

УДК 629.1.04: 681.51

## ДИНАМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СТАРТЕРНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ В ПРОЦЕСІ ЇХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЗГІДНО ПРОЦЕДУР BATTERY CARE AND BATTERY MANAGEMENT

**Макогон О.А., к.т.н., доцент, Славуцький І.О., магістрант,  
Чурбанов М.І., курсант**

*(Військовий інститут танкових військ НТУ “ХПІ”)*

**Черепньов І. А., к.т.н., с.н.с. доцент, Колокольніков В. О., студент**  
*(Державний біотехнологічний університет)*

Досвід моніторингу технічного стану стартерних акумуляторних батарей (АБ) у світовому автопромі пропонує проведення процедур Battery Care and Battery Management.

Впровадження аналогічних процедур при експлуатації стартерних акумуляторних батарей, які використовуються на вітчизняній колісній та гусеничній техніці, надасть можливість оптимізувати графік проведення їх технічного обслуговування (ТО) та перейти від планово-попереджувальної системи ТО до проведення ТО за вимогою з контролем параметрів за рахунок отримання оперативної та достовірної інформації про поточний стан АБ.

Battery Care (англ. – догляд за акумулятором) можна розуміти як комплекс заходів, що дозволяє здійснювати догляд за акумулятором за допомогою спеціальних приладів, інструментів, програмного забезпечення, тощо.

Battery Management (англ. – управління акумулятором) можна розуміти як комплекс заходів, що дозволяє здійснювати контроль за експлуатацією акумулятором за допомогою спеціальних приладів, інструментів, програмного забезпечення, тощо [1].

Актуальність дослідження обумовлюється тим, що порядок визначення технічного стану стартерних акумуляторних батарей, які використовуються на вітчизняній колісній та гусеничній техніці, аналогічна процедурам Battery Management та Battery Status control, але сама процедура є низько ефективною в сучасних умовах та має ряд недоліків, які призводять до надмірних витрат людських і матеріальних ресурсів та значного недовикористання ресурсу АБ.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки акумуляторних трекерів – програмно-апаратних приладів, здатних здійснювати догляд за стартерних акумуляторних батарей та управління ним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій засвідчує, що відомі методи оперативної оцінки стану АБ ґрунтуються на характеристиках, отриманих шляхом непрямих вимірювань.

Основою таких методів є спеціальні прилади – аналізатори АБ. Принцип їх дії заснований на вимірюванні параметрів батареї (зазвичай, внутрішнього опору) на змінному струмі за 10-20 секунд.

Значення вимірюваних параметрів дозволяють оцінити ступінь деградації батареї і спрогнозувати значення резервної і номінальної ємності, струму

стартерного розряду АБ.

Існуючі методики контролю технічного стану акумуляторних батарей характеризуються великою тривалістю, негативним впливом глибокого розряду, а також істотними енергетичними і людськими витратами [2-4].

Експрес-діагностування дозволяє звести ці недоліки до мінімуму і базується на математичному описі АБ за допомогою параметрів, виходячи з їх властивостей [5-8].

Безумовно, ефективність таких заходів значно підвищиться за умови використання сучасних інформаційних технологій, електронних вимірювальних пристроїв, розробка динамічних інтерфейсів, створення баз даних, тощо.

У доповіді розглядається є розробка методики оцінки параметрів АБ та термінів їх служби на основі використання сучасних інформаційних технологій.

Існуюча на сьогодні технологія технічного обслуговування акумуляторних батарей при їх експлуатації дозволяє контролювати такі параметри АБ для динамічного розрахунку їх термінів служби (табл. 1).

Таблиця 1. – Діагностичні параметри АБ для динамічного розрахунку їх термінів служби

№ з/п	Найменування	Позначення	Одиниці виміру
1	саморозряд		
2	ЕРС	$\varepsilon$	В
3	Напруга,	U	В
4	Щільність електроліту		
5	Зарядний струм	I	А

Як бачимо, існуючий набір діагностичних параметрів є таким, що дає непряму інформацію щодо залишкової ємності, що розглядається як основний показник залишкового експлуатаційного ресурсу АБ.

