

## МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

УДК 620.91

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-66-2-1

СКИБА М. Є., МАРТИНЮК В. В.,  
РАДЕЛЬЧУК Г. І., ТИМОЩУК Р. В.  
Хмельницький національний університет

### ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*У роботі запропонована автоматизована система діагностування стану накопичувачів електроенергії. Запропоновано підвищити достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії шляхом використання частотних та часових характеристик накопичувачів електроенергії. Встановлено, що достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії буде максимальною, якщо математичні моделі перехідного опору та перехідної провідності накопичувачів електроенергії з високою описують їх виміряні характеристики перехідного опору та перехідної провідності.*

*Keywords: система діагностування стану накопичувачів електроенергії, частотні та часові характеристики, достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.*

SKYBA M., MARTYNYUK V.,  
RADELCHUK G., TYMOSCHUK R.  
Khmelnitsky national university

### INCREASING THE RELIABILITY OF AUTOMATED DIAGNOSIS OF ELECTRICITY ACCUMULATORS

*Of all the secondary energy sources available for electric vehicles (EM), hybrid electric vehicles (GETs) and portable electronic devices such as smartphones and laptops, the use of lithium-ion (Li-ion) batteries is the most promising. Compared to other energy sources, lithium batteries have some unique advantages, for example, these batteries have a higher specific energy, have a minimal memory effect, provide the best ratio of energy to weight, and have a low self-discharge at idle.*

*The state of health (SOH) of electricity storage devices has recently become increasingly important, as electricity storage devices become obsolete over time and their parameters and characteristics deteriorate. The main consequences of the aging of electricity storage devices are a decrease over time in their capacity and an increase in their internal resistance.*

*Methods for diagnosing the level of charge and the level of efficiency of energy storage devices are similar. The difference between diagnosing the level of charge and diagnosing the level of efficiency of energy storage devices is that when the charge level decreases, it is necessary to react quickly and carry out the nucleation of the electrical energy storage device.*

*Instead, the process of aging (degradation) of drives is slower, but irreversible. The rate of aging (degradation) of electricity storage depends on various factors, such as operating conditions, charging and discharging modes, as well as the quality of electricity storage.*

*In the process of diagnosing the level of efficiency of electricity storage devices, measurements of capacity and active resistance of electricity storage losses are carried out. When building a system for diagnosing the condition of electricity storage, it is necessary to take into account the parameters that reflect their technical condition. The nominal indicators of the technical condition of electricity storage devices include their capacity C and active resistance R.*

*An automated system for diagnosing the state of electricity storage devices is proposed in the work. It is proposed to increase the reliability of diagnosing the state of electricity storage devices by using the frequency and time characteristics of electricity storage devices. It is established that the reliability of the process of diagnosing the state of electricity storage will be maximum if the mathematical models of transient resistance and transient conductivity of high energy storage describe their measured characteristics of transient resistance and transient conductivity.*

*Keywords: system for diagnosing the state of electric storage, frequency and time characteristics, the reliability of the process of diagnosing the state of electric storage.*

**Вступ.** Серед усіх вторинних джерел енергії, доступних для електромобілів (ЕМ), гібридних електричних транспортних засобів (ГЕТЗ) та для портативних електронних пристроїв, таких як смартфони та ноутбуки, використання літій-іонних (Li-ion) батарей є найбільш перспективним. Порівняно з іншими варіантами джерел енергії, літєві батареї мають деякі унікальні переваги [1; 2], наприклад ці батареї мають вищу питому енергію, мають мінімальний ефект пам'яті, забезпечують найкраще співвідношення енергії до ваги, а також мають низький саморозряд при простой [3].

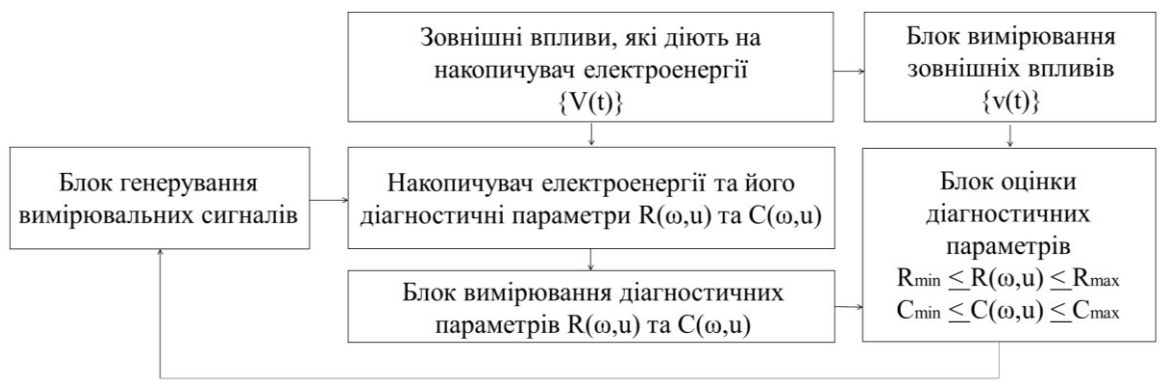
Рівень працездатності (англомовний термін state of health – SOH) накопичувачів електроенергії останнім часом стає все більш важливим, тому що накопичувачі електроенергії із часом старіють, а їх параметри і характеристики погіршуються. Основними наслідками старіння накопичувачів електроенергії є зменшення з часом їх ємності та зростання їх внутрішнього опору.

