

Порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Смирнов О.П.¹, Борисенко А.О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Стаття присвячена проблемі підвищення екологічності та енергоефективності транспортних засобів за рахунок проведення порівняльного аналізу електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. У дослідженні проведений аналіз відомих електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей: модель Rint, модель RC, модель Thevenin, моделі PNGV. Досліджені моделі деградації акумуляторних батарей за зменшенням ємності та зростанням активного опору. Обґрунтовані напрями удосконалення електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів шляхом врахування зміни величин ємності, внутрішнього опору та опору поляризації, календарної та циклічної деградації.

Ключові слова: електромобіль; літій-іонна акумуляторна батарея; електрична модель; ефективність; стан заряду; система накопичення енергії; деградація акумулятора

Вступ

Протягом останніх десятиліть для вирішення екологічних, соціальних та економічних проблем, пов'язаних з високими індексами викидів газів і неефективним використанням енергетичних ресурсів прогресивні країни інвестують в екологічно чисті та енергозберігаючі технології, що застосовуються в секторі автомобільного транспорту [1-3]. Прогнозується, що до 2050 р. міжнародні продажі автомобілів подвоїться [4], що підкреслює необхідність розгортання транспортних засобів з альтернативними джерелами енергії для вирішення проблеми зміни клімату.

Серед потенційних силових систем для заміни транспортних засобів, що працюють на викопному паливі, електричні транспортні засоби (Electric Vehicles (EV)) є перспективним альтернативним рішенням завдяки використанню літій-іонних акумуляторних батарей, які в порівнянні з іншими батареями відрізняються високою щільністю енергії, високою щільністю потужності, тривалим терміном служби та екологічністю [5]. Джерела живлення або системи накопичення енергії

(Energy Storage Systems (ESS)) є вирішальним компонентом при моделюванні та проектуванні електричної трансмісії, оскільки розробка електромобілів із збільшеним запасом ходу остається складним завданням. У той же час розвиток літій-іонних акумуляторних батарей протягом останнього десятиліття підвищив надійність електричних транспортних засобів з точки зору вищої енергоефективності та терміну служби [6]. Тому актуальним є проведення порівняльного аналізу електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначення шляхів їх удосконалення.

Аналіз публікацій

Останнім часом електричні транспортні засоби EV стали перспективним напрямом в автомобільному секторі через їх екологічність. Застосування літій-іонних акумуляторних батарей в системах накопичення енергії ESS електромобілів вважається оптимальним рішенням через їх високу питому щільність енергії та потужність, меншу вагу [7-10].

Моделювання ефективності та деградації літій-іонних акумуляторних батарей в системах накопичення енергії ESS електромобілів привернуло велику увагу в останні роки. Останні дослідження [11, 12] демонструють, що стан заряду (State of Charge (SoC)) акумуляторної батареї електромобілів діє як індикатор ефективності батареї. Неправильна оцінка SoC призводить до надмірної зарядки або надмірної розрядки. Оцінка SoC стала складним завданням через значні зміни, що відбуваються в характеристиках батареї через ефект деградації, вплив температури та наявність нелінійних характеристик батареї.

Дослідження [13] аналізує взаємозв'язок між втратою ємності та вхідними функціями за допомогою циклічного та календарного прогнозування деградації і представляє метод вибору інтелектуальних функцій, який розширив здатність узагальнення та покращив прогнозні характеристики алгоритмів моделі для точного прогнозування загальної втрати ємності.

У статті [14] розроблена модель стратегії швидкої зарядки з урахуванням стану акумуляторної батареї електромобіля, щоб зменшити ризик нелінійної деградації під час процесу заряд/розряд літій-іонних елементів. У дослідженнях [15, 16] розроблені моделі для кількісної оцінки коефіцієнтів деградації різних типів літій-іонних акумуляторних батарей, що дозволяє точніше передбачити ефективність, термін служби та час коли досягається такий рівень деградації, коли необхідно її замінити.

У статті [17] для покращення оцінки стану працездатності та прогнозування залишкового терміну служби пропонується варіант нейронної мережі довгострокової пам'яті, який призначений для забезпечення ефективності запропонованої структури. У дослідженні [18] проведено моделювання основних параметрів літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів другого терміну служби. У дослідженні [19] проведена оцінка електричних моделей еквівалентної схеми літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля для оцінки стану заряду за допомогою експериментального підходу.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є підвищення екологічності та енергоефективності транспортних засобів за

рахунок проведення порівняльного аналізу різних електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей, які використовуються в електромобілях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести порівняльний аналіз відомих електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, таких як, модель Rint, модель RC, модель Thevenin, моделі PNGV, тощо;

- визначити основні характеристики літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів, такі як стан заряду, маса, фактична напруга, енергія необхідна для підзарядки, тощо;

- дослідити електричні моделі деградації акумуляторних батарей за зменшенням ємності та зростанням активного опору;

- визначити можливі напрями удосконалення електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів;

- сформулювати висновки щодо доцільності врахування в електричних моделях зміну основних характеристик літій-іонних акумуляторних батарей, які відбуваються під час експлуатації електромобіля.

Аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів

Основним способом моделювання літій-іонного акумулятора є створення електричної еквівалентної схеми з параметрами, які представляють напругу, ємність елемента та внутрішній опір. Керуючі рівняння моделі акумулятора повинні відображати її зв'язок із температурою, станом працездатності (State of Health (SoH)), станом заряду (State of Charge (SoC)) і струмом, відтворюючи при цьому нелінійну залежність. Зв'язок літій-іонного акумулятора з цими факторами залежить від хімічного складу акумулятора та рівнем його деградації. Акумулятор, що був деякий час в експлуатації, має ознаки деградації через поступову втрату ємності та збільшення внутрішнього опору, що знижує напругу на клеммах. Таким чином, моделювання літій-іонного акумулятора другого терміну служби вимагає визначення того, як змінюються значення параметрів батареї та які фактори впливають на ці зміни.