Для динамічного розрахунку залишкового експлуатаційного ресурсу та оптимальних термінів проведення ТО збір таких параметрів вимагає великих часових затрат, зокрема розрядного струму розрядний струм  $I_n$ ; впродовж часу розряду  $t_p$  [9-11].

Вплив температури ( $T$ ) та навантаження автоматично враховується при розрахунку повної зарядної ємності ( $C$ ) та залишкову ємності ( $C_f$ ).

За аналогією, запропонованою у статті  $Q_{max}$  також обчислюється і оновлюється під час використання акумулятора.

За світовим досвідом експлуатації АБ визначення їх технічного стану аналогічно процедурам Battery Management та Battery Status control, тому авторам пропонується ввести такі узагальнені технічного стану АБ, що експлуатуються на колісній та гусеничній техніці.

*SOH* (State of Health) визначимо як ступінь працездатності акумулятора, що відображає поточний стан акумулятора в порівнянні з ідеальним.

*SOC* (State of Charge) визначимо як ступінь зарядженості акумулятора, що показує яка частина від повного заряду ще залишається накопиченою в акумуляторі.

Контроль *SOC* та *SOH* свинцево-кислотної батареї за допомогою такого приладу забезпечить моніторинг залишку заряду, а також видачу попередження

про необхідність заміни батареї. Значення ступеня зарядженості АБ має тенденцію до зниження при збільшенні терміну експлуатації АБ [3].

Однак, ці дані не є ідентичними зі значеннями щодо “здоров’я” АБ. З цього випливає висновок про актуальність та доцільність проведених досліджень. Цікавим буде зазначити, що замість терміну “електрорушійна сила” прийнято використовувати термін “напруга розімкненого кола”. Дослівний переклад виразу “Open-circuit voltage (OCV)” відповідає фізичній сутності електрорушійної сили.

Перспективним також можна вважати моніторинг таких важливих параметрів АБ як імпеданс, глибину розряду, залишкової ємності, тощо.

У якості “нових” параметрів пропонується розглянути такі:

*PassedCharge* – інтегрований заряд кулонівського лічильника під час заряду або розрядки акумулятора •

*SoC* – стан заряду в будь-який момент, визначений як

$$SOC = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (1)$$

де:  $Q$  – переданий заряд від стану повного заряду;  $DOD$  – глибина розряду;

$$DOD = 1 - SOC \quad (2)$$

$DOD_0$  – останнє зчитування  $DOD$  перед зарядом або розрядом;  $DOD_{charge}$  –  $DOD$  для повністю зарядженої батареї;  $Q_{start}$  – заряд, необхідний для  $DOD = DOD_0$ ;  $Q_{max}$  – максимальна хімічна ємність акумулятора;  $RM$  – залишкова потужність;  $FCC$  – повна потужність заряду, сума заряду, що переходить із повністю зарядженого стану.

Алгоритмом визначення  $SOC$  та  $SOH$  проілюстрований на прикладі батареї 12СТ-85Р.

Авторами був проаналізований світовий досвід з цього питання, тому далі пропонується використовувати прийняті міжнародні терміни із вказанням відомих аналогів.

Так, стан заряду ( $SOC$ ) свинцево-кислотної батареї, виражений у %, - це відношення залишкової ємності  $C_3$  ( $RC$ ) до фактичної (корисної) ємності  $C_\phi$  ( $FCC$ ):

$$SoC = \frac{RC}{FCC} = \frac{C_3}{C_\phi}, [\%] \quad (3)$$

де:  $RC$  (*remaining capacity*) – залишкова ємність  $C_3$ ;  $FCC$  (*full charge capacity*) – фактична (корисна)  $C_\phi$  ємність при поточній швидкості заряду або розряду та температурі;  $SoH$  контролює цю хімічну деградацію і визначається у відсотках (%) або частках:

$$SoH = \frac{FCCH}{C_n} = \frac{C_\phi^{25}}{C_n} \quad (4)$$

де:  $FCCH$  – це  $FCC$  при  $25^\circ C$  для проектного заряду або швидкості розряду.

