МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ҐЖИЦЬКОГО
ЦЕНТР ПЕРЕПІДГОТОВКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему: «Удосконалення процесу діагностики автомобільних джерел струму»

Виконав: студент групи Ат-42 зСП
спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)
Тарас ПІДЦЕРКОВНИЙ
(ім’я та прізвище)

Керівник: _____
(ім’я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 629.4.048.3

Підцерковний Тарас Андрійович. Удосконалення процесу діагностики автомобільних джерел струму. Кваліфікаційна робота. Львів: Львівський НУВМБ ім. Степана ГЖИЦЬКОГО, 2025. 71 с.

Табл. 8; рис. 24; бібліогр. джерел 36.

Проведений аналіз автомобільних джерел струму засвідчує, що розвиток електротранспорту й гібридних технологій безпосередньо залежить від вдосконалення акумуляторних систем. Основні тенденції – це зростання частки літій-іонних батарей, які поступово замінюють традиційні свинцево-кислотні і нікель-металогідридні акумулятори, а також поява нових перспективних типів накопичувачів, як-от твердотільні й натрієві.

Літій-іонні батареї сьогодні залишаються оптимальним вибором для більшості легкових і комерційних електро- та гібридних транспортних засобів. Їхня ефективність базується на високих показниках щільності енергії та мінімальному саморозряді.

.Дослідження деградації та типових дефектів акумуляторних батарей у сучасних електромобілях показує, що воно має комплексний характер втрати ресурсу, який зумовлений поєднанням фізико-хімічних процесів та експлуатаційних чинників. Особливо критичними є експлуатація при підвищених температурах, часті глибокі розряди та регулярне використання швидких заряджань, які не лише прискорюють старіння хімічної системи батареї. Діагностика залишкової ємності та технічного стану батарей електро- і гібридних автомобілів доводить, що реальний ресурс транспортного засобу значною мірою залежать від якості тестування тягових акумуляторних батарей. Результати практичного вимірювання на прикладі Nissan Leaf підтвердили, що навіть незначні відхилення напруги й внутрішнього опору окремих модулів можеть істотно вплинути на загальну ефективність роботи батареї.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 Огляд сучасних автомобільних джерел струму різноманітних транспортних засобів 7
1.1 Огляд конструкцій автомобілів та потреб в енергозабезпеченні 7
1.2 Основні типи джерел струму автомобілів 13
1.3 Енергетичні й експлуатаційні характеристики батарей 20
Висновки 23
РОЗДІЛ 2 Типові несправності, причини зниження ресурсу та основні дефекти батарей 24
2.1 Механізми деградації акумуляторних батарей 24
2.2 Вплив експлуатаційних режимів, температури й глибини розряду на деградацію акумуляторних батарей 26
Висновки 38
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА 39
3.1 Методики тестування та контролю залишкової ємності батарей електро- та гібридних автомобілів 39
3.2 Класичні методи діагностики батарей 40
3.3 Алгоритми оцінки стану батареї 42
3.4 Удосконалення процесу діагностики батареї Nissan Leaf 44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 67

ВСТУП

Світова автомобільна індустрія на початку XXI століття зазнає фундаментальних змін, що зумовлені переходом до більш екологічних та енергоефективних транспортних засобів. Зростання кількості електромобілів і гібридних автомобілів стає відповіддю на виклики глобального потепління, підвищення цін на традиційні енергоносії, а також вимогливість екологічних стандартів у провідних країнах. Така тенденція спостерігається не лише у високорозвинених країнах, а й поступово охоплює країни Східної Європи, зокрема Україну, де дедалі більше підприємств та приватних осіб віддають перевагу електрифікованому автотранспорту [1], [3], [7], [11].

В основі конструкції електро- та гібридних транспортних засобів знаходиться акумуляторна батарея - складна багатокомпонентна система, що виконує роль головного джерела електричної енергії для живлення тягових двигунів і численних допоміжних систем. Від її надійності, функціонального стану й ефективності роботи залежить не лише запас ходу автомобіля, а й безпека експлуатації, загальний термін служби агрегатів та вартість обслуговування.

Сучасні акумуляторні батареї мають складну внутрішню будову, яка передбачає використання багатьох елементів керування, систем моніторингу, балансування комірок та захисту від перенавантажень, коротких замикань, перегріву й інших критичних станів. Внаслідок цього діагностика акумуляторних батарей електромобілів і гібридних автомобілів стає дедалі важливішою складовою системи технічного обслуговування транспортних засобів, адже від своєчасного виявлення та усунення відхилень у роботі джерел струму залежить ефективність функціонування усього транспортного комплексу.

Зі зростанням ринку електромобілів та гібридів виникає гостра потреба у впровадженні нових, досконаліших методів контролю та діагностики джерел струму. Це обумовлено такими факторами, як підвищення енергомісткості

батарей, зростання вимог до точності контролю внутрішнього стану елементів, збільшення частки високовольтних систем і розширення функціональності вбудованих систем управління батареями. Стандартні методи діагностики, що широко використовуються для традиційних свинцево-кислотних акумуляторів, є недостатніми для сучасних складних систем, які експлуатуються в умовах постійного змінного навантаження та температурних коливань.

Актуальність дослідження полягає у необхідності розробки підходів до діагностики автомобільних джерел струму, які враховують сучасні тенденції у конструкції батарей, особливості експлуатації електро- та гібридних автомобілів, а також потребу в підвищенні ефективності та надійності експлуатації таких транспортних засобів у різних кліматичних і дорожніх умовах. Відсутність чітких стандартів щодо діагностики, недостатній рівень спеціальної підготовки персоналу та обмеженість апаратно-програмних засобів на сучасних СТО ускладнюють забезпечення якісного та своєчасного контролю за станом батарей.

Необхідно провести детальний аналіз існуючих типів джерел струму, класифікувати типові несправності та фактори деградації, оцінити ефективність сучасних діагностичних методик, розробити і апробувати алгоритми удосконалення діагностичних процесів [31], [32].

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ РІЗНОМАНІТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Огляд конструкцій автомобілів та потреб в енергозабезпеченні

В автомобілях з автоматичною системою «Старт-Стоп» (рис. 1.1) до акумулятора пред'являються підвищені вимоги. Однією з причин є висока пропускна здатність заряду. Крім того, існує велика кількість споживачів електроенергії, таких як підігрів керма, система кондиціонування повітря та функції безпеки, які повинні надійно постачатися живленням навіть під час очікування на світлофорі з вимкненим двигуном.

Рисунок 1.1 - Автомобіль з автоматичною системою «Старт-Стоп»

Найкращими акумуляторами, які можуть ефективно працювати в автоматичних систем «Старт-Стоп», є акумулятори EFB та AGM.

Конструкція акумуляторів EFB є подальшим розвитком звичайних свинцево-кислотних акумуляторів. Матеріал Polyvlies на поверхні позитивної пластини допомагає стабілізувати активний матеріал пластин і подовжити термін служби акумулятора. Сепаратори в комірках акумуляторів EFB мають низький опір і оптимізують процес заряджання. Акумулятори EFB мають

хорошу циклічну стабільність і вантажопідйомність. Згідно з випробуванням EN, вони можуть витримувати вдвічі більше циклів заряджання порівняно зі звичайними стартерними акумуляторами [2], [5], [7].

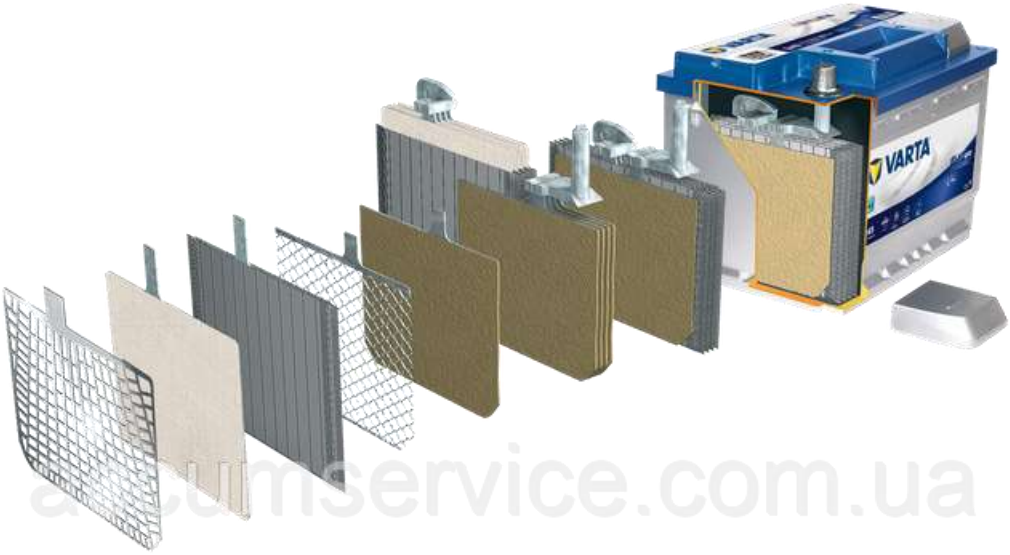


Рисунок 1.2 - Акумулятор з EFB-технологією

AGM-акумулятори ідеально підходять для автомобілів з автоматичними системами Start-Stop з рекуперацією енергії гальмування або для автомобілів з преміальним обладнанням та складними аксесуарами, оскільки звичайний стартерний акумулятор не може впоратися з високими вимогами до потужності цих систем.

Електроліт в акумуляторі AGM (AGM розшифровується як «Absorbent Glass Mat») зв'язаний абсорбуючим скляним флісом. Це робить акумулятор необслуговуваним та герметичним. Навіть якщо корпус акумулятора пошкоджено, кислота з акумулятора не може витекти. Акумулятор AGM також має чудові характеристики холодного запуску. Він потужно запускає стартер і скорочує час його роботи. Завдяки циклічній стабільності акумулятора, прогрітий двигун можна вимикати та запускати знову кілька разів через короткі проміжки часу без ризику виникнення труднощів під час повторного запуску. Щодо терміну служби, акумулятори AGM також мають значні переваги перед простими стартерними акумуляторами. Вони можуть

витримувати втричі більше циклів заряджання ніж звичайний стартерний акумулятор.

Рисунок 1.3 - Акумулятор з AGM -технологією

Кожен етап гальмування фактично є марною тратою енергії. Завдяки рекуперації енергії гальмування (рекуперації) енергія, що утворюється в результаті гальмування, не втрачається повністю. Залежно від умов руху, частина енергії, що рекуперується в процесі гальмування, подається в акумулятор автомобіля. Передумовою для цього є акумулятор, придатний для рекуперації: AGM-акумулятори забезпечують цю технологію. Звичайний акумулятор з мокрим зарядом (SLI) запускає двигун лише один раз за поїздку. Оптимальний 100% заряд SLI знижується лише один раз під час запуску, а потім заряджається генератором під час поїздки.

З автоматичною системою Start-Stop акумулятор повинен запускати двигун кілька разів протягом поїздки. Таким чином, рівень заряду акумулятора падає в кілька разів, а також споживачі електроенергії все ще повинні отримувати живлення під час періоду простою. Це створює особливо велике навантаження на акумулятор. Під час руху акумулятор заряджається, як і

звичайний стартерний акумулятор. Однак, через рекуперацію енергії гальмування, для подачі енергії рекуперативного гальмування повинна бути доступна додаткова ємність заряду. Тому акумулятори AGM працюють у діапазоні часткового заряду та досягають повного 100% заряду лише під час рекуперації (ілюстрація нижче праворуч). У наступній фазі зупинки заряд зменшується завдяки живленню споживачів електроенергії, так що знову залишається достатньо «місця» для зберігання енергії з наступної фази гальмування [5].

На дорогах зараз зростає кількість електричних та гібридних електричних транспортних засобів. Типи гібридних та електромобілів формуються залежно від конструкції системи приводу, принципів живлення та взаємодії між електричними і традиційними силовими установками.

Чисті електромобілі (BEV) оснащуються лише електродвигуном, який отримує енергію від акумуляторної батареї. Для таких авто характерна повна відсутність двигуна внутрішнього згоряння, завдяки чому вони не виробляють шкідливих викидів під час руху та відзначаються високою енергоефективністю. Основною особливістю електромобілів залишається залежність від інфраструктури для заряджання, що вимагає розвиненої мережі зарядних станцій, а також правильного планування маршруту з урахуванням запасу ходу.

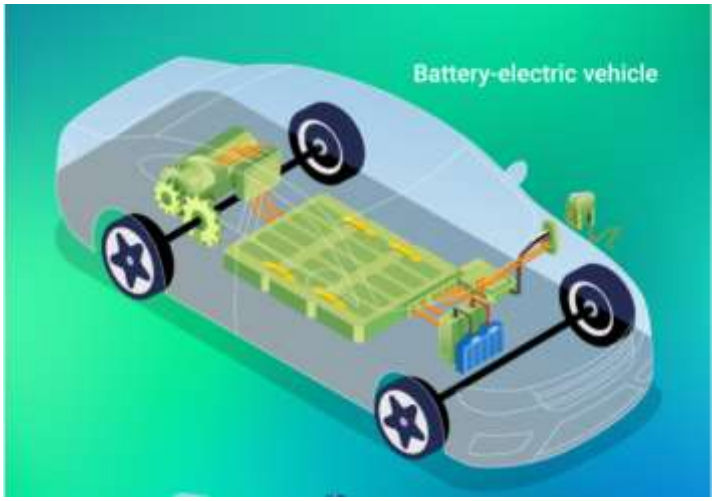


Рисунок 1.4 - Електромобілі (BEV)

Гібридні автомобілі (HEV) поєднують у конструкції традиційний ДВС та електродвигун із відносно невеликою батареєю. Ця схема дозволяє електромотору працювати паралельно з ДВС або підключатися до коліс під час старту, розгону та руху на малих швидкостях. Зарядження акумулятора в таких авто відбувається лише завдяки рекуперації енергії під час гальмування або безпосередньо від роботи ДВС, тобто підзарядка від зовнішніх джерел не передбачена. Завдяки такому поєднанню досягається суттєве зменшення витрат пального і викидів у міському циклі.

