

Д. О. ЛІПКО, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського  
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

## ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТКОВОГО ЗАРЯДНО-РОЗРЯДНОГО ЦИКЛУ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇЇ РЕСУРСУ

*Проаналізовано середньостатистичний денний пробіг автомобіля в Україні та інших країнах і встановлено, що він значно менший запасу ходу будь-якого серійного електромобіля. Було досліджено, як впливає обмеження глибини розряду акумуляторної батареї на її ресурс в таких умовах. Отримані результати показали, що при використанні циклу з обмеженням глибини розряду до 50% ресурс батареї можна збільшити на 20% і більше. Розглянуто шляхи модернізації електромобіля для збільшення ресурсу акумуляторної батареї без обмежень для користувача.*

*Ключові слова: електромобіль, акумуляторна батарея, рівень заряду, частковий цикл, ресурс акумуляторної батареї.*

Кількість електротранспорту у світі лише за 2021 рік збільшилася в два рази [1], а в багатьох країнах почали приймати закони про відмову від авто з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) у наступні роки [2]. Електромобілі мають багато переваг перед авто з ДВЗ, найважливіша — це відсутність шкідливих викидів [3], що не тільки позитивно впливає на екологію, але також є порятунком для міст з великим скупченням людей [4]. Крім того, електромобілі якоюсь мірою допомагають збалансувати електромережу, оскільки більшість авто заряджаються вночі, коли споживання електроенергії низьке, а електростанції мають надлишкову потужність. Тут також слід згадати технологію Vehicle-to-Grid (V2G), з розвитком якої електромобілі зможуть не тільки заряджатись від мережі, а й віддавати електроенергію назад під час пікового навантаження [5]. Плюсом електромобіля для користувача є те, що вони працюють досить плавно і тихо та є дешевшими в експлуатації — вартість 1 км шляху електромобіля в декілька разів нижча, а регламентного технічного обслуговування вони потребують набагато менше, ніж авто з ДВЗ. Електромотор має досить високий ККД — близько 95%, тоді як дизельний мотор — 30%, а бензиновий — 20% [6]. Можливість рекупераційного гальмування ще більше підвищує ККД електромобіля і може знизити споживання електроенергії на рельєфній місцевості на 20%.

Проте електромобілі мають і недоліки. Головною незручністю для власника є тривале заряджання акумуляторної батареї, яке не можна порівняти з часом заправки авто з ДВЗ. Швидкі зарядні станції, що стали з'являтися на ринку, значно прискорюють цей процес, але навіть 30 хв для заряджання батареї від 10 до 80% рівня заряду (*state of charge, SoC*) це набагато довше, ніж заправка паливом на АЗС. До того ж акумуляторна батарея має обмежений ресурс і з ча-

сом починає втрачати свою ємність. Деградація акумулятора відбувається й з плином часу (календарна) [8], а також залежить від кількості циклів розряду/заряду [9].

Великою проблемою останніми роками стає утилізація літєвих акумуляторів, до складу яких входять токсичні для довкілля матеріали — кобальт, нікель, літій. Масштабне виробництво електромобілів почалося у 2012 році (це були Nissan Leaf та Tesla Model S), і до сьогоднішнього дня ресурс їхніх батарей вичерпався. При цьому підприємств для вторинного перероблення літєвих акумуляторів у світі дуже мало, хоча деякі виробники електромобілів (Nissan, Renault, Volkswagen) нещодавно почали запускати такі пілотні проекти для акумуляторів своїх електромобілів. Оскільки без спеціальної утилізації літєві батареї є потенційною загрозою навколишньому середовищу [10], багато хто з фахівців ставлять під сумнів екологічність електромобіля.

Продовження строку експлуатації вже існуючих акумуляторів стає досить актуальним, оскільки відкладає на пізніше проблему перероблення та утилізації старих акумуляторів та дає більше часу на пошук нових технологій виробництва та утилізації батарей. З огляду на важливість проблематики, метою цієї роботи був пошук шляхів продовження ресурсу акумуляторної батареї електромобіля.