Найпростішою електричною моделлю еквівалентної схеми акумулятора є модель Рінта (Rint) [18], що наведена на рис. 1.

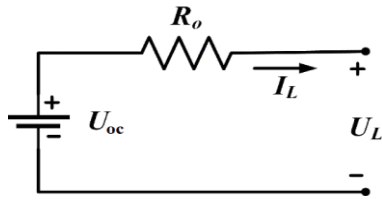


Рис. 1. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі Rint [18]

Напряга на клемі такого акумулятора, В:

$$U_L = U_{CO} - I_L \cdot R_0, \quad (1)$$

де U_L – напруга на клемі акумулятора, В; U_{CO} – напруга холостого ходу, В; I_L – струм навантаження, А; R_0 – внутрішній опір акумулятора, Ом.

Більш просунута версія електричної моделі акумулятора RC була розроблена відомою компанією SAFT Battery Company та досягла широкого використання за допомогою програмного забезпечення Advisor [19]. На рис. 2 наведена еквівалентна електрична схема акумулятора моделі RC. Активний опір додається послідовно та паралельно з двома конденсаторами для більш детального представлення акумулятора.

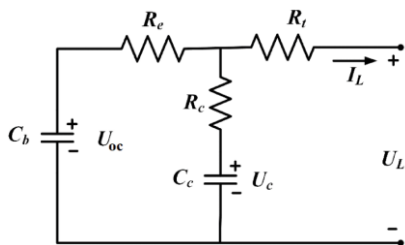


Рис. 2. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі RC [19]

Модель RC, як випливає з назви, повністю складається з резисторів і конденсаторів. Конденсатор C_b характеризує загальну ємність акумулятора для зберігання електричної енергії, а конденсатор C_c характеризує ємність поверхневого ефекту акумулятора. Резистор R_e характеризує внутрішній опір акумулятора, R_t представляє опір клемі, а R_c представляє опір конденсатора C_c . Напруга U_L характеризує напругу на клемі акумулятора, напруга U_b визначає стан заряду (SoC) акумулятора, напруга U_c – напругу на конденсаторі C_c . Рівняння моделі акумулятора RC:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c \cdot (R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_c \\ \frac{-R_e}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix} \cdot [I_L] \\ [U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \\ -R_t - \frac{R_e \cdot R_c}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + [I_L] \quad (3)$$

Популярної електричної моделлю літій-іонного акумулятора є модель Тевеніна (Thevenin). Еквівалентна модель акумулятора Тевеніна вводить поляризаційний опір R_{Th} паралельно з еквівалентною ємністю C_{Th} , як це показано на рис. 3.

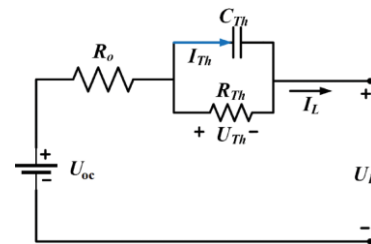


Рис. 3. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі Thevenin [18]

Конденсатор Тевеніна C_{Th} враховує перехідні характеристики, що спостерігаються під час процесу заряд/розряд акумулятора. Напруга Тевеніна U_{Th} на паралельному з'єднанні R_{Th} та C_{Th} та напруга на клемі акумулятора визначаються за формулою:

$$\begin{cases} \dot{U}_{Th} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th} \cdot C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \\ U_L = U_{OC} - U_{Th} - I_L \cdot R_0 \end{cases} \quad (4)$$

У дослідженні [20] розроблена модель літій-іонної акумуляторної батареї PNGV для нового покоління електромобілів (Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV)). Розрахункова електрична схема акумулятора PNGV відрізняється від моделі акумулятора

Thevenin тим, що вводить послідовно з R_0 додатковий конденсатор, як це показано на рис. 4.

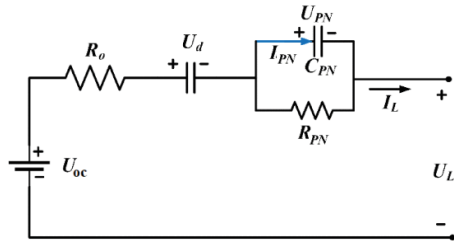


Рис. 4. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі PNGV [20]

Цей доданий конденсатор з напругою U_d (дивись рис. 4) допомагає пояснити зміни напруги холостого ходу акумуляторної батареї електромобіля, коли протікає струм навантаження. Рівняння електричної моделі акумуляторної батареї PNGV:

$$\begin{cases} \dot{U}_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} \cdot C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \\ U_L = U_{OC} - U_d - I_L \cdot R_0 - U_{PN} \end{cases} \quad (5)$$

Поляризаційні ефекти літій-іонної акумуляторної батареї такі як поляризація концентрації та електрохімічна поляризація можуть бути змодельовані лише в обмеженій мірі за допомогою моделі Thevenin або моделі PNGV, що може привести до неточних симуляцій наприкінці циклів заряду та розряду. Для подолання цієї проблеми у дослідженні [19] створено електричну модель акумулятора DP подвійної поляризації (Dual Polarization (DP)), яка може імітувати обидві поляризації окремо (рис. 5).