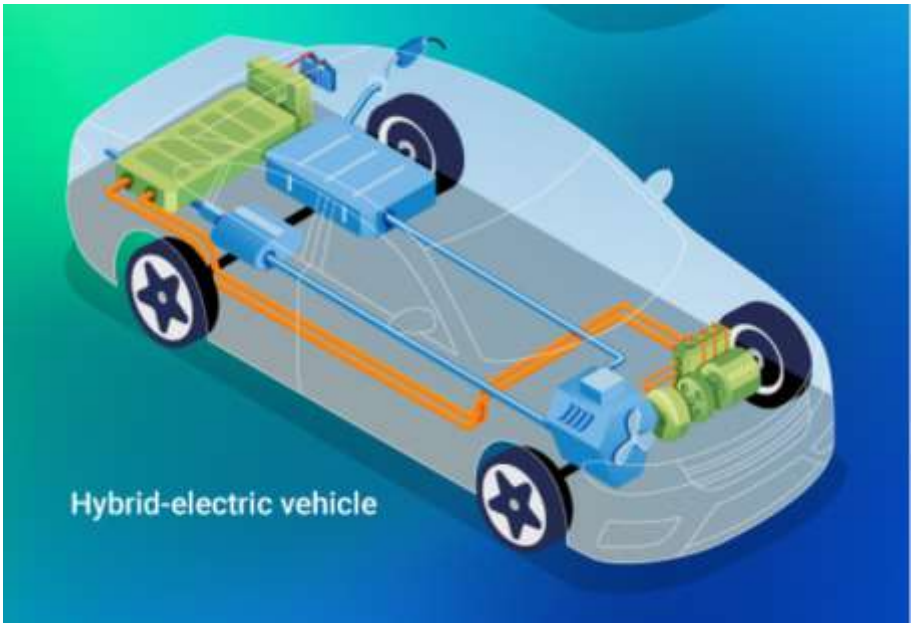


Рисунок 1.5 - Гібридні автомобілі (HEV)

Більш технологічних варіантом є гібриди (PHEV), що мають змогу заряджатись від електромережі. У ниих ємність батареї значно більша, а електродвигун дає змогу рухатися лише на електротязі протягом певної дистанції. Головна перевага цих авто полягає у можливості підзарядки батареї від зовнішньої електромережі, завдяки чому пересування містом відбувається без використання пального. Після вичерпання заряду авто переходить на гібридний режим із ДВС, що забезпечує більший загальний запас ходу.

Типи рівнів HEV. Мікрогібридні електромобілі мають обмежені переваги в економії палива завдяки технології «старт-стоп» на холостому ходу, але все ж економлять паливо порівняно з їхніми бензиновими аналогами.

Ці транспортні засоби не вимагають від виробника переробки всієї силової установки, тому вартість автомобіля аналогічна вартості автомобіля з бензиновим двигуном. Ці гібридні електромобілі не здатні до рекуперативного гальмування.

Легкі гібридні електромобілі використовують технологію «Старт-стопу» на холостому ходу, але також можуть рекуперувати електроенергію під час зупинки. Деякі виробники також можуть використовувати режим допомоги підсилювача двигуна під час рушання з місця (але не на високих швидкостях транспортного засобу) [12].

Середні гібридні електромобілі використовують систему старт-стоп на холостому ходу, рекуперативне гальмування та підсилювач двигуна на високих швидкостях. Однак ці транспортні засоби не обладнані для руху транспортного засобу лише за допомогою електродвигуна.

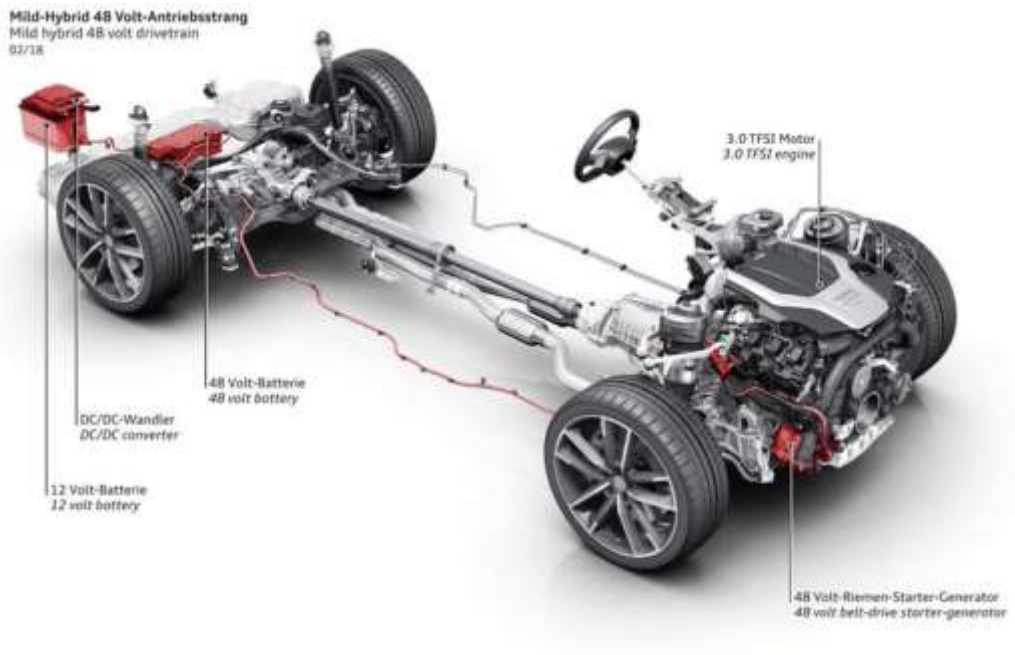


Рисунок 1.6 - Гібридний автомобіль (MHEV)

В окрему групу виділяють електромобілі з подовжувачем ходу (REEV), конструкція яких передбачає електродвигун як основний рушій, а невеликий ДВС або турбогенератор використовується виключно для підзарядки батареї при розряді. Це дозволяє долати більші відстані без ризику зупинки через розряджання акумулятора, зберігаючи всі переваги електротяги.

Архітектура гібридних авто може реалізовуватися за серійною або паралельною схемою. У паралельній системі як ДВЗ, так і електродвигун можуть безпосередньо приводити у рух колеса, а у серійній – ДВС працює тільки на генератор, що живить електродвигун, який приводить авто в рух. Вибір схеми залежить від вимог до економічності, динаміки і конструктивної складності.

Окремо слід розглянути електромобілі з паливними елементами (FCEV), де електрична енергія виробляється безпосередньо на борту автомобіля шляхом реакції водню в паливних елементах.

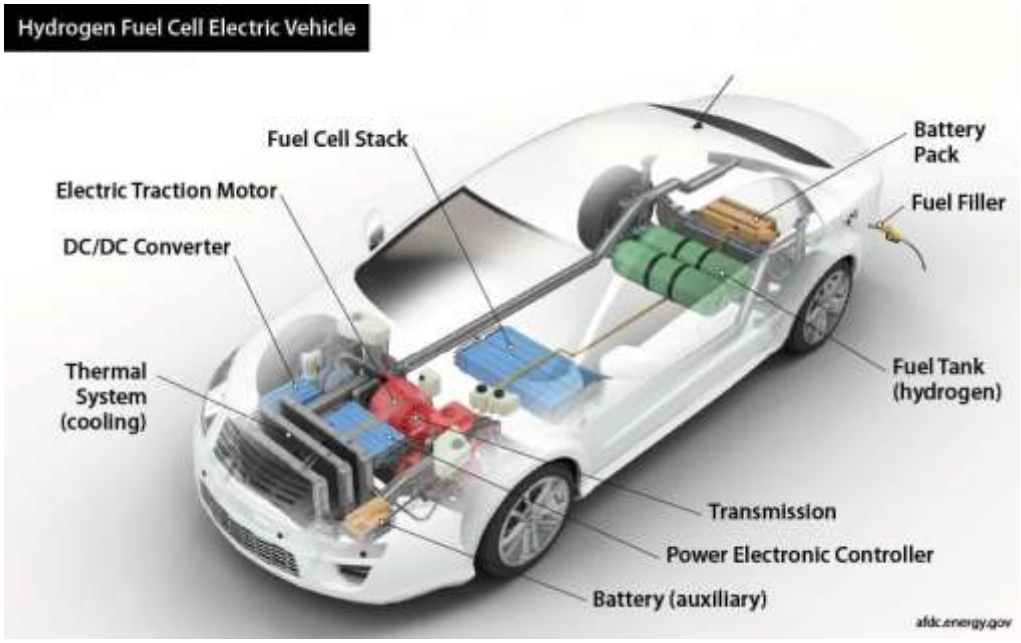


Рисунок 1.7 - Автомобіль на паливних водневих елементах (FCEV)

Такі машини відрізняються швидкою заправкою воднем і нульовими викидами під час руху, проте потребують розвиненої інфраструктури для зберігання й заправки воднем.

1.2 Основні типи джерел струму автомобілів

Енергетичні характеристики, конструктивна складність та експлуатаційні параметри електро- і гібридних автомобілів визначаються, передусім, вибором джерел електричної енергії. Основними типами сучасних автомобільних батарей залишаються літій-іонні, нікель-металогідридні,

свинцево-кислотні, а також менш розповсюджені натрієві, твердотільні та інші перспективні системи накопичення енергії. Кожен з цих типів має власні фізико-хімічні властивості, вплив на конструкцію автомобіля, специфічні переваги і недоліки.

Літій-іонні акумулятори (Li-ion) сьогодні посідають домінуюче місце в сегменті електричних та гібридних транспортних засобів. Їхня популярність зумовлена високою питомою енергією, низькою питомою вагою, широким температурним діапазоном роботи, а також відсутністю «ефекту пам’яті», що забезпечує стабільну ємність протягом багатьох циклів заряду-розряду. Літій-іонні батареї складаються з великої кількості осередків, які поєднані у модулі й пов’язані складною системою електронного контролю (BMS – Battery Management System), що контролює стан окремих елементів, захищає від перенапруги, перегріву, глибокого розряду. Основним електрохімічним принципом є зворотне переміщення іонів літію між анодом та катодом, виготовленими із вуглецевих та металоксидних матеріалів. До недоліків цього типу батарей належить чутливість до механічних пошкоджень, ризик термічного розгону у разі критичних відхилень параметрів, а також поступова деградація через втрату ємності з роками експлуатації. Вартість виробництва залишається відносно високою, проте з кожним роком спостерігається тенденція до її зниження [1], [2].

Рисунок 1.8 - Автомобіль з літій-іонними джерелами струму

Таблиця 1.1 - Порівняльні характеристики основних типів акумуляторних батарей для електро- та гібридних автомобілів

Тип батареї	Питома енергія, Вт·год/кг	Кількість циклів (заряд-розряд)	Діапазон робочих температур, °C	Саморозряд, % на 1 міс.	Робоча напруга, В	Термін служби, років
Літій-іонна (Li-ion)	150–270	2000–4000	–30...+60	2–5	3,6–3,7	8–15
Літій-залізо-фосфатна (LiFePO4)	90–160	3000–6000	–30...+60	3–6	3,2	10–15
Нікель-металогідридна (NiMH)	60–100	1500–2000	–30...+50	10–15	1,2	6–8
Свинцево-кислотна	30–50	300–500	–20...+50	5–15	2,0	3–5
Натрієво-іонна	120–160	2000–3000	–20...+60	5–8	2,3–3,7	7–12
Твердотільна (Solid-State)	250–350	>4000	–40...+80	1–3	2,8–3,7	10–20

Нікель-металогідридні акумулятори (NiMH) використовуються переважно в гібридних транспортних засобах, особливо у перших поколіннях таких моделей, як Toyota Prius, Honda Insight та інші. Вони характеризуються вищою довговічністю в порівнянні зі свинцево-кислотними батареями, меншою чутливістю до екстремальних температур та підвищеною стійкістю до частих циклів заряду-розряду. Принцип роботи базується на електрохімічних реакціях між гідридом металу (анод) і оксидом нікелю (катод), з використанням водного електроліту. Основною перевагою NiMH є відносна безпека, екологічність та простота вторинної переробки. До недоліків відносять меншу питому енергію у порівнянні з літієвими аналогами, схильність до саморозряду та поступове зменшення ємності під час експлуатації.

Рисунок 1.9 - Нікель-металогідридні акумулятори автомобілів Toyota Prius, Honda Insight

В автомобілях широко різняться конфігурація системи та акумуляторних блоків. Система акумуляторів поєднує багато елементів та іншої керуючої електроніки в повноцінну батарею для живлення електромобіля. В електромобілі (EV) конфігурація акумулятора стосується розташування окремих елементів акумулятора всередині акумуляторного блоку. Ця конфігурація впливає на напругу, ємність, вихідну потужність та загальну продуктивність автомобіля.

Найпоширенішою конфігурацією для акумуляторів електромобілів є послідовно-паралельна гібридна схема. У цій схемі кілька елементів з'єднуються послідовно для збільшення напруги акумуляторного блоку, а

кілька груп послідовно з'єднаних елементів потім з'єднуються паралельно для збільшення загальної ємності акумуляторного блоку.

- Послідовне з'єднання: Збільшує напругу акумуляторної батареї, що життєво важливо для забезпечення необхідної потужності для керування транспортним засобом.

- Паралельне підключення: Збільшує ємність акумуляторної батареї, що є важливим для накопичення енергії, необхідної для досягнення бажаного запасу ходу.

Щоб розрахувати загальний розмір акумуляторної батареї, необхідно помножити загальну паралельну ємність в ампер-годинах (А·год) на номінальну напругу акумуляторної батареї у вольтах (В). Результат вимірюється у ват-годинах (Вт·год).

На рисунку 1.10 показано конфігурацію акумуляторного модуля з Audi Q8 e-tron 55. Цей модуль містить 12 акумуляторних елементів, чотири з яких встановлені паралельно, і є три групи такої паралельної конфігурації, з'єднані послідовно.

