Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Василишин Ігор Ігорович
Vasylyshyn Ihor

УДК 004:681.5

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр та назва спеціальності)

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Розробка системи діагностики та профілактики літій-іонних акумуляторів
Development of a system of diagnostics and prevention of lithium-ion batteries

Науковий керівник:
доцент,
викладач кафедри
комп'ютерної інженерії та
електроніки
Терлецький А.І

Рецензент:
кандидат фізико-
математичних наук, доцент
Ліщинський І.М

Івано-Франківськ
2024

Зміст

ВСТУП.....

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....

1.1 Будова та принцип роботи літій-іонних акумуляторів.....

1.2 Процеси деградації літій-іонних акумуляторів.....

1.3 Існуючі методи діагностики.....

1.4 Системи управління батареями (BMS).....

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРАХ.....

2.1 Розробка еквівалентної схеми акумулятора.....

2.2Математичний опис процесів заряджання та розряджання.....

2.3 Моделювання процесів деградації.....

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ДІАГНОСТИКИ.....

3.1Вибір діагностичних параметрів.....

3.2 Розробка алгоритмів обробки даних.....

3.3Розробка методів оцінки стану здоров'я (SOH): Розробка методів для кількісної оцінки залишкової ємності акумулятора.....

РОЗДІЛ 4. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПРОФІЛАКТИКИ.....

4.1 Розробка стратегій управління заряджанням.....

4.2Розробка стратегій термоменеджменту.....

4.3Розробка системи балансування.....

РОЗДІЛ 5. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА .....

5.1 Розробка програмного забезпечення.....

5.2Створення експериментальної установки.....

5.3Проведення експериментів.....

5.4Аналіз результатів експериментів.....

6. ВИСНОВОК.....

7. ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....

Перелік умовних позначень

- **ЛА** - літій-іонний акумулятор
- **BMS** - система управління батареями (Battery Management System)
- **SOH** - стан здоров'я (State of Health)
- **SOC** - стан заряду (State of Charge)
- **EOL** - кінець життя (End of Life)
- **RUL** - залишковий термін служби (Remaining Useful Life)
- **OEM** - оригінальне обладнання (Original Equipment Manufacturer)
- **SEI** - твердий електролітне інтерфейс (Solid Electrolyte Interface)
- **Li-plating** - відкладення літію
- **ECM** - еквівалентна схема акумулятора (Equivalent Circuit Model)
- **PDE** - диференціальні рівняння в часткових похідних (Partial Differential Equations)
- **MATLAB** - програмний пакет для математичних обчислень
- **Simulink** - середовище моделювання динамічних систем
- **Python** - мова програмування загального призначення
- **GUI** - графічний інтерфейс користувача (Graphical User Interface)

Вступ

Актуальність теми: Актуальність дослідження літій-іонних акумуляторів та розробки систем для їх діагностики та профілактики зумовлена їхнім широким застосуванням, адже вони стали невід'ємною частиною сучасного життя. Їх використовують у смартфонах, ноутбуках, електромобілях, стаціонарних системах зберігання енергії тощо. Відповідно до даних акумуляторів виростають **високі вимоги до надійності,** збільшення їхньої потужності та енергоємності , а також їх використання в критично важливих системах (наприклад, медичному обладнанні, авіації), висувають високі вимоги до надійності та безпеки.

Літій-іонні акумулятори схильні до деградації з часом, що призводить до втрати ємності, збільшення внутрішнього опору та інших негативних наслідків. Це скорочує термін їх служби та потребує частої заміни. Також продовження терміну служби акумуляторів дозволяє знизити витрати на їх заміну та підвищити економічну ефективність пристроїв, в яких вони використовуються.

Певні екологічні аспекти теж відіграють ключові моменти в актуальності даної теми. Правильна утилізація великої кількості відпрацьованих акумуляторів є складною екологічною проблемою. Тому продовження терміну їх служби сприяє зменшенню обсягів відходів.

Таким чином, розробка ефективних систем діагностики та профілактики літій-іонних акумуляторів є актуальним завданням, яке дозволить: збільшити термін служби акумуляторів, підвищити надійність та безпеку їх експлуатації, знизити витрати на обслуговування, сприяти розвитку "зелених" технологій.

Мета роботи: ретельне дослідження літій-іонних акумуляторів з акцентом на їх розробку, розвиток та глибшого розуміння механізмів, зо лежать в основі акумуляторів.

Виходячи з мети роботи сформульовано наступні **завдання дослідження:**

-дати повну характеристику літій-іонних акумуляторів за даними наукової літератури;

- дослідити зміни та описати методи дослідження;

- провести дослідження та зробити висновок.

Об’єкт дослідження: Літій-іонні акумулятори.

Предмет дослідження: Процеси деградації акумуляторів, методи їх діагностики та профілактики.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Будова та принцип роботи літій-іонних акумуляторів

Літій-іонні акумулятори революціонізували світ портативної електроніки та стають все більш популярними в електромобілях та системах зберігання енергії. Їх висока енергетична щільність, довгий цикл життя та відносна безпека зробили їх незамінними компонентами сучасних пристроїв.

Будова літій-іонного акумулятора

Літій-іонний акумулятор складається з кількох основних компонентів:

- Електроди:
  - Позитивний електрод (катод)**:** Виготовляється з матеріалів, здатних приймати іони літію, таких як літій-кобальтовий оксид ($LiCoO_2$), літій-нікель-марганцево-кобальтовий оксид (NMC), літій-залізо-фосфат (LFP) та інші. Вибір матеріалу впливає на енергетичну щільність, потужність та циклічне життя акумулятора.
  - Негативний електрод (анод): Найчастіше виготовляється з графіту, який може вміщувати атоми літію. Графіт забезпечує хорошу провідність і стійкість до циклічних навантажень.
- Сепаратор: Тонка пориста мембрана, яка фізично розділяє позитивний і негативний електроди, але дозволяє проходження іонів літію. Виготовляється з мікропористої поліетилену або поліпропілену.
- Електроліт: Органічний розчинник (наприклад, етиленкарбонат, діетилкарбонат) з розчиненою в ньому літієвою сіллю (наприклад, $LiPF_6$). Електроліт забезпечує іонну провідність і передачу заряду між електродами.
- Токовивідні колектори: Металеві фольги (мідь для катода, алюміній для анода), які з'єднують активні матеріали електродів з зовнішнім електричним ланцюгом.

- Корпус: Захищає внутрішні компоненти акумулятора від механічних пошкоджень та забезпечує герметичність.

Принцип роботи

Робота літій-іонного акумулятора базується на процесах інтеркаляції та деінтеркаляції іонів літію між електродами.

- Заряджання: Під час заряджання іони літію деінтеркалюються з позитивного електрода і інтеркалюються в негативний електрод. Одночасно електрони рухаються по зовнішньому ланцюгу від негативного до позитивного електрода, створюючи електричний струм.
- Розряджання: Під час розряджання відбувається зворотний процес: іони літію деінтеркалюються з негативного електрода і інтеркалюються в позитивний електрод. Електрони рухаються по зовнішньому ланцюгу від позитивного до негативного електрода, забезпечуючи електричний струм.

Хімічні процеси

Приклад для системи $LiCoO_2$/графіт:

- Заряджання: $LiCoO_2 \rightarrow Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^- \; xLi^+ + 6C \rightarrow Li_xC_6$
- Розряджання: $Li_xC_6 \rightarrow xLi^+ + 6C + xe^- \; Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^- \rightarrow LiCoO_2$

Фактори, що впливають на роботу акумулятора

- Матеріали електродів: Вибір матеріалів для електродів визначає енергетичну щільність, потужність, циклічне життя та безпеку акумулятора.
- Електроліт: Властивості електроліту впливають на іонну провідність, стабільність і безпеку акумулятора.

- Сепаратор: Пористість і товщина сепаратора впливають на швидкість іонного транспорту та механічну міцність акумулятора.
- Температура: Температура впливає на швидкість хімічних реакцій, в'язкість електроліту і загальну ефективність акумулятора.
- Швидкість заряджання/розряджання: Високі швидкості заряджання/розряджання можуть призвести до нерівномірного розподілу іонів літію в електродах і, як наслідок, до деградації акумулятора.

Важливо розуміти, що це лише спрощена модель роботи літій-іонного акумулятора. Реальні процеси можуть бути більш складними і залежати від багатьох факторів.

1.2 Процеси деградації літій-іонних акумуляторів

Літій-іонні акумулятори, незважаючи на свою високу енергетичну щільність та довгий цикл життя, з часом піддаються деградації. Це призводить до зниження ємності, збільшення внутрішнього опору та, як наслідок, скорочення терміну служби. Розуміння процесів деградації є ключовим для розробки ефективних систем діагностики та профілактики.

Основні причини деградації

1. Календарне старіння:
    - Саморозряд: Навіть коли акумулятор не використовується, відбуваються повільні хімічні реакції, які призводять до втрати заряду.
    - Внутрішні хімічні реакції: Побічні реакції між компонентами акумулятора (електролітом, електродами) можуть призвести до утворення пасивних шарів, які перешкоджають проходженню іонів літію.

- Термічна деградація: Високі температури прискорюють хімічні реакції та можуть призвести до деградації матеріалів електродів.

2. Циклічна деградація:

- Формування SEI шару: Під час перших циклів заряджання-розряджання на поверхні негативного електрода утворюється шар твердого електроліту (SEI). З часом цей шар може потовщуватися, що збільшує внутрішній опір акумулятора.
- Неоднорідний розподіл літію: Нерівномірний розподіл іонів літію в електродах може призвести до утворення дендритів та короткого замикання.
- Механічна деградація: Постійні зміни об'єму електродів під час циклів заряджання-розряджання можуть призвести до їхнього розтріскування та відшарування від токовивідних колекторів.

3. Теплова деградація:

- Перегрів: Високі температури можуть прискорити всі процеси деградації, описані вище.
- Термічне розбігання: У деяких випадках перегрів може призвести до неконтрольованого виділення тепла та вибуху акумулятора.

4. Інші фактори:

- Глибокий розряд: Часті глибокі розряди можуть пошкодити структуру електродів.
- Швидке заряджання: Високі швидкості заряджання можуть призвести до нерівномірного розподілу іонів літію в електродах.

- Високі струми розряду: Великі струми розряду можуть спричинити підвищення температури та збільшення внутрішнього опору.

1.3 Існуючі методи діагностики

Для оцінки стану літій-іонних акумуляторів та виявлення ранніх ознак деградації використовується широкий спектр методів. Кожен метод має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу залежить від поставлених завдань та доступного обладнання.

Безпосередні вимірювання

Безпосередні вимірювання є одним з найпростіших і найінтуїтивніших методів оцінки стану здоров'я (SOH) літій-іонних акумуляторів. Вони передбачають прямий аналіз фізичних характеристик батареї для визначення її здатності зберігати та віддавати енергію.

Основні методи прямих вимірювань

- Вимірювання ємності:
  - Повний цикл заряджання-розряджання: Найточніший метод, але трудомісткий і може впливати на термін служби акумулятора.
  - Часткові цикли: Швидші вимірювання, але менш точні. Використовуються для оперативної оцінки.
- Вимірювання внутрішнього опору:
  - Імпедансна спектроскопія: Дозволяє оцінити різні процеси всередині акумулятора, такі як утворення SEI-плівки, але вимагає спеціального обладнання.
  - Метод постійного струму: Простіший метод, але менш точний.
  -

- Аналіз кривих заряджання-розряджання:
    - Кулонометрична ефективність: Показує, яка частина заряду, що приймається при зарядженні, віддається при розряді.
    - Напруга на кінці розряду: Зниження напруги свідчить про деградацію.

Переваги безпосередніх вимірювань

- Простота: Не вимагають складних математичних моделей або алгоритмів машинного навчання.
- Інтуїтивність: Результати легко інтерпретувати.
- Надійність: При правильній калібровці обладнання забезпечують досить точні результати.

Недоліки безпосередніх вимірювань

- Трудомісткість: Особливо для повних циклів заряджання-розряджання.
- Вплив на термін служби: Часті повні цикли можуть прискорити деградацію акумулятора.
- Недостатня інформативність: Не завжди дозволяють виявити ранні ознаки деградації.
- Залежність від умов вимірювання: Температура, швидкість заряджання та інші фактори можуть вплинути на результати.

Коли використовувати безпосередні вимірювання?

- Для калібрування інших методів: Повний цикл заряджання-розряджання часто використовується для встановлення базової лінії для інших методів оцінки SOH.

- Для швидкої оцінки: Часткові цикли та вимірювання внутрішнього опору можуть бути використані для оперативної оцінки стану акумулятора.
- Для перевірки точності інших методів: Порівняння результатів різних методів дозволяє оцінити їх точність.

Електрохімічні методи:

Електрохімічні методи є одним з найпоширеніших і найінформативніших способів оцінки стану здоров'я (SOH) літій-іонних акумуляторів. Вони дозволяють отримати детальну інформацію про процеси, що відбуваються всередині акумулятора, і виявити ранні ознаки деградації.

