аналізу та пропонує рішення для виконання ремонту акумуляторів для ноутбуків. Запропонований набір кроків дозволяє спростити процес діагностики та ремонту акумуляторів з контролерами батарей.

Проведено аналіз конфігурацій і компонування батарей для ноутбуків. Розбираються контролери акумуляторів і популярні мікросхеми.

Manufacturer Name:	Panasoni
Device Name:	IBM-02K662
Device Chemistry:	LiO
Serial Number:	1186
Manufacture Date:	2000.05.23
Manufacturer Access:	0008
Remaining Capacity Alarm:	360 mAh(/10mWh)
Remaining Time Alarm:	10 min
Battery Mode:	0000
At Rate:	0 mAh(/10mWh)
At Rate Time To Full:	65535 min
At Rate Time To Empty:	0 min
At Rate OK:	0
Temperature:	17.45 degC
Voltage:	7870 mV
Current:	0 mA
Average Current:	0 mA
Max Error:	0 %
Relative State Of Charge	0 %
Absolute State Of Charge	0 %
Remaining Capacity:	0 mAh(/10mWh)
Full Charge Capacity:	2605 mAh(/10mWh)
Run Time To Empty:	0 min
Average Time To Empty:	0 min
Average Time To Full:	65535 min
Charging Current:	200 mA
Charging Voltage:	12600 mV
Cycle Count:	57
Manufacturer Data:	42 80 02 16 00 00 57 0a 25 0b 42 00

Рис. 4. Інформація про батарею 2000-го року

```

00000000: 1130 1290 2a30 0031 1068 00c8 3138 1290  .0..*0.1.h..18..
00000010: 0853 414e 594f 0031 3120 20ff ffff 0105  .SANYO.11 .....
00000020: ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff  .....
00000030: 0130 2020 2020 2020 2020 2020 2020 2020  .0 .....
00000040: 044c 494f 4e30 ffff ffff ffff 0e10 0f30  .LION0.....0
00000050: 10fa ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff  .....
00000060: ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff  .....
00000070: ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff  .....
00000080: 30f0 c120 ff9c 0af0 00fc ffff 0000 0600  .0.....
00000090: 0900 0400 0064 102c 1054 10ae 0400 5f32  .d...T...2
000000a0: 0802 fb0e fb0e 0bfe 550a f05a 5603 4600  .U..ZV.F.
000000b0: ff12 ffff ff01 00bd 01ff ffff ffff ffff  .....
000000c0: ffff ffff ffff ffff ff01 01ff ffff ffff  .....
000000d0: ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff  .....
000000e0: ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff ffff  .....
000000f0: ffff 0f0a 1004 ffff ffff ffff ffff ffff  .....

```

Рис. 5. Фрагмент знімку пам'яті контролера батареї

Оригінальні акумулятори завжди робляться з максимальним ресурсом, тому навіть елементи з дуже старих оригінальних батарей ноутбуків можуть мати більшу ємність, ніж неоригінальні елементи. Батареї можуть бути просто розряджені, і, якщо контролер економний, то в такому стані вони можуть пролежати десятиліття без значної втрати ємності.

Одним з основних видів деградації елементів є збільшення їх внутрішнього опору. Як наслідок, вони не витримують розряд великим струмом і відключаються, тому й перестають працювати в оригінальній батареї ноутбука. Використання паралельного з'єднання літій-іонних акумуляторів при їх повторному використанні знижує внутрішній опір збірки.

Таким чином, серед факторів, що надають максимальний вплив на прискорену деградацію літій-іонних акумуляторів, слід віднести високу температуру, великі струми заряду і розряду, високу або низьку напругу, а також інтенсивність використання.

Для відновлення роботи частини неробочих батарей достатньо зарядити окремі їх елементи. Для іншої частини буває достатньо зробити емуляцію навантаження у вигляді резистора і подати на його зовнішній плюс дпотом напругу від верхньої батареї.

Тобто підключити VCC роз'єму до плюсу верхньої батареї і використовувати резистор як навантаження на GND, щоб струм був трохи більше одного ампера.

Для частини батарей існує можливість перепроставити контролер. При цьому необхідно орієнтуватися на існуючі та описані знання.

Якщо заміна самих елементів живлення у складі акумулятора необхідна то запропонована послідовність розбирання корпусу батареї дозволить зробити цей процес передбачуваним та відтворюваним. Рекомендується виконувати заміну елементів шляхом паралельної заміни – вирівняти напруги на каскадах, припаяти нові елементи, прибрати зношені. У такий спосіб мікроконтролер не визначить це як аварію.