### Огляд статистичних даних

Електромобіль Nissan Leaf першого покоління у 2011 році мав запас ходу 150 км та ємність акумулятора 24 кВт·год, у 2016-му виробник почав встановлювати акумулятор ємністю 30 кВт·год з запасом ходу 200 км. У 2018 році змінився не тільки зовнішній вигляд електромобіля, а й акумулятор — 40 кВт·год, 280 км, у 2019-му — 62 кВт·год, 385 км. За всі роки

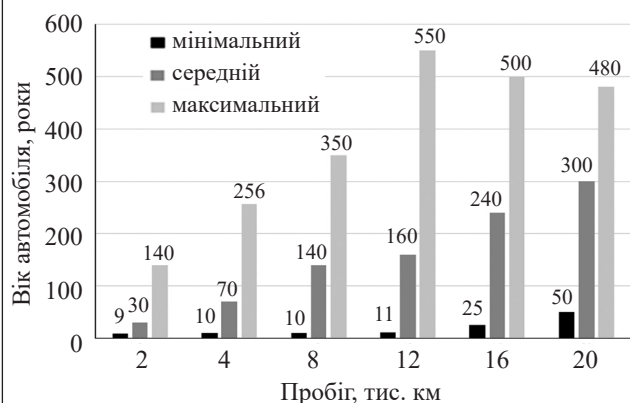


Рис 1. Статистика пробігу автомобілів в Україні залежно від віку [11]

виробництва Nissan Leaf кузов та корпус батареї не зазнавали змін, ємність батареї збільшувалася завдяки використанню акумуляторів з більшою питомою щільністю та технології лазерного зварювання комірок, при цьому загальна вага електромобіля майже не змінювалась.

Автори [11] проаналізували статистику пробігу автомобілів залежно від віку, використовуючи дані інтернет-ресурсу з продажу автомобілів в Україні, оскільки офіційні статистичні дані відсутні. З наведених на **рис. 1** видно, що автомобілі віком 2 роки мають середній показник загального пробігу 30 тис. км, віком 20 років — 300 тис. км, з чого можна зробити висновок, що в Україні середньодобовий пробіг слабо залежить від віку автомобіля й становить орієнтовно 41 км.

Статистика інших країн підтверджує той факт, що і там середньодобовий пробіг автомобіля теж не перевищує 50 км, наприклад у Великобританії він складає 25 миль, тобто 40 км [12]. Отже, бачимо, що запас ходу будь-якого серійного електромобіля більший за середньодобовий пробіг середньостатистичного автомобіля.

Ресурс акумулятора на основі літію характеризується кількістю циклів розряд-заряд [13], яка може бути отримана за умови дотримання умов експлуатації електромобіля, визначених виробником. Для сучасних акумуляторів кількість гарантованих циклів розряд-заряд становить мінімум 2000 при втраті до 30% ємності від номінальної. Але на деградацію впливають також інші фактори, такі як температура акумулятора, струм та напруга його заряду та розряду. Чим менше навантаження на акумулятор, тим повільніше відбувається деградація.

В сучасних електромобілях застосовуються літій-іонні акумулятори з різними типами хімічного складу і кожен з них має свої переваги та недоліки (**рис. 2**), тому виробники електромобілів обирають акумулятори з огляду на умови їх використання [15]. Наприклад, літій-іонні акумулятори LCO, катод яких виготовлений на основі оксиду літій-кобальту ( $LiCoO_2$ ), анод — з графіту, мають відносно невеликий термін експлуатації, проте вони мають високу питому ємність (240 Вт·год/кг). Недоліком літій-іонних акумуляторів LMO з катодом на основі оксиду літій-марганцю ( $LiMn_2O_4$ ) є низька питома ємність (150 Вт·год/кг), однак їхня термічна стійкість вища порівняно з LCO. Літій-іонні батареї LFP з катодом на