Основні електрохімічні методи

- Імпедансна спектроскопія (EIS):
  - Принцип дії: На акумулятор накладається змінний струм з різною частотою, а потім аналізується отримана відповідь у вигляді комплексного опору.
  - Інформація: Дозволяє оцінити внутрішній опір акумулятора, утворення пасивуючої плівки (SEI), деградацію електродів та інші процеси.
  - Переваги: Висока інформативність, можливість виявлення ранніх ознак деградації.
  - Недоліки: Вимагає спеціального обладнання, складність інтерпретації отриманих даних.
- Кулонометричний аналіз:
  - Принцип дії: Вимірювання кількості електричного заряду, що проходить через акумулятор під час заряджання та розряджання.

- Інформація: Дозволяє оцінити кулонометричну ефективність, тобто відношення кількості заряду, що віддається при розряді, до кількості заряду, що приймається при заряджанні.
- Переваги: Простота реалізації, інформативність.
- Недоліки: Не дозволяє оцінити всі аспекти стану акумулятора.

- Циклічні вольтамперметрія (CV):
  - Принцип дії: Вимірювання залежності струму від напруги при зміні напруги на акумуляторі з постійною швидкістю.
  - Інформація: Дозволяє оцінити кінетику електрохімічних реакцій, виявити побічні реакції та оцінити стабільність електродів.
  - Переваги: Висока чутливість до змін у структурі електродів.
  - Недоліки: Вимагає спеціального обладнання, складність інтерпретації отриманих даних.

Переваги електрохімічних методів

- Висока точність: Дозволяють отримати кількісні характеристики стану акумулятора.
- Інформативність: Дають детальну інформацію про процеси, що відбуваються всередині акумулятора.
- Можливість виявлення ранніх ознак деградації: Дозволяють виявити проблеми на ранніх стадіях, що дозволяє уникнути несподіваних відмов.

Недоліки електрохімічних методів

- Складність: Вимагають спеціального обладнання та знань електрохімії.

- Час: Деякі методи можуть бути досить тривалими.
- Вплив на акумулятор: Деякі методи можуть впливати на стан акумулятора.

Застосування електрохімічних методів

Електрохімічні методи широко використовуються в дослідженнях та виробництві літій-іонних акумуляторів, а також для оцінки стану акумуляторів в різних пристроях, таких як електромобілі, портативна електроніка та стаціонарні системи зберігання енергії..

Фізичні методи:

- Фізичні методи оцінки стану здоров'я (SOH) літій-іонних акумуляторів доповнюють електрохімічні методи і дозволяють отримати додаткову інформацію про внутрішні процеси в акумуляторі. Вони базуються на вимірюванні фізичних характеристик, таких як температура, розміри, вібрація та інші.

Основні фізичні методи

- Термографія:
  - Принцип дії: За допомогою інфрачервоних камер вимірюється температура різних ділянок акумулятора.
  - Інформація: Неоднорідність температурного поля може вказувати на внутрішні дефекти, такі як короткі замикання, нерівномірний розподіл струму.
  - Переваги: Неінвазивний метод, дозволяє візуалізувати теплові процеси.
  - Недоліки: Вимагає спеціального обладнання, може бути чутливим до зовнішніх впливів.

- Акустична емісія:
    - Принцип дії: Вимірювання акустичних сигналів, що виникають всередині акумулятора під час деградації.
    - Інформація: Дозволяє виявити мікротріщини, відшарування електродів та інші механічні пошкодження.
    - Переваги: Висока чутливість до ранніх стадій деградації.
    - Недоліки: Вимагає спеціального обладнання, складність інтерпретації сигналів.
- Рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ):
    - Принцип дії: Створення тривимірного зображення внутрішньої структури акумулятора за допомогою рентгенівських променів.
    - Інформація: Дозволяє виявити дефекти конструкції, неоднорідність матеріалів, відшарування електродів.
    - Переваги: Висока роздільна здатність, можливість отримати детальну інформацію про внутрішню структуру.
    - Недоліки: Вимагає дорогого обладнання, променеве навантаження на персонал.

Переваги фізичних методів

- Неінвазивність: Багато методів не вимагають розкриття акумулятора.
- Додаткова інформація: Доповнюють дані, отримані електрохімічними методами.
- Можливість виявлення різних типів дефектів: Від механічних пошкоджень до термохімічних процесів.

Недоліки фізичних методів

- Висока вартість обладнання: Деякі методи вимагають дорогого обладнання.
- Складність інтерпретації даних: Вимагають спеціальних знань та програмного забезпечення.
- Обмежена інформативність: Не всі методи дозволяють оцінити всі аспекти стану акумулятора.

Застосування фізичних методів

Фізичні методи використовуються для:

- Контролю якості виробництва акумуляторів.
- Оцінки стану акумуляторів в екстремальних умовах.
- Виявлення причин відмов акумуляторів.
- Розробки нових конструкцій акумуляторів.

Комп'ютерні методи:

Комп'ютерні методи відіграють все більш важливу роль в оцінці стану здоров'я (SOH) літій-іонних акумуляторів. Вони дозволяють аналізувати великі обсяги даних, отриманих з різних датчиків та сенсорів, встановлених в акумуляторах або системах управління батареями (BMS). Завдяки цьому можна виявляти закономірності, прогнозувати деградацію та оптимізувати роботу акумуляторів.

Основні комп'ютерні методи

- Машинне навчання:
  - Нейронні мережі: Використовуються для прогнозування SOH на основі вхідних даних (напруга, струм, температура, внутрішній опір тощо).

- Рекурентні нейронні мережі: Здатні враховувати часову залежність даних.
- Схвилювальні нейронні мережі: Ефективні для аналізу часових рядів.
- Дерева рішень, випадкові ліси: Використовуються для класифікації стану акумулятора та виявлення аномалій.

- Статистичні методи:
  - Кореляційний аналіз: Дозволяє виявити взаємозв'язки між різними параметрами акумулятора.
  - Регресійний аналіз: Використовується для побудови моделей, що описують залежність SOH від інших параметрів.
- Експертні системи:
  - Бази знань: Містять інформацію про різні типи акумуляторів, їх характеристики та можливі несправності.
  - Правила виведення: Дозволяють на основі вхідних даних приймати рішення про стан акумулятора.

Переваги комп'ютерних методів

- Висока точність: Завдяки великій кількості даних та складним алгоритмам можна досягти високої точності прогнозування SOH.
- Гнучкість: Можна використовувати для аналізу даних з різних джерел і для різних типів акумуляторів.
- Автоматизація: Багато процесів можуть бути автоматизовані, що зменшує трудомісткість.
- Можливість прогнозування: Дозволяють прогнозувати залишковий термін служби акумулятора.

Недоліки комп'ютерних методів

- Високі вимоги до обчислювальних ресурсів: Для навчання складних моделей можуть знадобитися потужні комп'ютери.
- Необхідність великої кількості даних: Для навчання моделей потрібна велика кількість якісних даних.
- Складність інтерпретації результатів: Моделі машинного навчання можуть бути "чорними скриньками", що ускладнює розуміння причин отриманих результатів.

Застосування комп'ютерних методів

- Системи управління батареями (BMS): Для моніторингу стану акумуляторів в реальному часі та оптимізації режимів заряджання/розряджання.
- Прогнозування терміну служби: Для планування заміни акумуляторів.
- Оптимізація роботи електромобілів: Для збільшення пробігу на одному заряді.
- Розробка нових матеріалів для акумуляторів: Для оцінки впливу різних матеріалів на деградацію акумуляторів.

Інші методи:

Окрім вже розглянутих методів (електрохімічних, фізичних та комп'ютерних), існують й інші, більш спеціалізовані підходи до оцінки стану здоров'я (SOH) літій-іонних акумуляторів.

Комбіновані методи

Одним з перспективних напрямків є використання комбінованих методів, що поєднують в собі переваги різних підходів. Наприклад, об'єднання електрохімічних та фізичних методів дозволяє отримати більш повну картину процесів, що відбуваються всередині акумулятора.

Методи, засновані на аналізі газів

Вимірювання складу газів, що виділяються під час роботи акумулятора, може дати інформацію про процеси деградації. Наприклад, збільшення концентрації водню або кисню може свідчити про пошкодження електрода або короткому замиканні.

Методи, засновані на аналізі вібрацій

Аналіз вібраційних сигналів, що виникають в акумуляторі під час роботи, дозволяє виявити механічні пошкодження, такі як тріщини або відшарування електродів.

Методи, засновані на аналізі зображень

Використання оптичних мікроскопів, скануючих зондових мікроскопів та інших методів візуалізації дозволяє досліджувати поверхню електродів та виявляти дефекти на мікроскопічному рівні.

Методи, засновані на аналізі хімічного складу

Аналіз хімічного складу матеріалів електрода може дати інформацію про зміни в їх структурі та складі, що відбуваються в процесі деградації.

Вибір методу діагностики залежить від наступних факторів:

- Мета діагностики: Виявлення ранніх ознак деградації, оцінка залишкового ресурсу, аналіз причин відмови.
- Стадія життєвого циклу акумулятора: Для нових акумуляторів можуть використовуватися інші методи, ніж для старих.
- Доступне обладнання: Не всі методи доступні в лабораторних умовах.

- Вимоги до точності та швидкості: Деякі методи дозволяють

отримати більш точні результати, але вимагають більше часу.

Комбінування різних методів діагностики дозволяє отримати більш повну картину стану акумулятора та розробити ефективні стратегії його експлуатації.

1.4 Системи управління батареями (BMS)

Що таке BMS?

Система управління батареями (Battery Management System, BMS) - це електронний пристрій, призначений для моніторингу, захисту та управління літій-іонними батареями. BMS відіграє критичну роль у забезпеченні безпечної та ефективної роботи батарей, особливо в таких застосуваннях, як електромобілі, портативна електроніка та стаціонарні системи зберігання енергії.

Основні функції BMS:

- Моніторинг: BMS постійно відстежує такі параметри, як напруга кожної окремої комірки, загальна напруга батареї, температура, струм заряджання/розряджання та внутрішній опір.
- Захист: BMS забезпечує захист батареї від перенапруги, перезаряду, глибокого розряду, короткого замикання, перегріву та інших несправностей.
- Балансування: BMS активно балансує напругу між окремими комірками батареї, щоб забезпечити рівномірний розряд і продовжити термін служби батареї.
- Оцінка стану здоров'я (SOH): BMS використовує різні алгоритми для оцінки стану здоров'я батареї, такого як залишкова ємність, внутрішній опір та кількість циклів заряджання/розряджання.

- Керування заряджанням/розряджанням: BMS керує процесами заряджання та розряджання батареї, оптимізуючи їх для досягнення максимальної ефективності та тривалості служби.
- Комунікація: BMS може спілкуватися з іншими системами, такими як система управління транспортним засобом або система домашньої автоматизації, надаючи інформацію про стан батареї та отримуючи команди.

Компоненти BMS:

Система управління батареями (BMS) складається з різних електронних компонентів, які працюють разом, щоб забезпечити безпечну та ефективну роботу літій-іонних акумуляторів. Давайте розглянемо детальніше кожен з цих компонентів.

Основні компоненти BMS

- Мікроконтролер:
  - Серце BMS.
  - Виконує логічні операції, обробляє дані від датчиків, приймає рішення про управління заряджанням/розряджанням та захист батареї.
  - Вибирається залежно від необхідної обчислювальної потужності та функціональності BMS.
- Аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП):
  - Перетворюють аналогові сигнали (напруга, струм, температура) в цифрові, які можуть бути оброблені мікроконтролером.
  - Розрядність АЦП визначає точність вимірювань.
- Датчики:

- Датчики напруги: Вимірюють напругу кожної комірки батареї та загальну напругу батареї.
- Датчики струму: Вимірюють струм заряджання та розряджання.
- Датчики температури: Вимірюють температуру комірок батареї та навколишнього середовища.
- Інші датчики: Можуть бути додаткові датчики, такі як датчики тиску, датчики вологості тощо, залежно від конкретної реалізації BMS.

- Реле та перемикачі:
  - Керують підключенням та відключенням комірок батареї, зарядних пристроїв та інших зовнішніх пристроїв.
  - Забезпечують захист від коротких замикань та перевантажень.
- Комунікаційні інтерфейси:
  - Дозволяють BMS взаємодіяти з іншими системами.
  - Найпоширеніші інтерфейси: CAN, LIN, RS-485, UART.
- Пам'ять:
  - Використовується для зберігання налаштувань, даних калібрування, журналів подій та інших даних.

Функції компонентів

- Мікроконтролер:
  - Приймає рішення про необхідність балансування комірок.
  - Контролює процес заряджання та розряджання.
  - Визначає стан здоров'я батареї.

- Забезпечує захист батареї від різних видів пошкоджень.

- АЦП:
  - Забезпечують точні вимірювання параметрів батареї.
- Датчики:
  - Збирають інформацію про стан батареї.
- Реле та перемикачі:
  - Виконують команди мікроконтролера.
- Комунікаційні інтерфейси:
  - Забезпечують обмін даними з іншими системами.

Вибір компонентів BMS

Вибір компонентів BMS залежить від таких факторів:

- Ємність батареї: Чим більша ємність, тим більше датчиків та більш потужний мікроконтролер може знадобитися.
- Кількість комірок: Збільшення кількості комірок вимагає більшої кількості датчиків та більш складних алгоритмів балансування.
- Вимоги до точності вимірювань: Висока точність вимагає використання високоточних АЦП та датчиків.
- Умови експлуатації: Температурний діапазон, вібрація, вологість впливають на вибір компонентів.
- Вартість: Вартість компонентів є важливим фактором при розробці BMS.