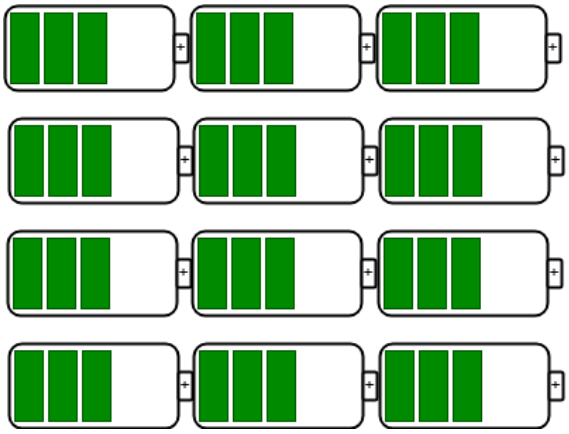


Рисунок 1.10 - Модуль 3s4p батареї Audi Q8 e-tron 55

Технічні характеристики елементів: Кожен елемент має номінальну напругу 3,67 вольта та ємність 72 А·год.

Напруга модуля - при послідовно з'єднані елементи дають напругу модуля 11 вольт, тоді як ємність модуля дорівнює 4 x 72 А·год паралельно, що дає загальну ємність модуля 288 А·год.

Напруга блоку живлення: Q8 e-tron 55 має загалом 36 модулів, з'єднаних послідовно. 36 x 11 вольт забезпечують 396 вольт для блоку живлення. Загальна ємність: 396 вольт x 288 Аг = 114 048 Вт·год або 114 кВт·год брутто-ємність.

Tesla Model Y Long Range використовує 4416 елементів у малому форматі 21700, з 96 рядами та 46 елементами, з'єднаними паралельно. Технічні характеристики елементів: Кожен елемент має ємність 4,8 А·год з номінальною напругою 3,7 вольта. Паралельна ємність: 4,8 А ·год x 46, що дає загалом 220,8 А·год.

Рисунок 1.11 - Батарея Model Y Long Range (4416 елементів типу 21700)

Напруга акумулятора: 96 x 3,7 вольта забезпечує номінальну напругу акумулятора 355 вольт. Загальна ємність в даному випадку становитиме: 355 вольт x 220,8 А·год = 78,4 кВт·год.

Акумулятор Kia EV6 з великим запасом ходу має загалом 384 елементи, сконфігуровані в 192 ряди по два елементи паралельно, структуровані в модулі з 12 елементами.

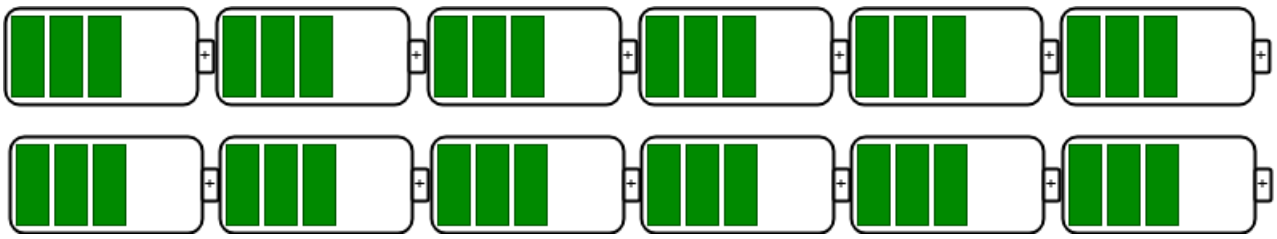


Рисунок 1.12 - Модуль 6s2p акумулятора Kia EV6

Технічні характеристики елементів наступні: ємність кожного елемента становить 55,6 А·год. Паралельна ємність: 2 х 55,6 А·год = 111,2 А·год, напруга акумуляторної батареї: Номінальна напруга становить 3,63 вольта на елемент. 192 х 3,63 вольта = 696,96 вольта номінально для акумуляторної батареї. Загальна ємність: 696,96 вольт х 111,2 А·год = 77,5 кВт·год.

Конструктивні особливості та принципи роботи джерел струму в електричних і гібридних автомобілях формуються під впливом суворих вимог до надійності, енергоємності, безпеки й швидкості заряджання.

Таблиця 1.2 - Конфігурації акумуляторних блоків автомобілів

Модель	Валова місткість	Конфігурація	Номінальна напруга
Audi Q8 e-tron	116 кВт·год	108s4p	396 вольт
Audi e-tron GT	93,7 кВт·год	198s2p	725 вольт
Kia EV6 GT	77,4 кВт·год	192s2p	697 вольт
Акумулятор Nio 100 кВт·год	100 кВт·год	96s1p	358 вольт
Mercedes EQE	96,12 кВт·год	90s 4 p.	328 вольт
Mercedes EQS	120 кВт·год	108s4p	396 вольт
Tesla Model Y з великим запасом ходу	78,1 кВт·год	96s46p	357 вольт
Rivian R1S	135 кВт·год	108s72p	390 вольт
Rivian R1S Max Pack	149 кВт·год	108s72p	390 вольт
Porsche Maccan / Audi Q6	100 кВт·год	180s1p	662 вольти

Головна особливість сучасних тягових батарей – це модульна будова, за якої один акумулятор складається з багатьох з’єднаних послідовно та паралельно осередків (елементів), кожен із яких має власні параметри напруги та ємності. Такий підхід дозволяє оптимізувати напругу для електродвигуна (зазвичай 200–800 В) і забезпечити потрібний запас енергії.

Літій-іонні батареї, які нині переважають у сучасних авто, базуються на принципі зворотної дифузії іонів літію між катодом і анодом через сепаратор, занурений у спеціальний електроліт. Під час розряду іони мігрують від анода до катода, генеруючи струм, а під час заряджання – у зворотному напрямку. Особливості конструкції полягають у використанні матеріалів із високою питомою ємністю (наприклад, кобальт, марганець або нікель у катодах), що дає змогу досягати щільності енергії понад 200 Вт·год/кг. Літій-іонна батарея оснащена багаторівневою системою контролю (BMS), яка моніторить температуру, напругу на кожному осередку, заряд/розряд, балансує струм між комірками та відсікає аварійні режими. Завдяки цьому вдається підвищити безпеку експлуатації та продовжити життєвий цикл батареї.

1.3 Енергетичні й експлуатаційні характеристики батарей

Літій-іонні акумуляторні елементи стали основою сучасної тягової енергетики для електро- та гібридних автомобілів завдяки поєднанню високої енергетичної щільності, стабільних експлуатаційних характеристик і відносно тривалого ресурсу. Принцип їхньої дії ґрунтується на оборотних електрохімічних реакціях між анодом і катодом, що відбуваються під час циклів заряджання та розряджання.

Кожен літій-іонний акумулятор складається з декількох основних компонентів: анода, катода, сепаратора, електроліту і зовнішньої оболонки. Найпоширенішим варіантом анода є матеріал на основі графіту, що забезпечує ефективне інтеркалювання іонів літію під час заряджання. Як катод використовують різні сполуки на основі оксидів металів: літій-кобальтовий оксид ($LiCoO_2$), літій-залізо-фосфат ($LiFePO_4$), літій-нікель-манган-

кобальтовий оксид (NMC) або літій-нікель-кобальт-алюміній (NCA). Електроліт - це, зазвичай, рідкий розчин літієвої солі в органічному розчиннику, що забезпечує високу іонну провідність, але є вибухонебезпечним і вимагає ретельного герметичного захисту.

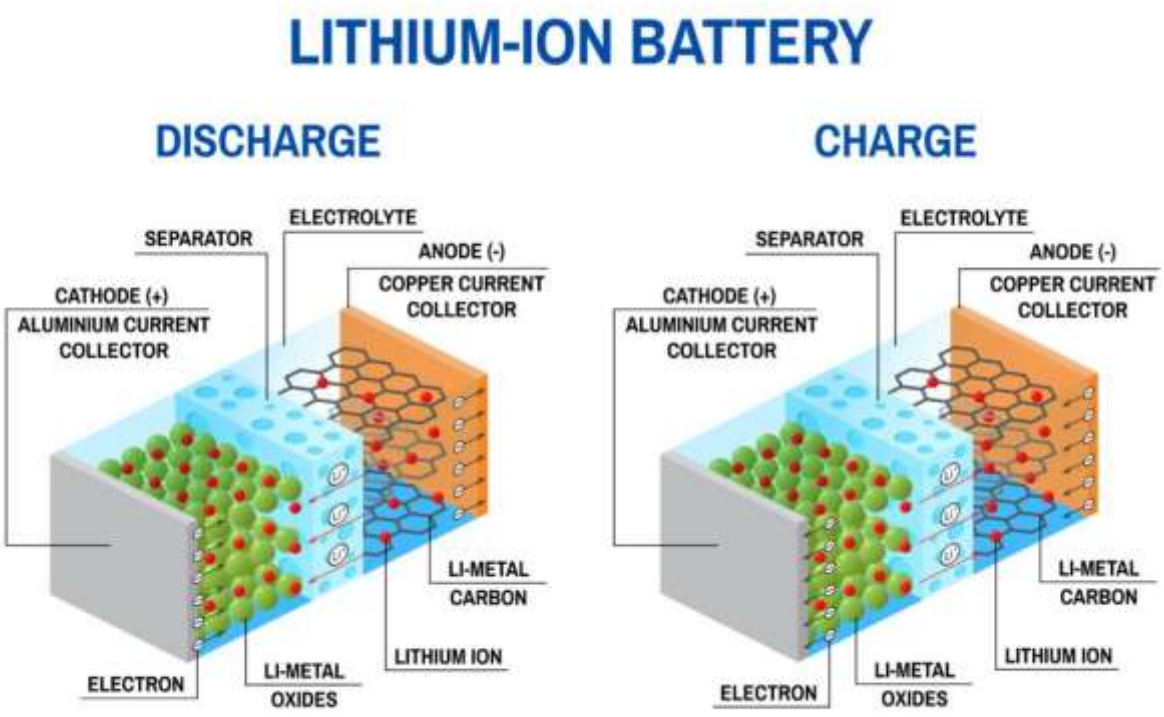


Рисунок 1.13 – Принцип роботи літій-іонного акумулятора

Під час заряджання акумулятора іони літію переміщуються через електроліт від катода до анода, «вбудовуючись» у кристалічну решітку графіту. При розряджанні цей процес іде у зворотному напрямку: іони повертаються до катода, супроводжуючись передачею електронів по зовнішньому електричному колу, що і забезпечує живлення споживачів енергією.

На молекулярному рівні основний фізико-хімічний процес полягає у багаторазовому інтеркаляційному переході іонів літію між шарами анода й катода. Від ефективності цього процесу залежить ємність елемента, питома потужність, ККД та термін служби. Значення мають не лише властивості активних матеріалів, а й якість сепаратора (полімерної мембрани, яка запобігає

прямому контакту електродів і короткому замиканню), а також чистота електроліту. Неправильний підбір чи деградація цих компонентів веде до зменшення ресурсу та виникнення небезпечних ситуацій – від втрати ємності до термічного розгону.

Крім високої щільності енергії, літій-іонні елементи мають характерну особливість - вони чутливі до температурних коливань, перевантаження струмом, глибокого розряду або перезаряду. Саме тому у тягових батареях автомобілів впроваджується багаторівнева система керування батареєю (Battery Management System, BMS).

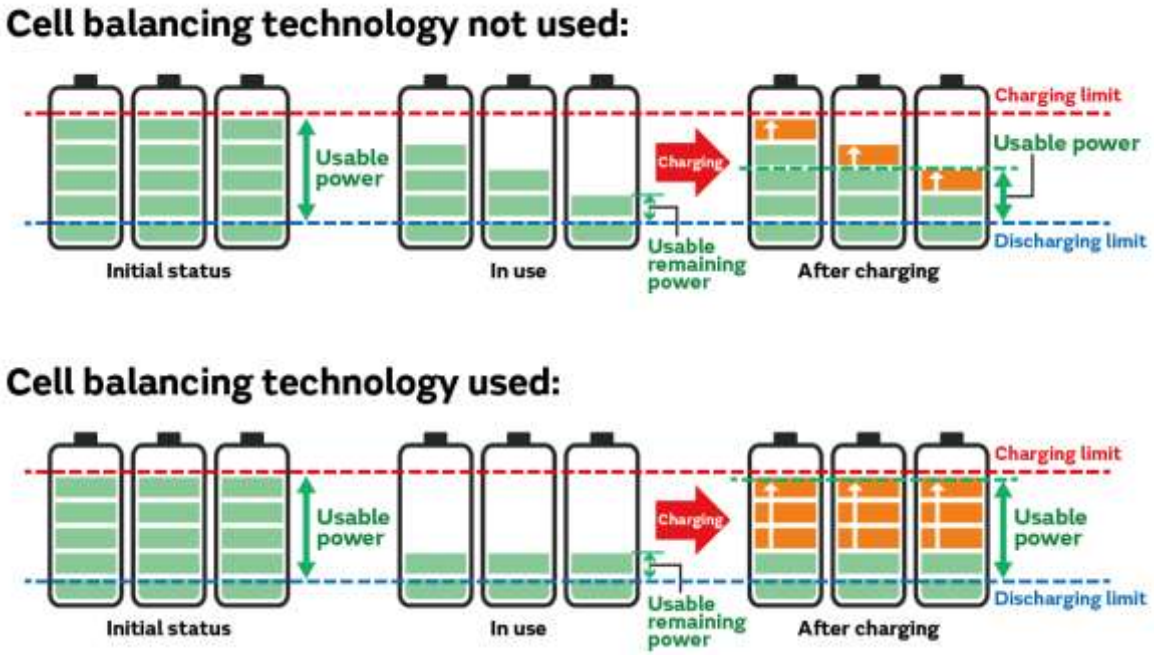


Рисунок 1.14 – Принцип багаторівневої системи керування батареєю (BMS)

BMS - це складний електронний комплекс, що здійснює цілодобовий моніторинг кожної комірки батареї за основними параметрами: напругою, температурою, струмом, станом заряду і балансу між осередками. Система забезпечує рівномірний розподіл навантаження, захищає елементи від перевищення напруги чи струму, перегріву, глибокого розряду. У разі виявлення критичних відхилень BMS може відключити акумулятор або обмежити струм, запобігаючи загорянню, вибуху або передчасному зносу батареї.