Інша запропонована послідовність дозволяє здійснити процес діагностики та модифікації прапорців помилок у складі контролера.

Удосконалення цієї методологічної та технологічної основи є напрямом подальших досліджень і розробок. Планується дослідження виконання запропонованого методу на інших моделях контролерів.

Внесок авторів: аналіз методів відновлення акумуляторів – А. Г. Тецький, А. Є. Перепелицин, О. В. Желтухін, аналіз механізмів захисту акумуляторів – О. В. Желтухін, аналіз даних контролерів – А. Г. Тецький, практичне використання запропонованої послідовності відновлення акумуляторів – А. Г. Тецький, А. Є. Перепелицин, О. В. Желтухін.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Pistoia, G. *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications* [Text] / G. Pistoia. – Elsevier, 1st edition, 2014. – 664 p.
2. *Sorting, characterisation, environmentally friendly recycling and re-use of components from End-of-Life 18650 Li ion batteries* [Text] / P. Cattaneo, D. Callegari, D. Merli, C. Tealdi, D. Vadivel, C. Milanese, V. Kapelyushko, F. D'aprile, E. Quartarone // *Advanced Sustainable Systems*. – 2023. – Vol. 7, no. 9. – Article no. 2300161. – P. 1-12. DOI: 10.1002/adsu.202300161.
3. *CP2112 Classic USB Bridges Specification* [Online]. – Available at: <https://www.silabs.com/interface/usb-bridges/classic/device.cp2112>. – 10.03.2023.
4. *USB SMBus interface - sdbus* [Online]. – Available at: <https://github.com/h4tr3d/sdbus>. – 10.03.2023.
5. *Технічна електрохімія 2: Хімічні джерела струму [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» [Електронний ресурс] / М. В. Бик, С. В. Фроленкова, О. І. Букет, Г. С. Васильєв; КНІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КНІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 321 с. – Available:*

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23888/3/Tehn_el_chem_part2_Power_sources.pdf. – 10.03.2023.

6. *Smart Battery Data Specification* [Online]. – Available at: <http://sbs-forum.org/specs/sbdat110.pdf>. – 10.03.2023.

7. *12AH3 Specification* [Online]. – Available at: <https://www.scribd.com/doc/146426827/12AH3>. – 10.03.2023.

8. *Perepelitsyn, A. Method of creation of power sources for home appliances under constraints of limited resources* [Text] / A. Perepelitsyn, A. Tetskyi // *Radioelectronic and Computer Systems*. – No. 2 (106). – 2023. – P. 81-93. DOI: 10.32620/reks.2023.2.07.

9. *Madani, S. S. A Model-Based Approach for Temperature Estimation of a Lithium-ion Battery Pack* [Text] / S. S. Madani, C. Ziebert // *Proceedings of 2022 Asia Power and Electrical Technology Conference (APET)*. – 2022. – P. 357-360. DOI: 10.1109/APET56294.2022.10072755.

10. *Hacking the bq8030 with SANYO firmware* [Online]. – Available at: <https://www.karosium.com/2016/08/hacking-bq8030-with-sanyo-firmware.html>. – 01.10.2023.

11. *Battery Management System Hardware Concepts: An Overview* [Text] / M. Lelie, T. Braun, M. Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, H. Zappen, D. U. Sauer // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, no. 4. – Article No. 534. – P. 1–27. DOI: 10.3390/app8040534.

References

1. Pistoia, G. *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. Elsevier, 1st edition, 2014. 664 p.
2. Cattaneo, P., Callegari, D., Merli, D., Tealdi, C., Vadivel, D., Milanese, C., Kapelyushko, V., D'aprile, F., & Quartarone, E. *Sorting, characterisation, environmentally friendly recycling and re-use of components from End-of-Life 18650 Li ion batteries*. *Advanced Sustainable Systems*, 2023, vol. 7, no. 9, article no. 2300161, pp. 1-12. DOI: 10.1002/adsu.202300161.
3. *CP2112 Classic USB Bridges Specification*. Available at: <https://www.silabs.com/interface/usb-bridges/classic/device.cp2112> (accessed March 10, 2023).
4. *USB SMBus interface - sdbus*. Available at: <https://github.com/h4tr3d/sdbus> (accessed March 10, 2023).
5. Byk, M. V., Frolenkova, S. V., Buket, O. I., & Vasylyev, H. S. *Tekhnichna elektrokhimia 2: Khimichni dzhherela strumu* [Technical electrochemistry 2: Chemical current sources]. Kyiv, KPI named after Igor Sikorsky, 2018. 321 p. Available at: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23888/3/Tehn_el_chem_part2_Power_sources.pdf (accessed March 10, 2023).
6. *Smart Battery Data Specification*. Available at: <http://sbs-forum.org/specs/sbdat110.pdf> (accessed March 10, 2023).
7. *12AH3 Specification*. Available at: <https://www.scribd.com/doc/146426827/12AH3> (accessed March 10, 2023).