Типи BMS

Системи управління батареями (BMS) відрізняються за своєю архітектурою, функціональністю та областю застосування. Розглянемо основні типи BMS:

За рівнем інтеграції:

- Централізована BMS:
  - Одна система керування для всієї батареї.
  - Проста у реалізації, економічна.
  - Підходить для невеликих батарейних систем.
  - Може бути обмежена у масштабованості для великих систем.
- Модульна BMS:
  - Кожен модуль батареї має свою BMS.
  - Вища надлишковість, краща масштабованість.
  - Більш складна в реалізації та дорожча.
  - Застосовується у великих батарейних системах, таких як електромобілі.
- Розподілена BMS:
  - Комбінація централізованої та модульної BMS.
  - Висока гнучкість та масштабованість.
  - Застосовується у великих, складних батарейних системах.

За функціональністю:

- Пасивна BMS:
  - Тільки моніторить стан батареї.
  - Не здійснює активного балансування або управління заряджанням/розряджанням.
  - Застосовується в простих системах, де не вимагається висока точність і ефективність.

- Активна BMS:
    - Активно керує процесами заряджання, розряджання та балансування.
    - Забезпечує оптимальну роботу батареї та її захист.
    - Застосовується у більшості сучасних батарейних систем.

За типом акумулятора:

- Для літій-іонних батарей: Найбільш поширений тип BMS.
- Для нікель-металгідридних батарей: Мають свої особливості, пов'язані зі специфікою хімічних реакцій.
- Для свинцево-кислотних батарей: Зазвичай простіші за конструкцією, оскільки такі батареї менш вимогливі до точного балансування.

За рівнем інтелекту:

- Проста BMS: Виконує базові функції моніторингу та захисту.
- Інтелектуальна BMS: Використовує алгоритми машинного навчання для прогнозування стану батареї, оптимізації режиму роботи та адаптації до змінних умов експлуатації.

Критерії вибору BMS

- Ємність батареї: Для великих батарей потрібні більш складні BMS.
- Кількість комірок: Збільшення кількості комірок вимагає більш складних алгоритмів балансування.
- Вимоги до точності вимірювань: Висока точність необхідна для критичних застосувань.

- Умови експлуатації: Температурний діапазон, вібрація, вологість впливають на вибір BMS.
- Вартість: Вартість BMS залежить від її функціональності та складності.

Важливість BMS:

Система управління батареями (BMS) є невід'ємною частиною сучасних літій-іонних акумуляторів. Вона виконує критично важливі функції, які забезпечують безпечну, ефективну та довготривалу роботу батареї.

Чому BMS так важлива?

1. Безпека:
   - Захист від перенапруги та недонапруги: Запобігає пошкодженню комірок батареї та ризику вибуху.
   - Захист від перевантаження за струмом: Запобігає перегріву та пошкодженню внутрішніх компонентів.
   - Захист від короткого замикання: Швидко відключає джерело живлення в разі виникнення короткого замикання.
   - Захист від перегріву: Відключає заряджання або розряджання батареї при перевищенні допустимої температури.
2. Оптимізація роботи:
   - Балансування комірок: Підтримує рівномірний розподіл напруги між комірками, збільшуючи загальну ємність батареї та продовжуючи її термін служби.
   - Оптимізація заряджання та розряджання: Вибирає оптимальні режими заряджання та розряджання для збільшення кількості циклів заряд/розряд.

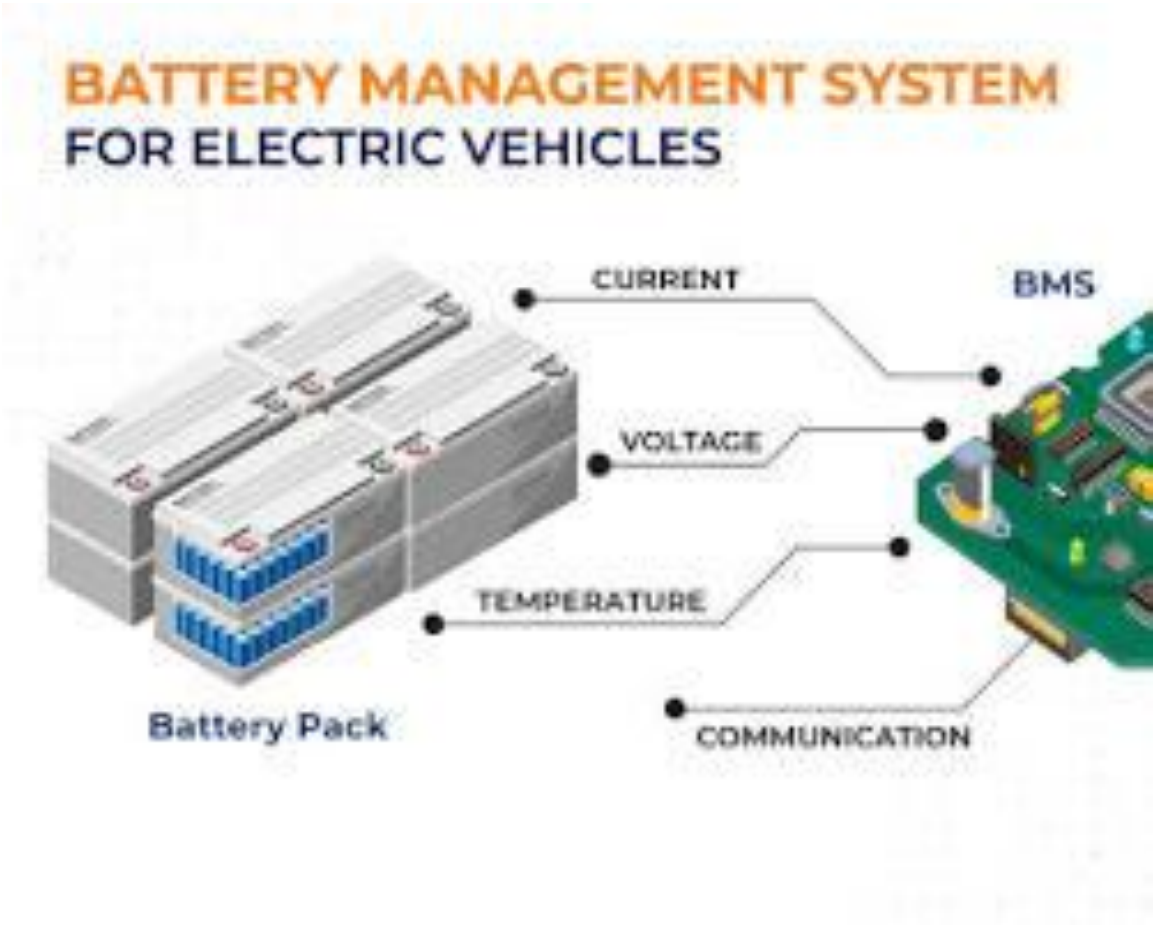
- Прогнозування стану здоров'я: Оцінює залишкову ємність батареї та прогнозує її термін служби.

3. Збільшення терміну служби:

- Завдяки своїм функціям BMS значно продовжує термін служби літій-іонних батарей, зменшуючи деградацію комірок.

4. Збільшення ефективності:

- Оптимізація роботи батареї дозволяє збільшити її ефективність та зменшити втрати енергії.



РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРАХ

2.1Розробка еквівалентної схеми акумулятора

Еквівалентна схема акумулятора - це спрощена модель, яка описує електричні характеристики реального акумулятора за допомогою з'єднання ідеальних елементів (джерело напруги, резистори, конденсатори тощо). Ця схема дозволяє аналізувати поведінку акумулятора в різних режимах роботи, моделювати процеси заряджання та розряджання, а також оцінювати його внутрішній опір.

Чому потрібна еквівалентна схема?

- Аналіз роботи: Дозволяє зрозуміти, як акумулятор поводиться в різних умовах експлуатації.
- Проектування систем: Використовується для моделювання систем, що використовують акумулятори (електромобілі, портативна електроніка тощо).
- Оцінка стану здоров'я: За змінами параметрів еквівалентної схеми можна оцінювати деградацію акумулятора.

Основні елементи еквівалентної схеми

- Ідеальне джерело напруги: Представляє електрорушійну силу акумулятора.
- Внутрішній опір: Описує втрати напруги всередині акумулятора під час протікання струму.
- Полярний конденсатор: Моделює подвійний електричний шар на межі розділу електрод-електроліт.

- Елементи, що враховують поляризацію: Описують нелінійні процеси, що відбуваються при заряджанні та розряджанні акумулятора.

Типи еквівалентних схем

Існує багато різних еквівалентних схем акумулятора, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Найбільш поширені:

- Проста схема з одним резистором: Найпростіша модель, яка враховує лише внутрішній опір акумулятора.
- Модель з одним RC-членом: Додатково враховує поляризацію електрода.
- Модель з кількома RC-членами: Більш точна модель, яка дозволяє врахувати різні типи поляризації.
- Модель з елементом Варбурга: Використовується для моделювання дифузійних процесів в електроліті.

Методи визначення параметрів еквівалентної схеми

- Імпедансна спектроскопія: Найбільш точний метод, який дозволяє визначити всі параметри еквівалентної схеми.
- Метод найменших квадратів: Використовується для підгонки теоретичних кривих до експериментальних даних.
- Метод еквівалентних схем: Заснований на порівнянні експериментальних даних з результатами моделювання різних еквівалентних схем.

Застосування еквівалентних схем

- Прогнозування роботи акумулятора: За допомогою еквівалентних схем можна моделювати поведінку акумулятора в різних режимах роботи і прогнозувати його ресурс.

- Оптимізація режимів заряджання та розряджання: Еквівалентні схеми дозволяють розробити оптимальні алгоритми заряджання та розряджання, що збільшують термін служби акумулятора.
- Створення систем управління батареями: Еквівалентні схеми є основою для розробки систем управління батареями, які забезпечують безпечну та ефективну роботу акумуляторів.

Вибір конкретної еквівалентної схеми залежить від поставлених задач, точності, необхідної для моделювання, та доступних експериментальних даних**.**

2.2 Математичний опис процесів заряджання та розряджання

Математичний опис процесів заряджання та розряджання акумулятора є фундаментальним для розуміння його поведінки та розробки ефективних систем управління батареями. Хоча точний математичний апарат може бути досить складним, існує кілька спрощених моделей, які дозволяють описати основні процеси.

Основні рівняння

- Закон Ома для нелінійних елементів:
- $V = IR + \eta(I)$

Де:

- V - напруга на клемах акумулятора
- I - струм
- R - внутрішній опір
- $\eta(I)$ - нелінійна функція, що описує поляризацію електрода

- Рівняння для концентрації іонів літію:
- $\partial c/\partial t = D \nabla^2 c$

Де:

- c - концентрація іонів літію
- t - час
- D - коефіцієнт дифузії
- ∇^2 - оператор Лапласа

- Рівняння для потенціалу:
- $\nabla^2\varphi = -\rho/\varepsilon$

Де:

- φ - потенціал
- ρ - об'ємний заряд
- ε - діелектрична проникність

Еквівалентні схеми

Для спрощення аналізу використовують еквівалентні схеми, які представляють акумулятор у вигляді з'єднання ідеальних елементів (джерело напруги, резистори, конденсатори тощо). Найпоширеніші моделі:

- Модель з одним RC-членом: Найпростіша модель, яка враховує внутрішній опір і поляризацію електрода.
- Модель з кількома RC-членами: Більш точна модель, яка дозволяє врахувати різні типи поляризації.
- Модель з елементом Варбурга: Використовується для моделювання дифузійних процесів в електроліті.

Методи розв'язання

- Аналітичні методи: Використовуються для розв'язання спрощених моделей, що описують лінійні процеси.
- Чисельні методи: Застосовуються для розв'язання нелінійних моделей, що описують реальні процеси в акумуляторі.
- Метод скінченних елементів: Використовується для розв'язання рівнянь в часткових похідних, що описують розподіл потенціалу і концентрації іонів літію в електродах.

Застосування математичних моделей

- Прогнозування роботи акумулятора: За допомогою математичних моделей можна прогнозувати поведінку акумулятора в різних умовах експлуатації і оцінювати його ресурс.
- Оптимізація режимів заряджання та розряджання: Математичні моделі дозволяють розробити оптимальні алгоритми заряджання та розряджання, що збільшують термін служби акумулятора.
- Створення систем управління батареями: Математичні моделі є основою для розробки систем управління батареями, які забезпечують безпечну та ефективну роботу акумуляторів.

Важливо зазначити, що точність математичних моделей залежить від багатьох факторів, включаючи складність акумулятора, умови експлуатації та використовувані припущення.

2.3Моделювання процесів деградації

літій-іонних акумуляторів є ключовим аспектом у сучасних дослідженнях та розробках енергетичних систем. Розуміння механізмів старіння акумуляторів дозволяє не тільки прогнозувати їх термін служби, але й розробляти стратегії для підвищення їх довговічності та ефективності.