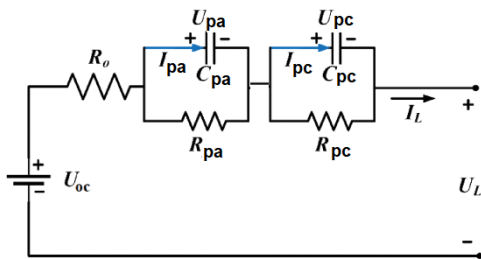


Рис. 5. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі DP [19]

Як показано на рис. 5 активний опір R_0 , опір електрохімічної поляризації R_{pa} та опір концентраційної поляризації R_{pc} імітують

внутрішній опір акумуляторної батареї електромобіля. Поляризаційні ємності C_{pa} (для електрохімічної поляризації) та C_{pc} (для концентраційної поляризації) можна використовувати для моделювання перехідних процесів під час процесу розряд/заряд літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля. Напруги U_{pa} та U_{pc} , що наведені на рис. 5, є напругами на паралельно з'єднаних елементах електричного кола R_{pa} , C_{pa} та R_{pc} , C_{pc} відповідно.

Враховуючи все вищесказане, можна записати рівняння моделі акумулятора подвійної поляризації DP:

$$\begin{cases} \dot{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa} \cdot C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \dot{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc} \cdot C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{OC} - U_{pa} - U_{pc} - I_L \cdot R_0 \end{cases} \quad (6)$$

Стан заряду акумуляторної батареї SoC електромобіля вважається ключовим параметром, оскільки він вказує на доступну ємність акумулятора, яка визначає дальність пробігу. При моделюванні стану заряду акумуляторної батареї $SoC(t)$ можна застосовувати модель літій-іонної акумуляторної батареї, яка базується на базі даних батарейних блоків Simulink™, %:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \left(\frac{1}{Q \cdot 3600} \int_0^t i_{ch}(t) dt \right) \cdot 100, \quad (7)$$

де $SoC(t_0)$ – початковий стан заряду, %; Q – номінальна ємність літій-іонної акумуляторної батареї, А·год; $i_{ch}(t)$ – зарядний струм батареї, А.

Поточний стан акумуляторної батареї електромобіля відображає її поточну ємність в порівнянні з ємністю батареї на початку терміну служби. У цьому сенсі зниження значення SoC пов'язане з проблемами довговічності акумуляторної батареї, яку можна оцінити за рівнянням:

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{BDL}}, \quad (8)$$

де Q_{BDL} – ємність акумуляторної батареї електромобіля, що відповідає 80 % ємності від ємності на початку експлуатації, згідно стандарту ISO 12405-4:2018 [21], А·год; $Q(t)$ – точна ємність батареї, А·год.

Стан заряду вводиться як один із вхідних параметрів керування енергоспоживанням. Фактичний стан заряду акумуляторної батареї визначається також глибиною розряду $DoD(t)$, %:

$$DoD(t) = 100 - SoC(t). \quad (9)$$

При постійному струмі розряду глибина розряду акумуляторної батареї DoD визначається за формулою, %:

$$DoD = \frac{I_{disch} \cdot t_{disch}}{Q} 100\%, \quad (10)$$

де I_{disch} – розрядний струм, А; t_{disch} – час розряду, год; Q – загальна ємність акумулятора, А·год.

Маса акумуляторної батареї електромобіля M задається рівнянням, як функція питомої енергоємності літій-іонної акумуляторної батареї, кг:

$$M = \frac{U \cdot Q}{S_E}, \quad (11)$$

де U – номінальна напруга, В; S_E – питома енергоємність, Вт·год/кг.

Приймемо, що типова питома енергоємність літій-іонного акумулятора $S_E = 150$ Вт·год/кг.

У дослідженні [22] рекомендують фактичну напругу акумуляторної батареї електромобіля визначати рівняннями (12), (13) для режимів заряду та розряду відповідно, В:

$$U_{batt}^{I^* \leq 0} = E_0 - I_{batt} R_0 - K \left(\frac{Q}{I_{batt} t - 0.1Q} \right) \cdot I^* - K \left(\frac{Q}{Q - I_{batt} \cdot t} \right) \cdot I_{batt} \cdot t + A \cdot e^{-B \cdot I_{batt} \cdot t} \quad ; (12)$$

$$U_{batt}^{I^* \geq 0} = E_0 - I_{batt} R_0 - K \left(\frac{Q}{Q - I_{batt} \cdot t} \right) \cdot I^* - K \left(\frac{Q}{Q - I_{batt} \cdot t} \right) \cdot I_{batt} \cdot t + A \cdot e^{-B \cdot I_{batt} \cdot t} \quad , (13)$$

де I^* – вимірювальний струм, який може приймати негативні значення (при заряді) або позитивні значення (при розряді), А; E_0 – постійна напруга еквівалентної схеми акумулятора, В; I_{batt} – струм батареї, А; K – постійна поляризації, (В/(А·год))⁻¹; A – постійна інтегрування, В; B – показник затухання перехідного процесу, (А·год)⁻¹.

Після того, як електромобіль виконує проїзд по відповідному комбінованому циклу водіння, моделюється процес заряду батареї з урахуванням остаточного заряду (наприкінці подорожі) як початкові умови заряду. Енергія $W_{batt}(t)$, що потрібна для підзарядки акумуляторної батареї електромобіля розраховується за рівнянням:

$$W_{batt}(t) = \int_0^t \eta_{ch} \cdot i_{ch}(t) \cdot U_{ch}(t) dt, \quad (14)$$

де t – час заряду, с; η_{ch} – ККД заряду, пов'язаний з тепловими втратами потужності та втратами потужності перетворення змінного та постійного струму; U_{ch} – напруга заряду, В.

