

Розробка прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Смирнов О.П.¹, Борисенко А.О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Стаття присвячена проблемі визначення остаточного ресурсу літій-іонних акумуляторних батарей на ранній стадії експлуатації електромобілів за допомогою нової моделі деградації ємності. Проведений аналіз працездатності та деградації літій-іонних акумуляторів та досліджені фактори їх деградації. Розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, яка визначає залишковий ресурс акумуляторної батареї та передбачає його життєвий цикл, використовуючи дані лише з ранніх циклів заряд/розряд, на яких відбувається значно менша деградація. Наведені методи підвищення терміну служби батарей електромобілів.

Ключові слова: акумуляторна батарея, деградація, електромобіль, прогнозування, прогностична модель, стан працездатності, цикл заряд/розряд, термін служби

Вступ

Через проблеми зміни клімату та виснаження викопного палива електричні транспортні засоби стали привабливим рішенням для декарбонізації транспортного сектора. Літій-іонні батареї стали домінуючим рішенням для живлення електромобілів через їхні гарні характеристики (високу щільність енергії та потужності) порівняно з іншими технологіями.

Деградація літій-іонних акумуляторних батарей є тривалим поступовим процесом, і на стан батареї впливають різні фактори, такі як температура, величина струму заряду та розряду, балансування акумуляторів у батареї та напруга заряду. Наразі досягнуто певних успіхів у дослідженні та моделюванні стану працездатності акумуляторних батарей електромобілів. Пов'язані дослідження включають механізм деградації батареї та аналіз факторів старіння, керування справністю батареї, моніторинг і оцінку стану акумуляторних батарей, прогнозування терміну їх служби, тощо.

Під час деградації літій-іонної батареї побічні реакції в електродах та електроліті призводять до втрати літію та активного матеріалу. Деградація батареї відбувається як під

час циклічної роботи батареї, так і під час простою. Стан заряду, температура, високий циклічний струм є зовнішніми факторами, які впливають на зменшення ємності акумуляторної батареї електромобіля. Тим часом внутрішній опір збільшується під час деградації, що призводить до зниження максимальної потужності батареї.

Отже, прогнозування стану працездатності акумуляторних батарей є важливою проблемою при експлуатації електромобілів. Розробка прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, яка визначає залишковий ресурс акумуляторної батареї та передбачає його життєвий цикл є важливою проблемою як для власників електромобілів (як нових та тих, що були в експлуатації), так і виробників електричних транспортних засобів (для формування гарантійних зобов'язань).

Прогностична модель деградації літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів заснована на використанні даних з перших циклах заряд/розряд (від 200 до 250), на яких відбувається ще незначна деградація. Важливою проблемою також є визначення методів

підвищення терміну служби акумуляторних батарей електромобілів.

Аналіз публікацій

Найбільшою проблемою для широкого впровадження електромобілів є розробка недорогих довговічних та енергоємних акумуляторних систем, які дозволять електромобілям збільшити дальність руху на одному заряді [1]. Тому виробники акумуляторів вкладають значні кошти у свої розробки високоефективних накопичувачів електричної енергії [2]. Проте очікуваний термін служби, висока потужність і щільність енергії акумуляторних батарей ще не досягнуто [3]. Крім того проблема безпеки літій-іонних акумуляторних батарей, такі як пожежа та вибух, викликають серйозне занепокоєння [4]. В дослідженнях [5] проведений огляд стратегій безпеки та пожеж літій-іонної батареї. Виробники електричних транспортних засобів посилюють тести на безпеку, особливо ті, що стосуються вибухів та горіння в умовах експлуатації електромобілів [6].

Керування температурою є одним із ключових факторів безпеки, ефективності та довговічності акумуляторних батарей електромобілів. Літій-іонні акумулятори чутливі до коливань температури, тому їх використання поза оптимальним температурним діапазоном може призвести до прискореної деградації, зменшення ємності та погіршення безпеки. Ключові показники, які використовуються для оцінки ефективності системи управління температурою батареї, включають рівномірність температури, ефективність охолодження, споживання енергії та вплив на термін служби батареї. У статті [7] описано експериментальне дослідження, під час якого розглядалося, як літій-іонні батареї для електромобілів поводитися в критичних умовах експлуатації. У дослідженні [8] запропоновано стратегію управління температурою та проведений повний аналіз останніх розробок і проблем у застосуванні охолодження літій-іонних акумуляторів електромобілів.

У статті [9] проведений огляд методів прогнозування працездатності літій-іонних акумуляторів, застосованих у реальних умовах експлуатації. У дослідженні [10] пропонується нова модель глибокого навчання LSTM-Informer для крапко-інтервального прогнозування ємності літій-іонної батареї.

У дослідженні [11] проведений аналіз розподілу стану працездатності батареї, ємності,

внутрішнього опору і спектроскопія електрохімічного стану, які були застосовані як діагностичні параметри для знятих з експлуатації літій-іонних батарей електромобілів. Крім того, було виконано балансування модулів в батареях, щоб оцінити, як зміна стану заряду батареї впливає на стан працездатності. Результати демонструють, що методологія діагностики залежить від хімічного складу батареї, і що не існує єдиної надійної діагностичної процедури, яку можна застосувати до всіх типів літій-іонних батарей.

У дослідженні [12] запропоновано гібридну структуру для точного передбачення та прогнозування стану працездатності літій-іонних акумуляторів для електромобілів з використанням шумових даних. Автори статті [13] використовують статистичні дані акумуляторних батарей від 550 електромобілів для прогнозування стану їх працездатності. Метод прогнозування працездатності, заснований на характеристиках гістограм, дозволяє визначити стан працездатності від навантаження батареї в процесі експлуатації.

У дослідженні [14] представлено методику точного прогнозування стану акумулятора, що є вирішальним для забезпечення безпеки та завоювання довіри споживачів. Використовуючи різні алгоритми машинного навчання, це дослідження вивчає досягнення в оцінці стану працездатності акумуляторів.

Літій-іонні елементи демонструють двофазну поведінку зменшення ємності: спочатку ємність знижується з низькою швидкістю, а потім, починаючи з певної початкової точки, ємність прискорює зниження. Таку точку вигину в англомовній літературі називають knee-point – точка коліна [15-21].