Чому важливо моделювати деградацію?

- Прогнозування терміну служби: Точні моделі дозволяють передбачити, як довго акумулятор буде працювати в конкретних умовах експлуатації, що є критично важливим для багатьох застосувань, від електромобілів до стаціонарних систем зберігання енергії.
- Оптимізація режимів роботи: За допомогою моделей можна розробити оптимальні режими заряджання та розряджання, які мінімізують деградацію та максимізують термін служби акумулятора.
- Розробка нових матеріалів: Моделі допомагають оцінити вплив різних матеріалів на процеси деградації та розробляти нові, більш довговічні матеріали для акумуляторів.
- Створення систем управління батареями: Моделі деградації використовуються для розробки алгоритмів управління зарядженням і розряджанням, які забезпечують безпечну та ефективну роботу акумуляторів.

Основні процеси деградації

Процеси деградації літій-іонних акумуляторів є складними і багатофакторними. Основними механізмами старіння є:

- Утворення SEI шару: На поверхні електрода утворюється шар твердого електроліту (SEI), який з часом потовщується, що призводить до збільшення внутрішнього опору акумулятора та втрати ємності.
- Розпад активного матеріалу: Активний матеріал електродів може розпадатися на менші частинки, що також призводить до втрати ємності.
- Розвиток дендритів: На поверхні електродів можуть утворюватися дендрити – металеві вирости, які можуть призвести до короткого замикання.

- Втрата літію: Частина літію може бути втрачена в процесі електрохімічних реакцій, що також призводить до зниження ємності.

Типи моделей деградації

- Емпіричні моделі: Базуються на статистичному аналізі експериментальних даних і дозволяють описати загальні тенденції деградації. Найчастіше використовують регресійний аналіз для встановлення залежності між характеристиками акумулятора (ємність, внутрішній опір) та часом або кількістю циклів заряджання-розряджання.

- Фізико-хімічні моделі: Описують процеси деградації на рівні мікроскопічних явищ. Такі моделі базуються на рівняннях дифузії, кінетики електрохімічних реакцій та термодинаміки. Вони дозволяють детально досліджувати механізми деградації та прогнозувати поведінку акумулятора в різних умовах.

- Еквівалентні схеми: Використовуються для моделювання електричних характеристик акумулятора з урахуванням процесів деградації. Еквівалентні схеми представляють акумулятор у вигляді з'єднання ідеальних елементів (джерело напруги, резистори, конденсатори тощо), параметри яких змінюються з часом внаслідок деградації.

Фактори, що впливають на деградацію

На процес деградації літій-іонних акумуляторів впливають різноманітні фактори:

- Температура: Високі температури прискорюють процеси деградації, оскільки підвищують швидкість дифузії іонів літію та активність хімічних реакцій.

- Струм заряджання/розряджання: Великі струми можуть призвести до підвищеного нагрівання і пошкодження електрода.

- Глибина розряду: Часті глибокі розряди прискорюють деградацію, оскільки збільшують кількість циклів, протягом яких активний матеріал піддається механічним напруженням.
- Кількість циклів заряджання-розряджання: З кожним циклом деградація акумулятора збільшується.
- Напруга заряджання: Перезаряджання акумулятора може призвести до утворення дендритів та пошкодження електрода.

Методи моделювання

Для моделювання процесів деградації використовуються різноманітні методи:

- Статистичний аналіз: Використання регресійного аналізу для встановлення залежності між характеристиками акумулятора та часом.
- Метод скінченних елементів: Використовується для моделювання розподілу концентрації іонів літію в електродах та дослідження механічних напружень.
- Машинне навчання: Застосовується для створення складних моделей, які враховують велику кількість факторів та нелінійних залежностей.

Застосування моделей деградації

Моделі деградації мають широке застосування:

- Прогнозування терміну служби акумуляторів: Дозволяє оптимізувати експлуатацію акумуляторів і планувати їх заміну.
- Розробка систем управління батареями: Моделі деградації використовуються для розробки алгоритмів управління заряджанням і розряджанням, які мінімізують деградацію.

- Оптимізація конструкції акумуляторів: Моделі допомагають розробляти нові матеріали та конструкції акумуляторів з більш тривалим терміном служби.
- Оцінка стану здоров'я акумуляторів: Моделі можуть бути використані для створення інструментів діагностики, які дозволяють оцінити стан акумулятора і прогнозувати його залишковий ресурс.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ДІАГНОСТИКИ

3.1 Вибір діагностичних параметрів

Вибір діагностичних параметрів для акумуляторів є фундаментальним завданням при оцінці їх стану здоров'я, прогнозуванні залишкового ресурсу та оптимізації експлуатації. Правильно підібрані параметри дозволяють точно визначити ступінь деградації акумулятора, виявити потенційні проблеми та забезпечити безпечну та ефективну роботу енергетичних систем.

Чому важливо вибирати правильні параметри?

- Точна оцінка стану: Правильно обрані параметри дозволяють точно оцінити стан акумулятора і визначити його придатність для подальшої експлуатації. Це особливо важливо для критично важливих застосувань, таких як електромобілі, системи зберігання енергії та медичне обладнання.
- Прогнозування терміну служби: Аналіз зміни діагностичних параметрів з часом дозволяє прогнозувати, коли акумулятор потребуватиме заміни. Це дозволяє планувати технічне обслуговування та уникнути несподіваних відмов.
- Оптимізація режимів роботи: За допомогою діагностичних параметрів можна оптимізувати режими заряджання та розряджання акумулятора, що дозволяє продовжити його термін служби та підвищити ефективність роботи системи.
- Виявлення аномалій: Зміна діагностичних параметрів може сигналізувати про розвиток внутрішніх дефектів акумулятора, таких як короткі замикання, розшарування електродів тощо. Це дозволяє виявити проблеми на ранніх стадіях і запобігти серйозним наслідкам.

Основні діагностичні параметри

- Ємність: Це одна з найважливіших характеристик акумулятора, яка визначає кількість електричної енергії, яку він може накопичити. Зменшення ємності з часом є одним з основних ознак деградації.

- Внутрішній опір: Внутрішній опір акумулятора зростає з часом внаслідок деградації матеріалів електрода і утворення пасивних шарів. Збільшення внутрішнього опору призводить до зниження ефективності заряджання та розряджання, а також до підвищення саморозряду.

- Напруга холостого ходу: Напруга холостого ходу акумулятора також може змінюватися з часом. Зменшення напруги холостого ходу може свідчити про втрату активної маси електрода.

- Температура: Температура акумулятора є важливим параметром, оскільки вона впливає на його характеристики і швидкість деградації. Високі температури прискорюють процеси деградації, а низькі можуть призвести до зниження ємності.

- Швидкість саморозряду: Швидкість саморозряду акумулятора збільшується з часом, особливо при високих температурах. Це призводить до втрати заряду навіть при тривалому зберіганні акумулятора.

- Імпеданс: Імпеданс акумулятора є комплексною величиною, яка характеризує його опір змінному струму. Аналіз імпедансних спектрів дозволяє отримати додаткову інформацію про процеси, що відбуваються всередині акумулятора, такі як утворення пасивних шарів, розвиток дендритів та інші.

Методи вимірювання діагностичних параметрів

- Прямі вимірювання: Вимірювання напруги, струму, температури за допомогою відповідних приладів (вольтметрів, амперметрів, термопар).

- Імпедансна спектроскопія: Метод, який дозволяє виміряти імпеданс акумулятора в широкому діапазоні частот. Це дозволяє отримати інформацію про різні фізичні процеси, що відбуваються всередині акумулятора.

- Циклічні випробування: Проведення циклів заряджання-розряджання з різними режимами для оцінки ємності, внутрішнього опору та інших параметрів. Цей метод дозволяє оцінити деградацію акумулятора в динаміці.

- Аналіз газу, що виділяється: Аналіз складу газу, що виділяється під час заряджання та розряджання, дозволяє виявити деякі типи дефектів акумулятора, такі як короткі замикання та розшарування електродів.

Вибір оптимального набору параметрів

Вибір оптимального набору діагностичних параметрів залежить від конкретного типу акумулятора, умов його експлуатації та поставлених задач. При виборі параметрів необхідно враховувати такі фактори:

- Точність вимірювань: Вибрані параметри повинні бути достатньо чутливими до змін стану акумулятора.

- Швидкість вимірювань: Час, необхідний для проведення вимірювань, повинен бути мінімальним, особливо для онлайн-моніторингу.

- Вартість обладнання: Вартість обладнання для вимірювання параметрів повинна бути економічно обґрунтованою.

- Складність інтерпретації результатів: Отримані результати повинні бути легко інтерпретовані і дозволяти приймати обґрунтовані рішення щодо експлуатації акумулятора.

Моделювання деградації на основі діагностичних параметрів

Для більш точного прогнозування терміну служби акумулятора використовуються математичні моделі, які описують зміну діагностичних параметрів з часом. Найбільш поширені моделі:

- Емпіричні моделі: Базуються на статистичному аналізі експериментальних даних і дозволяють описати загальні тенденції деградації.
- Фізико-хімічні моделі: Описують процеси деградації на рівні мікроскопічних явищ і дозволяють зрозуміти причини деградації.
- Еквівалентні схеми: Використовуються для моделювання електричних характеристик акумулятора з урахуванням процесів деградації.

3.2Розробка алгоритмів обробки даних

Розробка алгоритмів діагностики літій-іонних акумуляторів є критично важливим завданням у сучасному світі, де енергоефективність та довговічність акумуляторів відіграють все більшу роль. Ці алгоритми дозволяють:

- Оцінити стан здоров'я акумулятора: Визначити ступінь деградації та залишковий ресурс.
- Прогнозувати термін служби: Передбачити, коли акумулятор потребуватиме заміни.
- Оптимізувати режими роботи: Розробити оптимальні стратегії заряджання та розряджання для збільшення терміну служби та підвищення ефективності.
- Забезпечити безпеку: Виявити потенційні проблеми, такі як перегрів, короткі замикання та інші, що можуть призвести до пожежі або вибуху.

Вибір діагностичних параметрів

Першим кроком у розробці алгоритмів є вибір ключових діагностичних параметрів, які будуть використовуватися для оцінки стану акумулятора. До таких параметрів відносяться:

- Ємність: Здатність акумулятора зберігати електричний заряд.
- Внутрішній опір: Опір проходженню електричного струму всередині акумулятора.
- Напруга холостого ходу: Напруга на клемах акумулятора при відсутності навантаження.
- Температура: Температура акумулятора впливає на його характеристики та швидкість деградації.
- Імпеданс: Комплексна величина, яка характеризує опір акумулятора змінному струму.

Методи збору даних

1. Прямі вимірювання:
   - Напруга: Вимірювання напруги на клемах акумулятора при різних режимах роботи.
   - Струм: Вимірювання струму заряджання та розряджання.
   - Температура: Вимірювання температури акумулятора за допомогою термодатчиків.
   - Внутрішній опір: Вимірювання опору проходженню струму всередині акумулятора.
2. Імпедансна спектроскопія:
   - Цей метод дозволяє отримати детальну інформацію про внутрішню структуру акумулятора шляхом вимірювання його імпедансу в широкому діапазоні частот.

Це дозволяє виявити такі процеси, як утворення пасивних шарів, розвиток дендритів та інші.

3. Циклічні випробування:

- Проведення повторюваних циклів заряджання-розряджання з різними режимами дозволяє оцінити зміну ємності, внутрішнього опору та інших параметрів з часом.

4. Аналіз газу, що виділяється:

- Аналіз складу газу, який виділяється під час роботи акумулятора, дозволяє виявити такі дефекти, як короткі замикання та розшарування електродів.

5. Моніторинг напруги окремих елементів:

- Для батарей, що складаються з декількох елементів, важливо моніторити напругу кожного елемента для виявлення дисбалансу.

Вибір методів збору даних залежить від таких факторів:

Вибір оптимального методу збору даних для діагностики літій-іонних акумуляторів є критичним етапом у розробці ефективних систем моніторингу та управління. Різноманітність акумуляторів, умов їх експлуатації та цілей дослідження вимагає індивідуального підходу до вибору методів.

Основні фактори, що впливають на вибір методів збору даних:

1. Тип акумулятора:

- Хімічний склад: Різні хімічні склади електродутів впливають на процеси деградації та вимагають різних методів діагностики.

- Форма та розмір: Форма та розмір акумулятора можуть обмежувати доступність для встановлення датчиків.

- Номінальна ємність: Великі акумулятори можуть потребувати додаткових датчиків для забезпечення однорідного моніторингу.

2. Умови експлуатації:

- Температура: Зміна температури впливає на швидкість деградації та може вимагати додаткових температурних датчиків.
- Вібрація: Вібрація може призводити до механічних пошкоджень і вимагати додаткових датчиків для моніторингу цілісності.
- Вологість: Висока вологість може прискорити корозію і вимагати спеціальних захисних заходів для датчиків.