Таким чином, у проаналізованих вище електричних моделях акумуляторних батарей електромобілів активні опори використовуються в різних кількостях для імітації процесу заряд/розряду акумуляторної батареї електромобіля. На додаток до наведених вище електричних моделей, опори еквівалентної схеми акумуляторної батареї можна використовувати для врахування ємності, опору передачі заряду та опору електроліту [23].

Для будь-якої моделі акумулятора комбінація всіх цих опорів представляє внутрішній опір відповідного акумулятора. Якщо сформулювати в термінах напруги холостого ходу, напруги на клеммах акумуляторної батареї та струму розряду, еквівалентний внутрішній опір можна виразити як, Ом:

$$R_0 = \frac{U_{CO} - U_L}{I_L}. \quad (15)$$

Недоліками моделей, що були досліджені, полягають у тому, що в них не враховується зміна величини внутрішнього опору та ємності акумулятора під час експлуатації електромобіля. Зміна цих параметрів відбувається як в залежності від деградації акумуляторної батареї та від стану її заряду *SoC*.

На рис. 6 [24] наведені залежності величини внутрішнього опору акумуляторної батареї, що складається з 16 послідовно з'єднаних літій-марганцева-оксидних акумуляторів номінальною ємністю 100 А·год, від стану заряду *SoC*.

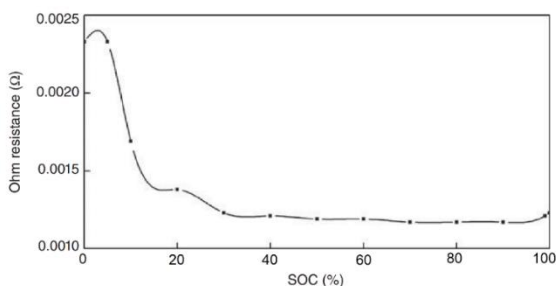


Рис. 6. Залежність величини внутрішнього опору акумулятора від стану заряду *SoC* [24]

На рис. 7 [24] наведені залежності величини опору поляризації акумуляторної батареї, що складається з 16 послідовно з'єднаних літій-марганцева-оксидних акумуляторів номінальною ємністю 100 А·год, від стану заряду *SoC*.

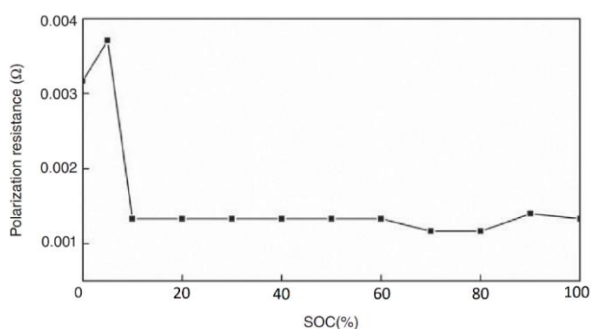


Рис. 7. Залежність величини опору поляризації акумулятора від стану заряду *SoC* [24]

Рис. 6 та рис. 7 демонструють, що під час глибокого розряду акумуляторної батареї внутрішній опір і опір поляризації збільшуються до 3 разів, тому напруга на клеммах акумуляторної батареї значно знижується.

На рис. 8 показана залежність напруги від розрядженої ємності при різних розрядних струмах під час глибокого розряду акумуля-

торної батареї, яка складається з 16 послідовно з'єднаних літій-марганцева-оксидних акумуляторів номінальною ємністю 100 А·год [24].

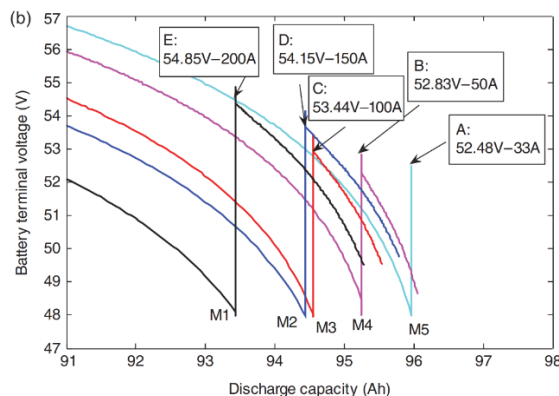


Рис. 8. Залежність напруги від розрядженої ємності при різних розрядних струмах під час глибокого розряду акумуляторної батареї [24]

Проведемо дослідження процесу розряду акумуляторної батареї у відповідних точках (дивись рис. 8) M1 (при постійному режимі розрядного струму 200 А (2 С)), M2 (при постійному режимі розрядного струму 150 А (1,5 С)), M3 (при постійному режимі розрядного струму 100 А (1,0 С)), M4 (при постійному режимі розрядного струму 50 А (0,5 С)), M5 (при постійному режимі розрядного струму 33 А (1/3 С)).

Як видно з рис. 8, в точках M1, M2, M3, M4 і M5 розрядні ємності дорівнюють 93,43 А·год, 94,43 А·год, 94,55 А·год, 95,24 А·год та 95,96 А·год відповідно, а напруга холостого ходу після витримування в розімкненому стані протягом 1 год становлять 54,85 В, 54,15 В, 53,44 В, 52,83 В і 52,48 В відповідно. Очевидно, що напруги холостого ходу зростають зі збільшенням розрядного струму. Зменшення ємності не помітно, оскільки розрядний струм збільшується. Розрядна ємність при струмі 200 А зменшується лише на 2,6 % порівняно з розрядною ємністю при струмі 33 А.

Глибокий розряд акумулятора зменшує його термін служби, тому слід уникати повного 100 % розряду. Але в електромобілях рівень заряду акумуляторної батареї, представлений у вигляді відсоткового значення на приладовій панелі, не відображає реальний рівень заряду *SoC*, тому що система керування батареєю не дозволяє її розряджати до критичного значення та резервує декілька процентів *SoC*

для збільшення терміну служби системи накопичення енергії.