Стандарт IEEE 485™-2010 [18] пов'язує «точку коліна» з переходом до стадії швидкого зниження ємності та потужності. Виникнення коліна є вирішальним фактором життєвого циклу акумулятора. Таким чином, здатність виявляти та, що більш важливо, прогнозувати виникнення коліна та (якщо можливо) його початок є цінною для виробників акумуляторних батарей, які можуть коригувати свої специфікації та відповідні гарантії, а також для кінцевого користувача.

Хоча це поняття knee-point добре задокументовано [15-21], література про ідентифікацію та прогнозування точки вигину є рідкісною, задокументовані лише кілька спроб. Наприклад, у дослідженні [16] визначають точку ви-

гину як перетин двох дотичних ліній до кривої згасання ємності, проведених у двох значущих точках (точці перегину та точці максимального коефіцієнта зміни нахилу).

На рис. 1 показано ідентифіковані точки вигину підігнаних графіках деградації ємності акумуляторів при різних температурах.

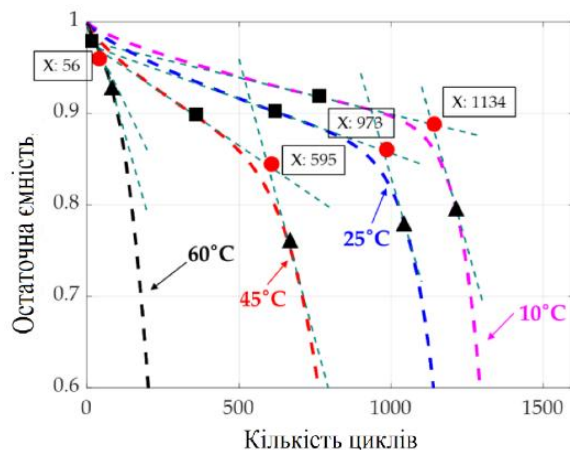


Рис. 1. Ідентифіковані точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонних акумуляторів при різних температурах [18]

На рис. 2 нанесено відповідні дотичні лінії кожної кривої, а точки перетину дотичних позначено суцільними червоними колами. Точки з мінімальним і максимальним абсолютним коефіцієнтом зміни ухилу позначені на графіку чорними квадратами і чорними трикутниками відповідно. Кількість циклів X на перетині – це час, коли відбулося коліно.

У дослідженні [17] представлена нова методологія, яка призначена для передбачення появи точки вигину під час експлуатації акумулятора. Такий підхід передбачає детальний аналіз диференціальної напруги та ступеня неоднорідності для моніторингу та прогнозування вирішального моменту, коли акумулятор, ймовірно, досягне свого кінцевого рівня.

У дослідженні [19] визначають точку вигину як точку максимальної кривизни та розробляють алгоритм на основі цього визначення, який можна застосувати до широкого діапазону систем.

У дослідженні [20] визначено точку вигину як перетин двох прямих з різними нахилами та запропоновано алгоритм для онлайн-виявлення коліна на основі квантильної регресії. Автори виявили, що точки вигину в акумуляторах типу NMC з'явилася між 90 % та 95% стану працездатності SOH.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є прогнозування остаточного ресурсу літій-іонних акумуляторних батарей на ранній стадії експлуатації електромобілів за допомогою нової моделі деградації ємності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести дослідження працездатності та деградації акумуляторних батарей електромобілів, визначити основні фактори, що впливають на ефективність та термін служби літій-іонних акумуляторів та виконати аналіз сучасних публікацій за тематикою дослідження;
- розробити прогностичну модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, яка визначає залишковий ресурс акумулятора та передбачає його життєвий цикл, використовуючи дані лише з ранніх циклів заряд/розряд, на яких відбувається значно менша деградація;
- визначити методи підвищення терміну служби акумуляторних батарей за рахунок раціонального використання електромобілів.

Працездатність та деградація літій-іонних акумуляторів

Стан працездатності (від англ. State of Health, SOH) акумуляторної батареї електромобіля – це поточний показник остаточної ємності батареї порівняно з її ідеальними початковими умовами. На момент виготовлення SOH початкова ємність батареї складає 100 % та зменшується під час експлуатації. Найбільшими факторами, які впливають на працездатність та довговічність акумуляторної батареї електромобіля, є агресивне водіння та інфраструктура заряду (струми заряду та розряду, а також глибина розряду), тепла динаміка (підвищена або низка температура), швидкість деградації та термін експлуатації.

Системи керування батареями (від англ. Battery Management System, BMS) призначені для безпечної та ефективної роботи літій-іонних акумуляторних батарей та контролює процес заряду та розряду, температуру, стан працездатності, стан заряду (від англ. State of Charge, SOC). У розробників систем керування акумуляторних батарей BMS електромобілів немає консенсусу щодо того, як слід визначати стан працездатності SOH. Розробники BMS використовують різні параметри (окремо чи в комбінації), щоб отримати адекватне значення для стану працездатності акумуляторної батареї електромобілів:

- внутрішній опір (якщо внутрішній опір

зростає на 100 % від початкового, то акумуляторна батарея стає непридатною для електромобіля);

- ємність (якщо ємність стає нижче 80 % від початкової, то акумуляторна батарея стає непридатною для електромобіля);
- напруга, що вимірюється під різним навантаженням;
- саморозряд батареї та можливість приймати заряд;
- кількість циклів заряд-розряд;
- температурний режим батареї;
- порівняння загальної зарядженої та розрядженої енергії, тощо.

Деградація акумуляторів є ключовою науковою проблемою в дослідженнях систем накопичення енергії електромобілів. Ефект деградації літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля – це природний процес погіршення стану батареї та поступове зниження спосібності батареї зберігати та доставляти енергію. У середньому, залежно від використання та конкретних умов експлуатації, яким вони піддаються, акумуляторні батареї електромобілів втрачають від 1 % до 3 % свого запасу на рік.

На рис. 2 наведений приклад керованого діапазону ємності акумуляторної батареї, який використовується виробниками електромобілів, щоб зменшити вплив деградації на дальність пробігу електромобіля.