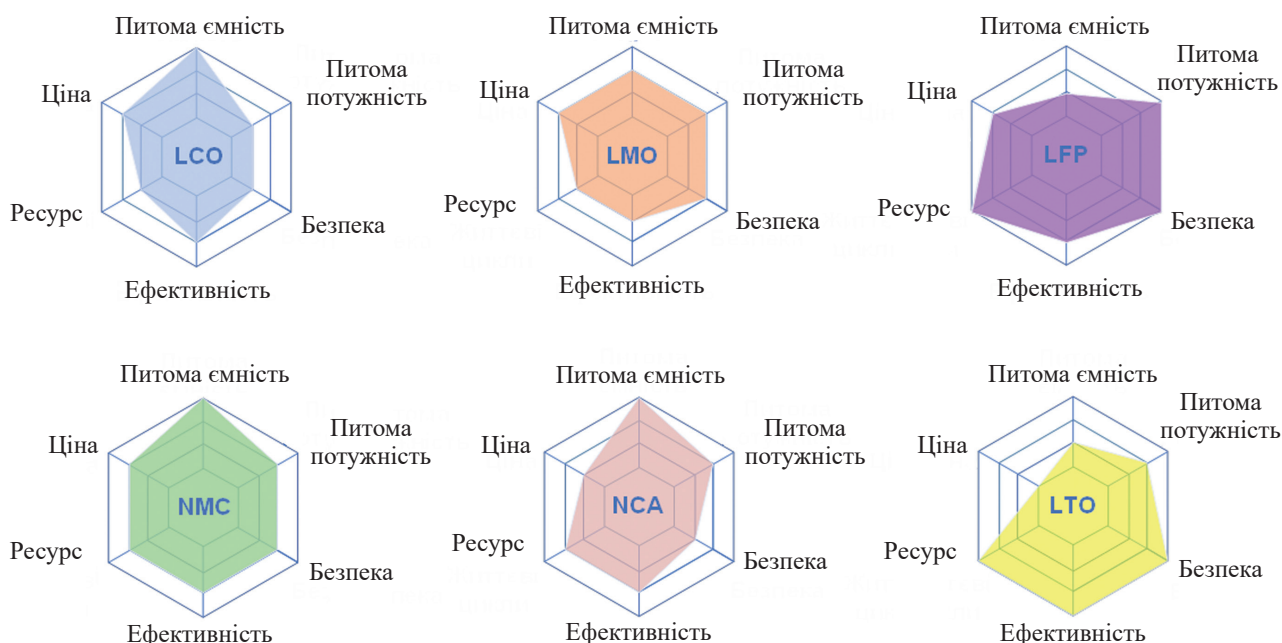


Рис. 2. Порівняння характеристик різних типів акумуляторів на основі літію [16] (показник “Ціна” відбиває не вартість, а доступність за ціною)

основі оксиду літій-залізо-фосфату ( $\text{LiFePO}_4$ ) мають великий ресурс, високу питому потужність та рівень безпеки водночас з доступною ціною, до того ж такі акумулятори здатні працювати за низьких температур [15]. Літій-іонні батареї NMC з катодом на основі оксиду літій-нікель-кобальт-марганцю ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) досить широко застосовуються в електромобілях через доступність та збалансовані характеристики. Літій-іонні акумулятори NCA з катодом на основі оксиду літій-нікель-кобальт-алюмінію ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ) мають досить високу питому щільність ( $280 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ ) [17], найбільше вони використовуються у випадках, коли потрібна велика ємність акумулятора, наприклад в електромобілях Tesla. Але ці акумулятори вибагливі до температурного режиму, тому їх не можна використовувати без системи терморегулювання. Літій-іонні акумулятори LTO з катодом на основі оксиду літій-титанату ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) сьогодні майже не використовуються в електромобілях через високу ціну і низьку питому ємність, але є досить перспективними в майбутньому.

**Частковий зарядно-розрядний цикл**

Тягова акумуляторна батарея більшості електромобілів складається з 96 послідовно підключених комірок, має загальну напругу 410 В в зарядженому стані, а також містить систему BMS (*battery management system*), що вимірює напругу окремо на кожній комірці, загальний струм, температуру батареї, на основі чого вираховує поточний рівень SoC батареї, а також прогнозує запас ходу електромобіля. Крім цього, BMS управляє струмом заряду та розряду акумулятора шляхом обміну інформацією з іншими модулями електромобіля через комунікаційну шину CAN-BUS, саме вона зупиняє процес зарядки та розрядки акумулятора. Окрім основних функцій, BMS також здійснює балансування рівня заряду кожної комірки відносно інших — необхідно, щоб всі комірки батареї мали однаковий рівень заряду, адже тільки за такої умови можливе використання повної ємності акумуляторної батареї (рис. 3).

Загальну ємність батареї можна поділити на чотири зони (рис. 4):

A — резерв ємності батареї, заблокований для користувача;

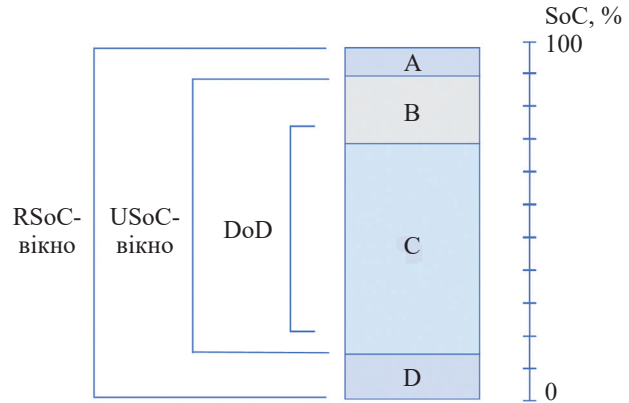


Рис. 4. Зони розподілу ємності акумуляторної батареї

B — ємність, яку користувач може використовувати для дальніх поїздок;

C — доступна користувачеві “повсякденна” ємність;

D — нижній резерв ємності, недоступний користувачеві.