Завдяки впровадженню BMS сучасні автомобільні акумуляторні батареї мають не лише покращений ресурс, а й підвищену безпеку, можливість прогнозування залишкової ємності та дистанційної діагностики. На практиці це дозволяє підтримувати оптимальні режими експлуатації, уникати критичних ситуацій і суттєво продовжити термін служби дорогої тягової батареї. Такий підхід є одним з основних чинників еволюції електротранспорту, який став можливим лише завдяки поєднанню сучасної хімії матеріалів та досягнень в електроніці керування.

Висновки

1. Проведений аналіз автомобільних джерел струму засвідчує, що розвиток електротранспорту й гібридних технологій безпосередньо залежить від вдосконалення акумуляторних систем. Основні тенденції – це зростання частки літій-іонних батарей, які поступово замінюють традиційні свинцево-кислотні і нікель-металогідридні акумулятори, а також поява нових перспективних типів накопичувачів, як-от твердотільні й натрієві.

2. Сучасні автомобільні акумулятори повинні витримувати ряд вимог – від забезпечення стабільного живлення до підтримки високої потужності для електричного приводу. Серед основних параметрів: енергетична щільність, термін служби, здатність працювати у складних температурних режимах, безпека й технологічність.

3. Літій-іонні батареї сьогодні залишаються оптимальним вибором для більшості легкових і комерційних електро- та гібридних транспортних засобів. Їхня ефективність базується на високих показниках щільності енергії та мінімальному саморозряді.

4. Серед основних технічних рішень визначальними є модульна архітектура акумуляторних блоків, використання гібридних схем з’єднання елементів, а також інтеграція з іншими електросистемами автомобіля.

РОЗДІЛ 2 ТИПОВІ НЕСПРАВНОСТІ, ПРИЧИНИ ЗНИЖЕННЯ РЕСУРСУ ТА ОСНОВНІ ДЕФЕКТИ БАТАРЕЙ

2.1 Механізми деградації акумуляторних батарей

Зниження ефективності та передчасна втрата ресурсу акумуляторних батарей сучасних електро- та гібридних автомобілів є комплексним явищем, що обумовлюється низкою фізико-хімічних та експлуатаційних факторів. Основою процесу деградації слугують незворотні зміни у структурі електродів, електроліту, а також порушення балансу між окремими елементами батарейного блока.

Для літій-іонних акумуляторів типовою є поступова втрата ємності внаслідок формування стабільної пасивуючої плівки на поверхні анода (рис. 2.1). Цей шар виникає при кожному циклі заряду-розряду і спочатку забезпечує захист анода від прямого контакту з електролітом. Проте з часом товщина плівки збільшується, що ускладнює рух іонів літію та сприяє втраті активної площі електрода. Додатково, деградація катода може відбуватися внаслідок структурних змін кристалічної решітки металоксидних матеріалів, втрати активних іонів літію та локального розкладу електроліту за високих температур або при надмірних струмах.

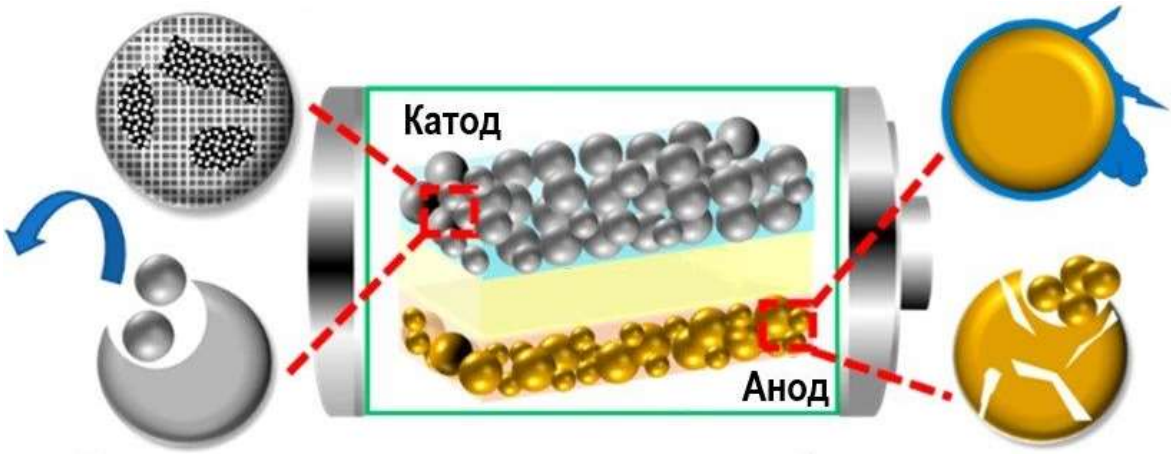


Рисунок 2.1 – Деградація літій-іонного акумулятора

Однією з критичних проблем, особливо при експлуатації у складних кліматичних умовах чи при частих циклах швидкого заряджання, є ріст

металевого літію на аноді – так звані дендритні відростки. Їхня поява не лише скорочує реальну ємність батареї, але й може призводити до внутрішніх коротких замикань, локального нагріву, а у рідкісних випадках – до термічного розгону і займання. Аналогічні явища спостерігаються і в інших хімічних системах: наприклад, у нікель-металогідридних або свинцево-кислотних акумуляторах процеси сульфатації або гідратації електродів поступово виводять частину активного матеріалу з реакції, зменшуючи корисну ємність.

Іншим поширеним механізмом є поступова зміна структури електроліту – як наслідок деградації розчинника, утворення газів або осаду домішок, що ускладнює перенесення іонів між електродами. Внаслідок цього спостерігається підвищення внутрішнього опору батареї, зниження напруги під навантаженням і збільшення тепловиділення.

Ще одним фактором зниження ресурсу акумуляторів виступає так званий календарний знос – старіння батареї внаслідок тривалого зберігання у зарядженому стані навіть без активної експлуатації. При цьому відбувається повільна деградація компонентів через саморозряд, окиснення матеріалів електродів і поступову втрату гнучкості сепаратора.

Важливо відзначити, що будь-який акумуляторний блок складається з великої кількості елементів, кожен з яких має власні характеристики старіння. У процесі експлуатації виникає розбалансування комірок за напругою та ємністю, що підвищує ризики глибокого розряду або перезаряду окремих елементів. Система BMS частково компенсує ці явища, але не здатна повністю їх усунути.

Крім основних механізмів деградації, значний вплив на ресурс батареї мають порушення режимів експлуатації – глибокі розряди, часті пікові навантаження, перегрів або переохолодження, а також недостатній контроль температури та вентиляції акумуляторного відсіку.

Сумарно механізми деградації зумовлюють поступову втрату енергетичних та експлуатаційних характеристик батареї, зменшення запасу ходу, підвищення внутрішнього опору і погіршення ефективності швидкого

заряджання. На певному етапі експлуатації цей процес стає незворотним, що вимагає заміни акумуляторного блока або проведення його ремонту із застосуванням сучасних методик діагностики й балансування.

2.2 Вплив експлуатаційних режимів, температури й глибини розряду на деградацію акумуляторних батарей

Режими експлуатації акумуляторних батарей електро- та гібридних транспортних засобів мають принципове значення для швидкості втрати їх ресурсу, стабільності роботи та безпеки. В першу чергу, характер роботи акумуляторної системи визначається частотою циклів заряджання і розряджання, величиною навантаження, температурними коливаннями в процесі експлуатації, а також особливостями профілю поїздок (короткі міські маршрути чи далекі міжміські рейси) [12], [13].

Зміна потужності, ємності та запасу ходу акумуляторної батареї Nissan Leaf у процесі експлуатації є багатофакторним процесом, що залежить від сукупності фізико-хімічних та експлуатаційних впливів. На практиці найбільший вплив на деградацію батареї мають: температура довкілля, стиль керування, глибина розряду, частота швидких заряджань, а також характер використання додаткових електроспоживачів.

Розрахунок втрати ємності батареї Nissan Leaf зі зміною часу експлуатації проводимо на основі наступних вихідних даних. Початкова ємність батареї Q_0 - 40 кВт·год; кількість повних циклів заряд-розряд на рік $N_ц$ 70–80; Середньорічний пробіг - 18 000 км; середнє енергоспоживання - 15 кВт·год на 100 км; номінальна втрата ємності за один рік у середньому кліматі α - 4%, тоді як втрата ємності у спекотному кліматі (до 35 °C) знаходитиметься в межах до 6%/рік. Приймемо середню тривалість експлуатації t - 1...10 років.

Розрахуємо втрати ємності від часу, якщо основний вплив мають часове старіння і циклічне використання, може бути апроксимоване наступним чином:

$$Q(t) = Q_0 \cdot (1 - \alpha \cdot t), \quad (2.1)$$

де: $Q(t)$ – залишкова ємність батареї через t років;

Q_0 – початкова ємність батареї, кВт·год;

α – річний відсоток втрати ємності (у десяткових дробах, тобто 4% = 0,04);

t – кількість років експлуатації;

Для Nissan Leaf, α = 0,04 в помірному кліматі після 5 років експлуатації:

$$Q_{(5)} = 40 - (1 \quad 0{,}04 \cdot 5) = 40 \cdot (1 - 0{,}20) = 40 \cdot 0{,}80 = 32 \text{ кВт·год.}$$

Після 8 років експлуатації:

$$Q_{(8)} = 40 \cdot (1 - 0{,}04 \cdot 8) = 40 \cdot (1 - 0{,}32) = 40 \cdot 0{,}68 = 27{,}2 \text{ кВт·год.}$$

Вплив глибини розряду відносно повного обсягу ємності, яка витрачається при кожному циклі. Як відомо, чим глибший розряд – тим швидше деградує батарея.

При середній глибині розряду 80% – типовий ресурс 1500–2000 циклів.

Якщо обмежити розряд до 60% – ресурс зростає до 2500–3000 циклів.

Формула коригування втрати ємності за глибиною розряду:

$$Q_{(t)} = Q_0 \cdot (1 - \alpha \cdot t - \beta \cdot n) \quad (2.2)$$

де: β – додатковий річний відсоток втрати ємності через глибокі розряди (80% це = 1%/рік);

n – кількість років експлуатації з високою глибиною розряду;

Після 5 років із глибокими розрядами:

$$Q_{(5)} = 40 \cdot (1 - 0{,}04 \cdot 5 - 0{,}01 \cdot 5) = 40 \cdot (1 - 0{,}25) = 40 \cdot 0{,}75 = 30 \text{ кВт·год}$$

Вплив швидкої зарядки швидка зарядка прискорює деградацію батареї через підвищене нагрівання.

Часте використання швидкої зарядки може підвищити втрати ємності ще на 0,5–1% на рік.

Формула коригування:

$$Q_{(t)} = Q_0 \cdot [1 - (\alpha + \beta + \gamma) \cdot t], \quad (2.2)$$

де: γ – відсоток втрати через швидкі заряди (наприклад, γ = 0,007, якщо 70% заряджань швидкі).

Після 5 років з інтенсивною швидкою зарядкою:

$Q_{(5)} = 40 \cdot [1 - (0{,}04 + 0{,}01 + 0{,}007)\cdot 5] = 40 \cdot [1 - 0{,}285] = 40 \cdot 0{,}715 = 28{,}6$ кВт·год.

Згідно розрахунків залишкова ємність становитиме.

Таблиця 2.1 - Порівняльна таблиця залишкової ємності

Умови експлуатації	5 років	8 років
Звичайний режим, помірний клімат	32	27,2
Глибокі розряди (80%), середній клімат	30	25,6
Додавання швидких зарядок (70% випадків)	28,6	23,6
Спекотний клімат, часті швидкі заряди	26,4	20,8

Видно, що з часом навіть при ідеальних умовах ємність тягової батареї Nissan Leaf зменшується на 20–32% за 5–8 років. Якщо до цього додати регулярні глибокі розряди та переважне використання швидкої зарядки, втрати можуть досягти 35–50% від номінальної ємності через 8 років. Це призводить до помітного скорочення запасу ходу та зниження вартості автомобіля.