3. Цілі дослідження:

- Оцінка стану здоров'я: Для оцінки загального стану акумулятора можуть бути достатні прості вимірювання напруги та струму.
- Прогнозування терміну служби: Для точного прогнозування необхідні більш детальні дані, отримані за допомогою імпедансної спектроскопії та циклічних випробувань.
- Виявлення дефектів: Для виявлення конкретних дефектів (коротких замикань, розшарування) можуть знадобитися спеціальні методи, такі як аналіз газу або рентгенівська комп'ютерна томографія.

4. Точність вимірювань:

- Висока точність: Для наукових досліджень та розробки нових матеріалів потрібна висока точність вимірювань.
- Достатня точність: Для практичних застосувань часто достатня менша точність вимірювань.

5. Вартість обладнання та трудомісткість:

- Вартість: Деякі методи, такі як імпедансна спектроскопія, вимагають дорогого обладнання.
- Трудомісткість: Збір даних може бути трудомістким процесом, особливо для великої кількості акумуляторів.

Метод	Переваги	Недоліки	Виявлення коротких замикань, розшарування
Прямі вимірювання	Простота, низька вартість	Обмежена інформація	Виявлення коротких замикань, розшарування
Імпедансна спектроскопія	Детальна інформація про внутрішню структуру	Висока вартість обладнання, складність інтерпретації даних	Виявлення коротких замикань, розшарування
Циклічні випробування	Точна оцінка ємності та внутрішнього опору	Тривалий час проведення випробувань	Виявлення коротких замикань, розшарування
Аналіз газу	Виявлення внутрішніх дефектів	Висока вартість обладнання, складність аналізу даних	Виявлення коротких замикань, розшарування

Важливі аспекти збору даних:

Вибір правильних методів збору даних є лише першим кроком. Щоб отримати достовірні та корисні результати, необхідно враховувати ряд важливих аспектів:

1. Частота збору даних

- Швидкість деградації: Для акумуляторів, які швидко деградують, потрібні частіші вимірювання.
- Цілі дослідження: Для довгострокових прогнозів достатньо менш частого збору даних.
- Обчислювальні ресурси: Часта збірка великих обсягів даних вимагає потужних обчислювальних ресурсів.

2. Точність вимірювань

- Калібрування датчиків: Регулярна калібрування датчиків забезпечує точність вимірювань.
- Шум: Зниження рівня шуму в сигналах покращує якість даних.
- Похибка вимірювань: Оцінка похибки вимірювань дозволяє визначити довірчі інтервали для отриманих результатів.

3. Зберігання даних

- Формат даних: Вибір відповідного формату даних для зручного зберігання та подальшого аналізу.
- Безпека даних: Захист даних від втрати та несанкціонованого доступу.
- Структуризація даних: Структуризація даних для полегшення пошуку та аналізу.

4. Синхронізація даних

- Часова синхронізація: Точна синхронізація даних від різних датчиків для аналізу взаємозв'язків.
- Протоколи синхронізації: Використання стандартних протоколів для забезпечення сумісності різних систем.

5. Обробка даних

- Фільтрація даних: Видалення шумів та аномалій з даних для підвищення якості аналізу.
- Нормалізація даних: Приведення даних до єдиного масштабу для порівняння.
- Виявлення аномалій: Виявлення відхилень від нормального стану акумулятора.

6. Аналіз даних

- Статистичний аналіз: Обчислення середніх значень, дисперсій, кореляційних коефіцієнтів та інших статистичних характеристик.
- Машинне навчання: Застосування алгоритмів машинного навчання для виявлення закономірностей та прогнозування.
- Візуалізація даних: Візуалізація даних для наочного представлення результатів аналізу.

7. Інтеграція з іншими системами

- Системи управління батареями: Інтеграція з системами управління батареями для прийняття рішень на основі даних про стан акумулятора.
- Системи моніторингу: Інтеграція з системами моніторингу для віддаленого доступу до даних та управління.

8. Захист даних

- Конфіденційність: Захист персональних даних та даних про власність.
- Цілісність: Захист даних від несанкціонованих змін.
- Доступність: Забезпечення доступності даних для авторизованих користувачів.

Сучасні тенденції у зборі даних:

- Використання IoT: Інтернет речей дозволяє збирати дані про роботу акумулятора в реальному часі та передавати їх для аналізу.
- Розподілені системи моніторингу: Розподілені системи дозволяють збирати дані з великої кількості акумуляторів і аналізувати їх в єдиному центрі.
- Машинне навчання: Методи машинного навчання дозволяють автоматизувати процес аналізу даних та виявляти складні залежності.

Алгоритми обробки даних:

Після збору даних необхідно розробити алгоритми для їх обробки та аналізу. Найбільш поширені алгоритми включають:

- Статистичний аналіз: Використання статистичних методів для оцінки середніх значень, дисперсій та інших характеристик даних.
- Регресійний аналіз: Встановлення залежностей між діагностичними параметрами та часом для прогнозування деградації.
- Класифікація: Використання методів машинного навчання для класифікації стану акумулятора (здоровий, деградований).
- Нейронні мережі: Створення моделей, які можуть виявляти складні залежності в даних і прогнозувати майбутню поведінку акумулятора.

Моделювання деградації

Для більш точного прогнозування терміну служби акумулятора використовуються математичні моделі, які описують зміну діагностичних параметрів з часом. Найбільш поширені моделі:

- Емпіричні моделі: Базуються на статистичному аналізі експериментальних даних і дозволяють описати загальні тенденції деградації.
- Фізико-хімічні моделі: Описують процеси деградації на рівні мікроскопічних явищ і дозволяють зрозуміти причини деградації.
- Еквівалентні схеми: Використовуються для моделювання електричних характеристик акумулятора з урахуванням процесів деградації.

Виклики та перспективи

Розробка алгоритмів обробки даних для літій-іонних акумуляторів має ряд викликів:

- Складність процесів деградації: Деградація акумуляторів є багатофакторним процесом, який залежить від багатьох змінних.
- Нелінійність даних: Зв'язок між діагностичними параметрами та станом акумулятора часто має нелінійний характер.
- Шум у даних: Вимірювання можуть містити шум, що ускладнює аналіз даних.

Перспективи розвитку включають:

1. Штучний інтелект та машинне навчання

- Глибоке навчання: Застосування нейронних мереж для аналізу

великих обсягів даних про стан акумулятора, виявлення складних залежностей та підвищення точності прогнозування.

- Підсилювальне навчання: Розробка алгоритмів, які можуть самостійно навчатися на основі зворотного зв'язку, оптимізуючи режими роботи акумулятора в реальному часі.
- Техніки обробки природної мови: Використання методів обробки природної мови для аналізу текстових даних про акумулятори (наприклад, звіти про виробництво, дані моніторингу) та виявлення потенційних проблем.

2. Фізико-хімічне моделювання

- Розширення моделей деградації: Розробка більш детальних моделей, які враховують різноманітні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в акумуляторі.
- Комбінування фізичних моделей з машинним навчанням: Створення гібридних моделей, які поєднують точність фізичних моделей з гнучкістю машинного навчання.

3. Інтеграція з IoT та великими даними

- Створення інтелектуальних систем моніторингу: Розробка систем, які збирають та аналізують дані про роботу акумулятора в реальному часі з використанням датчиків IoT.
- Використання хмарних технологій: Обробка великих обсягів даних на хмарних платформах для підвищення швидкості та ефективності аналізу.

4. Нові методи діагностики

- Акустична емісія: Виявлення дефектів в акумуляторі за допомогою аналізу акустичних сигналів.

- Термографія: Виявлення перегрітих зон в акумуляторі за допомогою теплових зображень.
- Рентгенівська комп'ютерна томографія: Виявлення внутрішніх дефектів акумулятора.

5. Розробка стандартів та протоколів

- Створення єдиних стандартів: Розробка стандартів для обміну даними про стан акумулятора між різними виробниками та системами.
- Розробка протоколів комунікації: Створення протоколів для безпечної та надійної передачі даних про акумулятори.

Перспективи застосування:

Розробка ефективних алгоритмів діагностики літій-іонних акумуляторів відкриває широкі перспективи для різних галузей. Ось деякі з найперспективніших напрямків застосування:

1. Електромобілі

- Оптимізація заряджання: Алгоритми дозволять визначити оптимальні режими заряджання для продовження терміну служби батареї та підвищення її ефективності.
- Прогнозування запасу ходу: Точний прогноз запасу ходу на основі даних про стан батареї дозволить водіям планувати поїздки з більшою впевненістю.
- Системи швидкого заряджання: Алгоритми допоможуть розробити безпечні та ефективні системи швидкого заряджання, мінімізуючи негативний вплив на батарею.

2. Стаціонарні системи зберігання енергії

- Оптимізація роботи: Алгоритми дозволять оптимізувати роботу систем зберігання енергії, збільшуючи їх ефективність та тривалість життя.
- Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії: Алгоритми допоможуть інтегрувати системи зберігання енергії з відновлюваними джерелами енергії, забезпечуючи стабільну подачу електроенергії.
- Управління мережею: Алгоритми дозволять використовувати системи зберігання енергії для стабілізації електричної мережі та забезпечення її надійності.

3. Портативна електроніка

- Збільшення часу автономної роботи: Алгоритми допоможуть оптимізувати споживання енергії пристроями, збільшуючи час їх автономної роботи.
- Прогнозування необхідності заміни батареї: Користувачі зможуть заздалегідь дізнатися про необхідність заміни батареї, що дозволить уникнути несподіваних ситуацій.

4. Аерокосмічна промисловість

- Забезпечення надійності енергетичних систем: Алгоритми дозволять забезпечити надійну роботу енергетичних систем космічних апаратів, що є критично важливим для успішного виконання місій.
- Продовження терміну служби батарей: Збільшення терміну служби батарей дозволить зменшити масу космічних апаратів та збільшити їх вантажопідйомність.

5. Медична електроніка

- Моніторинг імплантованих пристроїв: Алгоритми дозволять відслідковувати стан батарей імплантованих медичних пристроїв та

своєчасно замінювати їх.

- Оптимізація роботи портативної медичної техніки: Алгоритми дозволять збільшити час роботи портативної медичної техніки, що особливо важливо для використання в польових умовах.

6. Промислова автоматизація

- Оптимізація роботи роботів: Алгоритми дозволять оптимізувати роботу роботів, забезпечуючи їх безперервну роботу та підвищуючи продуктивність.
- Моніторинг стану обладнання: Алгоритми дозволять відслідковувати стан батарей промислового обладнання та планувати профілактичне обслуговування.

Приклади застосування алгоритмів:

- Системи управління батареями електромобілів: Оптимізація заряджання, балансування елементів батареї, прогнозування запасу ходу.
- Стаціонарні системи зберігання енергії: Моніторинг стану батарей, оптимізація роботи системи, прогнозування необхідності заміни батарей.
- Портативні електронні пристрої: Продовження терміну служби батарей, оптимізація енергоспоживання.

3.3 Розробка методів оцінки стану здоров'я (SOH): Розробка методів для кількісної оцінки залишкової ємності акумулятора.

Оцінка стану здоров'я (SOH) літій-іонних акумуляторів є критично важливим завданням у багатьох сучасних галузях, особливо в електромобілях, стаціонарних системах зберігання енергії та портативній електроніці. Точна оцінка залишкової ємності акумулятора дозволяє:

- Прогнозувати термін служби: Забезпечити своєчасну заміну акумулятора, уникнувши несподіваних відмов.
- Оптимізувати роботу системи: Планувати заряджання та розряджання акумулятора, забезпечуючи максимальну ефективність.
- Підвищити безпеку: Виявити потенційні проблеми з акумулятором до того, як вони призведуть до аварійних ситуацій.

Попередній огляд методів оцінки SOH був досить всебічним. Давайте глибше зануримося в цю тему, розглядаючи кожен метод більш детально, а також обговоримо їх переваги та недоліки.

Методи оцінки SOH

1. Прямі вимірювання

- Вимірювання ємності:
  - Повний цикл заряджання-розряджання: Класичний метод, але трудомісткий та впливає на термін служби акумулятора.
  - Часткові цикли: Швидші вимірювання, але менш точні.
- Вимірювання внутрішнього опору:
  - Імпедансна спектроскопія: Дозволяє оцінити різні процеси всередині акумулятора, такі як утворення SEI-плівки, але вимагає спеціального обладнання.
  - Метод постійного струму: Простіший метод, але менш точний.
- Аналіз кривих заряджання-розряджання:
  - Кулонометричний ефективність: Визначається як відношення кількості заряду, що віддається при розряді, до кількості заряду, що приймається при зарядці.
  - Напруга на кінці розряду: Зниження напруги на кінці

- розряду свідчить про деградацію акумулятора.

2. Моделювання

- Емпіричні моделі:
  - Модель експоненціальної деградації: Проста модель, яка описує експоненціальне зменшення ємності з часом.
  - Модель з кількома параметрами: Більш складні моделі, які враховують вплив різних факторів на деградацію.
- Фізичні моделі:
  - Модель еквівалентного кола: Представляє акумулятор у вигляді електричного кола, що дозволяє моделювати різні процеси всередині акумулятора.
  - Модель на основі механізмів деградації: Більш детальні моделі, які враховують фізичні процеси, що відбуваються всередині акумулятора.