Таким чином, на панелі приладів користувача відображається рівень заряду USoC (*usable state of charge*), що знаходиться в межах зон B та C, а дійсний рівень заряду акумулятора RSoC (*real state of charge*) може знаходитись в діапазоні зон від A до D, але не відображатися для користувача [18].

Рівень деградації (*state of health, SoH*) акумуляторної батареї, розраховується як відношення її наявної ємності до номінальної:

$$\text{SoH} = C_{\text{real}} / C_{\text{nom}} \tag{1}$$

Ресурс акумуляторів — це кількість циклів заряду-розряду акумулятора до втрати певної ємності, що може сильно коліватися в більшу або меншу сторону залежно від умов експлуатації. Виробником акумуляторів гарантується певна кількість повних циклів заряду-розряду, тобто ресурс при  $\text{DoD} = 100\%$ , за якої SoH не впаде нижче встановленого значення за умови використання акумулятора в заданих виробником режимах роботи, що надаються в технічній документації до кожної моделі. Виробник вказує максимальну напругу заряду та розряду акумулятора, і при функціонуванні акумулятора в цьому діапазоні напруги буде використана його повна ємність,

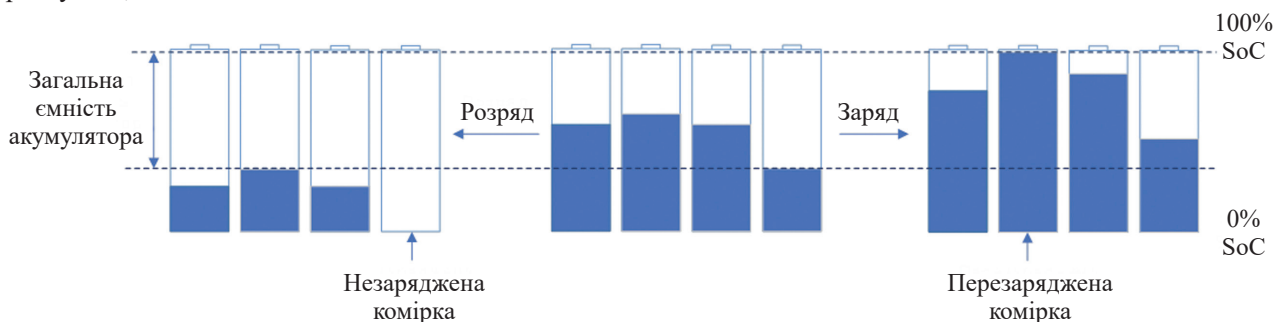


Рис. 3. Дисбаланс заряду комірок акумуляторної батареї

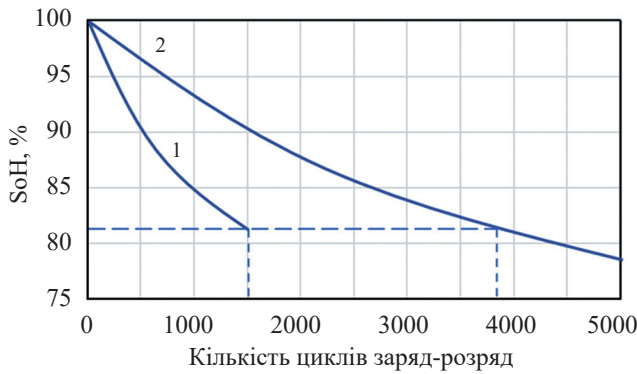


Рис. 5. Залежність SoH акумуляторної батареї від кількості циклів заряд-розряд при DoD 100% (1) та 50% (2) [14]

а значить глибину розряду (*depth of discharge, DoD*) слід вважати 100%. Загальний ресурс акумуляторної батареї можна вимірювати кількістю повних циклів заряду-розряду, тобто при глибині розряду 100%. Якщо  $DoD < 100\%$ , то кількість часткових циклів перераховується по відношенню до повних.

Дослідження показали, що SoH літійового акумулятора залежить від кількості циклів заряду та розряду акумулятора та DoD. З рис. 5 видно, що за однакового рівня SoH при меншому рівні DoD кількість циклів заряд-розряд акумулятора є більшою. При функціонуванні з  $DoD = 50\%$  доступна ємність акумуляторної батареї, як і запас ходу, удвічі менша порівняно з експлуатацією при  $DoD = 100\%$ , але за таких умов у понад два рази збільшується кількість циклів заряд-розряд, а отже ресурс батареї також збільшується.