Удосконалення електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів полягає в підвищенні їх точності за рахунок надання змінного характеру його внутрішнього опору та опору поляризації. Збільшення еквівалентного внутрішнього опору акумуляторної батареї призводить до зниження напруги живлення та відповідно потужності.

Також для удосконалення розглянутих моделей літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля необхідно враховувати такий факт, як зниження її ємності, яка природно знижується під час експлуатації електромобіля як при збільшенні циклічного заряду, так і в режимі простою. Зниження ємності акумуляторної батареї електромобіля призводить до зниження дальності пробігу на одному заряді.

Крім того, в моделях, що проаналізовані, не враховується ступень деградації акумуляторної батареї, яку необхідно враховувати при моделюванні літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля, що перебуває в експлуатації, або при моделюванні акумуляторних батарей, які повторно використовуються у системах зберігання енергії, наприклад, при використанні акумуляторних батарей електромобілів у житловому секторі для підтримки сонячної електростанції [25].

У подальшому дослідженні при складанні моделі деградації акумуляторних батарей електромобілів будемо враховувати збільшення еквівалентного активного опору та зниження ємності акумуляторної батареї. Ще проаналізуємо вплив використання технології електромобіль до електромережі (Vehicle to Grid (V2G)) на довговічність акумуляторних батарей електромобілів [26, 27].

Модель деградації акумуляторних батарей електромобілів

Деградація акумуляторних батарей електромобілів відбувається через хімічні побічні реакції під час зберігання та електрохімічні побічні реакції під час роботи. Електричні та термічні навантаження викликають електрохіміко-механічну деградацію через об'ємні зміни активного матеріалу.

Деградація акумуляторних батарей електромобілів залежить головним чином від тем-

ператури, глибини розряду DoD , системи охолодження та швидкості заряду [28]. Використання швидких зарядних пристроїв, які використовують постійний струм, збільшує швидкість деградації, яка становить 10 % за шість років, у порівнянні з повільним зарядом змінним струмом з номінальною напругою 120 В або 220 В [29].

У причинно-наслідковому контексті стресові фактори акумуляторних батарей електромобілів прискорюють різні механізми фізичної деградації, які проявляються у втраті запасів літію, втраті активного матеріалу та обмеженнях напруги та струмів.

Початкова ємність акумуляторної батареї Q_{batt} є функцією ємності елемента Q_{cell} і кількості елементів N , з'єднаних паралельно, А·год:

$$Q_{batt} = Q_{cell} \cdot N. \quad (16)$$

Для акумуляторної батареї електромобіля можна визначити дві ємності: номінальну (або загальну) і корисну [30]. Номінальна ємність – це кількість енергії, яку теоретично може вмістити акумуляторна батарея (формула (16)). Корисна ємність менша за номінальну і описує кількість енергії, яку можна безпосередньо використовувати для руху електромобіля. Виробники електромобілів можуть обмежити доступну ємність акумулятора, включивши буфер, який недоступний на початку терміну служби автомобіля. Потім цей буфер звільняється з часом, змінюючи на корисну ємність протягом терміну служби автомобіля [31].

Зменшення ємності акумуляторної батареї електромобіля може бути розділене на календарну та циклічну деградацію. Календарна деградація є функцією часу, температури та SoC і виникає навіть тоді, коли акумуляторна батарея електромобіля не використовується. Циклічна деградація пов'язана з кількістю циклів заряд-розряд та є функцією температури, пропускну здатності енергії та величини струму [32-34].

Незважаючи на те, що в електромобілі може бути використана лише корисна ємність, деградація впливає на всю ємність. Поточна ємність акумулятора виражається як [31]:

$$Q(t) = Q_{batt} \left[1 - (q_{cal}(t) + q_{cycle}(t)) \right], \quad (17)$$

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

Швидкість календарної деградації акумуляторної батареї електромобіля оцінюється за допомогою рівняння Арреніуса [31]:

$$\frac{dq_{cal}}{dt} = A_1 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT_k}} \sqrt{\frac{t}{86400}}, \quad (18)$$

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). Її значення пов'язане зі сталою Больцмана співвідношенням:

$$R = E_a \cdot k_B \quad (19)$$

де E_a – число Авогадро; k_B – стала Больцмана.

Прискорюють електрохімічну деградацію акумуляторних батарей електромобілів термічні фактори, що відбуваються через електричне навантаження. У дослідженнях [29, 35] об'ємна температура акумуляторів $T(t)$ визначається за допомогою об'ємної теплової моделі, К:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{d}{dt} T(t) + h \cdot S \cdot (T(t) - T_{amb}) = I \cdot (U_L - U_{OC}) \quad (20)$$

де m – маса акумуляторної батареї, г; c_p – теплоємність акумуляторної батареї, Дж/(кг·К); h – коефіцієнт теплопередачі акумулятора, Вт/(м²·К); S – площа поверхні акумуляторної батареї, м²; T_{amb} – температура навколишнього середовища, К.

Інженери систем накопичення енергії електромобілів кількісно визначають результуючу фізичну деградацію акумуляторних батарей двома способами:

- за зменшенням ємності, що обмежує дальність пробігу;
- за зменшенням потужності, що відбувається за рахунок збільшення внутрішнього

опору та опору поляризації та обмежує загальну потужність електропривода та знижує ефективність електромобіля [36].