3. Машинне навчання

- Нейронні мережі:
  - Прямі нейронні мережі: Використовуються для прогнозування SOH на основі вхідних даних (напруга, струм, температура).
  - Рекурентні нейронні мережі: Здатні враховувати часову залежність даних.
- Методи кластеризації:
  - k-means: Дозволяє розділити акумулятори на групи з схожими характеристиками.
  - Ієрархічна кластеризація: Будує ієрархічну структуру кластерів.

Переваги та недоліки методів

Метод	Переваги	Недоліки
Прямі вимірювання	Простота, точність	Трудомісткість, вплив на термін служби
Моделювання	Можливість прогнозування, гнучкість	Складність розробки моделей, необхідність великої кількості даних
Машинне навчання	Висока точність, здатність виявляти складні залежності	Чорна скринька, необхідність великої кількості даних

Фактори, що впливають на точність оцінки SOH:

- Якість даних: Шум, пропуски даних, неточність вимірювань.
- Тип акумулятора: Різні хімічні склади, конструкції.
- Умови експлуатації: Температура, швидкість заряджання, глибина розряджання.
- Складність моделі: Чим складніша модель, тим більше даних потрібно для її навчання і тим вища обчислювальна складність.

РОЗДІЛ 4. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПРОФІЛАКТИКИ

4.1 Розробка стратегій управління заряджанням

Управління заряджанням є ключовим аспектом у продовженні терміну служби та підвищенні ефективності літій-іонних батарей. Розумні стратегії заряджання дозволяють мінімізувати деградацію батарей, оптимізувати використання енергії та забезпечити безпечну експлуатацію.

Чому важлива розробка стратегій управління заряджанням?:

Розробка стратегій управління заряджанням є критично важливою для забезпечення довготривалої та ефективної роботи літій-іонних батарей, які широко використовуються в сучасних пристроях від смартфонів до електромобілів. Ось чому це так важливо:

- Продовження терміну служби батареї:
  - Правильно підібрані режими заряджання зменшують кількість циклів заряд/розряд, що призводить до меншої деградації матеріалів електрода.
  - Уникнення екстремальних температур, перенапруги та інших шкідливих умов продовжує "життя" батареї.
- Збільшення безпеки:
  - Правильно спроектовані стратегії заряджання мінімізують ризики перегріву, вибуху та інших небезпечних ситуацій, пов'язаних з батареями.
- Оптимізація використання енергії:
  - Ефективне використання енергії, особливо в умовах обмежених ресурсів, наприклад, у мобільних пристроях.
  - Зменшення часу заряджання без шкоди для батареї.
- Підвищення продуктивності:

- Забезпечення швидкого заряджання без втрати ємності або пошкодження батареї.
- Оптимізація роботи батареї під час використання пристрою.

Чому просто заряджати батарею недостатньо?

- Різні типи батарей: Кожен тип батареї має свої особливості, які впливають на оптимальні режими заряджання.
- Умови експлуатації: Температура, вологість, вібрація та інші фактори впливають на процес заряджання.
- Швидкість деградації: Постійна зарядка і розрядка призводять до поступової втрати ємності батареї.
- Безпека: Неправильне заряджання може призвести до перегріву, вибуху та інших небезпечних ситуацій.

Основні стратегії управління заряджанням:

Управління заряджанням літій-іонних батарей є ключовим фактором для забезпечення їх довговічності та безпечної експлуатації. Різні стратегії заряджання дозволяють оптимізувати процес, зменшуючи деградацію батареї та підвищуючи її ефективність.

Основні стратегії заряджання

1. Постійна струмова зарядка (CC):
   - На початку заряджання до батареї подається постійний струм, що дозволяє швидко підвищити напругу.
   - Використовується для швидкого початкового заряджання.
2. Постійна напругова зарядка (CV):

- Після досягнення певної напруги перехід до режиму постійної напруги, при якому струм поступово зменшується.
- Забезпечує повне заряджання батареї.

3. Комбінована зарядка (CC/CV):
   - Поєднання постійної струмової та постійної напругової зарядки.
   - Найбільш поширений метод заряджання, що забезпечує оптимальне співвідношення швидкості та ефективності.
4. Мультиступенева зарядка:
   - Розділення процесу заряджання на кілька етапів з різними значеннями струму та напруги для більш точного контролю процесу.
   - Застосовується для оптимізації заряджання батарей з високою ємністю.
5. Швидке заряджання:
   - Використання високих струмів для швидкого заряджання батареї.
   - Вимагає додаткових заходів для захисту батареї від перегріву та деградації.
6. Температурна компенсація:
   - Корекція параметрів заряджання залежно від температури батареї.
   - Дозволяє оптимізувати процес заряджання в різних температурних умовах.
7. Балансування комірок:
   - Підтримання рівного заряду всіх комірок батареї для збільшення загальної ємності та продовження терміну служби.

Фактори, що впливають на вибір стратегії заряджання:

Вибір оптимальної стратегії заряджання для літій-іонних батарей є складним завданням, яке залежить від багатьох факторів. Кожен з цих факторів може значно вплинути на ефективність, довговічність та безпеку батареї.

Властивості батареї

- Тип хімічного складу: Різні хімічні склади (NMC, LFP, NCA тощо) мають різні характеристики заряджання, такі як максимальний струм заряджання, робочий температурний діапазон та схильність до деградації.
- Розмір та ємність: Великі батареї, як правило, вимагають більш тривалого часу заряджання для зменшення тепловиділення.
- Вік батареї: З віком батареї її характеристики змінюються, що може вимагати коригування стратегії заряджання.

Умови експлуатації

- Температура: Високі або низькі температури можуть негативно вплинути на процес заряджання та зменшити ємність батареї.
- Вібрація: Постійна вібрація може призвести до внутрішніх пошкоджень батареї та скоротити її термін служби.
- Вологість: Висока вологість може спричинити корозію внутрішніх компонентів батареї.

Вимоги до застосування

- Швидкість заряджання: Для електромобілів та інших пристроїв, де час має значення, пріоритетом є швидке заряджання, хоча це може призвести до деградації батареї.

- Термін служби: Для стаціонарних систем зберігання енергії, де важлива довговічність, пріоритетом є повільне, щадне заряджання.
- Вартість: Вартість зарядного пристрою та системи управління також є важливим фактором при виборі стратегії.

Інші фактори

- Профіль навантаження: Частота циклів заряджання/розряджання, глибина розряду впливають на вибір стратегії.
- Безпека: Вибір стратегії заряджання повинен забезпечувати максимальну безпеку, мінімізуючи ризик перегріву, вибуху та інших аварійних ситуацій.
- Регуляторні вимоги: Існують різні стандарти та норми, які регулюють процес заряджання літій-іонних батарей.

Сучасні тенденції в управлінні зарядженням:

Світ технологій постійно розвивається, і галузь управління зарядженням не є винятком. Сучасні тенденції спрямовані на підвищення ефективності, безпеки та зручності заряджання літій-іонних батарей, які використовуються в широкому спектрі пристроїв від смартфонів до електромобілів.

Основні сучасні тенденції:

- Інтелектуальні зарядні пристрої:
  - Адаптивне заряджання: Зарядні пристрої можуть адаптувати режим заряджання до конкретної батареї та умов експлуатації, що дозволяє оптимізувати процес і продовжити термін служби батареї.
  - Прогнозування: За допомогою алгоритмів машинного навчання зарядні пристрої можуть прогнозувати час, необхідний для повного заряджання, а також залишкову ємність батареї.

- Інтеграція з розумними будинками: Зарядні пристрої можуть інтегруватися в систему розумного будинку, що дозволяє автоматизувати процес заряджання та оптимізувати споживання енергії.

- Швидке заряджання:
  - Високі струми: Використання високих зарядних струмів дозволяє значно скоротити час заряджання, але вимагає додаткових заходів для захисту батареї від перегріву.
  - Нові матеріали: Розробка нових матеріалів для електродів і електролітів дозволяє створювати батареї, які здатні витримувати високі швидкості заряджання без значної деградації.
- Балансування комірок:
  - Активні методи балансування: Застосування додаткових елементів для вирівнювання напруги між окремими комірками батареї.
  - Пасивні методи балансування: Використання резисторів або діодів для розсіювання надлишкової енергії в окремих комірках.
- Оцінка стану здоров'я батареї (SOH):
  - Точні алгоритми: Розробка більш точних алгоритмів для оцінки залишкової ємності та загального стану здоров'я батареї.
  - Прогнозування терміну служби: На основі даних про SOH можна прогнозувати, коли батарею необхідно замінити.
- Безпека:
  - Системи захисту: Вдосконалення систем захисту від перенапруги, короткого замикання та перегріву.
  - Моніторинг температури: Постійний моніторинг температури батареї для запобігання перегріву.

- Екологічність:
    - Використання перероблених матеріалів: Збільшення використання перероблених матеріалів у виробництві батарей.
    - Біобезпечні матеріали: Розробка батарей на основі біобезпечних матеріалів.

4.2Розробка стратегій термоменеджменту

Термоменеджмент – це комплекс заходів, спрямованих на підтримання оптимальної температури роботи електронних пристроїв. Це особливо важливо для сучасних гаджетів, які генерують значну кількість тепла під час роботи. Неадекватний термоменеджмент може призвести до зниження продуктивності, скорочення терміну служби та навіть виходу з ладу пристрою.

Чому важливий термоменеджмент?:

Термоменеджмент – це наука про управління теплом в електронних пристроях. Чому це так важливо? Давайте розберемося докладніше.

Чому перегрів шкідливий для електроніки?

- Зниження продуктивності: Коли процесор або графічний процесор перегріваються, вони автоматично знижують свою частоту для захисту. Це призводить до сповільнення роботи пристрою та зниження його продуктивності.
- Скорочення терміну служби: Постійний перегрів призводить до деградації компонентів, таких як пайка, конденсатори та мікросхеми. Це може призвести до передчасного виходу з ладу пристрою.
- Нестабільна робота: Перегрів може викликати випадкові збої, перезавантаження або повне відключення пристрою.
- Ризик пожежі: У крайніх випадках перегрів може призвести до загоряння пристрою.

Переваги ефективного термоменеджменту:

- Стабільна робота: Оптимальна температура забезпечує стабільну роботу пристрою без перегріву та збоїв.
- Висока продуктивність: Компоненти можуть працювати на максимальних частотах без троттлінгу.
- Довгий термін служби: Зменшується знос компонентів, що продовжує життя пристрою.
- Енергоефективність: Ефективне охолодження може знизити енергоспоживання.

Основні стратегії термоменеджменту

1. Пасивне охолодження:
   - Радіатори: Відводять тепло від гарячих компонентів до корпусу пристрою.
   - Теплові трубки: Переносять тепло від джерела до радіатора.
   - Теплові прокладки: Забезпечують хороший тепловий контакт між компонентами.
   - Вентиляційні отвори: Забезпечують циркуляцію повітря всередині пристрою.
2. Активне охолодження:
   - Вентилятори: Примусово видувають гаряче повітря з корпусу пристрою.
   - Водяне охолодження: Використовується рідина для відведення тепла від гарячих компонентів.
   - Фазові переходи: Використання матеріалів, які змінюють свій агрегатний стан при зміні температури (наприклад, теплові

трубки з рідиною).

3. Програмне забезпечення:

- Тротлінг: Автоматичне зниження частоти процесора при перегріві.
- Динамічне керування вентиляторами: Зміна швидкості обертання вентиляторів залежно від температури.
- Оптимізація енергоспоживання: Зменшення енергоспоживання компонентів для зниження тепловиділення.

Фактори, що впливають на вибір стратегії термоменеджменту

Вибір оптимальної стратегії термоменеджменту для електронного пристрою є складним завданням, яке залежить від багатьох взаємопов'язаних факторів. Кожен з цих факторів може значно вплинути на ефективність, довговічність та загальну продуктивність пристрою.

Ось деякі з ключових факторів, які слід враховувати при розробці стратегії термоменеджменту:

1. Характеристики пристрою

- Тип пристрою: Ноутбуки, смартфони, сервери, ігрові консолі мають різні вимоги до охолодження через різний рівень тепловиділення та розміри.
- Компоненти: Тип процесора, графічного процесора, пам'яті та інших компонентів визначає загальний тепловий потік.
- Розмір і форма: Компактні пристрої часто мають обмежені можливості для встановлення систем охолодження.
- Матеріали корпусу: Матеріал корпусу впливає на теплопровідність і здатність відводити тепло.

2. Умови експлуатації

- Температура навколишнього середовища: Високі температури навколишнього середовища ускладнюють відведення тепла від пристрою.
- Вологість: Висока вологість може вплинути на ефективність деяких систем охолодження.
- Вібрація: Вібрація може пошкодити компоненти системи охолодження.
- Запиленість: Накопичення пилу на вентиляторах та радіаторах знижує ефективність охолодження.

3. Вимоги до продуктивності

- Рівень навантаження: Під час інтенсивних обчислень тепловиділення значно зростає, що вимагає більш ефективної системи охолодження.
- Час безперервної роботи: Для пристроїв, які працюють тривалий час без перерви, необхідні більш надійні системи охолодження.

4. Енергоспоживання

- Ефективність системи охолодження: Системи охолодження споживають певну кількість енергії, що може вплинути на загальне енергоспоживання пристрою.
- Баланс між продуктивністю та енергоспоживанням: Необхідно знайти оптимальний баланс між високою продуктивністю та низьким енергоспоживанням.