Як можна побачити на рис. 5, після 1500 повних циклів заряду-розряду втрата ємності складає 18% від номінальної ( $SoH = 82\%$ ). При частковому циклі заряд-розряд з  $DoD = 50\%$ , тобто при використанні половини ємності акумулятора, втрата 18% ємності настає після 3750 таких циклів. Оскільки за кількістю енергії повний цикл дорівнює двом неповним з  $DoD = 50\%$ , то наявний приріст у 750 таких неповних циклів, або ж 375 повних. Приріст ресурсу акумуляторної батареї при такому частковому циклі складає 20%.

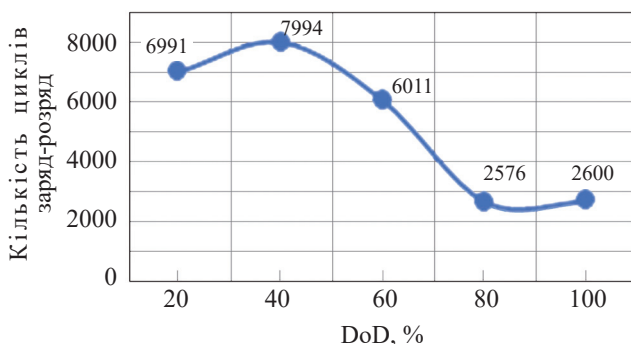


Рис. 6. Залежність кількості циклів заряд-розряд акумуляторної батареї до втрати певної ємності від глибини розряду [19]

Результати дослідження [19] показали, що кількість повних циклів заряд-розряд акумулятора до втрати певної ємності становить 2600 (рис. 6). За таких самих умов експлуатації акумулятора, але при  $DoD = 60\%$  кількість циклів до втрати такої самої ємності дорівнює 6011, тобто при обмеженні робочої ємності величиною 40% від повної ємності приріст складає 3411 циклів. Максимально ефективною є експлуатація при  $DoD = 40\%$ , коли досягається найбільша кількість циклів заряд-розряд, що відповідає максимальному ресурсу батареї.

На основі попереднього аналізу можна зробити висновок, що збільшити ресурс акумуляторної батареї електромобіля можна шляхом обмеження рівня заряду-розряду. В електромобілі, запас ходу якого в декілька разів більший за необхідний денний запас, можна обмежувати рівень заряду шляхом недозарядження батареї і таким чином регулювати доступну користувачеві ємність залежно від його потреб.

#### Визначення меж часткового зарядно-розрядного циклу

Виробники електромобілів з великим запасом ходу з самого початку обмежують програмно ємність батареї, створюючи зони А та D (див. рис. 4) для того, аби з часом, коли батарея починає деградувати, використовувати цей резерв для компенсації втраченої ємності. Але, як показало дослідження [19], зниження доступної для використання ємності на 20% ( $DoD = 80\%$ ) не призводить до збільшення ресурсу акумулятора. Найефективнішим виявилось використання акумуляторної батареї в межах 40–80% від повної ємності. Отже, якщо у користувача немає потреби у використанні всієї доступної ємності, можна обмежувати рівень заряду батареї верхнім рівнем зони С або навіть нижче. Таке обмеження, скоріш за все, не завдаватиме проблем переважній більшості користувачів.

Також слід враховувати, що для кожного типу акумулятора є рекомендована виробником напруга зберігання, за якої акумулятор найменше деградуватиме у часі. Календарну деградацію необхідно брати до уваги при виборі діапазону доступної користувачеві ємності, оптимізувавши її так, щоб під час простою електромобіля рівень заряду максимально довго знаходився на рівні напруги зберігання, яка зазвичай близька до половини рівня заряду. Таке рішення створює передумови для збільшення терміну експлуатації батареї на десятки років незалежно від кількості циклів заряд-розряд.