Методи діагностування рівня заряду та рівня працездатності накопичувачів електроенергії є подібними. Різниця між діагностуванням рівня заряду та діагностуванням рівня працездатності накопичувачів електроенергії полягає в тому, що при зменшенні рівня заряду необхідно швидко реагувати і здійснювати заряджування накопичувача електроенергії.

Натомість процес старіння (деградації) накопичувачів є більш повільним, але незворотнім. Швидкість старіння (деградації) накопичувачів електроенергії залежить від різних факторів, таких як умови експлуатації, режими заряджування та розряджування, а також якості накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування рівня працездатності накопичувачів електроенергії проводяться вимірювання ємності та активного опору втрат накопичувачів електроенергії. При побудові системи діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати параметри, які відображують їх технічний стан. До номінальних показників технічного стану накопичувачів електроенергії відноситься їх ємність  $C$  та активний опір  $R$ .

**Загальна структурна схема автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії.** В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії необхідно враховувати частотної дисперсію та не лінійність їх ємності  $C(\omega, u)$  та активного опору  $R(\omega, u)$ . Загальна структурна схема системи діагностування стану накопичувачів електроенергії зображена на рис. 1.



**Рис. 1. Загальна структурна схема автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії**

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії блок генерування вимірювальних сигналів подає на накопичувач електроенергії вимірювальну напругу  $u_0(t)$  або вимірювальний струм  $i_0(t)$ . Оточуюче середовище впливає на накопичувач електроенергії через зовнішні впливи  $\{v(t)\}$ .

Блок вимірювання діагностичних параметрів вимірює параметри накопичувача електроенергії ємності  $c(\omega, u)$  та активного опору  $r(\omega, u)$ , відповідно. Блок вимірювання зовнішніх впливів, які діють на накопичувача електроенергії, вимірює множину зовнішніх впливів  $\{v(t)\}$ .

Виміряні діагностичні параметри накопичувача електроенергії  $c(\omega, u)$  та  $r(\omega, u)$  та множина зовнішніх впливів  $\{v(t)\}$  поступають на блок оцінки діагностичних параметрів, який визначає оцінку  $Q$  (накопичувач електроенергії є справним або несправним). Процес діагностування стану накопичувачів електроенергії може відбуватись у стаціонарному режимі діагностування або у нестаціонарному режимі діагностування накопичувачів електроенергії.

Найпростіша математична модель процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі діагностування побудована на вимірюванні ємності  $C$  та активного опору  $R$  накопичувача електроенергії один лише раз. В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо вимірюванні ємності  $c$  та активного опору  $r$ .

В основі найпростішої математичної моделі процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії лежить дві гіпотези.

1. Першою гіпотезою  $H_0$  є гіпотеза, що в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії виявили його працездатний стан:

$$H_0: c \in [C_H, C_B] \cap r \in [R_H, R_B], \quad (1)$$

де  $C_H, C_B$  та  $R_H, R_B$  – нижня і верхня межі ємності та активного опору відповідно  $c$  і  $r$ .

2. Другою гіпотезою  $H_1$  є гіпотеза, що в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії виявили його непрацездатний стан:

$$H_0: c \notin [C_H, C_B] \cap r \notin [R_H, R_B]. \quad (2)$$

Достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії дорівнює добутку методичної достовірності процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії на інструментальну достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії.

Методична достовірність процесу діагностування стану накопичувачів електроенергії дорівнює відношенню кількості показників технічного стану, які визначаються в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії до загальної кількості показників діагностування стану накопичувачів електроенергії.