У процес розряду або заряду АБ відбувається “передача” ємності. Тому пропонується ввести поняття *переданої* ємності  $C_n$  ( $Q_{passed}$ ), тобто ємності, яку віддала або прийняла АБ під час розряду/заряду відповідно. За логічно вважати, що  $C_n = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$ .

У міру старіння батареї її повна хімічна ємність  $C_{max}$  ( $Q_{max}$ ), як правило, нижча від проектної (номінальної) ємності через хімічну деградацію.

$C_{MAX}$  оцінюється у випадку, коли батарея знаходиться у стані спокою (наприклад, перед початком експлуатації) та обчислюється шляхом обчислень результатів двох вимірювань ЕРС  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$ , проведених у станах “спокою”.

Формалізовано стан “спокою” батареї може бути виражений через умову, що швидкість її розряду/заряду  $\frac{dV}{dt}$  не перевищить визначену, де  $V(t)$  – величина напруги АБ у часі. Наприклад, для АБ 12СТ-85Р доцільно задати умову  $\frac{dV}{dt} \leq 20 \frac{\mu V}{sec}$ . В лабораторних умовах стан “спокою” АБ досягає за декілька годин.

Тоді

$$SoC_1 = \frac{\varepsilon_1}{C_{max}} \quad (5)$$

$$SoC_2 = \frac{\varepsilon_2}{C_{max}} \quad (6)$$

З виразів (5) та (6) впливає значення  $C_{max}$ :

$$C_{max} = \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{|SoC_1 - SoC_2|} \quad (7)$$

Відповідне співвідношення у цьому випадку має вигляд:

$$C_{MAX} = \frac{C_{PASSED}}{SOC_1 - SOC_2} \quad (8)$$

де:  $C_{PASSED}$  – заряд, пройдений між  $SOC_1$  и  $SOC_2$ ,  $SOC_1 - SOC$  батареї у

спокої перед зарядженням / розрядженням;  $SOC_2$  –  $SOC$  відновленої батареї після зарядження / розрядження (рис. 1).

Тоді, передана ємність пов'язана буде із максимальною ємністю співвідношенням

$$C_{max} = \frac{C_n}{SoC_1 - SoC_2} \quad (9)$$

де:  $C_n$  – передана ємністю будемо розуміти ємність, виміряна між “спокою” батареї перед передачею ємності.

Таким чином, користуючись виразом (9) можливо отримати про стан АБ не проводячи повного циклу її розряду/заряду.