Вікно RSoC охоплює діапазон рівня заряду SoC від 0 до 100%. Розмір вікна USoC, яке лежить в межах вікна RSoC, накладає деяке обмеження на доступну для користування ємність. Цей розмір залежить від базових налаштувань BMS, встановлених виробни-



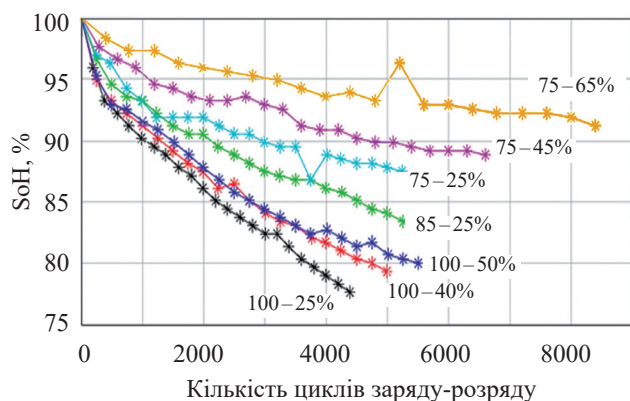


Рис. 7. Залежність рівня деградації акумуляторної батареї від кількості циклів заряду-розряду в різних діапазонах рівня заряду за температури 20°C [20]

ком електромобіля. В подальшому він може змінюватися системою BMS з огляду на такі фактори, як температура та SoH батареї. В межах вікна USoC знаходиться діапазон DoD, який залежить від того, як саме користувач електромобіля заряджає та розряджає батарею. Зі зменшенням діапазону DoD збільшується кількість можливих варіантів його розміщення відносно SoC (див. рис. 4). Як показує дослідження [19], на кількість циклів окрім DoD впливає також діапазон SoC, в якому використовується акумулятор. На **рис. 7** наведено графіки залежності рівня втрат ємності акумулятора від кількості циклів заряду-розряду при використанні акумулятора в певних межах рівня заряду за однакової температури. З цих залежностей видно, що в умовах однакового рівня деградації батареї кількість циклів заряду-розряду залежить від діапазону рівня заряду, причому різниця може бути суттєвою.

Оскільки один повний цикл розряду-заряду акумулятора відповідає певному пройденому шляху електромобіля, кількість таких циклів акумулятора від-

биває загальну величину пройденого шляху електромобіля в кілометрах. З рис. 7 було взято інформацію про кількість циклів акумулятора до настання рівня SoH = 90% при використанні у різних діапазонах рівня заряду. Як можна побачити з наведених у **таблиці** результатів, за однакової глибини розряду акумулятора у різних діапазонах рівня заряду кількість циклів заряд-розряд буде різною. Так, при DoD=60% кількість циклів заряд-розряд у діапазоні рівня заряду 85–25% буде більшою, ніж у діапазоні 100–40%, а при DoD=50% вона буде більшою у діапазоні 75–25%, ніж у діапазоні 100–50%. Тобто можна зробити висновок, що недозарядження акумулятора позитивно впливає на його ресурс.

**Висновки**

Отже, обмеження діапазону рівня заряду-розряду акумулятора позитивно впливає на продовження його ресурсу, що призводить до приросту кількості повних циклів заряду-розряду. Власники електромобілів з запасом ходу, більшим їхнього добового пробігу, можуть використовувати не повний цикл акумуляторної батареї, а частковий, залежно від потреб, тим самим значно продовжуючи її ресурс. Частковий цикл може знаходитися в різних діапазонах рівня заряду, і вибір цього діапазону також впливає на ресурс акумулятора.

На ресурс акумуляторної батареї електромобіля також може суттєво впливати система BMS, оскільки дисбаланс між величинами напруги комірок призводить до використання акумулятора у ширшому діапазоні рівня заряду: комірки з напругою, вищою за середню, довше працюють у більш високому діапазоні рівня заряду, а з меншою напругою — у більш низькому. Отже, необхідно шукати шляхи модернізації BMS для поліпшення показників точності вимірювання напруги комірок та струму балансування.

*Вплив умов реалізації зарядо-розрядних циклів акумуляторних батарей на їхній ресурс до втрати 10% ємності*

DoD, %	Діапазон заряду батареї, %	Кількість циклів до втрати ємності 10%	Запас ходу на одному заряді, км	Середній пробіг, тис. км	Приріст пробігу, %
100	100–0	700*	300	210	0
75	100–25	1000	225	225	7,1
60	100–40	1250	180	225	7,1
	85–25	2000	180	360	<b>71,4</b>
50	75–25	1500	150	225	7,1
	100–50	3000	150	450	<b>114,3</b>
30	75–45	5000	90	450	<b>114,3</b>
10	75–65	9000*	30	270	28,6

\*Значення отримані авторами апроксимацією наявних даних через відсутність інформації в першоджерелі [20]