На основі аналізу найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі можна зробити висновок, що вимірювання ємності  $C$  та активного опору  $R$  накопичувача електроенергії здійснюється один лише раз. Тому найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії характеризується низькою методичною достовірністю діагностування. Низька методична достовірністю діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії пояснюється зміною ємності  $C \neq \text{const}$  та активного опору  $R \neq \text{const}$  в процесі експлуатації накопичувачів електроенергії.

Для найпростішої математичної моделі процесу діагностування технічного стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі діагностування кількість показників дорівнює  $N_1 = 2$  (ємність та активний опір).

В процесі експлуатації накопичувачів електроенергії частотна дисперсія та нелінійність ємності  $C(\omega, u)$  та активного опору  $R(\omega, u)$  накопичувачів електроенергії є аналогічним великій кількості параметрів, які характеризують технічний стан накопичувачів електроенергії.

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо  $N \neq N_1$  і  $N \gg N_1$ , тому методична достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії для найпростішої моделі діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі буде набагато меншою ніж одиниця:

$$D_M = \frac{2}{N} \ll 1. \quad (3)$$

До складу інструментальної достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі входить ймовірність помилки першого  $\alpha$ , а також ймовірність помилки другого роду  $\beta$ . Вирази для визначення ймовірності помилки першого  $\alpha$  та ймовірності помилки другого роду  $\beta$  описуються рівняннями (4) та (5). Необхідно відмітити, що ймовірності помилки першого  $\alpha$  та ймовірності помилки другого роду  $\beta$  потрібно розраховувати для ємності  $C$  та активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії:

$$\alpha_c = \int_{C_H}^{C_B} f(c) \left( \int_{-\infty}^{C_H-c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc + \int_{C_H}^{C_B} f(c) \left( \int_{C_H-c}^{\infty} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc; \quad (4)$$

$$\beta_c = \int_{-\infty}^{C_H} f(c) \left( \int_{C_H-c}^{C_B-c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc + \int_{C_B}^{\infty} f(c) \left( \int_{C_H-c}^{C_B-c} f(\delta_c) d\delta_c \right) dc, \quad (5)$$

де  $C_B, C_H$  – верхня та нижня межі для ємності  $C$  накопичувачів електроенергії;

$f(c)$  – вираз щільності ймовірності для ємності  $C$  накопичувачів електроенергії;

$f(\delta_c)$  – вираз щільності ймовірності похибки вимірювання ємності  $C$  накопичувачів електроенергії.

Вирази для визначення ймовірності помилки першого  $\alpha$  та ймовірності помилки другого роду  $\beta$  активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії описуються рівняннями (6) та (7), відповідно:

$$\alpha_r = \int_{R_H}^{R_B} f(r) \left( \int_{-\infty}^{R_H-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr + \int_{R_H}^{R_B} f(r) \left( \int_{R_H-r}^{\infty} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr; \quad (6)$$

$$\beta_r = \int_{-\infty}^{R_H} f(r) \left( \int_{R_H-r}^{R_B-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr + \int_{R_B}^{\infty} f(r) \left( \int_{R_H-r}^{R_B-r} f(\delta_r) d\delta_r \right) dr, \quad (7)$$

де  $R_B, R_H$  – верхня та нижня межі для активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії;

$f(r)$  – вираз щільності ймовірності для активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії;

$f(\delta_r)$  – вираз щільності ймовірності похибки вимірювання активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії.

У процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії отримуємо вираз загальної достовірності діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі, який записується у вигляді (8):

$$D_3 = D_M \cdot D_I = \frac{2}{N} \cdot (1 - \alpha - \beta) \ll 1. \quad (8)$$

В процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії оцінку якості діагностування стану накопичувачів електроенергії у стаціонарному режимі визначимо, використовуючи вираз середнього ризику діагностування стану накопичувачів електроенергії, який записується у вигляді (2.9):

$$\Psi \approx W_{1c}\alpha_c + W_{2c}\beta_c + W_{1r}\alpha_r + W_{2r}\beta_r, \quad (9)$$

де  $W_{1c}$ , та  $W_{1r}$  – коефіцієнти втрат, що виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії та обумовлені помилками 1-го роду для ємності  $C$  та активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії;

$W_{2c}$ , та  $W_{2r}$  – коефіцієнти втрат, що виникають в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії та обумовлені помилками 2-го роду для ємності  $C$  та активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії;

$\alpha_c$ , та  $\alpha_r$  – вирази імовірностей помилок 1-го роду для ємності  $C$  та активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії;

$\beta_c$ , та  $\beta_r$  – вирази імовірностей помилок 2-го роду для ємності  $C$  та активного опору  $R$  накопичувачів електроенергії;

Достовірність діагностування стану накопичувачів електроенергії можна підвищити, якщо використовувати їх частотні та часові характеристики.