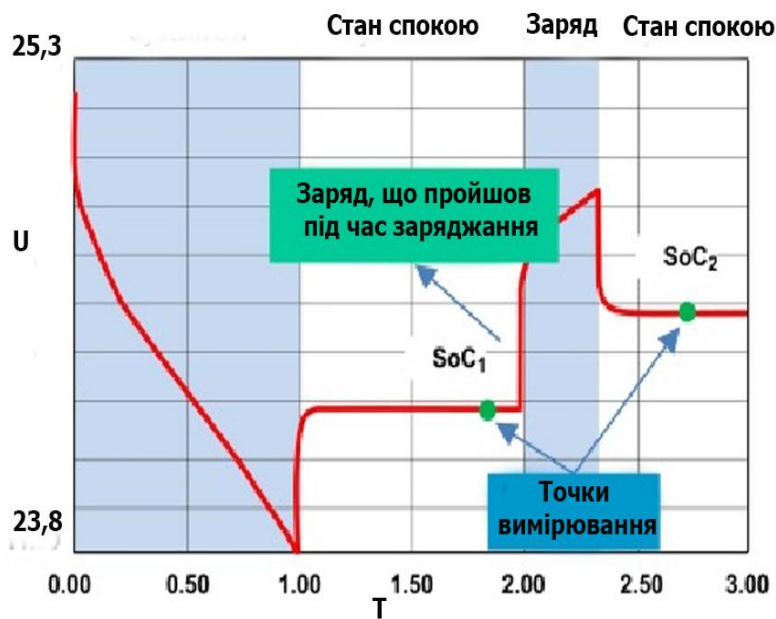


Рисунок 1 – Вимірювання  $SOC$  АБ.

Перед початком експлуатації, коли акумулятор знаходиться в режимі спокою та коли струм нижче порогового значення, обраного споживачем,  $SOC$  визначається з використанням виміряної напруги та попередньо заданої таблиці відношень ЕРС до  $SOC$  з врахуванням температурної компенсації. Ці дані є унікальними для даного типу акумулятора та хімічного складу.

Під час заряджання та розряджання  $SOC$  постійно розраховується з використанням  $C$  та  $C_f$  за рекурентними залежностями, а  $SOH$  розраховується з використанням  $C^{25}$  та проектної ємності.

Розрахунки  $SOC$  и  $SOH$  залежать від точної оцінки  $C$  та внутрішнього опору.  $R_{вн}$ . Додамо, що при проведенні діагностування змінним струмом, що широко застосовується у сучасних автомобільних приладах експрес-діагностування, аналогіє  $R_{вн}$  вважається імпеданс батареї  $R_{BAT}$ .

При прикладенні зовнішнього навантаження імпеданс може бути обрахований вимірюється за законом Ома для повного кола шляхом знаходження різниці між виміряною напругою під навантаженням і ЕРС,

специфічною для поточного сучасному стані заряду  $SoC$  та з врахуванням температури АБ.

Після розрахунку  $C_{MAX}$  одне і теж його значення використовується для розрахунку  $SOC$  и  $SOH$  під час заряджання/розряджання до тих пір, доки не буде виконане наступне оновлення  $C_{MAX}$ .

Аналогічним чином  $R_{BAT}$  оцінюється за рівнянням:

$$R_{BAT} = \frac{U - \varepsilon}{I} \quad (10)$$

де:  $U$  – напруга батареї, В;  $\varepsilon$  – електрорушійна сила, В;  $I$  – струм заряду / розряду.

Напруга акумулятора вимірюється постійно, навіть при відсутності навантаження. Безперервне вимірювання напруги використовується для оновлення інформації про поточний стан заряду. Потім, коли навантаження прикладене, методом підрахунку визначається результуючий заряд, що проходить через систему “АБ–треккер” у прямому або зворотньому напрямку.

Після зняття навантаження батареї дають деякий час на відновлення, і напруга вимірюється знову. Використовуючи дані двох вимірювань напруги і результати підрахунку сумарного заряду, можна визначити максимальну ємність акумулятора. Також можна розрахувати поточний імпеданс, ґрунтуючись на вимірюваному струмі, напрузі холостого ходу з поправками на температуру і стан заряду. Зазначимо, що термін “доступна ємність” визначається як ємність, яку АБ має у поточних умовах. Фактичну ємність визначають на повністю зарядженій АБ при постійній температурі  $T = 25 \pm 2$  °С. При таких умовах виконується співвідношення  $C_d = C_\phi$ . В інших умовах фактичною ємністю буде розрахункова величина  $k C_d$  ( $k$  – коефіцієнт, який враховує зміну ємності АБ в залежності від температури [12-14]).

Технічна реалізація методики динамічний моніторинг технічного стану стартерних акумуляторних батарей в процесі їх життєвого циклу згідно процедур *Battery care and Battery management* може бути реалізований за допомогою акумуляторного треккера – програмно-апаратного приладу, здатного здійснювати догляд за акумулятором та управління ним.