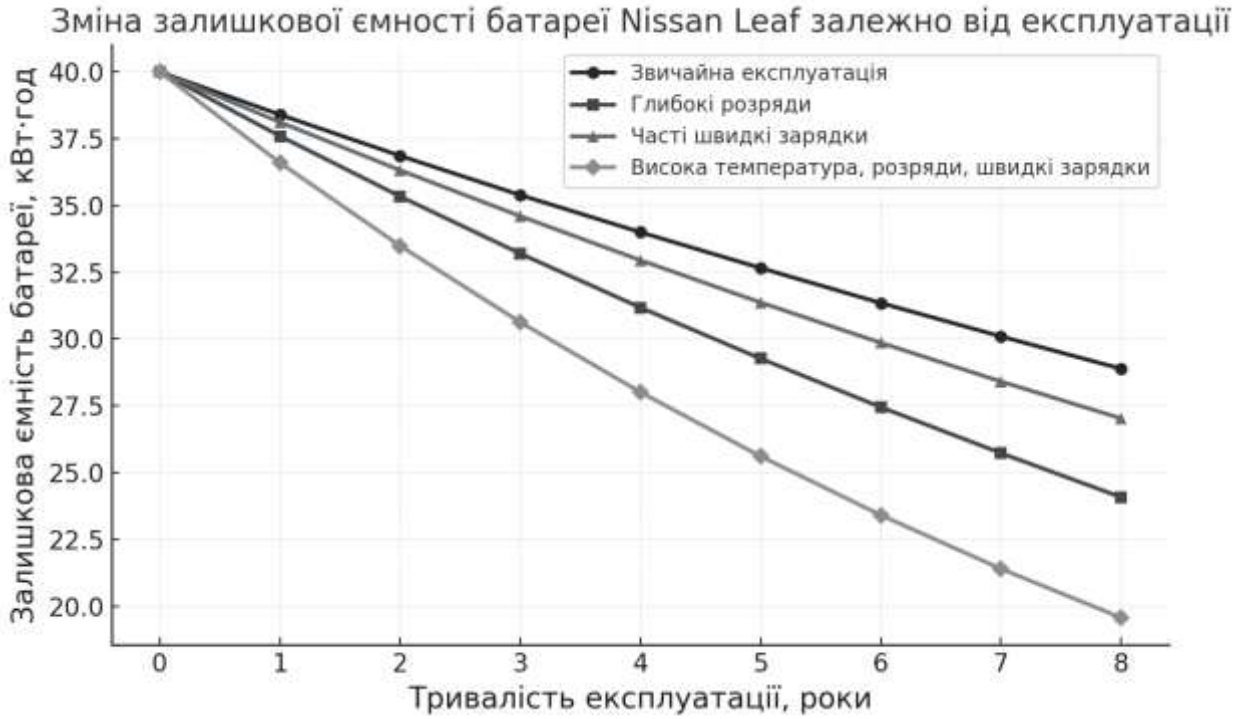


Рисунок 2.2 – Зміна номінальної ємності літій-іонного акумулятора

Графік відображає зменшення залишкової ємності батареї електромобіля Nissan Leaf з початковою номінальною ємністю 40 кВт·год протягом часу експлуатації (від 0 до 8 років). Звичайна експлуатація передбачає ощодливий режим зарядки, відсутність регулярних глибоких розрядів, дотримання оптимального температурного режиму та середній. За такої експлуатації за 8 років ємність знижується до 28,9 кВт·год (зниження приблизно на 28%).

Глибокі розряди та регулярне використання батареї до 10% і нижче призводить до інтенсивнішої деградації. За 8 років залишкова ємність може впасти до 24,1 кВт·год, тобто на понад 40%.

Часті швидкі зарядки сприяють пришвидшеному зносу і за 8 років ємність зменшується до 27,0 кВт·год (зниження становить приблизно 33%).

За високих температур батарея може втратити більше половини номінальної ємності. до 19,6 кВт·год.

Додатково, експлуатація у спекотних регіонах (де середньодобова температура понад +30 °C, авто часто залишають на сонці) ще більше прискорює деградацію – у такому випадку батарея може втратити половину початкової ємності вже за 6–8 років.

Стиль їзди також значною мірою впливає на темп старіння батареї. Акуратне керування з униканням глибоких розрядів (не нижче 20%) і заряджанням не вище 80% дозволяє мінімізувати втрати ємності. Водночас, агресивна експлуатація із частими швидкими заряджаннями та частими розрядами до 5–10% може збільшити деградацію ще на 15–20% за 5 років. З практичної точки зору, водій, який регулярно експлуатує електромобіль на високих швидкостях із використанням потужних споживачів, відчуватиме зниження запасу ходу та потужності вже через 3–4 роки.

Реальний запас ходу знижується не лише пропорційно втраті ємності. Зі зменшенням енергетичного потенціалу батареї знижується і максимальна потужність, яку вона може видати, що впливає на динаміку автомобіля, особливо під час прискорення чи підйому на пагорби. Наприклад, у Nissan Leaf

із 20% втраченої ємності потужність падає приблизно на 10–12%, а запас ходу в типовому міському режимі скорочується з 250 до 200 кілометрів, якщо не враховувати додаткових навантажень. З урахуванням регулярного використання підігріву, кондиціонера, мультимедіа та іншої електроніки запас ходу може знизитися ще на 20–40 кілометрів, тобто на 10–20% залежно від сезону.

Таблиця 2.2 – Залишкова ємність батареї Nissan Leaf залежно від різних умов експлуатації

Умови експлуатації	Початкова ємність, кВт·год	Вік батареї, років	Кількість глибоких розрядів	Частота швидких зарядок	Температурний режим	Залишкова ємність, кВт·год
Оптимальні (новий автомобіль)	40	0	0	0	20–25°C	40
Помірна експлуатація	40	4	40	100	10–30°C	31,2
Часті глибокі розряди	40	4	90	100	10–30°C	28,8
Часті швидкі зарядки	40	4	40	240	10–30°C	27,2
Високі температури (літо)	40	4	40	100	30–40°C	26,0
Низькі температури (зима)	40	4	40	100	–10…+5°C	30,0
Поєднання негативних факторів	40	4	90	240	30–40°C	23,5

Залишкова ємність батареї змінюється залежно від комбінації основних факторів старіння – віку, кількості глибоких розрядів, частоти швидких

заряджань та температурного режиму. Зазвичай втрати ємності при нормальних умовах становлять 15–20% за 4 роки, але за частих глибоких розрядів або високих температур деградація пришвидшується.

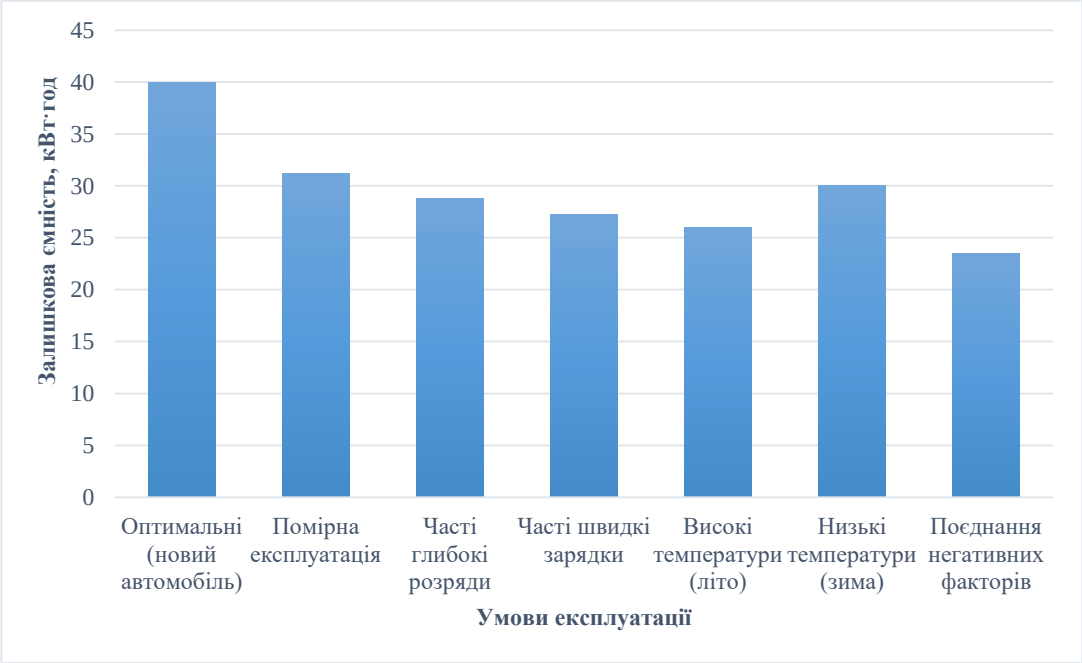


Рисунок 2.3 – Зміна номінальної ємності батареї Nissan Leaf

З рисунка 2.3 видно, як різні умови впливають на залишкову ємність батареї. Видно, що оптимальні умови дозволяють зберегти до 40 кВт·год, тоді як поєднання негативних факторів знижує цю величину до 23,5 кВт·год. Це підтверджує важливість грамотної експлуатації та уникнення негативних впливів - глибоких розрядів, перевантаження, екстремальних температур, частих швидких заряджань.

Також доцільно розглянути вплив стилю водіння на залишкову ємність і запас ходу. У Nissan Leaf початкова ємність батареї Q_0 = 40 кВт·год.

Залежно від втрати стилю водіння деградація становитиме:

Економний (k = 0,04 річна втрата);

Помірний (k = 0,06 річна втрата);

Агресивний (k = 0,08 річна втрата).

Тривалість експлуатації n = 5 років, стандартна витрата енергії на 100 км: W = 16 кВт·год/100 км (без навантаження).

Залишкова ємність батареї:

$$Q_{(n)} = Q_0 \cdot (1 - k \cdot n) \quad (2.3)$$

Економний стиль водіння:

$Q_{(5)} = 40 \cdot (1 - 0{,}04 \cdot 5) = 40 \cdot (1 - 0{,}20) = 40 \cdot 0{,}80 = 32{,}0$ кВт·год.

Помірний стиль водіння:

$Q_{(5)} = 40 \cdot (1 - 0{,}06 \cdot 5) = 40 \cdot (1 - 0{,}30) = 40 \cdot 0{,}70 = 28{,}0$ кВт·год.

Агресивний стиль:

$Q_{(5)} = 40 \cdot (1 - 0{,}08 \cdot 5) = 40 \cdot (1 - 0{,}40) = 40 \cdot 0{,}60 = 24{,}0$ кВт·год.

Розрахунок запасу ходу:

$$D = Q_{(5)} / (W / 100). \quad (2.4)$$

Економний стиль:

$$D = 32{,}0 / 0{,}16 = 200 \text{ км.}$$

Помірний стиль:

$$D = 28{,}0 / 0{,}16 = 175 \text{ км.}$$

Агресивний стиль:

$$D = 24{,}0 / 0{,}16 = 150 \text{ км.}$$

Вплив температури на залишкову ємність та запас ходу, вихідні дані для розрахунків:

Початкова ємність батареї Q_0 = 40 кВт·год, кількість років експлуатації n = 5.

Помірний клімат (k_1 = 0,06 річна втрата, базовий випадок).

Спекотний клімат (k_2 = 0,08 річна втрата через прискорену деградацію).

Експлуатація при низьких температурах (k_3 = 0,07 річна втрата та додатково зниження доступної ємності на 10% у зимовий період).

Середня витрата енергії:

W = 16 кВт·год/100 км – для помірної температури),

Витрата енергії в зимовий період:

$W_{зим}$ = 18 кВт·год/100 км (з урахуванням опалення).

$$Q_{(n)} = Q_0 \cdot (1 - k \cdot n). \quad (2.5)$$

$$D = Q_{(n)} / (W / 100). \quad (2.6)$$

Розрахунок залишкової ємності за 5 років

Помірний клімат:

$$Q_{1(5)} = 40 \cdot (1 - 0{,}06 \cdot 5) = 40 \cdot 0{,}70 = 28{,}0 \text{ кВт·год.}$$

$$D_1 = 28{,}0 / 0{,}16 = 175 \text{ км.}$$

Спекотний клімат:

$$Q_{2(5)} = 40 \cdot (1 - 0{,}08 \cdot 5) = 40 \cdot 0{,}60 = 24{,}0 \text{ кВт·год.}$$

$$D_2 = 24{,}0 / 0{,}16 = 150 \text{ км.}$$

Зима (низькі температури):

$$Q_{3(5)} = 40 \cdot (1 - 0{,}07 \cdot 5) = 40 \cdot 0{,}65 = 26{,}0 \text{ кВт·год}$$

Доступна ємність з урахуванням температури понад - 5°C:

$$Q_{3зим} = 26{,}0 \cdot 0{,}9 = 23{,}4 \text{ кВт·год.}$$

$$D_3 = 23{,}4 / 0{,}18 = 130 \text{ км.}$$

Температура довкілля критично впливає на ефективність роботи акумуляторної батареї. У помірному кліматі темпи деградації є середніми, але навіть за таких умов за п’ять років експлуатації залишкова ємність зменшується до 70% початкового значення. В умовах спеки процеси деградації прискорюються через прискорені побічні хімічні реакції, втрати можуть сягати 40%, а запас ходу зменшується ще більше – до 150 км.

У зимовий період, окрім прискореної деградації, слід враховувати зниження доступної ємності на 10–15% через погіршення провідності електроліту та збільшення внутрішнього опору. Це суттєво обмежує реальний запас ходу – з 175 км у помірних умовах до 130 км взимку. Також збільшується споживання енергії на опалення салону, обігрів акумулятора та скління, що ще більше впливає на запас ходу.

Вплив додаткового навантаження на запас ходу

Початкова ємність батареї: Q = 40 кВт·год (залишкова після 5 років експлуатації, наприклад, 28 кВт·год). Базова маса автомобіля з водієм: 1 650 кг. Середня витрата енергії у змішаному циклі: W_0 = 16 кВт·год/100 км.

Кожні додаткові 100 кг вантажу/пасажирів збільшують споживання енергії на 3–4%.

Витрата енергії з урахуванням навантаження:

$$W = W_0 \cdot (1 + 0{,}035 \cdot (\Delta m/100)), \quad (2.7)$$

де Δm – додаткова маса, кг.

Запас ходу:

$$D = Q / (W / 100) \quad (2.8)$$

Приклад розрахунків для Nissan Leaf із залишковою ємністю батареї Q = 28 кВт·год.

Перший варіант (лише водій, Δm = 0):

$$W_0 = 16{,}0 \text{ кВт·год/100 км}$$

$$D_0 = 28{,}0 / 0{,}16 = 175 \text{ км}$$

Додамо 200 кг (4 пасажири або багаж):

$$W_1 = 16{,}0 \cdot (1 + 0{,}035 \cdot 2) = 16{,}0 \cdot 1{,}07 = 17{,}12 \text{ кВт·год/100 км}$$

$$D_1 = 28{,}0 / 0{,}1712 = 163{,}6 \text{ км}$$

Додамо 400 кг (максимальне допустиме навантаження):

$$W_2 = 16{,}0 \cdot (1 + 0{,}035 \cdot 4) = 16{,}0 \cdot 1{,}14 = 18{,}24 \text{ кВт·год/100 км}$$

$$D_2 = 28{,}0 / 0{,}1824 = 153{,}5 \text{ км}$$

Залишкова ємність батареї після кількох років експлуатації: Q = 28 кВт·год. Базова витрата енергії на 100 км (без додаткових споживачів): W_0 = 16 кВт·год/100 км. Середній запас ходу без додаткових споживачів: $D_0 = Q / (W_0 / 100) = 28 / 0{,}16 = 175$ км.