**Програмне забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії.** Програмне забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії складається із трьох програм. Перша програма призначена для сигнального процесора. Структура програмного забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії зображена на рис. 2. Програма для сигнального процесора виконує обробку даних, які отримуються від діагностуючих каналів у режимі реального часу.

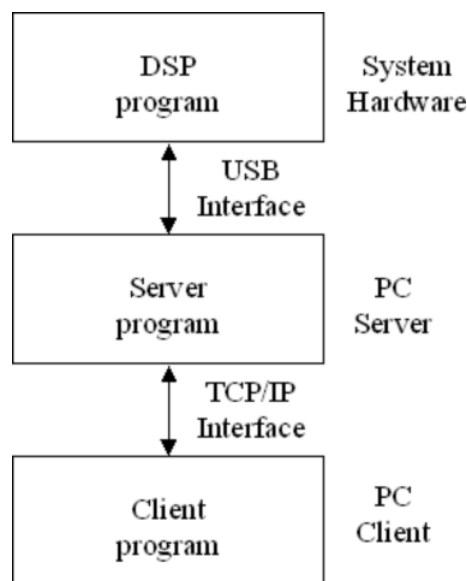


Рис. 2. Структура програмного забезпечення автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії

Друга програма виконує роль серверної програми. Ця програма дозволяє віддалене керування для багатьох користувачів через клієнтські програми, які здійснюють діагностування за допомогою незалежних каналів. Діагностуючі канали працюють незалежно і можуть керуватися за допомогою одного користувача.

Третя програма виконує роль клієнтської програми. Діагностування стану накопичувачів електроенергії виконується в автоматичному або в напівавтоматичному режимах. В автоматичному режимі модуль діагностуючих параметрів накопичувачів електроенергії виконує обробку даних без додаткових сигналів керування.

У напівавтоматичному режимі діагностування стану накопичувачів електроенергії програма здійснює цифрову обробку інформації під керівництвом оператора. Оператор системи може запускати або зупиняти незалежний діагностуючий канал.

У напівавтоматичному режимі можна перейти до наступного кроку програмного алгоритму процесу діагностування, використовуючи ручний режим роботи.

**Висновки.** В роботі запропоновано загальну структурну схема автоматизованої системи діагностування стану накопичувачів електроенергії, характеризується наступними перевагами:

- а) в процесі діагностування стану накопичувачів електроенергії проводяться вимірювання ємності та активного опору втрат накопичувачів електроенергії;
- б) діагностування стану накопичувачів електроенергії виконується в автоматичному або у напівавтоматичному режимах;
- в) у автоматичному режимі модуль діагностуючих параметрів накопичувачів електроенергії виконує обробку даних без додаткових сигналів керування;
- г) у напівавтоматичному режимі діагностування стану накопичувачів електроенергії програма здійснює цифрову обробку інформації під керівництвом оператора.

### **Література**

1. B. Bilgin, P. Magne, P. Malysz, Y. Yang, V. Pantelic, M. Preindl, A. Korobkine, W. Jiang, S. Member, M. Lawford, S. Member, and A. Emadi, "Making the Case for Electrified Transportation," IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 1, no. 1, pp. 4–17, 2015.
2. S. M. Lukic and A. Emadi, "Charging ahead," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 2, no. 4, pp. 22–31, 2008.
3. J. Cao and A. Emadi, "Batteries need electronics," Ind. Electron. Mag. IEEE, vol. 5, no. 1, pp. 27–35, 2011.
4. A. Emadi, "Transportation 2.0," Power Energy Mag. IEEE, vol. 9, no. 4, pp. 18–29, 2011.
5. D. Fregosi, S. Bhattacharya, and S. Atcitty, "Empirical battery model characterizing a utility-scale carbon-enhanced VRLA battery," 2011 IEEE Energy Convers. Congr. Expo., pp. 3541–3548, 2011.
6. X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," J. Power Sources, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
7. R. Ahmed, M. El Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong, and S. Habibi, "Reduced-Order Electrochemical Model Parameters Identification and SOC Estimation for Healthy and Aged Li-Ion Batteries. Part I: Parameterization Model Development for Healthy Batteries," IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 2, no. 3, pp. 659–677, 2014.
8. W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," J. Power Sources, vol. 258, pp. 321–339, 2014.

Надійшла / Paper received: 25.08.2020

Надрукована / Paper Printed : 01.12.2020