В якості прототипу мікросхеми для програмної реалізації моніторингу процедур *Battery Care and Battery Management* пропонується використати мікросхему типу *bq29312A* [15].

Таким чином, застосування процедур *Battery Care and Battery Management* протягом терміну експлуатації АБ надасть змогу збільшити період та зменшити обсяг проведення певної кількості операцій при проведенні ТО.

### Список використаних джерел

1. Гумелёв В.Ю., Кочуров А.А. Факторы, влияющие на срок службы аккумуляторных батарей // Исследования в области естественных наук. 2013. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://science.snauka.ru/2013/05/4946>

2. Свинцовые стартерные аккумуляторные батареи: руководство. – М.: Воениздат, 1983. – 184 с.
3. Юров Ю.Ю., Постников А.А., Гумелёв В.Ю. Краткая оценка методов диагностирования свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. // Современная техника и технологии. – 2015. – № 12 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2015/12/8775>.
4. Кочуров А. А. Теоретические основы решения проблемы увеличения сроков службы аккумуляторных батарей при хранении и повышения эффективности способов их восстановления / А. А. Кочуров, Н. П. Шевченко, В. Ю. Гумелев. – Рязань: РВАИ, 2009 – 249 с.
5. Valve-Regulated Lead-Acid Batteries [Электронный ресурс] / Patrick T. Moseley, Jurgen Garche, C. D. Parker, D. A. J. Rand. – Amsterdam: Elsevier B. V., 2004. – URL: <http://bookree.org/reader?file=676368&pg=1>.
6. Метод оперативной диагностики доступной емкости свинцовых аккумуляторов (батарей) / А. А. Алешкин и [др.] // Электрохимическая энергетика. – 2013. – № 1. – С.46–53.
7. Постников А.А., Юров Ю.Ю., Гумелёв В. Ю. Оценка и выбор параметров для контроля технического состояния аккумуляторных батарей / А.А. Постников // Научный резерв. – Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В. Ф. Маргелова. – 2018. – № 1(1). – с.54-59.
8. Battery Council International, Lead Acid Batteries: [http://batteryCouncil.org/?page=Lead\\_Acid\\_Batteries](http://batteryCouncil.org/?page=Lead_Acid_Batteries)
9. Ольховіков С.В. Оцінка технічного стану хімічних джерел струму / С.В. Ольховіков // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХВУ, 2004. – Вып. 9. – С. 114-123.
9. Вайлов, А.М. Автоматизация контроля и обслуживания аккумуляторных батарей / А.М. Вайлов, Ф.И. Эйгель. – М.: Связь, 1985. – 156 с.
10. Метод оперативной диагностики доступной емкости свинцовых аккумуляторов (батарей) / А. А. Алешкин и [др.] // Электрохимическая энергетика. – 2013. – № 1. – С.46–53.
11. Lead-acid batteries: The growing need for monitoring state-of-charge and health[Электронный ресурс] // Electronic Products. Cambridge, MA – URL: <https://www.electronicproducts.com/lead-acid-batteries-the-growing-need-for-monitoring-state-of-charge-and-health/>
12. Battery University, How to Measure State-of-Charge [On-line]: [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_measure\\_state\\_of\\_charge/](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge/)
13. Helen Makogon, Roman Suchko, Viktor Moskalenko, Igor Kalinin1, Sergiy Burdin, Viktoriia Iksarytsia, Application of the Correlation Analysis Mathematical Apparatus for Determination the Lead–acid Batteries Management and Status Control Minimum Diagnosis // Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 129-135.
14. Simon Wen. Impedance Track™ Gas Gauge for Novice, Application Report (SLUA375), [On-line]: Texas Instruments, Jan 2006: <http://www.ti.com/lit/an/slua375/slua375.pdf>