Додаткові споживачі (приблизні значення для Nissan Leaf): обігрівач салону: 1,5–2,0 кВт (узимку), кондиціонер: 1,0–1,5 кВт (влітку), мультимедіа, освітлення, підігрів сидінь: 0,2–0,4 кВт сумарно.

Сумарна потужність додаткових споживачів:

$$P_s = P_1 + P_2 + \ldots + P_n \text{ (кВт)} \quad (2.8)$$

Загальна витрата енергії на 100 км з урахуванням додаткових споживачів:

$$W = W_0 + (P_s \cdot t / d) \cdot 100, \quad (2.9)$$

де t – час руху (год),

d – відстань (км).

Для міста із середньою швидкістю 35 км/год: t/100 = 100/35 = 2,86 год. Додаткова витрата енергії на 100 км:

$$W_s = P_s \cdot 2{,}86.$$

Новий запас ходу:

$$D = Q / (W / 100).$$

Влітку (використовується кондиціонер і мультимедіа):

P_s = 1,2 кВт (кондиціонер) + 0,3 кВт (мультимедіа, інше) = 1,5 кВт:

$$W_s = 1{,}5 \times 2{,}86 = 4{,}29 \text{ кВт·год/100 км.}$$

$$W = 16 + 4{,}29 = 20{,}29 \text{ кВт·год/100 км.}$$

$$D = 28 / 0{,}2029 \approx 138 \text{ км.}$$

Взимку (використовується обігрівач і мультимедіа):

P_s = 1,8 кВт (обігрівач) + 0,3 кВт (мультимедіа, інше) = 2,1 кВт.

$$W_s = 2{,}1 \times 2{,}86 = 6{,}01 \text{ кВт·год/100 км.}$$

$$W = 16 + 6{,}01 = 22{,}01 \text{ кВт·год/100 км.}$$

$$D = 28 / 0{,}2201 = 127 \text{ км.}$$

Без додаткових споживачів D = 175 км.

Використання кліматичних систем, обігрівачів, кондиціонера та інших електроспоживачів істотно зменшує запас ходу електромобіля, особливо взимку. При низьких температурах значна частина енергії витрачається на обігрів салону та забезпечення комфортних умов для пасажирів, оскільки електромобіль не має відбору тепла від ДВС. Влітку активне використання кондиціонера також може «з'їдати» до 15–20% від загального запасу ходу.

Якщо додати одночасно всі споживачі (наприклад, взимку при сильному морозі), запас ходу Nissan Leaf знижується з типових 175 км до 125–130 км,

що потрібно враховувати при плануванні поїздок, особливо на далекі відстані або за відсутності зарядної інфраструктури.

Тому кожен додатковий кіловат потужності, що витрачається на сторонні електроприлади, прямо скорочує запас ходу – в умовах міського циклу це може призвести до зменшення пробігу на 20–25% залежно від сезону та режиму роботи кліматичних систем.

Таблиця 2.3 – Зміна запасу ходу Nissan Leaf за різних умов експлуатації

Умови експлуатації	Залишкова ємність, кВт·год	Витрата енергії, кВт·год/100 км	Сумарна потужність споживачів, кВт	Загальна витрата, кВт·год/100 км	Запас ходу, км
Оптимальні (новий автомобіль)	40	15,5	0	15,5	258
Помірна експлуатація	31,2	16,0	0,7	16,7	187
Часті глибокі розряди	28,8	16,0	1,0	17,0	170
Часті швидкі зарядки	27,2	16,0	1,5	17,5	155
Високі температури (літо, з кондиціонером)	26,0	16,0	2,0	18,0	144
Низькі температури (зима, з обігрівачем)	30,0	18,0	2,2	20,2	149
Поєднання негативних факторів	23,5	18,0	2,5	20,5	115

Запас ходу безпосередньо залежить не лише від залишкової ємності батареї, а й від витрати енергії на кілометр та роботи додаткових споживачів (кондиціонер, обігрівач, мультимедіа). За несприятливих умов запас ходу може впасти майже вдвічі у порівнянні з ідеальними.

Збільшення навантаження автомобіля прямо впливає на запас ходу, оскільки для переміщення більшої маси потрібно більше енергії. Кожні 100 кг додаткової маси зменшують запас ходу на 3–4%. В реальних умовах рух із

повним навантаженням може зменшити запас ходу Nissan Leaf на 20–25 км порівняно з поїздкою лише з одним водієм.

Особливо це критично для електромобілів із невеликим запасом ходу. В умовах міста, де часто доводиться перевозити кілька пасажирів, треба враховувати додаткові втрати, а також поєднувати цей фактор з іншими – такими як використання кондиціонера чи опалення взимку.

Стиль водіння є одним із найсуттєвіших чинників деградації батареї електромобіля. Плавне прискорення і дотримання режимів оптимальної швидкості забезпечують мінімальні втрати ємності та дозволяють зберегти до 80% початкової місткості батареї за 5 років, що дає запас ходу близько 200 км. При активній експлуатації, з частими прискореннями та різкими розгонами, втрати можуть сягати 40% від початкової ємності, а запас ходу скорочується до 150 км.

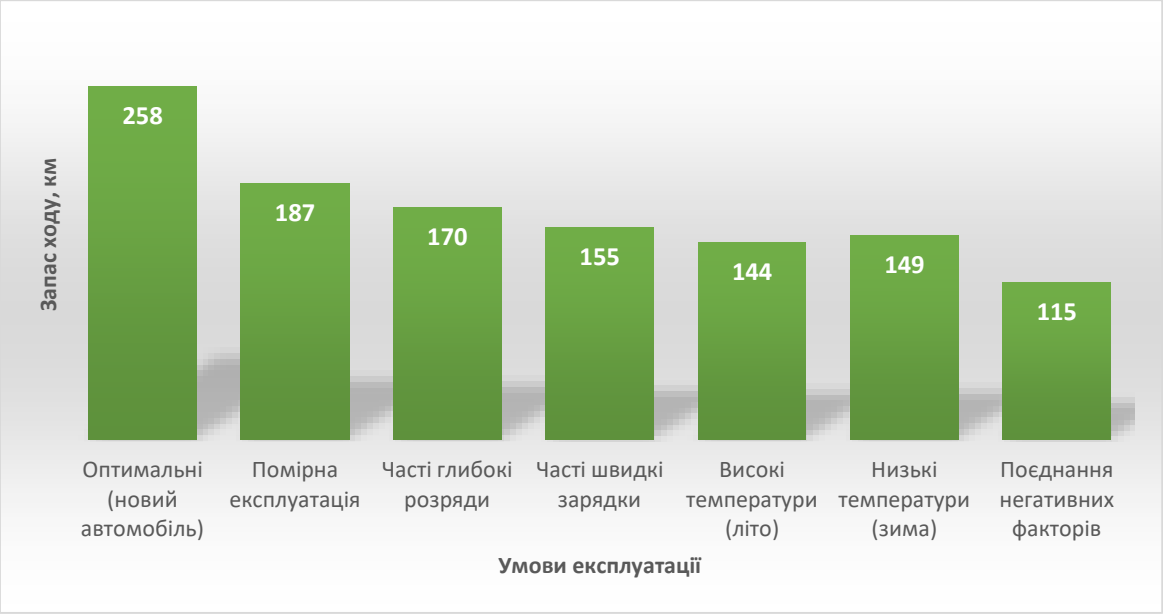


Рисунок 2.4 – Залежність запасу ходу та ємності батареї Nissan Leaf

За ідеальних параметрів запас ходу сягає 258 км, а у разі поєднання кількох негативних факторів знижується до 115 км. Саме це суттєво впливає на практичну ефективність електромобіля – власник бачить, як ресурс

поступово зменшується і при несприятливих режимах запас ходу майже вдвічі менший за паспортний.

Для об'єктивної оцінки залишкової потужності, ємності та запасу ходу Nissan Leaf слід враховувати комплексне поєднання таких факторів, як кількість пройдених циклів, температурний режим, режим заряджання та характер експлуатації додаткових систем. Із урахуванням усіх втрат, раціональна експлуатація та використання електроспоживачів дозволяє подовжити реальний термін служби батареї до 10 років, тоді як ігнорування цих факторів скорочує ресурс майже удвічі [7], [31].

Висновки

1. Дослідження деградації та типових дефектів акумуляторних батарей у сучасних електромобілях показує, що воно має комплексний характер втрати ресурсу, який зумовлений поєднанням фізико-хімічних процесів та експлуатаційних чинників. Однією з головних причин поступового зниження ємності та потужності літій-іонних батарей є незворотні зміни у структурі анода й катода: формування пасивуючих шарів на електродах, структурна деградація матеріалів, локальна втрата активних іонів літію та виникнення відкладень, які порушують ефективне переміщення носіїв заряду.

2. Особливо критичними є експлуатація при підвищених температурах, часті глибокі розряди та регулярне використання швидких заряджань, які не лише прискорюють старіння хімічної системи батареї.

3. Проведені розрахунки на прикладі батареї Nissan Leaf показують, що навіть при оптимальних умовах експлуатації за п’ять–вісім років залишкова ємність знижується на 20–35% від початкової, а у разі поєднання негативних чинників втрати можуть сягати 45–50%.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Методики тестування та контролю залишкової ємності батарей електро- та гібридних автомобілів

Діагностика самого стану та залишкової ємності тягової батареї є ключовим етапом оцінки реальних потенційних можливостей електро- та гібридних автомобілів. Оскільки саме втрата ємності визначає запас ходу, динаміку автомобіля та економічну доцільність подальшої експлуатації. Загалом інженерами розроблено кілька підходів до визначення цього показника. Вибір методики залежить від конструкції акумулятора, наявності системи керування батареєю (BMS) та можливостей діагностичного обладнання.

Найпростішим є метод прямого вимірювання повного циклу заряд–розряд. Він є найбільш достовірним способом визначення залишкової ємності батареї. Це проведення повного циклу контрольованого розряду з подальшим зарядом за фіксованими параметрами.

Під час цього автомобіль підключають до спеціального стенда, що імітує реальні умови експлуатації. За умови постійного струму розряду реєструють сумарну кількість відданої енергії до досягнення граничної мінімальної напруги на елементах. Отримане значення співвідносять із паспортною ємністю для розрахунку втрат. Метод дозволяє точно оцінити фактичний ресурс, однак вимагає повного зняття батареї, підключення до стенда й багато часу, тому його використовують переважно на сервісних центрах та в лабораторних умовах.

Метод аналізу OBD-параметрів через BMS. Його використовують у більшості сучасних електромобілів і гібридів оснащені системою керування батареєю, яка безперервно моніторить стан кожного модуля. А саме: температуру, напругу, струм, історію циклів та оцінює стан заряду (SOC) і стан здоров’я (SOH). Використовуючи стандартні діагностичні сканери через

роз’єм OBD-II. Програмне забезпечення переважно LeafSpy для Nissan Leaf, Hybrid Assistant для Toyota чи Honda. За допомогою них можна отримати інформацію про розрахункову залишкову ємність, балансування осередків, різницю напруг, а також наявність помилок у роботі батареї.

Перевага цього методу – це простота і доступність діагностики без зняття батареї. Проте точність розрахунків залежить від алгоритмів BMS, які можуть бути скориговані виробником для уникнення передчасних звернень по гарантії.

Метод оцінки запасу ходу та споживання енергії у реальних умовах – це найбільш практичний підхід до діагностики полягає у вимірюванні пройденої відстані на одному заряді батареї за сталих умов руху. Цей метод особливо цінний для користувача, адже дозволяє співставити паспортні параметри із реальним запасом ходу автомобіля. Водночас результат залежить від манери водіння, температурних та дорожніх умов, інтенсивності використання додаткових споживачів.

Методи експрес-оцінки Health Check, який використовують на станціях технічного обслуговування пропонують експрес-діагностику батарей, яка базується на аналізі напруги різних модулів під навантаженням, швидкості її просідання при запуску потужних споживачів, аналізу температурного балансу. Залежно від цих даних, можна зробити висновок про наявність деградованих елементів або нерівномірність старіння батареї. Метод дозволяє швидко визначити модулі з критичними дефектами,

3.2 Класичні методи діагностики батарей

Діагностика технічного стану акумуляторних батарей електро- та гібридних автомобілів спирається не лише на сучасні цифрові алгоритми, але й на класичні фізико-інженерні методики. Серед них найбільш поширені вольтамперметричні, імпедансні та спектральні методи, що забезпечують якісний аналіз залишкової ємності, ступеня деградації та наявності дефектів елементів.

Вольтамперметричні методи базується на вимірюванні напруги та струму під час різних режимів навантаження батареї. Він передбачає оцінку напруги холостого ходу, падіння напруги під робочим струмом і відновлення напруги після припинення навантаження.

До батареї підключають стандартний навантажувальний резистор, після чого вимірюють миттєве просідання напруги та величину струму. Якщо напруга різко падає навіть при невеликому струмі, це вказує на високий внутрішній опір і значну деградацію осередків.

Динаміка зміни напруги під час розряду дозволяє оцінити залишкову ємність. Цей ефективний спосіб застосовується як для окремих елементів, так і для цілого батарейного блоку.

Імпедансна спектроскопія вважається одним із найточніших інструментів для діагностики стану літій-іонних батарей. Він ґрунтується на подачі на батарею змінного струму малої амплітуди з різною частотою й подальшому аналізі реакції напруги.

Зміна імпедансу (комплексного електричного опору) на різних частотах дозволяє визначити характерні електрохімічні параметри:

– стан електродів;
– цілісність електроліту та сепаратора;
– рівень деградації матеріалів;
– розподіл опорів по осередках.

Імпедансна діагностика дає змогу раннього виявлення локальних дефектів, порушення балансу та зростання внутрішнього опору ще до появи очевидних ознак несправності. Метод часто використовується у лабораторних і гарантійних випробуваннях, а також для порівняльного аналізу батарей різних виробників [1], [23], [31], [32].