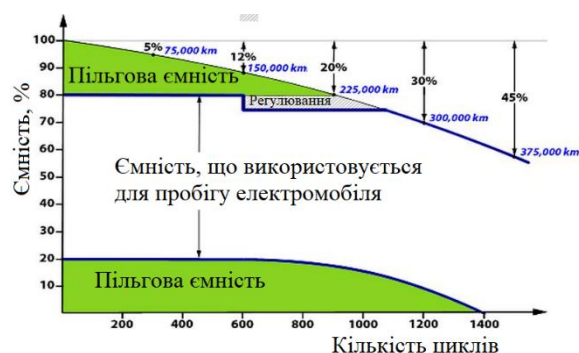


Рис. 2. Приклад керованого діапазону ємності акумуляторної батареї електромобіля. Зображення: Battery University [21]

Пільгова ємність (дивись рис. 1) – це додаткова ємність акумуляторної батареї електромобілів понад рекламовану, яка встановлюється виробником як буфер проти природної деградації та забезпечує додатковий запас безпеки від шкідливих методів зарядки [21].

Зменшення ємності акумуляторної батареї відбувається внаслідок незворотних електро-

хімічних побічних реакцій і може бути розділене на календарну та циклічну деградацію. Календарна деградація є функцією часу, температури та стану заряду SOC і виникає навіть тоді, коли акумулятор не використовується. Циклічна деградація пов'язана з кількістю циклів заряд-розряд та є функцією розглянутих вище факторів, які впливають на працездатність та довговічність акумуляторної батареї електромобіля.

Незважаючи на те, що для руху електричного транспортного засобу може бути використана лише корисна ємність, деградаційні процеси охоплюють всю ємність акумуляторної батареї.

Ємність акумулятора [22]:

$$Q(t) = Q_{batt} \left[1 - (q_{cal}(t) + q_{cycle}(t)) \right], \quad (1)$$

де $q_{cal}(t)$ – накопичена календарна деградація, %; $q_{cycle}(t)$ – накопичена циклічна деградація, %.

Календарна деградація батареї оцінюється за допомогою рівняння Арреніуса [22]:

$$\frac{dq_{cal}}{dt} = A_1 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_k}} \sqrt{\frac{t}{86400}}, \quad (2)$$

де A_1 – постійна інтегрування; E_a – енергія активації, що дорівнює 24,5 кДж; T_k – абсолютна температура акумуляторної батареї, К; t – час, с; R – універсальна газова стала дорівнює $R = 8,31446261815$ Дж/(моль·К).

У дослідженні [22] також побудовані моделі зменшення ємності та потужності акумуляторних батарей електромобілів.

Прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Оцінка та прогнозування процесу деградації літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля, виявлення її причин, наслідків і стратегій мінімізації є критично важливою проблемою, особливо в умовах зростання електрифікації транспортної галузі. Ефективність літій-іонних акумуляторів значно виграють від точних ранніх прогнозів майбутньої втрати ємності, щоб покращити керування батареєю та підтримувати бажані характеристики для конкретного застосування якомога довше. Літій-

іонні елементи демонструють повільне зниження ємності до точки вигину, після чого погіршення швидко прискорюється до завершення терміну служби елемента.

Дослідження, що пов'язані з визначенням прогностичних характеристик акумуляторних батарей, ускладнюються тим, що для побудови моделі деградації акумуляторної батареї потрібен надзвичайно тривалий процес, що заснований на експериментальних дослідженнях поведінки конкретного акумулятора. Але емпіричну модель, отриману для однієї батареї, навряд чи можна перенести на інший тип батареї, навіть якщо розглядається той самий хімічний склад, оскільки розбіжність між осередками вже існує в процесі виробництва. Емпіричні моделі можуть бути непридатними для впровадження систем керування батареями, тому що реальні умови використання також будуть відрізнятися від лабораторних.

Зазвичай виробники електромобілів і систем накопичувачів енергії надають восьмирічну гарантію на акумуляторні батареї. Однак ідентичні електричні транспортні засоби або системи накопичення енергії можуть піддаватися дуже різним робочим циклам і умовам навколишнього середовища, що впливає на швидкість деградації акумуляторної батареї.

Прогнозування точки вигину дозволить визначити початок швидкого погіршення ємності літій-іонних акумуляторів і, таким чином, слугуватиме індикатором швидкої деградації акумулятора. Це також показник, який можна використовувати в поєднанні з порогом зниження ємності до 80 % для оцінки тривалої ефективності та надійності акумуляторної батареї електромобіля. Визначення залишкового терміну служби акумулятора є значним показником для кваліфікаційної оцінки, планування технічного обслуговування акумуляторів у комерційних електронних системах, а також для оцінки та планування вторинного використання акумуляторів знятих з електромобілів.

Проблема раннього прогнозування має на меті передбачити (якісно чи кількісно) залишковий ресурс акумулятора та передбачити його життєвий цикл, використовуючи дані лише з ранніх циклів акумуляторів, де відбувається значно менша деградація. На рис. 3 наведені два підходи до прогнозування точки вигину на графіку деградації ємності.

Якщо відомі данні про графіки деградації ємності та про повний життєвий цикл акумуля-

лятора та вони працюють приблизно в однакових умовах експлуатації, то можна з високою достовірністю провести раннє прогнозування та раціонально визначити точку вигину, а також спрогнозувати залишковий ресурс акумуляторної батареї електромобіля.

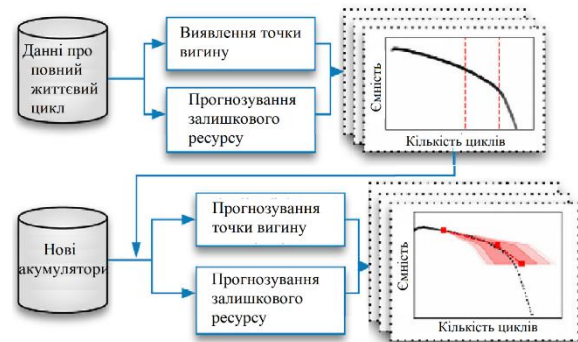


Рис. 3. Два підходи до прогнозування точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля [15]

Але в даному випадку треба враховувати умови експлуатації літій-іонної акумуляторної батареї такі як клімат, в якому експлуатується електромобіль, скільки швидких зарядів вона отримала, скільки років є в експлуатації та в яких критичних режимах працювала акумуляторна батарея електромобіля.

Якщо невідомі данні про повний життєвий цикл акумулятора (нові акумулятори) тоді зробити процес прогнозування значно ускладнюється, тому що може бути декілька сценаріїв роботи літій-іонного акумулятора електромобіля, як це показано на рис. 3 червоними лініями.

Розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів визначає початок викривлення «колінного суглоба», як початок нелінійної деградації. Ми пов'язуємо життєвий цикл літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля з такими параметрами:

- початок викривлення;
- точка вигину;
- значна деградація.

Визначення початку викривлення на графіку деградації ємності, як це показано на рис. 4, прогнозує ідентифікацію точки вигину, а визначення точки вигину прогнозує ідентифікацію початку значної деградації та остаточного життєвого циклу акумуляторної батареї.

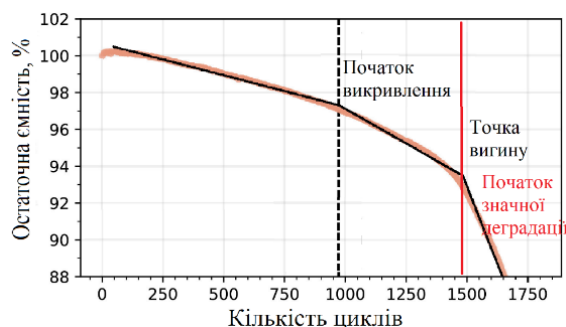


Рис. 4. Визначення початку викривлення на графіку деградації ємності [15]

Точка початку викривлення (дивись рис. 4) означає кінець першої фази лінійної деградації ємності акумуляторної батареї, за якої зниження ємності теж можна апроксимувати як лінійну функцію до точки вигину. Визначення початку викривлення може бути кращим у додатках, де важливий залишковий термін корисного використання, оскільки він дає змогу отримати раннє попередження про прискорення деградації акумулятора. Прогнозування точки вигину дає змогу отримати початок інтенсивної деградації акумулятора та адекватно прогнозувати його остаточний термін служби.

Можливість виявлення початку викривлення дає власнику електромобіля попереднє попередження про те, що починається прискорена деградація акумуляторної батареї. Таким чином, здатність ідентифікувати/передбачити початок прискореної деградації акумуляторних батарей є бажаною з точки зору кінцевого користувача.

Поява точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора може бути класифікована згідно кількості циклів заряд/розряд на наступні діапазони:

- короткий діапазон, якщо кількість циклів складає менш 500;
- середній діапазону, якщо кількість циклів від 500 до 1100;
- довгий діапазон, якщо кількість циклів більш 1100.

У дослідженні [23] проведені експериментальні дослідження з 124 комерційними літій-іонними фосфатне-графітовими LFP акумуляторами типу APR18650M1A, що виготовлені компанією A123 Systems. Ці літій-іонні акумулятори проходили цикли заряд/розряд на 48-канальному потенціостаті Arbin LBT у температурній камері з примусовою конвекцією, встановленою на 30 °C. Акумулятори

мають номінальну ємність 1,1 А·год і номінальну напругу 3,3 В.

Літій-іонні LFP акумулятори типу APR18650M1A циклічно проходили розряд струмом 4С з наступними різними умовами швидкого заряду в основному струмом від 3С до 8С, при цьому лише невелика кількість акумуляторів заряджалася струмом від 1С до 2С (менше 10 %). Набір даних містить вимірювання температури, струму, зарядної та розрядної ємності під час циклів, а також вимірювання ємності, внутрішнього опору та часу заряду за цикл. Експериментальні данні записуються послідовно, починаючи з другого циклу, принаймні, до циклу, коли кожна комірка досягає 80 % номінальної ємності. Детальний опис отриманих даних і проведеного експерименту можна знайти на сайті [24].

Нами проведений досконалий аналіз результатів цього експерименту та інших аналогічних досліджень, що присвячені визначенню деградації ємності реальних акумуляторів. Результати проведеного аналізу графіків деградації ємності реальних літій-іонних акумуляторів від кількості циклів заряд/розряд дозволили сформулювати наступні положення, що є основою прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів:

- точка викривлення на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора виникає між 97 % та 95 % ємності. При чому в критичних умовах експлуатації (при струмах заряду 8С) деградація ємності складала 97%, а в легких умовах експлуатації (при струмах заряду від 1С до 2С) – 95 %, як це показано на рис. 5;

- точка вигину на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора виникає між 94% та 90 % ємності. При чому в критичних умовах експлуатації (при струмах заряду 8С) деградація ємності складала приблизно 94 %, а в легких умовах експлуатації (при струмах заряду від 1С до 2С) – приблизно 90 % як це показано на рис. 5;

- кількість циклів заряд/розряд (позначення на рис. 5 як 1,5d) від початку експерименту до точки вигину на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора у 1,4-1,5 разів перевищує кількість циклів заряд/розряд (позначення на рис. 5 як d) від початку експерименту до точки викривлення. Такий взаємозв'язок спостерігається як для критичних умов експлуатації, так і для легких, як це показано на рис. 5. Наприклад, якщо кількість

циклів заряд/розряд від початку експерименту до точки початку викривлення на графіку деградації ємності літій-іонного акумулятора складає 500, то кількість циклів заряд/розряд від точки початку викривлення до точки вигину складає від 200 до 250 циклів. А загальна кількість циклів заряд/розряд акумулятора до точки вигину складає від 700 до 750 циклів. Після 750 циклів заряд/розряд інтенсивність деградації літій-іонного акумулятора ще посилюється, але експлуатацію акумулятора, ще можна продовжувати ;

- тангенс кута (позначення на рис. 5 як $2tg\alpha$) від точки викривлення до точки вигину приблизно у 2 рази перевищує $tg\alpha$, де α - кут спаду дотичної прямої від початку експлуатації до точки викривлення – це той кут, визначення якого дозволяє прогнозувати стан працездатності та термін служби акумуляторної батареї електромобіля, якщо його умови використання не будуть значно змінюватись. Тангенс кута спаду дотичної прямої нижче точки вигину, після якої починається інтенсивна деградація акумулятора, перевищує початковий тангенс кута нахилу більш ніж у 4 рази (позначення на рис. 5 як $>4tg\alpha$). Такий взаємозв'язок спостерігається як для критичних умов експлуатації, так і для легких. Слід відмітити, що тангенс кута спаду дотичної прямої характеризує швидкість деградації акумуляторів, наприклад, якщо за перші 350 циклів заряд/розряд ємність акумулятора зменшилась на 3 %, це означає, що акумулятор у кожному циклі втрачає приблизно 0,0085 % ємності. Такий процес деградації визначається тангенсом кута спаду дотичної прямої від початку експлуатації до точки викривлення $tg\alpha$ з урахуванням масштабного коефіцієнту. А якщо за наступні 175 циклів заряд/розряд ємність акумулятора зменшилась ще на 3 %, це означає, акумулятор у кожному циклі втрачає приблизно 0,017 % ємності, а тангенс кута акумуляторної батареї збільшуватиметься у два рази та буде дорівнювати $2tg\alpha$;