Ефекти деградації акумуляторних батарей визначаються як зменшення ємності та зростання активного опору. У дослідженні [29] модель зменшення ємності CF (Capacity Fade) побудована за еквівалентною моделлю акумулятора Thevenin (див. рис. 3) та визначаються як:

$$CF = 1 - \frac{C - \mu_{CF} \cdot C_{rater}}{C_{rater} - \mu_{CF} \cdot C_{rater}}, \quad (21)$$

де C – поточна ємність акумуляторної батареї, А·год; C_{rater} – максимальна розрядна ємність, визначена виробником, А·год; μ_{CF} – коефіцієнт номінальної ємності, за якого акумулятор вважається непридатним для використання (для акумуляторної батареї електромобіля вказується як 0,8, що відповідає втраті 20 % від початкової ємності) [21].

Модель зменшення потужності PF (Power Fade) побудована за еквівалентною електричною моделлю акумулятора Thevenin (див. рис. 3) та визначаються як:

$$PF = \frac{1}{\mu_{FF} - 1} \cdot \left(\frac{R_0 + R_{Th}}{R_0(0) + R_{Th}(0)} - 1 \right), \quad (22)$$

де μ_{FF} – коефіцієнт загального опору елементів, за якого акумуляторна батарея вважається непридатною для використання (для акумуляторної батареї електромобіля вказується як 2, що відповідає збільшенню загального опору на 100 %); R_0 – поточна величина внутрішнього опору акумуляторної батареї електромобіля, Ом; R_{Th} – поточна величина поляризаційного опору Тевеніна, Ом; $R_0(0)$ – внутрішній опір, який був під час виробництва акумуляторної батареї, Ом; $R_{Th}(0)$ – поляризаційний опір Тевеніна, який був під час виробництва акумуляторної батареї, Ом.

При збільшенні внутрішнього опору більш ніж у 2 рази акумуляторна батарея електромобіля вважається непридатною для потреб живлення електропривода.

Вартість деградації акумуляторної батареї електромобіля \mathcal{E}_{deg} рекомендують розраховувати за формулою [29]:

$$\xi_{deg} = \max[CF \cdot \xi_{batt}, PF \cdot \xi_{batt}], \quad (23)$$

де ξ_{batt} – вартість заміни акумуляторної батареї електромобіля.

У дослідженні [28] запропонований розрахунок вартості деградації акумуляторної батареї електромобіля D , €/кВт·год:

$$D = \frac{C_{batt}}{DoD \cdot L}, \quad (24)$$

де C_{batt} – вартість акумуляторної батареї електромобіля, €/кВт·год; L – життєві цикли батареї до деградації для фіксованого DoD .

Ефективний термін служби кожної акумуляторної батареї електромобіля залежить від DoD , і, отже, можна визначити максимальну кількість циклів до деградації. Для кожної поїздки розраховується потреба в електричній енергії для подорожі, а вартість зарядки електромобіля може бути розрахована, як показано в рівнянні, кВт·год:

$$\xi_{ch} = \xi_e \frac{C \cdot (1 - DoD)}{\eta_{ch}}, \quad (25)$$

де ξ_e – вартість енергії, €/кВт·год; C – ємність акумулятора, кВт·год; η_{ch} – ККД зарядного пристрою, %.

Останні дослідження, що проведене доктором Котубом Уддіном (Kotub Uddin) разом із його командою з групи енергетичних і електричних систем WMG і Jaguar Land Rover, показали, що можна використовувати живлення від акумуляторних батарей електромобілів до електромережі V2G без додаткової деградації акумуляторів. Вони навіть заявили, що це може знизити на 10 % процес деградації акумуляторної батареї електромобіля [36].

Компанія Geotab провела дослідження акумуляторних батарей 6300 електромобілів з 21 різних моделей [37], та сформулювала два основні висновки:

- можна стверджувати, що якщо поточні темпи деградації збережуться, більшість акумуляторних батарей сучасних електромобілів матиме довший термін служби, ніж сам автомобіль;

- середня річна швидкість деградації становить близько 2,3%, що означає, наприклад, що для акумулятора, який на початку експлу-

атації пропонує 250 км автономності, протягом перших п'яти років використання він втратить близько 28 км, що в середньому складає приблизно 5 км на рік [28].

Висновки

За результатами дослідження можна дійти до висновку, що з метою підвищення екологічності та енергоефективності транспортних засобів проведений порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначено, що у електричних моделях доцільно враховувати зміну характеристик літій-іонних акумуляторних батарей, які відбуваються в процесі експлуатації електромобіля, а саме:

- зміну величини внутрішнього опору та опору поляризації;
- зміну величини ємності;
- деградацію акумуляторних батарей.

Зміну величини внутрішнього опору та опору поляризації слід враховувати в залежності від двох факторів: від стану заряду акумуляторної батареї та від ступеня її деградації. При чому якщо перший фактор можна враховувати лише при глибокому розряді акумуляторної батареї, коли $SoC < 30\%$, то другий фактор треба враховувати при будь-якої SoC . Збільшення внутрішнього опору акумуляторної батареї обмежує потужність електропривода, знижує динамічні властивості та ефективність транспортного засобу. Якщо величина внутрішнього опору зростає більш ніж на 100 % від початкового опору, то така акумуляторна батарея вважається непридатною для електромобілів. Але такі акумуляторні батареї можна повторно використовувати, наприклад, як накопичувачі електричної енергії від сонячних панелей в житловому секторі.

Зміну величини ємності слід враховувати в залежності від двох факторів: календарної та циклічної деградації. Календарна деградація є функцією часу, температури та SoC і виникає навіть тоді, коли акумуляторна батарея електромобіля не використовується. Циклічна деградація пов'язана з швидкістю заряду (зарядним струмом), кількістю циклів заряд-розряд та є функцією температури, пропускну здатності енергії та величини струму. Зменшенням ємності акумуляторної батареї електромобіля відповідно знижує дальність проїзду. Якщо величина ємності акумуляторної батареї електромобіля знижується більш ніж

на 20 % від початкової ємності, то така акумуляторна батарея вважається непрацездатною для електромобілів.