До спектральних методів аналізу відносять оптичні, спектроскопічні й хімічні методи, що застосовуються для дослідження змін у структурі активних матеріалів батарей. Серед них рентгенівська дифрактометрія, інфрачервона спектроскопія

Завдяки цим підходам визначають фазові зміни в катоді чи аноді, наявність побічних продуктів, хімічні реакції деградації, а також накопичення домішок або газоутворення. Хоча спектральні методи рідко використовуються у звичайній автосервісній практиці через складність та високу вартість обладнання, вони є незамінними для глибокого дослідження механізмів старіння, контролю якості нових батарей, оцінки залишкової цінності відпрацьованих елементів.

3.3 Алгоритми оцінки стану батареї

У сучасній діагностиці акумуляторних батарей електро- та гібридних автомобілів використовуються три основні індикатори, що відображають їхній реальний стан: State of Charge (SOC) – стан заряду, State of Health (SOH) – стан здоров'я (або збереження ресурсу) та State of Energy (SOE) – залишкова енергія. Кожен із цих показників розраховується на основі комплексних алгоритмів, які враховують як електричні, так і фізико-хімічні параметри батареї.

Стан заряду SOC – це відносний рівень залишкового заряду батареї, виражений у відсотках від її номінальної ємності. Він визначає, скільки енергії ще можна отримати від батареї в поточний момент. Він є аналогом пального бака для електромобіля та є основним параметром для користувача.

Найпоширеніші алгоритми його визначення є:

Метод кулонометрії (Ah-метрія) - це облік усього струму, що проходить через батарею:

$$SOC = SOC_0 + (1 / Q_n) \int I(t)\, dt, \tag{3.1}$$

де SOC_0 – початковий стан заряду,

Q_n – номінальна ємність,

$I(t)$ – поточний струм.

Метод діагностики за напругою використовується для приблизної оцінки SOC на підставі напруги на клемах елемента чи окремих модулів. Він точний лише при сталих навантаженнях і для повністю стабілізованої батареї.

Стан здоров'я чи збереження ресурсу (SOH) показує, наскільки поточна ємність і робочі характеристики батареї відрізняються від початкових параметрів нового елемента. Цей індикатор використовується для оцінки залишкового ресурсу батареї, її здатності зберігати та віддавати енергію.

Прямий метод розрахунку SOH це відношення поточної виміряної ємності до номінальної (паспортної) ємності:

$$SOH = (Q_{факт} / Q_{ном}) \times 100\%, \quad (3.2)$$

де $Q_{факт}$ – фактично виміряна ємність,

$Q_{ном}$ – номінальна ємність нової батареї.

Метод аналізу внутрішнього опору, за умови, що SOH знижується, якщо спостерігається зростання внутрішнього опору. Цей показник корелює з деградацією елементів і здатністю витримувати великі струми.

Індикатори циклічного старіння: оцінюється кількість циклів заряд-розряд, глибина розряду, температурний режим та інші фактори, що впливають на темп деградації. Сучасні BMS інтегрують дані про експлуатацію батареї для точнішої оцінки SOH.

Та мнтоди оцінки залишкової енергії, тобто встановлення реальної кількості енергії, яку може видати батарея у поточному стані, з урахуванням деградації, температури, робочого навантаження. SOE визначає реальний запас ходу електромобіля або тривалість роботи гібридної системи без підзарядки. Він визначається за формулою:

$$SOE = (E_{факт} / E_{ном}) \times 100\%, \quad (3.3)$$

де $E_{факт}$ – фактична енергія, яку можна видати при поточному SOC і SOH,

$E_{ном}$ – енергія нової батареї при повному заряді.

Взаємозалежність між SOC, SOH та SOE дозволяє повністю оцінювати стан батареї. SOC показує миттєвий стан заряду, SOH – довгострокову здатність батареї працювати, а SOE – реальну доступну енергію.

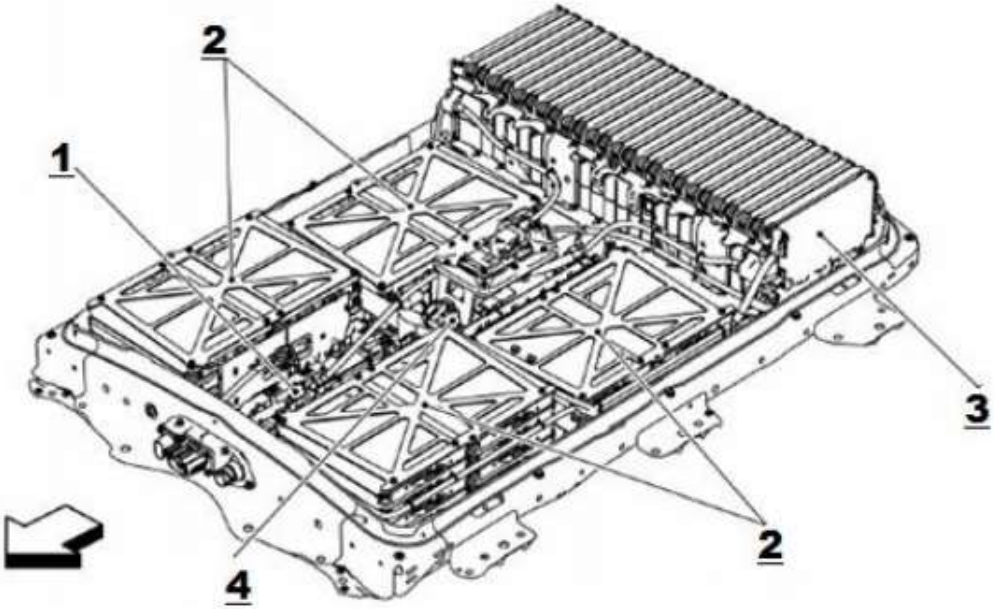
3.4 Удосконалення процесу діагностики батареї Nissan Leaf

У конструкції енергетичної системи Nissan Leaf застосовується акумуляторний блок, сформований на основі літій-марганцевих ($LiMn_2O_4$) та літій-нікель-марганець-кобальтових ($LiNiMnCoO_2$) елементів. Таке поєднання хімічних систем обумовлено прагненням досягти оптимального балансу між питомою енергоємністю, експлуатаційною надійністю й ресурсом роботи батареї. Вдале поєднання різних типів літієвих елементів дозволяє отримати низку переваг, серед яких – покращена стійкість до високих струмових навантажень, швидке приймання заряду та підвищена тривалість служби.

Для Nissan Leaf характерна архітектура, коли близько третини елементів акумуляторного блока виконано за технологією літій-марганцевих акумуляторів. Вони забезпечують високу здатність до віддачі потужності та відповідають за динамічні властивості електромобіля, особливо в режимах розгону чи енергоємного рекуперативного гальмування. Решта частини батареї представлена елементами типу $LiNiMnCoO_2$, які дозволяють збільшити загальну ємність системи, а отже, і запас автономного ходу на одному заряді.

Такий підхід до компонування акумуляторного блока поступово став типовим для сучасних електромобілів, включаючи Chevrolet Volt та BMW i3, оскільки дозволяє гнучко налаштовувати характеристику батареї під реальні вимоги міських і міжміських маршрутів. Водночас використання комбінованих хімічних систем позитивно позначається на циклічній стабільності акумулятора, знижує ризики деградації під впливом високих температур чи тривалого зберігання у зарядженому стані, а також дає змогу зберігати високу ефективність навіть за інтенсивної експлуатації. Завдяки

такій інженерній концепції Nissan Leaf досяг оптимального співвідношення між потужністю, запасом ходу та довговічністю своєї енергетичної системи, що забезпечило популярність цієї моделі серед електромобілів різних поколінь.



1 – сенсор струму, датчик температури; 2 – акумулятор; 3 – контролер; 4 – запобіжник

Рисунок 3.1 – Структура та загальний вигляд батареї Nissan Leaf

В конструкції тягової батареї Nissan Leaf використовується модульний принцип компонування. Кожен модуль складається з чотирьох літій-іонних елементів, які жорстко об'єднані в єдиний конструктив. Далі ці модулі групуються і формують повний акумуляторний блок, який у сумі містить 48 окремих модулів. Такий підхід забезпечує гнучкість у конфігурації батареї та дозволяє оптимізувати як електричні характеристики, так і умови монтажу всередині корпусу автомобіля.

Кожен модуль, у свою чергу, складається із секцій, у яких по два акумуляторних елементи з'єднані паралельно. Для формування високої робочої напруги всі 96 паралельно з'єднаних секцій об’єднують послідовно в ланцюг, що дозволяє отримати потрібний рівень напруги для живлення електродвигуна та електроніки автомобіля. Така архітектура не лише підвищує загальну надійність системи, а й спрощує обслуговування та діагностику: у разі виходу з ладу одного з елементів є можливість замінити окремий модуль без розбирання всієї батареї.

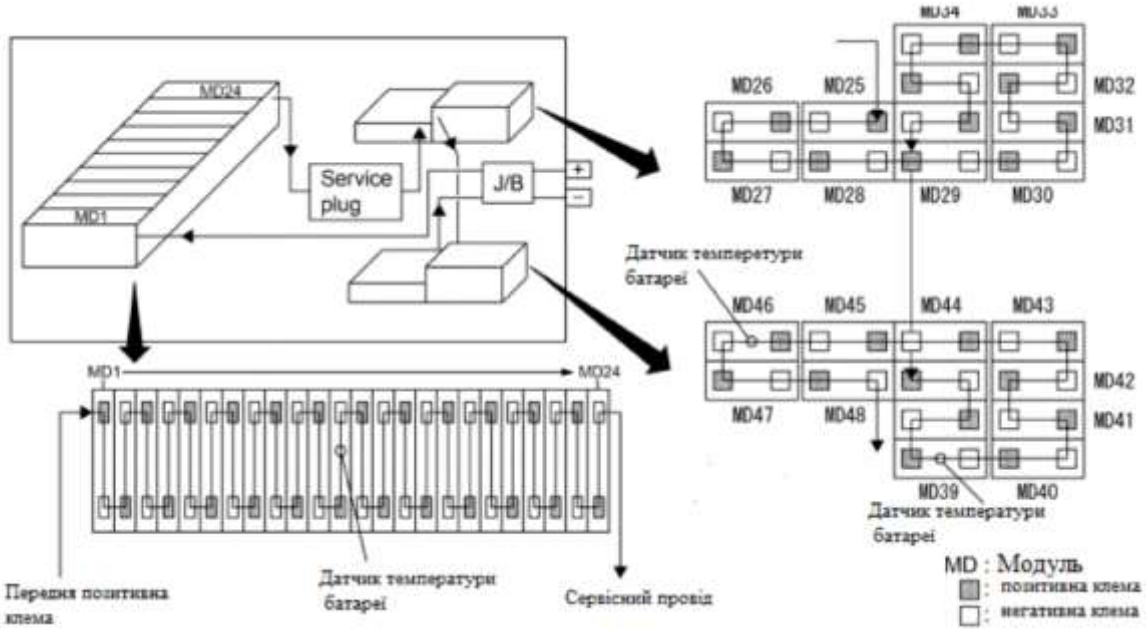


Рисунок 3.2 – Структура модулів батареї та розташування контролерів

Деталізована схема з’єднання модулів, відображена на рисунку 3.2, ілюструє принцип побудови енергетичного блока, що поєднує в собі як

паралельні, так і послідовні електричні з’єднання. Завдяки цьому досягається оптимальний баланс між напругою, ємністю й струмовими можливостями акумуляторної системи Nissan Leaf, що сприяє ефективній роботі електромобіля в широкому спектрі режимів експлуатації.

В системі контролю стану акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf передбачене обов’язкове вимірювання температури для підтримання оптимальних режимів роботи та забезпечення безпеки експлуатації. Для цього безпосередньо на модулі високовольтної батареї розташовано три температурних датчики. Конструктивно два з них закріплені у передній частині батарейного модуля, а третій – у задній частині.

Такий розподіл дає змогу точно відстежувати температурні коливання у різних зонах акумуляторної системи, своєчасно реагувати на локальне підвищення температури та уникати ризиків перегріву. Це особливо важливо при інтенсивних циклах заряджання й розряджання, коли нагрів окремих осередків або модулів може відрізнятися залежно від характеру навантаження, тепловідведення й розміщення у корпусі. Дані з датчиків постійно надходять до блока керування батареєю (BMS), який аналізує ситуацію й у разі виявлення перегріву може обмежити струм, активувати охолодження або попередити водія про необхідність обслуговування.

На структурній схемі акумуляторного модуля (рис. 3.2) чітко видно, як розміщення температурних датчиків дозволяє отримувати достовірну інформацію про тепловий стан батареї в найкритичніших точках, що позитивно впливає на довговічність і безпечність експлуатації акумуляторної системи Nissan Leaf.

Рисунок 3.3 – Визначення основних параметрів модулів батареї

Діагностика починається з фіксації звернення власника автомобіля. У випадку електромобіля Nissan Leaf найпоширенішими причинами звернення стають відчутне зниження запасу ходу, прискорене падіння рівня заряду, а також погіршення динаміки чи стабільності електроживлення бортових систем. Оператор сервісу фіксує усі ознаки та симптоми, які описує водій, зазначає пробіг, умови експлуатації (міський/змішаний цикл, сезонність), а також час, коли вперше було помічено погіршення параметрів.

Далі проводиться візуальний первинний огляд транспортного засобу. Оглядають цілісність кузова, відсутність механічних ушкоджень у зоні розміщення батареї, сліди корозії або затоплення, а також оцінюють зовнішній стан силових електричних з'єднань. Перевіряється рівень заряду, відображений на бортовому дисплеї, фіксують наявність аварійних повідомлень чи попереджувальних індикаторів у системі діагностики авто.

Перед проведенням електротехнічних вимірювань і комплексної діагностики акумуляторної батареї електромобіля необхідно забезпечити відповідні умови та дотриматися вимог безпеки. На цьому етапі механік або електротехнік готує транспортний засіб і робоче місце до тестування, що є важливою складовою коректності подальших вимірювань і збереження гарантійних зобов'язань.