- існує кореляційна залежність між тангенсом кута спаду дотичної прямої від початку експлуатації до точки викривлення та кількістю прогнозованих циклів заряд/розряд $d_{жц}$. Причому чим менший кут α_{min} , тим буде більша кількість циклів заряд/розряд $d_{жц}$ при життєвому циклі акумуляторної батареї перед початком інтенсивної деградації, при цьому буде довшим термін служби акумулятора, як

це показано на рис. 5. Та навпаки, чим більший кут α_{max} , тим буде менша кількість прогнозованих циклів заряд/розряд $d_{жц}$, тим буде коротшим життєвий цикл акумулятора.

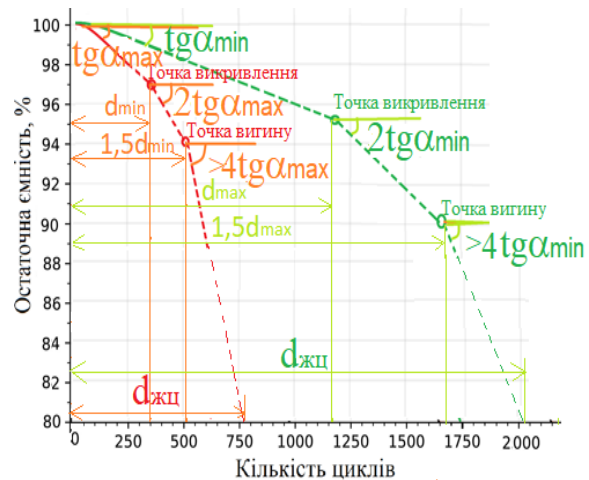


Рис. 5. Прогностичні моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторів в легких та критичних умовах експлуатації

На рис. 5 показані дві прогностичні моделі стану працездатності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, які експлуатуються в двох крайніх режимах роботи: легких (α_{min} , d_{max}) та критичних (α_{max} , d_{min}). Всі інші прогностичні моделі будуть знаходитись між цими двома моделями та мати відповідні пропорційні значення тангенса кута спаду дотичної прямої α від горизонтальної лінії та кількістю прогнозованих циклів заряд/розряд $d_{жц}$. Точка вигину демонструє початок інтенсивної деградації акумулятора.

Як згадувалося раніше, коли ємність акумуляторної батареї електромобіля досягає 80% своєї початкової ємності, вона вважається такою, що досягла кінця свого життєвого циклу. В легких умовах експлуатації акумуляторної батареї електромобіля кількість циклів заряд/розряд $d_{жц}$ може складати більш 2000, але в критичних режимах $d_{жц}$ може не перевищувати і 750 циклів заряд/розряд (дивись рис. 5). Таким чином критичні умови експлуатації електромобілів можуть зменшити життєвий термін експлуатації літій-іонних акумуляторних батарей майже в 3 рази.

Згідно проведеного дослідження можна побудувати прогностичну модель стану працездатності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначити прогнозний термін служби батареї в початковий період експлуатації електричного транспортного засобу. Для більш точного прогнозування остаточного

ресурсу акумуляторної батареї достатньо виконати від 150 до 200 циклів заряд/розряд.

На рис. 6 наведена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів.

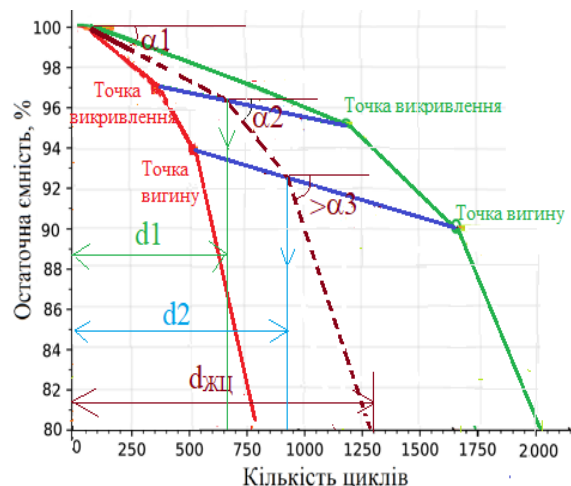


Рис. 6. Прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Після визначення відповідного кута α_1 (дивись рис. 6), який характеризує швидкість деградації акумуляторної батареї на початку експлуатації електромобіля, та який дорівнює відношенню втрати ємності ΔC до кількості перших Δd циклів заряду/розряду з урахуванням масштабних коефіцієнтів:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{\Delta C_1}{\Delta d_1} \cdot \frac{md}{mC}\right), \quad (3)$$

де ΔC_1 – зниження ємності акумуляторної батареї за перші Δd_1 циклів заряду/розряду, %; Δd_1 – кількість циклів заряду/розряду, після яких трапляється зниження ємності акумуляторної батареї на величину ΔC_1 , md та mC – масштабні коефіцієнти кількості циклів та остаточної ємності відповідно, які узгоджують параметри циклів та ємності на графіках прогностичної моделі деградації ємності акумуляторної батареї.

Відношення масштабних коефіцієнтів $\frac{md}{mC}$ розраховано наступним чином. На графіку прогностичної моделі деградації ємності акумуляторної батареї, наприклад, відрізок від 0 до 1000 циклів (різниця 1000, тому $md=1000$) дорівнює відрізку від 80 % до 90 %

(різниця 10, тому $mC=10$), а відношення $\frac{md}{mC}$ буде як раз відношенням цих параметрів $\frac{md}{mC} = \frac{1000}{10} = 100$.

Прийmemo, що після перших 200 циклів заряд/розряду акумуляторна батарея знизила ємність на 1 %. Тоді кут

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{1}{200} \cdot 100\right) = 26,5\%$$

Тоді на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому 0,005 % своєї ємності.