Деградацію акумуляторних батарей електромобілів визначають двома способами: за зменшенням ємності та зменшенням потужності. Побудовані моделі зменшення ємності *CF* (Capacity Fade) і зменшення потужності *PF* (Power Fade) на основі еквівалентної електричної схеми акумулятора Thevenin, які демонструють рівень погіршення технічних характеристик електромобіля. Вважається, що середня річна швидкість деградації акумуляторних батарей електромобілів становить близько 2,3% [28].

Визначено, що основними причинами погіршення характеристик акумуляторних батарей електромобілів є календарна деградація (термін служби) та деградація від кількості циклів заряд/розряд. При чому на термін служби найбільш впливає температура, *SoC*, час експлуатації, тоді як швидкість заряду, кількість циклів та *DoD* визначають циклічну деградацію. Але існує протилежне ствердження, що використання технології від акумуляторних батарей електромобілів до електромережі V2G знижує на 10 % процес деградації акумуляторних батарей [36].

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, а також у рамках науково-технічної роботи «Розроблення дослідного зразка енергоефективного колісного малогабаритного транспортного засобу подвійного використання», державний реєстраційний номер: 0122U200935, що фінансуються Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Hill, G., Heidrich, O., Creutzig, F., & Blythe, P. (2019). The role of electric vehicles in near-term mitigation pathways and achieving the UK's carbon budget. *Applied Energy*, 251, 113111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.107>

2. Linn, J., & McConnell, V. (2019). Interactions between federal and state policies for reducing vehicle emissions. *Energy Policy*, 126, 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.052>
3. Dhar, S., Pathak, M., & Shukla, P. R. (2017). Electric vehicles and India's low carbon passenger transport: a long-term co-benefits assessment. *Journal of Cleaner Production*, 146, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.111>
4. Hao, H., Geng, Y., & Sarkis, J. (2016). Carbon footprint of global passenger cars: Scenarios through 2050. *Energy*, 101, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.089>
5. Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>
6. Eldeeb, H. H., Elsayed, A. T., Lashway, C. R., & Mohammed, O. (2019). Hybrid Energy Storage Sizing and Power Splitting Optimization for Plug-In Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2252–2262. <https://doi.org/10.1109/tia.2019.2898839>
7. Farhadi, M., & Mohammed, O. (2016). Energy Storage Technologies for High-Power Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 1953–1961. <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2511096>
8. Bongartz, L., Shammugam, S., Gervais, E., & Schlegl, T. (2021). Multidimensional criticality assessment of metal requirements for lithium-ion batteries in electric vehicles and stationary storage applications in Germany by 2050. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126056>
9. Urquiza, J., & Singh, P. (2023). A review of health estimation methods for Lithium-ion batteries in Electric Vehicles and their relevance for Battery Energy Storage Systems. *Journal of Energy Storage*, 73, 109194. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109194>
10. Khan, F. M. N. U., Rasul, M. G., Sayem, A. S. M., & Mandal, N. (2023). Maximizing energy density of lithium-ion batteries for electric vehicles: A critical review. *Energy Reports*, 9, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.08.069>
11. Hytowitz, A. N. (2023). Review of using the Dyop optotype for acuity and refractions per the article: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1888429622000656>. *Journal of Optometry*. <https://doi.org/10.1016/j.optom.2022.12.002>
12. Selvaraj, V., & Vairavasundaram, I. (2023). A comprehensive review of state of charge estimation in lithium-ion batteries used in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 72, 108777. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108777>
13. Rauf, H., Khalid, M., & Arshad, N. (2023). A novel smart feature selection strategy of lithium-