5. Вартість

- Вартість компонентів: Вартість системи охолодження може значно вплинути на загальну вартість пристрою.

- Вартість виробництва: Складні системи охолодження можуть збільшити вартість виробництва.

6. Шум

- Рівень шуму: Вентилятори та інші компоненти системи охолодження можуть створювати шум, що може бути неприйнятним для деяких пристроїв.

Фактори, що впливають на вибір конкретних технологій охолодження:

- Розмір і вага пристрою: Для портативних пристроїв важливо мінімізувати розмір і вагу системи охолодження.
- Рівень шуму: Для ноутбуків та інших пристроїв, що використовуються в тихих умовах, важливо мінімізувати рівень шуму.
- Надійність: Система охолодження повинна бути надійною і витримувати тривалу експлуатацію.
- Вартість: Вартість виробництва і обслуговування системи охолодження повинна бути економічно обґрунтованою.

Сучасні тенденції в термоменеджменті:

Термоменеджмент, або управління теплом, є критично важливим аспектом у розробці сучасних електронних пристроїв. Зі збільшенням потужності та мініатюризацією компонентів, вимоги до ефективного відведення тепла стають все більш жорсткими. Розглянемо деякі з найактуальніших тенденцій у цій галузі.

1. Інтеграція з Штучним Інтелектом

- Адаптивне управління: ШІ дозволяє системам охолодження адаптуватися до змінних навантажень і умов навколишнього середовища, оптимізуючи роботу вентиляторів та інших компонентів.

- Прогнозування: ШІ-алгоритми можуть прогнозувати майбутні теплові навантаження, дозволяючи системі охолодження готуватися заздалегідь.
- Оптимізація енергоспоживання: ШІ допомагає знайти оптимальний баланс між охолодженням і енергоспоживанням.

2. Нові матеріали з високою теплопровідністю

- Графен: Цей двовимірний матеріал має надзвичайно високу теплопровідність, що робить його перспективним для використання в теплових прокладках і радіаторах.
- Алмаз: Алмаз також має високу теплопровідність і використовується в високопродуктивних системах охолодження.
- Композитні матеріали: Комбінація різних матеріалів дозволяє створювати матеріали з оптимальним поєднанням теплопровідності, міцності та вартості.

3. Мікроканальні системи охолодження

- Висока ефективність: Мікроканальні системи забезпечують більш ефективний відвід тепла порівняно з традиційними системами.
- Компактність: Завдяки своїм малим розмірам, мікроканальні системи ідеально підходять для використання в портативних пристроях.

4. Фазові переходи

- Теплові трубки: Використання теплових труб, які використовують фазові переходи рідини для ефективного відведення тепла.
- Термосифони: Подібні до теплових труб, але з більшою довжиною і діаметром.

5. Активне біологічне охолодження

- Вдохновлення природою: Дослідники вивчають природні системи охолодження, такі як терморегуляція у тварин, для створення більш ефективних систем охолодження.
- Мікробні паливові елементи: Використання мікроорганізмів для виробництва електрики і одночасного відведення тепла.

6. Інтеграція з системами живлення

- Динамічне керування: Співпраця систем термоменеджменту і живлення для більш ефективного використання енергії.
- Захист акумуляторів: Оптимізація температури акумулятора для збільшення терміну його служби.

7. Друк 3D

- Індивідуальні рішення: Друк 3D дозволяє створювати індивідуальні рішення для охолодження, враховуючи конкретні вимоги кожного пристрою.
- Нові геометрії: Друк 3D дозволяє створювати складні геометричні форми радіаторів і теплових труб.

8. Термоелектричні матеріали

- Безвентиляторні системи: Термоелектричні матеріали дозволяють створювати безвентиляторні системи охолодження, що є важливим для тихих пристроїв.

Сучасні тенденції в термоменеджменті спрямовані на створення більш ефективних, компактних і тихих систем охолодження. Інтеграція з ШІ, використання нових матеріалів і технологій дозволяють розробляти рішення, які відповідають вимогам сучасних електронних пристроїв.

4.3Розробка системи балансування

Системи балансування відіграють критичну роль у багатьох галузях, від виробництва до енергетики, забезпечуючи оптимальний розподіл ресурсів та стабільну роботу процесів. Розробка такої системи вимагає комплексного підходу, який враховує специфіку конкретного завдання.

Основні етапи розробки системи балансування:

Розробка системи балансування – це комплексний процес, який вимагає системного підходу та глибокого розуміння як загальних принципів системного аналізу, так і специфіки конкретної галузі, в якій система буде застосовуватися. Ось основні етапи цього процесу:

1. Формулювання завдання та постановка цілей:

- Визначення мети: Чого саме ми хочемо досягти за допомогою системи балансування? Які показники ми прагнемо оптимізувати?
- Ідентифікація об'єктів балансування: Які саме ресурси, процеси або величини ми будемо балансувати?
- Визначення меж системи: Які елементи будуть включені в систему, а які – ні?
- Формулювання критеріїв ефективності: За якими показниками ми будемо оцінювати ефективність роботи системи?

2. Аналіз системи та збір даних:

- Ідентифікація компонентів: Виявлення всіх елементів системи та їх взаємозв'язків.
- Збір даних: Збір інформації про роботу системи, її параметри та характеристики.

- Побудова математичної моделі: Створення абстрактної моделі системи, яка описує її поведінку за допомогою математичних рівнянь.

3. Розробка алгоритмів балансування:

- Вибір алгоритму: Вибір алгоритму балансування, який найбільш підходить для вирішення поставленого завдання.
- Налаштування параметрів алгоритму: Підбір оптимальних значень параметрів алгоритму.
- Програмна реалізація: Переведення алгоритму на мову програмування та створення програмного модуля.

4. Проектування системи:

- Структурний дизайн: Розробка структури системи, визначення взаємодії компонентів.
- Інтерфейси: Розробка інтерфейсів користувача та програмних інтерфейсів для взаємодії з іншими системами.
- Вибір обладнання: Вибір необхідного обладнання для реалізації системи (сенсори, виконавчі механізми, комп'ютери тощо).

5. Розробка програмного забезпечення:

- Програмування: Розробка програмного забезпечення для управління системою, збору даних, обробки інформації та прийняття рішень.
- Тестування: Тестування програмного забезпечення на відповідність вимогам.

6. Інтеграція системи:

- Підключення до інших систем: Інтеграція системи з іншими системами управління або інформаційними системами.

- Налаштування параметрів: Налаштування параметрів системи відповідно до конкретних умов експлуатації.

7. Тестування та налагодження:

- Лабораторні випробування: Перевірка роботи системи в лабораторних умовах.
- Пілотний проект: Впровадження системи в невеликому масштабі для оцінки її ефективності.
- Налагодження: Усунення виявлених помилок та недоліків.

8. Впровадження та експлуатація:

- Встановлення: Встановлення системи на виробництві або в іншій галузі застосування.
- Навчання персоналу: Навчання персоналу роботі з системою.
- Супровід: Технічне обслуговування та супровід системи протягом усього терміну експлуатації.

Типи систем балансування та їх застосування

Системи балансування – це інструменти, що дозволяють оптимізувати розподіл ресурсів, навантаження або інших величин в системах різного типу. Вони широко застосовуються в промисловості, інформаційних технологіях, енергетиці та багатьох інших галузях.

Основні типи систем балансування та їх застосування:

1. Системи балансування навантаження

- Мета: Розподілити обчислювальне навантаження між декількома серверами або процесорами для підвищення продуктивності, надійності та доступності системи.

- Застосування:
    - Веб-сервери: Розподіляють вхідний трафік між декількома серверами для запобігання перевантаження одного з них.
    - Бази даних: Розподіляють запити до бази даних між декількома серверами для підвищення швидкості обробки.
    - Хмарні обчислення: Динамічно розподіляють ресурси між віртуальними машинами залежно від навантаження.

2. Системи балансування енергії

- Мета: Оптимізувати споживання енергії в електричних мережах, промислових підприємствах та побуті.
- Застосування:
    - Енергетичні мережі: Регулюють виробництво та споживання електроенергії для забезпечення стабільності мережі.
    - Промислові підприємства: Оптимізують споживання енергії на виробничих лініях.
    - "Розумні будинки": Автоматично регулюють споживання енергії домашніми приладами.

3. Системи балансування виробництва

- Мета: Забезпечити рівномірний випуск продукції, мінімізувати простої обладнання та витрати матеріалів.
- Застосування:
    - Виробничі лінії: Регулюють швидкість роботи конвеєрів та обладнання для забезпечення синхронної роботи.

- Логістика: Оптимізують маршрути транспортування та розподіл товарів.

4. Системи балансування складських запасів

- Мета: Оптимізувати рівень запасів на складах, мінімізуючи витрати на зберігання та забезпечуючи безперебійну роботу виробництва.
- Застосування:
  - Логістика: Автоматично формують замовлення на постачання матеріалів та комплектуючих.
  - Роздрібна торгівля: Оптимізують рівні запасів товарів на складах магазинів.

5. Системи балансування навантаження на обладнання

- Мета: Розподілити навантаження між різними одиницями обладнання для збільшення терміну їх служби та підвищення ефективності.
- Застосування:
  - Металообробка: Розподіляють деталі між різними верстатами для рівномірного зношування інструменту.
  - Енергетика: Розподіляють навантаження між генераторами для збільшення їх терміну служби.

Ключові технології, що використовуються в системах балансування

Системи балансування – це складні інженерні рішення, які спираються на широкий спектр технологій. Ось деякі з ключових технологій, що використовуються в їх розробці та впровадженні:

1. Математичне моделювання

- Створення цифрових двійників: Розробка віртуальних моделей реальних систем, що дозволяє аналізувати їх поведінку та прогнозувати результати різних сценаріїв.
- Оптимізаційні моделі: Використання математичних моделей для знаходження оптимальних рішень, таких як мінімізація витрат або максимізація продуктивності.
- Статистичні моделі: Аналіз історичних даних для виявлення закономірностей та прогнозування майбутніх значень.

2. Алгоритми оптимізації

- Лінійне програмування: Використовується для розв'язання задач оптимізації з лінійними обмеженнями.
- Нелінійне програмування: Застосовується для задач з нелінійними обмеженнями та цільовими функціями.
- Еволюційні алгоритми: Інспіровані природною еволюцією, використовуються для пошуку оптимальних рішень в складних задачах.
- Рої частинок: Інспіровані поведінкою соціальних комах, використовуються для колективного пошуку оптимальних рішень.

3. Системи керування

- Програмовані логічні контролери (PLC): Використовуються для автоматизації процесів і прийняття рішень на основі логічних операцій.
- Розподілені системи керування: Об'єднують декілька контролерів для керування складними системами.
- Системи реального часу: Забезпечують швидку реакцію на зміни у зовнішньому середовищі.

4. Програмне забезпечення

- SCADA-системи: Використовуються для збору даних, візуалізації процесів і керування технологічними процесами.
- Промислові бази даних: Зберігають великі обсяги даних про роботу системи.
- Інтегровані середовища розробки: Забезпечують розробку, тестування та впровадження програмного забезпечення.

5. Сенсори та актуатори

- Датчики: Вимірюють різноманітні параметри процесу, такі як температура, тиск, витрата, рівень тощо.
- Виконавчі механізми: Змінюють стан системи відповідно до команд системи керування.

6. Мережі та комунікації

- Промислові мережі: Забезпечують обмін даними між різними компонентами системи.
- Бездротові мережі: Використовуються для передачі даних на великі відстані або в складних умовах.
- Інтернет речей (IoT): Дозволяє підключати до системи різноманітні пристрої та отримувати дані з них.

7. Штучний інтелект та машинне навчання

- Нейронні мережі: Використовуються для прогнозування, класифікації та прийняття рішень на основі великих обсягів даних.
- Машинне навчання: Дозволяє системам самонавчатися на основі нових даних і адаптуватися до змінних умов.

8. Інтерфейси користувача

- Графічні інтерфейси користувача (GUI): Забезпечують зручну взаємодію користувача з системою.
- Веб-інтерфейси: Дозволяють керувати системою віддалено через веб-браузер.
- Мобільні додатки: Забезпечують доступ до системи з мобільних пристроїв.

Виклики при розробці систем балансування:

Розробка систем балансування – це складний процес, який супроводжується цілим рядом викликів. Графічне представлення цих викликів допомагає візуалізувати їх взаємозв'язок та краще зрозуміти масштаб завдання.

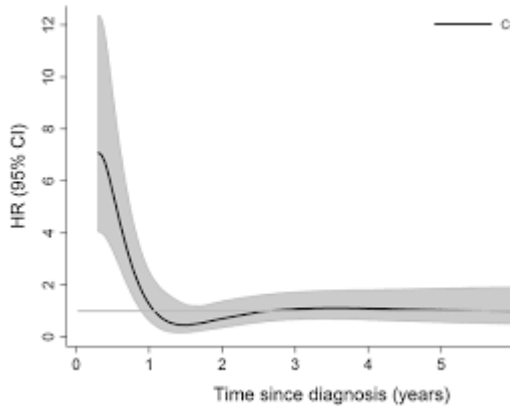
Основні виклики та їх візуалізація

1. Складність систем і велика кількість змінних:

- Проблема: Сучасні системи часто складаються з тисяч взаємопов'язаних елементів, кожен з яких має свої параметри і може впливати на інші. Це створює велику кількість змінних, які необхідно враховувати при моделюванні та оптимізації системи.
- Візуалізація: Можна представити систему у вигляді графа, де вузли - це елементи системи, а ребра - їхні зв'язки. Такий граф буде дуже розгалуженим і складним для аналізу.