8. Perepelitsyn, A., & Tetskyi, A. Method of creation of power sources for home appliances under constraints of limited resources. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2023, no. 2 (106), pp. 81-93. DOI: 10.32620/reks.2023.2.07.

9. Madani, S. S., & Ziebert, C. A Model-Based Approach for Temperature Estimation of a Lithium-ion Battery Pack. *2022 Asia Power and Electrical Technology Conference (APET)*, 2022, pp. 357-360. DOI: 10.1109/APET56294.2022.10072755.

10. *Hacking the bq8030 with SANYO firmware*. Available at: <https://www.karosium.com/2016/08/hacking-bq8030-with-sanyo-firmware.html> (accessed March 10, 2023).

11. Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., & Sauer, D. U. Battery Management System Hardware Concepts: An Overview. *Applied Sciences* 2018, vol. 8, no. 4, article no. 534, pp. 1-27. DOI: 10.3390/app8040534.

Надійшла до редакції 10.08.2023, розглянута на редколегії 20.09.2023

METHOD OF REPAIRING OF LAPTOP BATTERIES UNDER CONSTRAINTS OF LIMITED RESOURCES

Artem Tetskyi, Artem Perepelitsyn, Olexander Zheltukhin

The subject of study in this article and research is the process of reuse and recovery of power elements and batteries of modern digital electronics and laptop batteries, as well as controller diagnostic and repairing processes. The **goal** is to increase the duration of the lifetime and improve the maintainability and efficiency of reusing batteries of laptops and portable electronic devices. The **task** is to analyze existing types of laptop batteries; analyze different models of battery controllers; analyze options for repairing Li-ion batteries from secondary good market; propose a sequence of repairing of laptop batteries and portable electronics with use of Li-ion cells; and perform practical application of the research results. According to the tasks, the following **results** were obtained. The possibilities and existing options for repairing laptop batteries are analyzed. The possible mechanisms of protection of Li-ion batteries with different principles of action are analyzed. An analysis of the possibility of repairing of batteries with diagnostics of the elements in the laptop accumulator is performed. The process of repairing of the operation of laptop Li-ion batteries is proposed. A sequence for resetting error flags using additional equipment is proposed. The process of mechanical disassembling of the plastic housing of the laptop battery for the replacement of elements is described. The necessary equipment and tools for performing advanced diagnostics of laptop batteries are provided. A comparison of the results of the analysis of battery controllers and the practical experience of their recovery is performed. The description of the utility package for working with battery controllers is provided. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is in the fact that the comparative analysis of recovery methods of different models of batteries from different manufacturers allows to assess in advance the possibility of successful repairing of a laptop battery with a given controller. The proposed method of repairing of laptop batteries makes the recovery process predictable and reproducible for a wide range of battery models. The provided practical example of using the method demonstrates the possibility of obtaining additional information about batteries, even if the manufacturer does not provide documentation. The practical use of the research results allows to perform the process of repairing of a part of laptop battery models without additional knowledge and tools. It allows to reduce costs for the processes of maintaining the workability of electronics with extending of efficient device lifetime.

Keywords: Li-ion accumulator; charge controller; secondary good market; repairing of batteries; reuse of electronics; 18650 battery.

Тецький Артем Григорович – канд. техн. наук, доц. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Перепелицин Артем Євгенович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Желтухін Олександр Васильович – старш. викл. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Artem Tetskyi – PhD, Associate Professor at the Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.tetskiy@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0003-1745-2452, Scopus Author ID: 57202894656.

Artem Perepelitsyn – PhD, Associate Professor at the Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.perepelitsyn@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0002-5463-7889, Scopus Author ID: 56332607800.

Olexander Zheltukhin – Senior Lecturer at the Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.zheltukhin@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0001-7338-6256, Scopus Author ID: 58099279900.