Передусім, автомобіль встановлюється на рівний майданчик, бажано в закритому сервісному приміщенні зі стабільною температурою повітря (близько +20...+25°C). Це дає змогу уникнути похибок, пов’язаних із температурними коливаннями під час вимірювань. Автомобіль переводиться в режим стоянки, всі споживачі електроенергії (освітлення, клімат-контроль, аудіо, зарядні роз’єми) вимикаються, ключ від авто фіксується у майстра або оператора.

Далі знімаються параметри поточного заряду батареї SOC за бортовою системою, залишковий запас ходу, інформація про попередні цикли заряд-розряд (якщо це дозволяє діагностичне ПЗ). Важливо, щоб батарея мала середній рівень заряду (наприклад, 40–60%), необхідний діапазон для тестування ємності, імпедансу й струмовіддачі.

Перед початком тестування обов’язково перевіряють справність електроізоляції корпусу батареї, цілісність усіх основних роз’ємів, відсутність вологи, сторонніх предметів і ознак пошкоджень на корпусі. За потреби проводиться очищення поверхні батарейного відсіку.

Для доступу до акумуляторної батареї Nissan Leaf може знадобитися зняття частини захисних кожухів, демонтаж сидінь чи центральної тунельної

панелі. При цьому обов’язково використовуються діелектричні рукавиці та інструмент, сертифікований для роботи з високовольтними системами. Уся подальша робота ведеться лише після зняття “мінусової” клеми 12-вольтової допоміжної батареї, що запобігає випадковому замиканню або пошкодженню електроніки.

Передусім заміряється напруга на вихідних клемах батареї в режимі спокою, тобто коли автомобіль перебуває в стані очікування і всі основні електроспоживачі вимкнені. Для цього використовують цифровий мультиметр із відповідним діапазоном вимірювань (до 400–500 В), а вимірювання проводять через спеціальні діагностичні порти або на вихідних клемах батарейного відсіку.

Типове значення напруги для повністю зарядженої батареї Nissan Leaf становить 360–400 В залежно від модифікації. Значне відхилення цього параметра свідчить або про неповний заряд, або про деградацію окремих модулів, що вже на цьому етапі дозволяє оцінити загальний стан системи.

Далі проводиться перевірка струму, який акумуляторна батарея здатна віддавати при роботі основних споживачів (електродвигуна, кліматичних систем тощо). Для цього вмикається режим “Ready”, і фіксується сила струму під навантаженням за допомогою токових кліщів або внутрішніх датчиків системи BMS (якщо такі дані можна зчитати через діагностичне ПЗ).

Величина струму у спокійному режимі буде низькою (кілька ампер), але при різких прискореннях може досягати 100–200 А. Якщо реальний струм суттєво менший від паспортного при стандартному навантаженні, це може свідчити про зношування або втрату активної маси окремих модулів.

Дуже важливим параметром, що характеризує стан батареї, є її внутрішній опір. Зазвичай його визначають за допомогою спеціалізованих приладів (імпеданс-метрів) або через аналіз падіння напруги під час короткочасного навантаження. Збільшення внутрішнього опору прямо свідчить про старіння елементів і зниження ефективності.

На цьому етапі через діагностичний сканер зчитують поточний SOC (рівень заряду) та SOH (стан здоров’я батареї) — останній параметр особливо важливий, оскільки визначає залишкову відносну ємність порівняно з новим акумулятором. Для Nissan Leaf допустиме зниження SOH до 70–80%, після чого рекомендується плановий ремонт чи заміна батарейних модулів.

Спочатку автомобіль переводять у безпечний сервісний режим. Акумуляторний відсік відкривається відповідно до технічних інструкцій виробника з дотриманням вимог електробезпеки. Якщо конструкція дозволяє, роз’єднують головний силовий контакт батареї, щоб унеможливити випадковий електричний пробій.

Далі знімаються показники напруги кожного окремого модуля чи секції. Для Nissan Leaf батарея містить 48 модулів, кожен з яких складається із чотирьох послідовно з’єднаних елементів. Напруга на кожному модулі вимірюється безпосередньо через технічні порти або спеціальні вимірювальні конектори. Для стандартного режиму експлуатації (SOC 40–60%) напруга справного модуля повинна бути в межах 7,6–8,2 В.

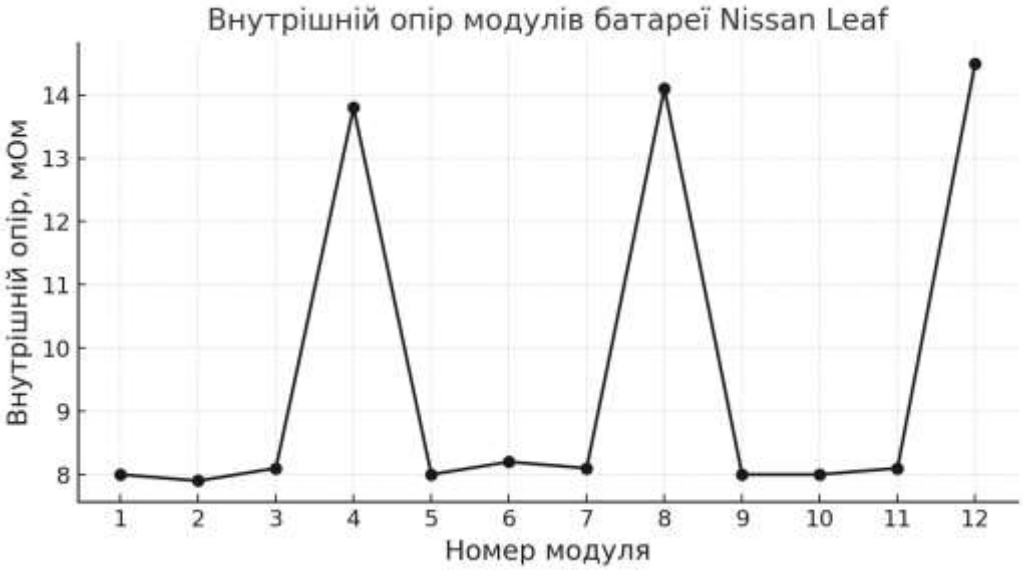
Проводять вимірювання внутрішнього опору окремих модулів, застосовуючи імпеданс-метри або спеціалізовані сканери, що зчитують дані з BMS. Якщо спостерігаються модулі із значенням опору, яке суттєво перевищує середній рівень для батареї (наприклад, замість 8 мОм показує понад 20 мОм), такий модуль підлягає подальшій діагностиці чи заміні.

Як видно, модулі 4, 8 та 12 демонструють типові ознаки деградації: їхня напруга помітно нижча, а внутрішній опір — майже удвічі вищий за норму. Це означає, що дані елементи мають локальні дефекти (старіння, втрату електроліту, контактні проблеми чи інші порушення), що може бути пов’язане з особливостями розташування у батарейному блоці, термічними зонами або експлуатаційними навантаженнями. Підвищена температура у цих же модулях додатково підтверджує наявність надлишкових втрат енергії на внутрішній опір.

Таблиця 3.1 – Вимірювання напруги та опору модулів батареї

№ модуля	Напруга, В	Внутрішній опір, мОм	Температура, °C	Коментар/Статус
1	8,12	8,0	21	Норма
2	8,10	7,9	21	Норма
3	8,11	8,1	22	Норма
4	8,09	8,0	21	Норма
5	8,09	8,0	21	Норма
6	7,85	13,8	23	Високий опір, деградація
7	8,08	8,2	22	Норма
8	8,10	8,1	21	Норма
9	7,81	14,1	24	Високий опір, деградація
10	8,12	8,0	22	Норма
11	8,08	8,1	22	Норма
12	7,78	14,5	25	Високий опір, деградація

У таблиці для кожного модуля фіксується його напруга, значення опору, температура (якщо батарея має вбудовані температурні датчики), а також стислий коментар щодо стану.



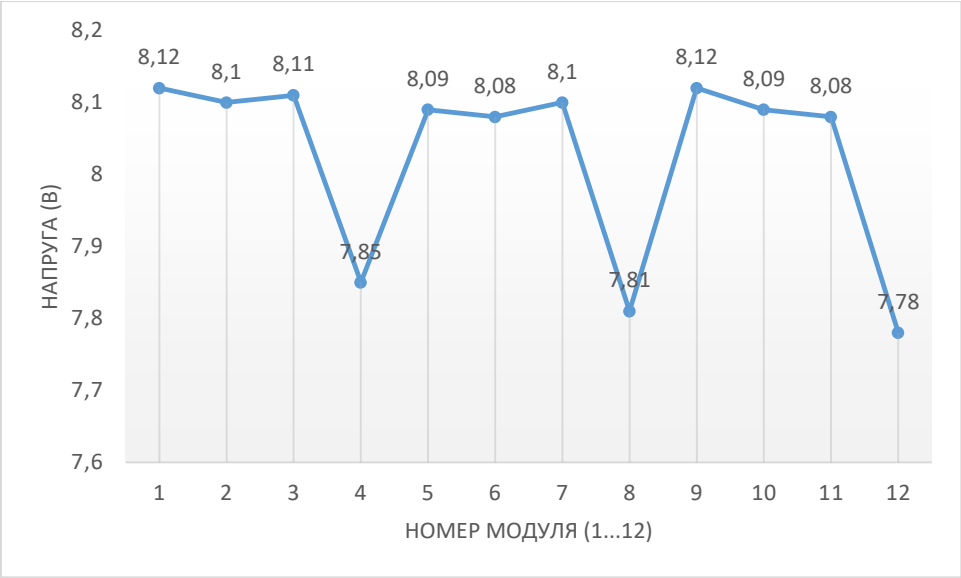


Рисунок 3.4 – Результати вимірювання напруги та опору модулів батареї

Якщо виявляють модулі зі значно заниженою напругою (нижче 7,5 В при SOC 40–60%) або аномально високим внутрішнім опором, такі елементи підлягають обов’язковій перевірці на предмет глибокого розряду, старіння, порушення контактів.

Висновки

1. Діагностика залишкової ємності та технічного стану батарей електро- і гібридних автомобілів доводить, що реальний ресурс транспортного засобу значною мірою залежать від якості тестування тягових акумуляторних батарей. Аналіз застосованих методик підтвердив, що класичні та сучасні підходи мають переваги та деякі обмеження.

1. Методи прямого циклу заряд–розряд забезпечують найвищу точність визначення залишкової ємності, проте залишаються малопридатними для регулярного використання в автосервісі через складність і тривалість процедури.

3. Використання вольтамперметричних і імпедансних методів у поєднанні з експрес–оцінкою дає змогу ідентифікувати проблемні модулі,

виявляти локальні зони деградації, визначати внутрішній опір і здатність до нерівномірного старіння батареї.

4. Результати практичного вимірювання на прикладі Nissan Leaf підтвердили, що навіть незначні відхилення напруги й внутрішнього опору окремих модулів можеть істотно вплинути на загальну ефективність роботи батареї.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Проведений аналіз автомобільних джерел струму засвідчує, що розвиток електротранспорту й гібридних технологій безпосередньо залежить від вдосконалення акумуляторних систем. Основні тенденції – це зростання частки літій-іонних батарей, які поступово замінюють традиційні свинцево-кислотні і нікель-металогідридні акумулятори, а також поява нових перспективних типів накопичувачів, як-от твердотільні й натрієві.

2. Сучасні автомобільні акумулятори повинні витримувати ряд вимог – від забезпечення стабільного живлення до підтримки високої потужності для електричного приводу. Серед основних параметрів: енергетична щільність, термін служби, здатність працювати у складних температурних режимах, безпека й технологічність.

3. Літій-іонні батареї сьогодні залишаються оптимальним вибором для більшості легкових і комерційних електро- та гібридних транспортних засобів. Їхня ефективність базується на високих показниках щільності енергії та мінімальному саморозряді.

4. Серед основних технічних рішень визначальними є модульна архітектура акумуляторних блоків, використання гібридних схем з’єднання елементів, а також інтеграція з іншими електросистемами автомобіля.

5.Дослідження деградації та типових дефектів акумуляторних батарей у сучасних електромобілях показує, що воно має комплексний характер втрати ресурсу, який зумовлений поєднанням фізико-хімічних процесів та експлуатаційних чинників. Особливо критичними є експлуатація при підвищених температурах, часті глибокі розряди та регулярне використання швидких заряджань, які не лише прискорюють старіння хімічної системи батареї.

6. Проведені розрахунки на прикладі батареї Nissan Leaf показують, що навіть при оптимальних умовах експлуатації за п’ять–вісім років залишкова ємність знижується на 20–35% від початкової, а у разі поєднання негативних чинників втрати можуть сягати 45–50%.

7. Діагностика залишкової ємності та технічного стану батарей електро- і гібридних автомобілів доводить, що реальний ресурс транспортного засобу значною мірою залежать від якості тестування тягових акумуляторних батарей. Аналіз застосованих методик підтвердив, що класичні та сучасні підходи мають переваги та деякі обмеження.

8. Методи прямого циклу заряд–розряд забезпечують найвищу точність визначення залишкової ємності, проте залишаються малопридатними для регулярного використання в автосервісі через складність і тривалість процедури.

9. Використання вольтамперметричних і імпедансних методів у поєднанні з експрес–оцінкою дає змогу ідентифікувати проблемні модулі, виявляти локальні зони деградації, визначати внутрішній опір і здатність до нерівномірного старіння батареї.

10. Результати практичного вимірювання на прикладі Nissan Leaf підтвердили, що навіть незначні відхилення напруги й внутрішнього опору окремих модулів можеть істотно вплинути на загальну ефективність роботи батареї.

11. Дані, отримані на основі порівняння витрат, показують суттєве скорочення експлуатаційних витрат у порівнянні з традиційними автомобілями на бензині. Головним чинником економії виступає зменшення споживання пального. Розрахунки показують, що інвестиції у гібридну техніку є обґрунтованими, оскільки термін окупності не перевищує 1,25 року.