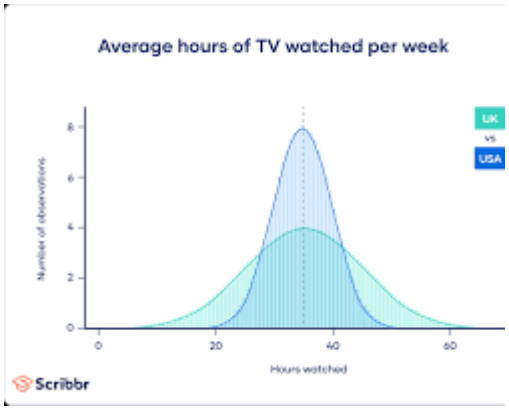
2. Нелінійність і нестаціонарність процесів:

- Проблема: Багато процесів в реальних системах є нелінійними і нестаціонарними, тобто їх поведінка змінюється з часом і не може бути точно описана лінійними рівняннями.
- Візуалізація: Нелінійність можна показати на графіках, де залежність однієї величини від іншої не є прямою лінією. Нестаціонарність можна відобразити за допомогою змінних у часі графіків.



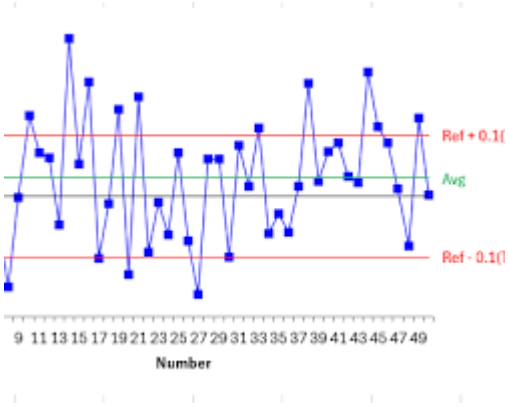
3. Невизначеність і шум у даних:

- Проблема: Датчики можуть давати похибки, а зовнішні фактори можуть впливати на роботу системи, що призводить до неточностей в даних.
- Візуалізація: Шум можна представити як випадкові відхилення від реального значення на графіках. Невизначеність можна показати у вигляді довірчих інтервалів.



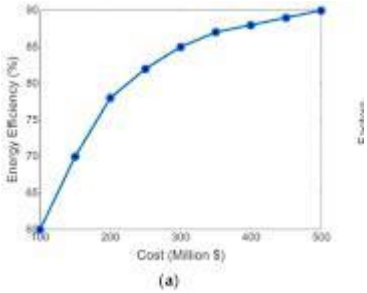
4. Високі вимоги до точності та швидкодії:

- Проблема: Системи балансування часто повинні працювати в реальному часі і з високою точністю, щоб забезпечити оптимальний результат.
- Візуалізація: Можна представити вимоги до точності у вигляді допустимих відхилень від заданого значення на графіку. Швидкодію можна оцінити за часом реакції системи на зміни умов.



5. Оптимізація за множинними критеріями:

- Проблема: Часто необхідно одночасно оптимізувати кілька конкуруючих критеріїв, таких як продуктивність, енергоефективність і вартість.
- Візуалізація: Можна представити різні критерії у вигляді координатних осей і показати, як змінюється значення кожного критерію при зміні параметрів системи

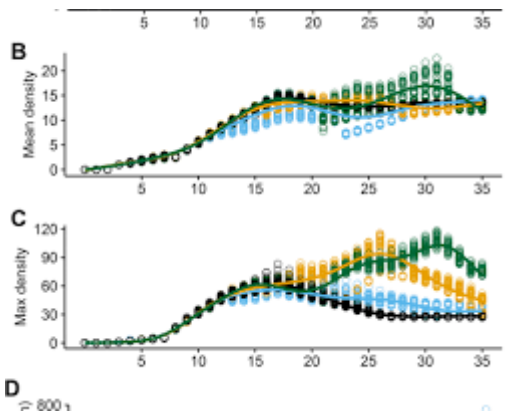


6. Зміна умов експлуатації:

- Проблема: Умови експлуатації системи можуть змінюватися з

часом, що вимагає постійної адаптації алгоритмів балансування.

- Візуалізація: Можна представити зміну умов у вигляді часових рядів, які показують, як змінюються різні параметри системи.



Стратегії подолання викликів

- Спрощення моделей: Використання спрощених моделей, які адекватно описують основні процеси в системі.
- Адаптивні алгоритми: Використання алгоритмів, які здатні самонавчатися і адаптуватися до змін умов.
- Робастність: Розробка систем, які стійкі до шумів і збурень.
- Розподілені обчислення: Розподіл обчислень між декількома процесорами або комп'ютерами для підвищення швидкодії.
- Машинне навчання: Використання методів машинного навчання для аналізу великих обсягів даних і прийняття рішень.

Розробка системи балансування – це складний і багатогранний процес, який вимагає глибоких знань в області математики, інформатики, автоматики та інших дисциплін. Вибір оптимального рішення залежить від конкретних умов завдання і вимагає індивідуального підходу.

РОЗДІЛ 5. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

5.1 Розробка програмного забезпечення

Розробка програмного забезпечення – це складний процес створення програм, які дозволяють комп'ютерам виконувати певні завдання. Це поєднання творчості, технічних знань та логічного мислення.

Основні етапи розробки програмного забезпечення:

1. Аналіз вимог:
   - Визначення мети: Чого саме ми хочемо досягти за допомогою програми? Які проблеми вона має вирішувати?
   - Виявлення функціональних вимог: Які функції повинна виконувати програма?
   - Виявлення нефункціональних вимог: Якими мають бути продуктивність, надійність, безпека програми?
   - Створення технічного завдання: Детальний опис того, що повинна робити програма.
2. Проектування:
   - Вибір архітектури: Як програма буде побудована? Які компоненти вона буде мати?
   - Розробка алгоритмів: Які послідовності дій будуть виконуватись програмою?
   - Вибір структур даних: Як будуть організовані дані в програмі?
   - Створення діаграм: Візуалізація структури програми за допомогою діаграм (блок-схеми, діаграми класів).
3. Кодування:

- Написання коду: Переклад проекту на конкретну мову програмування (Python, Java, C++ тощо).
- Створення модулів і функцій: Розбиття програми на окремі блоки для кращої організації коду.
- Форматування коду: Використання правил форматування для підвищення читабельності коду.

4. Тестування:
   - Юніт-тести: Перевірка окремих функцій і модулів.
   - Інтеграційне тестування: Перевірка взаємодії між різними частинами програми.
   - Системне тестування: Перевірка всієї програми на відповідність вимогам.
   - Тестування користувацького інтерфейсу: Перевірка зручності використання програми.
5. Впровадження:
   - Розгортання: Встановлення програми на сервер або комп'ютер користувача.
   - Навчання користувачів: Надання інструкцій з використання програми.
   - Підтримка: Виправлення помилок, внесення змін та доповнень.

5.2 Проведення експериментів

Після ретельної підготовки установки настає найцікавіший етап – проведення експериментів. Цей процес передбачає:

- Підготовка зразків: Підготовка матеріалів або об'єктів, які будуть досліджуватися. Це може включати очищення, калібрування, підготовку розчинів тощо.
- Встановлення параметрів: Встановлення необхідних параметрів на обладнанні (температура, тиск, напруга тощо).
- Запуск експерименту: Запуск установки та початок збору даних.
- Моніторинг процесу: Спостереження за ходом експерименту, фіксація будь-яких непередбачених ситуацій.
- Збір даних: Реєстрація отриманих даних за допомогою датчиків та програмного забезпечення.

Важливі аспекти проведення експериментів:

- Повторюваність: Експерименти повинні проводитися кілька разів для підтвердження результатів та оцінки похибки.
- Контроль зовнішніх факторів: Необхідно мінімізувати вплив зовнішніх факторів (температура, вологість, вібрація тощо), які можуть спотворити результати.
- Безпека: Дотримання всіх правил безпеки при роботі з обладнанням і матеріалами.
- Документація: Детальний запис всіх параметрів експерименту та отриманих результатів.

5.4 Аналіз результатів експериментів

Після завершення експериментів настає етап аналізу отриманих даних. Це найважливіший етап дослідження, оскільки саме на його основі робляться висновки та формулюються нові гіпотези.

- Обробка даних: Очищення даних від помилок, нормалізація, обчислення середніх значень, стандартних відхилень тощо.
- Візуалізація даних: Побудова графіків, діаграм для наочного представлення результатів.
- Статистичний аналіз: Використання статистичних методів для оцінки достовірності результатів, виявлення кореляційних зв'язків.
- Порівняння з теоретичними моделями: Порівняння отриманих результатів з теоретичними розрахунками для перевірки гіпотез.
- Формулювання висновків: На основі проведеного аналізу формулюються висновки про результати дослідження, їх значення та подальші напрямки досліджень.

Інструменти для аналізу даних:

- Табличні процесори: Excel, Google Sheets
- Статистичні пакети: SPSS, Statistica, R
- Мови програмування: Python, MATLAB
- Спеціалізоване програмне забезпечення: залежить від типу експерименту (наприклад, для обробки зображень, спектральних даних)

Приклади методів аналізу:

- Кореляційний аналіз: для виявлення зв'язків між різними змінними.
- Регресійний аналіз: для побудови математичних моделей, що описують залежність однієї змінної від інших.
- Кластерний аналіз: для об'єднання схожих об'єктів в групи.
- Факторний аналіз: для виявлення основних факторів, що впливають на досліджуваний процес.

ВИСНОВКИ

Розроблена система діагностики та профілактики літій-іонних акумуляторів відкриває нові можливості для підвищення ефективності та безпеки використання батарей в різних галузях. Отримані результати можуть бути використані для створення більш досконалих систем управління батареями в електромобілях, стаціонарних енергосистемах та портативних пристроях. Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка адаптивних систем управління, які здатні самонавчатися та оптимізувати свою роботу в реальних умовах експлуатації.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. **Goodenough J.B., Kim Y.** Challenges for rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 2011, Vol. 196, Issue 16, pp. 6688–6694. DOI:10.1016/j.jpowsour.2010.11.074.
2. **Plett G.L.** Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Artech House, 2015. 288 p.
3. **Linden D., Reddy T.B.** Handbook of Batteries. 4th Edition. McGraw-Hill Education, 2010. 1456 p.
4. **Nishi Y.** Lithium Ion Secondary Batteries; Past 10 Years and the Future. *Journal of Power Sources*, 2001, Vol. 100, Issue 1-2, pp. 101–106.
5. **Cheng X., Zhang R., Zhao C., Zhang Q.** Toward Safe Lithium Metal Anode in Rechargeable Batteries: A Review. *Chemical Reviews*, 2017, Vol. 117, Issue 15, pp. 10403–10473. DOI:10.1021/acs.chemrev.7b00115.
6. **Tarascon J.-M., Armand M.** Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 2001, Vol. 414, pp. 359–367.
7. **Wu X., Yuan L., Hou X., et al.** Effects of State-of-Charge on Lithium-Ion Battery Degradation and Resistance Growth. *Energy Storage Materials*, 2018, Vol. 15, pp. 153–161. DOI:10.1016/j.ensm.2018.01.009.
8. **Zhang S.S.** A review on electrolyte additives for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2006, Vol. 162, Issue 3, pp. 1379–1394. DOI:10.1016/j.jpowsour.2006.07.074.
9. **Ecker M., et al.** Calendar and Cycle Life Study of Li(NiMnCo)O2-Based 18650 Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 2014, Vol. 248, pp. 839–851. DOI:10.1016/j.jpowsour.2013.09.143.
10. **Thackeray M.M., Wolverton C., Isaacs E.D.** Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 2012, Vol. 5, Issue 7, pp. 7854–7863. DOI:10.1039/c2ee21892e.
11. **Shah K., et al.** Diagnostic Techniques for Lithium-Ion Battery Management Systems. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 52796–52810. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2980912.
12. **Harlow J.E., et al.** A Wide-Range Assessment of Lithium-Ion Battery Performance Attributes Relevant to Automotive Applications. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, Vol. 166, Issue 13, pp. A3031–A3044. DOI:10.1149/2.0981913jes.
13. **Bloom I., et al.** An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 2001, Vol. 101, Issue 2, pp. 238–247. DOI:10.1016/S0378-7753(01)00783-2.
14. **Wang Q., Ping P., Zhao X., et al.** Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 2012, Vol. 208, pp. 210–224. DOI:10.1016/j.jpowsour.2012.02.038.
15. **Chen Z., et al.** Advances and Challenges in Practical Lithium-Metal Batteries. *Nature Reviews Materials*, 2020, Vol. 5, pp. 451–468. DOI:10.1038/s41578-020-0192-5.