Надалі потрібно розробляти автоматичні системи, які без участі користувача прогнозуватимуть дальність поїздки й на основі цього регулювати доступну для користувача ємність шляхом автоматичного припинення заряджання електромобіля. Наприклад, якщо користувач у робочі дні їздить одним і тим самим маршрутом, то можна спрогнозувати необхідну для цього маршруту кількість енергії та зарядити в батарею у два рази більше, ніж необхідно для поїздки. У вихідні дні користувач може мати довгі поїздки або ж взагалі нікуди не виїжджати. Цю інформацію може збирати вбудована в електромобіль система, яка з часом буде все точніше підлаштовуватись під користувача. Також ця система має враховувати рельєф місцевості та погодні умови, беручи цю інформацію із мережі Інтернет. Для кращого результату, щоб пришвидшити навчання системи, необхідно надати можливість користувачеві налаштувати її власноруч.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Скрибка Є. Електромобілі 2021: знову подвоїлись. *Нафторинок*, 28.03.2022. <http://www.naftorynok.info/stati/elektromobl-2021-znovu-podvolis>.
2. Закат эпохи ДВС: Где и когда полностью запретят автомобили с дизельными и бензиновыми двигателями. *Autoconsulting*, 5.07.2019 <http://www.autoconsulting.com.ua/article.php?sid=43899>
3. Granovskii M., Dincer I., Rosen M.A. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, vol. 159, iss. 2, 2006, pp. 1186–1193. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.086>
4. Guo J., Zhang X., Gu F., Zhang H., Fan Y. Does air pollution stimulate electric vehicle sales? Empirical evidence from twenty major cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 249, p. 119372. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119372>
5. Ota Y., Taniguchi H., Nakajima T. et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, iss. 1, 2012, pp. 559–564. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2167993>
6. Albatayneh A., Assaf M., Alterman D., Jaradat M. Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, vol. 24, iss. 1, pp. 669–680. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041>
7. Motoaki Y., Shirk M.G. Consumer behavioral adaption in EV fast charging through pricing. *Energy Policy*, vol. 108, 2017, pp. 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.051>
8. Keil P., Schuster S. F., Wilhelm J. et al. Calendar aging of lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, vol. 163, no. 9, pp. A1872–A1880. <https://doi.org/10.1149/2.0411609jes>
9. Kabir M. M., Demirocak D. E. Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review. *International Journal of Energy Research*, 2017, vol. 41, iss. 14, pp. 1963–1986. <https://doi.org/10.1002/er.3762>
10. Emma Woollacott. Electric cars: What will happen to all the dead batteries? *BBC News*, 27.04.2021 <https://www.bbc.com/news/business-56574779>
11. Новицький О. На який реальний пробіг варто розраховувати, купуючи вживане авто. *AUTO.RIA*, 30.01. 2019. [https://auto.ria.com/uk/news/first\\_auto/241867/na-kakoj-realnyj-probeg-stoit-rasschityvat-pokupaya-b-u-avtomobil.html](https://auto.ria.com/uk/news/first_auto/241867/na-kakoj-realnyj-probeg-stoit-rasschityvat-pokupaya-b-u-avtomobil.html)
12. Nissan leaf charging guide. *Pure-EV*, <https://www.pure-ev.co.uk/nissan-leaf-charging/>
13. Saldaña G., Martín J. I. S., Zamora I. et al. Empirical electrical and degradation model for electric vehicle batteries. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 155576–155589. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019477>
14. Millner A. Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles. *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, USA, Waltham, MA, 2010*, pp. 349–356. <https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619782>
15. Zeng X., Li M., Abd El-Hady D. et al. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials*, 2019, vol. 9, iss. 27. <https://doi.org/10.1002/aenm.201900161>
16. Miao Y., Hynan P., Jouanne von A., Yokochi A., Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 6, pp. 1074–1094. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
17. Alaoui C. Solid-state thermal management for lithium-ion EV batteries. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 98–107. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2214246>
18. Argue Ch. What 6,000 EV batteries tell us about EV battery health. *GEOTAB*, 7.08.2020. <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>
19. Han X., Lu L., Zheng Y. et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 2019, vol. 1, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005>
20. Xu B., Oudalov A., Ulbig A. et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>

Дата надходження рукопису  
до редакції 28.09 2023 р.