Далі згідно рис. 6 під визначеним за формулою (3) кутом $\alpha_1=26,5\%$ вирисовуємо прогностичну пряму від початку експлуатації електромобіля, коли ємність акумуляторної батареї дорівнює 100 %, до прямої, яка з'єднує крайні точки виправлення. Точка перетину буде прогнозню точкою викривлення для цієї акумуляторної батареї.

Опустимо перпендикуляр від прогнозню точки викривлення на вісь кількості циклів та отримаємо кількість надійних циклів заряд/розряду d_1 , в яких деградація акумуляторних батарей буде незначною. В нашому випадку $d_1=650$ циклів.

Після цього проводимо розрахунок кута α_2 , який визначає швидкість деградації акумуляторної батареї від точки викривлення до точки вигину:

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{\Delta C_2}{\Delta d_2} \cdot \frac{md}{mC}\right), \quad (4)$$

де ΔC_2 – прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї від точки викривлення до точки вигину, %; $\Delta d_2 = \frac{\Delta d_1}{2}$ – кількість циклів заряду/розряду, після яких трапилось прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї електромобіля на величину ΔC_2 .

Прогнозний розрахунок кута нахилу прямої від точки викривлення до точки вигину показує, що кут

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{1}{200/2} \cdot 100\right) = 45\%.$$

Тоді на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому 0,01 % своєї ємності.

Далі згідно рис. 6 під визначеним за формулою (4) кутом $\alpha_2=45\%$ вирисовуємо прогностичну пряму від прогнозню точки викривлення до прямої, яка з'єднує крайні точки вигину. Точка перетину буде прогнозню точкою

вигину для цієї акумуляторної батареї. Опустимо перпендикуляр від прогнозованої точки вигину на вісь кількості циклів та отримаємо кількість циклів заряд/розряд d_2 , в яких деградація акумуляторної батареї буде більш інтенсивною, ніж в першому випадку. З графіка деградації ємності отримуємо $d_2=950$, що у 1,46 разів перевищує d_1 .

Після цього проводимо розрахунок кута α_3 , який визначає прогнозовану швидкість деградації акумуляторної батареї після точки вигину. Після точки вигину починається етап інтенсивної деградації акумуляторної батареї електромобіля:

$$\alpha_3 \geq \arctg\left(\frac{\Delta C_3}{\Delta d_3} \cdot \frac{md}{mC}\right), \quad (5)$$

де ΔC_3 – прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї після точки вигину, %; $\Delta d_3 = \Delta d_1 / 4$ – кількість циклів заряду/розряду, після яких трапилось прогнозоване зниження ємності акумуляторної батареї електромобіля на величину ΔC_3 .

Прогнозний розрахунок кута нахилу прямої від точки вигину до кінцевого терміну служби акумулятора показує, що кут

$$\alpha_3 \geq \arctg\left(\frac{1}{200/4} \cdot 100\right) \geq 65\% . \quad \text{Приймаємо}$$

$\alpha_3 = 70\%$. Тоді на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому 0,02 % своєї ємності.

Далі згідно рис. 6 під визначеним за формулою (5) кутом $\alpha_3 = 70\%$ вирисовуємо прогностичну пряму до 80 % остаточної ємності акумуляторної батареї, при якій закінчується термін служби акумуляторної батареї. Перетин цієї прямої з віссю циклів визначає прогнозовану кількість циклів заряд/розряд акумуляторної батареї електромобіля $d_{жц}$. В нашому випадку $d_{жц} = 1300$ циклів. Це означає, що на кожному циклі заряду/розряду акумулятор втрачає в середньому за весь життєвий цикл приблизно 0,01538 % своєї ємності.

Визначення циклів заряд/розряд акумуляторної батареї $d_{жц}$ допоможе провести прогнозування наступних характеристик електромобіля:

- загальний прогнозний пробіг електромобіля, тис. км;
 - прогнозна кількість років експлуатації.
- Кількість прогнозних циклів заряд/розряд

акумуляторної батареї електромобіля $d_{жц}$ можна перевести спочатку у км пробігу електромобіля. Наприклад, якщо дальність пробігу на повному заряді акумуляторних батарей складає $S=200$ км, то для визначення ресурсу батареї треба кількість циклів $d_{жц}$ помножити на S . В нашому випадку загальний прогнозний пробіг електромобіля складає $1300 \cdot 200 = 260$ тис. км.

Якщо відомий середньорічний пробіг електромобіля, то можна визначити прогнозну кількість років його експлуатації, як відношення загального прогнозного пробігу електромобіля на середньорічний пробіг. Приймаємо, що середньорічний пробіг електромобіля складає 20 тис. км. Тоді в нашому випадку прогнозна кількість років експлуатації буде складати $260/20 = 13$ років.

Але слід визначити, що ми враховували тільки циклічну деградацію акумуляторних батарей. Існує також календарна деградація, яка є функцією часу, температури та стану заряду SOC і виникає навіть тоді, коли акумулятор не знаходиться у процесі експлуатації.

Таким чином, згідно наведеної концепції можна провести прогностичні оцінки тривалості життя акумуляторної батареї електромобіля на основі даних раннього періоду експлуатації. Такі дослідження мають вирішальне значення для просування технологій акумуляторів, покращення їх ефективності та умов експлуатації. Також такі дослідження будуть актуальними та корисними при оптимізації політики швидкої зарядки та забезпечення надійного страхового ринку для акумуляторів.

Таким чином, існуюча концепція точки вигину або «початку коліна» додатково уточняється новим підходом, який визначає точку, в якій акумуляторна батарея демонструє перші ознаки переходу до фази прискореної деградації. Така точка має назву точка викривлення. Визначення точки викривлення дає більш раннє попередження, ніж точка вигину («точка коліна»), після якої починається швидка деградація акумуляторів. Це веде до більш ефективного прогнозованого технічного обслуговування, оскільки здатність передбачити виникнення швидкої деградації акумуляторної батареї дає кінцевому користувачеві достатньо часу для планування заміни до того, як акумулятор перестане відповідати вимогам потрібної ємності та ефективності.

Запропонована прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних

батарей електромобілів, яка прогнозує визначення точки викривлення та точки вигину, які, як показано, забезпечують послідовні та візуально точні результати прогнозування. Крім того, розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей працює навіть у сценаріях, коли інші відомі методики не працюють.