- ion battery degradation modelling for electric vehicles based on modern machine learning algorithms. *Journal of Energy Storage*, 68, 107577. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107577>
14. Wassiliadis, N., Kriegler, J., Gamra, K. A., & Lienkamp, M. (2023). Model-based health-aware fast charging to mitigate the risk of lithium plating and prolong the cycle life of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 561, 232586. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232586>
 15. Ando, K., Matsuda, T., & Imamura, D. (2018). Degradation diagnosis of lithium-ion batteries with a $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ and LiMn_2O_4 blended cathode using dV/dQ curve analysis. *Journal of Power Sources*, 390, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.043>
 16. Lewerenz, M., Münnix, J., Schmalstieg, J., Käbitz, S., Knips, M., & Sauer, D. U. (2017). Systematic aging of commercial LiFePO_4 |Graphite cylindrical cells including a theory explaining rise of capacity during aging. *Journal of Power Sources*, 345, 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.133>
 17. Li, P., Zhang, Z., Xiong, Q., Ding, B., Hou, J., Luo, D., Rong, Y., & Li, S. (2020b). State-of-health estimation and remaining useful life prediction for the lithium-ion battery based on a variant long short term memory neural network. *Journal of Power Sources*, 459, 228069. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228069>
 18. Hossain, E., Murtaugh, D., Mody, J., Faruque, H. M. R., Haque Sunny, M. S., & Mohammad, N. (2019). A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. *IEEE Access*, 7, 73215–73252. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2917859>
 19. He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*, 4(4), 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>
 20. Avadikyan, A., & Larrue, P. (2003). The Partnership for a New Generation of Vehicles and the US DoE Transportation Fuel Cells Programme. *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies* (c. 133–158). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24822-4_6
 21. Electrically propelled road vehicles —Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 4: Performance testing (ISO 12405-4:2018). (2018). <https://www.iso.org/standard/55854.html>
 22. da Silva, S. F., Eckert, J. J., Corrêa, F. C., Silva, F. L., Silva, L. C. A., & Dedini, F. G. (2022b). Dual HESS electric vehicle powertrain design and fuzzy control based on multi-objective optimization to increase driving range and battery life cycle. *Applied Energy*, 324, 119723. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119723>
 23. On the Ageing of High Energy Lithium-Ion Batteries—Comprehensive Electrochemical Diffusivity Studies of Harvested Nickel Manganese Cobalt Electrodes. (2018). *Materials*, 11(2), 176. <https://doi.org/10.3390/ma11020176>
 24. Jiang, J., & Zhang, C. (2015). *Fundamentals and Applications of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles*. Wiley & Sons, Limited, John.
 25. Assunção, A., Moura, P. S., & de Almeida, A. T. (2016). Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy. *Applied Energy*, 181, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.056>
 26. Adnan Khan, M. S., Kadir, K. M., Mahmood, K. S., Ibne Alam, M. I., Kamal, A., & Al Bashir, M. M. (2019). Technical investigation on V2G, S2V, and V2I for next generation smart city planning. *Journal of Electronic Science and Technology*, 17(4), 100010. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100010>
 27. İnci, M., Savrun, M. M., & Çelik, Ö. (2022). Integrating electric vehicles as virtual power plants: A comprehensive review on vehicle-to-grid (V2G) concepts, interface topologies, marketing and future prospects. *Journal of Energy Storage*, 55, 105579. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105579>
 28. Borge-Diez, D., Icaza, D., Açıklalp, E., & Amaris, H. (2021b). Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share. *Energy*, 237, 121608. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121608>
 29. Uddin, K., Jackson, T., Widanage, W. D., Chouchelamane, G., Jennings, P. A., & Marco, J. (2017). On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal V2G facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system. *Energy*, 133, 710–722. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.116>
 30. Timilsina, L., Badr, P. R., Hoang, P. H., Ozkan, G., Papari, B., & Edrington, C. S. (2023). Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3271287>
 31. Meng, J., Cai, L., Stroe, D.-I., Luo, G., Sui, X., & Teodorescu, R. (2019). Lithium-ion battery state-of-health estimation in electric vehicle using optimized partial charging voltage profiles. *Energy*, 185, 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.127>
 32. Jin, X. (2022). Aging-Aware optimal charging strategy for lithium-ion batteries: Considering aging status and electro-thermal-aging dynamics. *Electrochimica Acta*, 407, 139651. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139651>
 33. Saldana, G., Martin, J. I. S., Zamora, I., Asensio,

- F. J., Onederra, O., & Gonzalez, M. (2020). Empirical Electrical and Degradation Model for Electric Vehicle Batteries. *IEEE Access*, 8, 155576–155589. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3019477>
34. Wang, D., Coignard, J., Zeng, T., Zhang, C., & Saxena, S. (2016). Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services. *Journal of Power Sources*, 332, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.116>
35. Ng, K. S., Moo, C.-S., Chen, Y.-P., & Hsieh, Y.-C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), 1506–1511. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021>
36. Uddin, K., Dubarry, M., & Glick, M. B. (2018). The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective. *Energy Policy*, 113, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.015>
37. EV Battery Health: What 6,000 EV Batteries Tell Us | Geotab. (2020). Geotab. <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>

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.

Comparative analysis of electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles

Abstract. Problem. This article addresses the challenge of enhancing the environmental friendliness and energy efficiency of vehicles. It does so by conducting a comparative analysis and identifying ways to improve the electrical models of lithium-ion batteries used in electric vehicles. The study includes an examination of well-known electrical models of lithium-ion rechargeable batteries, such as the Rint model, the RC model, the Thevenin model, and the PNGV model. It identifies key characteristics of lithium-ion batteries in electric vehicles, including state of charge, mass, actual voltage, energy required for recharging, among others. The study also explores models of battery degradation, focusing on capacity reduction and the increase in active resistance. It substantiates directions for improving electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles by considering changes in capacity, internal resistance, polarization resistance, and both calendar and cyclic degradation. **Goal.** The aim of this work is to enhance the environmental friendliness and

energy efficiency of vehicles through a comparative analysis and by determining ways to improve the electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles. **Methodology.** Our approach to achieving this goal involves using electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles, which describe various parameters such as state of charge, actual voltage during charge/discharge processes, and energy required for recharging. The study encompasses an investigation into the degradation of electric vehicle batteries, including their use in Vehicle to Grid (V2G) technology. **Results.** The analysis of electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles, aiming to increase their accuracy, considers the following aspects: changes in internal resistance and polarization resistance; capacity variation; and battery degradation. The change in internal resistance and polarization resistance should be considered based on two factors: the state of charge of the battery and the degree of its degradation. While the first factor is relevant primarily when the battery is deeply discharged (SoC<30%), the second factor must be considered at any state of charge. Capacity changes should be accounted for based on calendar and cyclic degradation. It has been determined that the primary causes of degradation in electric vehicle batteries are calendar aging (service life) and aging due to charge/discharge cycles. Contrarily, it is argued that using Vehicle to Grid (V2G) technology can reduce battery degradation by 10%. **Originality.** The results of this study provide a comprehensive understanding of the electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles and contribute to the improvement of existing models. **Practical value.** This research enhances the accuracy of current electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles by considering the variable nature of internal resistance and capacity during vehicle operation. It may be valuable in assessing the residual parameters of electric vehicle batteries during their secondary use, such as in the residential sector for solar energy support. The findings can be recommended to scientific and technical professionals involved in developing energy storage systems for electric vehicles.

Key words: electric vehicle; lithium-ion battery; electric model; efficiency; state of charge; energy storage system, battery degradation

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, 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, anutochka2111@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

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