## Опис статті для цитування:

Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 9–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.09>

## Cite the article as:

Lipko D. O., Bondarenko O. F. Using partial charge-discharge cycle of battery to increase its lifespan. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 3–4, pp. 9–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.09>

USING PARTIAL CHARGE-DISCHARGE CYCLE OF BATTERY  
TO INCREASE ITS LIFESPAN

The work investigates a way to extend the lifespan of electric vehicle battery packs. Currently, there is a notable absence of solutions for recycling and disposal of lithium-based battery packs. Therefore, investigating possible ways to prolong the lifespan of existing electric vehicle battery packs becomes crucial to delay their disposal and allow more time to find new effective recycling solutions. This study analyzes the average daily mileage of vehicles in Ukraine and other countries, revealing that it does not exceed 50 km per day. This mileage is significantly lower than the full charge-discharge cycle range of any electric vehicle traction battery pack. The authors investigated the impact of limiting the depth of discharge of the battery pack on its lifespan and found that by restricting the depth of discharge to 50%, the battery lifespan could increase by 20% and more. Statistical data from other scientists were gathered and organized to analyze the influence of the depth of discharge on the battery lifespan across different charge levels during the charge-discharge cycle. It was shown that when using battery packs with the same depth of discharge but in different charge-discharge cycle ranges, the batteries degrade differently. In conclusion, it was noted that to increase the battery lifespan, it is essential to keep it in the optimal charge level range for as long as possible. The paper provides recommendations for identifying this optimal charge level range. It proposes ways for upgrading electric vehicle control systems that can increase the lifespan of their traction battery pack without setting substantial restrictions for users.

Keywords: electric vehicle, battery, state of charge, partial cycle, battery lifespan.

## REFERENCES

1. Skrybka Ye. [Electric vehicles 2021: doubled again]. *NaftoRynok*, 28 March 2022. <http://www.neftorynok.info/stati/elektromobl-2021-znovu-podvolis> (Ukr)
2. [ICE Sunset: Where and when diesel and gasoline engines will be completely banned]. *Autoconsulting*, 5.07.2019 <http://www.autoconsulting.com.ua/article.php?sid=43899> (Rus)
3. Granovskii M., Dincer I., Rosen M.A. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, vol. 159, iss. 2, 2006, pp. 1186–1193. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.086>
4. Guo J., Zhang X., Gu F., Zhang H., Fan Y. Does air pollution stimulate electric vehicle sales? Empirical evidence from twenty major cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 249, p.119372. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119372>
5. Ota Y., Taniguchi H., Nakajima T. et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, iss. 1, 2012, pp. 559–564. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2167993>
6. Albatayneh A., Assaf M., Alterman D., Jaradat M. Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, vol. 24, iss. 1, pp. 669–680. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041>
7. Motoaki Y., Shirk M.G. Consumer behavioral adaption in EV fast charging through pricing. *Energy Policy*, vol. 108, 2017, pp. 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.051>
8. Keil P., Schuster S. F., Wilhelm J. et al. Calendar aging of lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, vol. 163, no. 9, pp. A1872–A1880. <https://doi.org/10.1149/2.0411609jes>
9. Kabir M. M., Demirocak D. E. Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review. *International Journal of Energy Research*, 2017, vol. 41, iss. 14, pp. 1963–1986. <https://doi.org/10.1002/er.3762>
10. Emma Woollacott. Electric cars: What will happen to all the dead batteries? *BBC News*, 27.04.2021 <https://www.bbc.com/news/business-56574779>
11. Novytskyi O. [What real mileage should you expect when buying a used car]. *AUTO.RIA*, 30.01. 2019. [https://auto.ria.com/uk/news/first\\_auto/241867/na-kakoj-realnyj-probeg-stoit-rasschityvat-pokupaya-b-u-avtomobil.html](https://auto.ria.com/uk/news/first_auto/241867/na-kakoj-realnyj-probeg-stoit-rasschityvat-pokupaya-b-u-avtomobil.html)
12. Nissan leaf charging guide. *Pure-EV*, <https://www.pure-ev.co.uk/nissan-leaf-charging/>
13. Saldaña G., Martín J. I. S., Zamora I. et al. Empirical electrical and degradation model for electric vehicle batteries. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 155576–155589. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019477>
14. Millner A. Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles. 2010 *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, USA, Waltham, MA, 2010, pp. 349–356. <https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619782>
15. Zeng X., Li M., Abd El-Hady D. et al. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials*, 2019, vol. 9, iss. 27. <https://doi.org/10.1002/aenm.201900161>
16. Miao Y., Hynan P., Jouanne von A., Yokochi A., Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 6, pp. 1074–1094. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
17. Alaoui C. Solid-state thermal management for lithium-ion EV batteries. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 98–107. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2214246>
18. Argue Ch. What 6,000 EV batteries tell us about EV battery health. *GEOTAB*, 7.08.2020. <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>
19. Han X., Lu L., Zheng Y. et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 2019, vol. 1, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005>
20. Xu B., Oudalov A., Ulbig A. et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>