Методи підвищення терміну служби акумуляторних батарей електромобілів

Власники електромобілів можуть застосувати кілька стратегій, щоб пролонгувати термін служби акумуляторної батареї. До них відносяться паркування в затінених місцях або середовищах з контрольованою температурою, підтримка оптимального діапазону зарядки (від 20 % до 80 %), запровадження плавного еко-водіння, тощо.

Для підвищення терміну служби акумуляторних батарей необхідно обмежувати струм та температуру їх зарядки. Існують певні обмеження температури заряджання для літій-іонних акумуляторів. Вони чудово працюють під час заряджання за нижчих температур, а також активують систему «швидкої зарядки» акумулятора. Діапазон температур для цього має бути від 5 °C до 25 °C, оскільки це вважається найкращим температурним діапазоном для заряджання. Низька температура також негативно впливає на ефективність та термін служби літій-іонних акумуляторів. Коли температура знижується нижче 0 °C, струм заряду слід значно зменшити, але зарядка можлива. Коли відбувається зарядка при низькій температурі, невелике підвищення температури є вигідним, оскільки відбувається нагрів за рахунок струму, що протікає через внутрішній опір акумулятора.

Термін служби літій-іонного акумулятора має певну кореляцію з глибиною розряду батареї (від англ. Depth Of Discharge, DOD), яка вказує на відсоток розряду батареї відносно загальної ємності батареї. У дослідженні [25] наведено що, якщо DOD акумулятора типу NMC змінюється з 20 % до 80 %, відсоток погіршення стану працездатності батареї збільшуватиметься на 0,014 % у кожному циклі. Результати таких досліджень співпадають з розробленою прогностичною моделлю деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, в якій визначено, що на кожному циклі заряду/розряду акумулятор

втрачає в середньому за весь життєвий цикл 0,01538 % своєї ємності.

Отже, щоб зберегти гарантований термін служби літій-іонної акумуляторної батареї, виробники електричних транспортних засобів зазвичай обмежують діапазон стану заряду нової літій-іонної акумуляторної батареї його середньою областю, як це показано на рис.2. Якщо використовувати частковий діапазон при заряді та розряді акумуляторної батареї електромобіля протягом усього терміну служби, тоді точка вигину буде пролонгована у часі та сам перегін буде більш плавний. Порівняно з повним діапазоном напруги, частковий діапазон напруги також легше отримати під час щоденного використання електромобіля та регулярного циклу заряду.

Висновки

Розроблена прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей та розглянути методи підвищення терміну служби акумуляторних батарей електромобілів дозволяють підвищити безпеку, екологічність та економічність електричних транспортних засобів за рахунок визначення стану працездатності та прогнозованого остаточного ресурсу літій-іонних акумуляторних батарей та продовження терміну їх життєвого циклу за рахунок раціонального використання електромобіля.

Прогностична модель деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів допомагає визначити залишковий ресурс акумуляторної батареї та передбачає її термін служби, що є важливою проблемою як для власників електромобілів (як нових та тих, що були в експлуатації), так і виробників електричних транспортних засобів (для формування гарантійних зобов'язань та стратегій експлуатації акумуляторних батарей).

Особливістю розробленої прогностичної моделі деградації ємності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів є те, що визначення життєвого циклу батарей відбувається за рахунок використання даних з перших циклів заряд/розряд (від 200 до 250), на яких відбувається ще незначна деградація. Але таких даних буде достатньо, щоб ідентифікувати спочатку точку викривлення, визначити точку вигину та потім встановити повний термін служби акумуляторної батареї електромобіля, який обмежений 80 % корисної ємності. Важливим аспектом концепції

прогнозування стану деградації ємності акумуляторної батареї є те, що аналіз даних у поєднанні з результатами цього дослідження демонструє практично лінійний зв'язок між життєвим циклом, точкою вигину та точкою викривлення.

Подяка

Ця робота проводилась у рамках науково-дослідної роботи «Розробка енергоефективних та високоманеврених багатовісних автомобілів подвійного призначення для Збройних Сил України», державний реєстраційний номер: 0123U101766, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

- Masias, A., Marcicki, J., & Paxton, W. A. (2021). Opportunities and Challenges of Lithium Ion Batteries in Automotive Applications. *ACS Energy Letters*, 6(2), 621–630. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.0c02584>
- Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., & Amine, K. (2019). Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles. *Advanced Energy Materials*, 9(27), 1900161. <https://doi.org/10.1002/aenm.201900161>
- Wang, G., Lu, Z., Li, Y., Li, L., Ji, H., Feteira, A., Zhou, D., Wang, D., Zhang, S., & Reaney, I. M. (2021). Electroceramics for High-Energy Density Capacitors: Current Status and Future Perspectives. *Chemical Reviews*, 121(10), 6124–6172. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01264>
- Lai, T., Zhao, H., Song, Y., Wang, L., Wang, Y., & He, X. (2024). Mechanism and Control Strategies of Lithium-Ion Battery Safety: A Review. *Small Methods*. <https://doi.org/10.1002/smt.202400029>
- Chombo, P. V., & Laoonual, Y. (2020). A review of safety strategies of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 478, 228649. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228649>
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*, 56(4), 1361–1410. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- Chen, K., Li, Y., & Zhan, H. (2022). Advanced separators for lithium-ion batteries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1011(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1011/1/012009>
- Sadar, A., Mohammad, N., Amir, M., & Haque, A. (2024). An Experimental Study on Lithium-ion Electric Vehicles Battery Packs Behavior Under Extreme Conditions for Prevention of Thermal Runaway. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.019>
- Chavan, S., Venkateswarlu, B., Salman, M., Liu, J., Pawar, P., Joo, S. W., Choi, G. S., & Kim, S. C. (2024). Thermal management strategies for lithium-ion batteries in electric vehicles: Fundamentals, recent advances, thermal models, and cooling techniques. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 232, 125918. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125918>
- von Bülow, F., & Meisen, T. (2023). A review on methods for state of health forecasting of lithium-ion batteries applicable in real-world operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 57, 105978. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105978>
- Liu, Z.-F., Huang, Y.-H., Zhang, S.-R., Luo, X.-F., Chen, X.-R., Lin, J.-J., Tang, Y., Guo, L., & Li, J.-X. (2025). A collaborative interaction gate-based deep learning model with optimal bandwidth adjustment strategies for lithium-ion battery capacity point-interval forecasting. *Applied Energy*, 377, 124741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124741>
- Vásquez, F. A., Sara Gaitán, P., & Calderón, J. A. (2025). Comparative study of methodologies for SOH diagnosis and forecast of LFP and NMC lithium batteries used in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 105, 114725. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114725>
- Maleki, S., Ray, B., & Hagh, M. T. (2022). Hybrid framework for predicting and forecasting State of Health of Lithium-ion batteries in Electric Vehicles. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 30, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100603>
- von Bülow, F., Wassermann, M., & Meisen, T. (2023). State of health forecasting of Lithium-ion batteries operated in a battery electric vehicle fleet. *Journal of Energy Storage*, 72, 108271. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108271>
- Fermín-Cueto, P., McTurk, E., Allerhand, M., Medina-Lopez, E., Anjos, M. F., Sylvester, J., & dos Reis, G. (2020). Identification and machine learning prediction of knee-point and knee-onset in capacity degradation curves of lithium-ion cells. *Energy and AI*, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100006>
- Diao, W., Saxena, S., Han, B., & Pecht, M. (2019). Algorithm to Determine the Knee Point on Capacity Fade Curves of Lithium-Ion Cells. *Energies*, 12(15), 2910. <https://doi.org/10.3390/en12152910>
- Fuhrmann, M., Torcheux, L., & Kobayashi, Y. (2024). Knee point prediction for lithium-ion bat-

- teries using differential voltage analysis and degree of inhomogeneity. *Journal of Power Sources*, 621, 235210. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235210>
18. IEEE Recommended practice for sizing lead-Acid batteries for stationary applications. IEEE Std 485–2010 (Revision of IEEE Std 485–1997)2011:1–90. Official edition.
 19. Satopaa, V., Albrecht, J., Irwin, D., & Raghavan, B. (2011). Finding a "Kneedle" in a Haystack: Detecting Knee Points in System Behavior. У 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS Workshops). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icdcs.2011.20>
 20. Zhang, C., Wang, Y., Gao, Y., Wang, F., Mu, B., & Zhang, W. (2019). Accelerated fading recognition for lithium-ion batteries with Nickel-Cobalt-Manganese cathode using quantile regression method. *Applied Energy*, 256, 113841. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113841>
 21. How does EV battery aging affect range and performance? (2023). EV Engineering & Infrastructure. <https://www.evengineeringonline.com/how-does-ev-battery-aging-affect-range-and-performance>
 22. Смирнов, О., & Борисенко, А. (2023). Порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 50–61. <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.5>
 - Smyrnov, O., & Borysenko, A. (2023). Porivnialnyi analiz elektrychnykh modelei litii-ionnykh akumulatornykh batarei elektromobiliv [Comparative analysis of electric models of lithium-ion batteries for electric vehicles]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (24), 50–61. <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.5> [in Ukrainian]
 23. Severson, K. A., Attia, P. M., Jin, N., Perkins, N., Jiang, B., Yang, Z., Chen, M. H., Aykol, M., Herring, P. K., Fraggadakis, D., Bazant, M. Z., Harris, S. J., Chueh, W. C., & Braatz, R. D. (2019). Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. *Nature Energy*, 4(5), 383–391. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0356-8>
 24. Experimental Data Platform. data.matr.io. URL: <https://data.matr.io/1/>
 25. Wang, Y., Zhou, Z., Botterud, A., Zhang, K., & Ding, Q. (2016). Stochastic coordinated operation of wind and battery energy storage system considering battery degradation. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 4(4), 581–592. <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0238-z>

Смирнов Олег Петрович¹, д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки, e-mail: smirnov1oleg@gmail.com, тел. +38 068-609-94-58, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Борисенко Анна Олегівна¹, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: anutochka2111@gmail.com, тел. +38 096-110-69-49, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Development of a predictive model for the degradation of the capacity of lithium-ion batteries in electric vehicles

Abstract. Problem. The article is devoted to the problem of determining the residual life of lithium-ion rechargeable batteries at the early stage of operation of electric vehicles using a new model of capacity degradation. The analysis of the performance and degradation of lithium-ion batteries is carried out and the factors of their degradation are studied. A predictive model of the degradation of the capacity of lithium-ion batteries in electric vehicles has been developed, which determines the remaining useful life of the battery and predicts its life cycle using data only from early charge/discharge cycles, during which significantly less degradation occurs. Methods for increasing the service life of electric vehicle batteries are given. **Goal.** The aim of the work is to improve the safety, environmental friendliness and efficiency of electric vehicles by determining the predicted final resource of lithium-ion batteries using a new predictive model of capacity degradation. **Methodology.** Methods of scientific analysis and synthesis of increasing the service life of batteries. A predictive model of capacity degradation of lithium-ion batteries of electric vehicles determines the remaining useful life of the battery and predicts its life cycle. **The results.** Based on the analysis of publications and studies, a predictive model of capacity degradation of lithium-ion batteries was developed. As a result, the final resource of lithium-ion batteries is predicted. An important aspect of the concept of predicting the state of degradation of the battery capacity is that the data analysis in combination with the results of this study demonstrates a virtually linear relationship between the life cycle, inflection point and curvature point. Methods for increasing the service life of batteries of electric vehicles and prolonging their life cycle through the rational use of an electric vehicle are considered. The results of the research coincide with the developed predictive model of lithium-ion battery capacity degradation, which determines that at each charge/discharge cycle, the electric vehicle battery loses an average of 0.015 % of its capacity over the entire life cycle. The considered methods for increasing the battery life, which allows increasing the number of charge/discharge cycles and the life cycle due to the rational use of the electric vehicle. **Originality.** The peculiarity of the developed predictive model of lithium-ion battery capacity

degradation in electric vehicles is that the battery life cycle is determined by using data from the first charge/discharge cycles (from 200 to 250), where minor degradation still occurs. But such data will be sufficient to identify the distortion point, then the inflection point and then determine the full service life of the electric vehicle battery, which is limited to 80% of the useful capacity. **Practical value.** A predictive model for the capacity degradation of lithium-ion batteries in electric vehicles determines the remaining useful life of the battery and predicts its service life, which is an important issue for both electric vehicle owners (both new and used) and electric vehicle manufacturers (for the formation of warranty obligations and battery operation strategies).

Key words: battery, degradation, electric vehicle, forecasting, predictive model, state of health, charge/discharge cycle, service life

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, e-mail: smirnov1oleg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Borysenko Anna¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-11-06-949, e-mail: anutochka2111@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.