

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АКУМУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ. ЧАСТИНА II: ВЕРИФІКАЦІЯ

**Пушніцин Д. С., асп., Ніконенко Є. О., студ., Пересада С. М., д.т.н., проф.**  
*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** На сьогодні електричні акумулятори широко використовуються в автономному наземному електротранспорті та гібридних транспортних засобах [1]. Для ефективного використання ресурсу акумуляторних батарей (АКБ) необхідно мати достатньо точне відображення процесів, що протікають всередині батареї. Врахування всіх можливих процесів, що виникають під час роботи АКБ, суттєво збільшує необхідну обчислювальну потужність керуючого пристрою [2], що може бути критичним у високодинамічних системах на кшталт приводів електротранспорту. Модифікована модель Шеферда [3] є простотою з точки зору математичного опису батареї в якості джерела електричної енергії електричних та гібридних транспортних засобів [4]. При цьому дана модель дозволяє враховувати явища гістерезису, що виникають при частій зміні напрямку струму АКБ [5].

Метою даної роботи є ідентифікація параметрів моделі АКБ, а також її експериментальна верифікація.

**Матеріали дослідження.** Динамічна поведінка свинцево-кислотних АКБ описується системою 3-го порядку зі змінною структурою:

$$\left. \begin{aligned} U_{bt} &= E_0 - i_{bt} R_i - K_1 \frac{Q}{Q - i_t} i_t - K_2 \frac{Q}{Q - i_t} i_f + E_{\text{exp}} \\ \dot{i}_f &= (-i_f + i_{bt}) / T_f \\ \dot{i}_t &= i_{bt} / 3600 \\ \dot{E}_{\text{exp}} &= -E_{\text{exp}} V i_{bt} \end{aligned} \right| \text{при розряді } (i_{bt} > 0) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{bt} &= E_0 - i_{bt} R_i - K_1 \frac{Q}{Q - i_t} i_t - K_2 \frac{Q}{i_t + k_c Q} i_f + E_{\text{exp}} \\ \dot{i}_f &= (-i_f + i_{bt}) / T_f \\ \dot{i}_t &= i_{bt} / 3600 \\ \dot{E}_{\text{exp}} &= V |i_{bt}| (-E_{\text{exp}} + A) \end{aligned} \right| \text{при заряді } (i_{bt} < 0) \quad (2)$$

$$\text{SOC} = (i_t(0) - i_t) / Q_{\text{EN}} \quad (3)$$

де  $U_{bt}$  – напруга на клеммах АКБ,  $E_0$  – ідеальна ЕРС АКБ (В),  $K_1$  – поляризаційна константа (В/А·год),  $K_2$  – поляризаційний опір (Ом), причому приймається, що  $|K_1| = |K_2|$ ;  $Q$  – максимальна ємність (А·год),  $Q_{\text{EN}}$  – номінальна ефективна ємність (А·год),  $i_{\text{batt}}$  – струм АКБ,  $k_c$  – коефіцієнт, що визначає споживаний струм при повністю зарядженій АКБ,  $T_f$  – поляризаційна

стала часу,  $A$  і  $B$  – амплітуда і коефіцієнт сталої часу експоненційної частини кривої розряду відповідно,  $SOC$  – стан заряду,  $R_i$  – внутрішній опір.

За наведеними в [3] рекомендаціями, для визначення параметрів АКБ необхідно експериментально отримати криву розряду – залежність напруги від спожитого заряду АКБ, типовий вигляд якої зображено на рис. 1. При цьому необхідно зняти криву щонайменше для двох значень струму розряду. Для визначення поляризаційної сталої часу авторами пропонується виконати тест зі стрибкоподібним прикладанням струму.

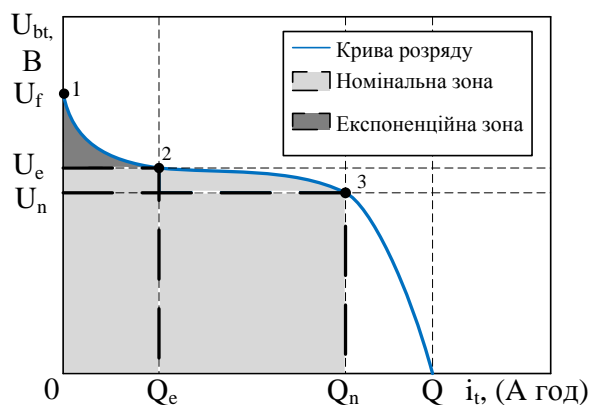


Рисунок 1 – Типова крива розряду

Функціональна схема експериментальної установки зображена на рис. 2 і представляє собою підвищувальний DC-DC перетворювач, що живиться від двох свинцево-кислотних АКБ ємністю  $7 \text{ А} \cdot \text{год}$  і номінальною напругою  $12 \text{ В}$  кожна, що з'єднані послідовно. В якості навантаження для перетворювача виступає емулятор електроприводу, що дозволяє прикладати до АКБ струм навантаження обох напрямків.

Порядок проведення тесту для визначення кривої розряду наступний: до початку експерименту кожна АКБ заряджена до напруги  $U_{bt} = 13 \text{ В}$ . В початковий момент часу прикладається навантаження, що відповідає стабілізованому струму  $i_{bt} = 1.5 \text{ А}$  ( $i_{bt} = 3 \text{ А}$ ), і підтримується до різкого спаду напруги (точка 3 на рис. 1).

Для розрахунку параметрів АКБ необхідно зафіксувати під час розряду характерні точки ( точки 1-3 на рис. 1), а саме: напругу в початковий момент часу при повному заряді  $U_f$ , напругу наприкінці експоненційної ділянки  $U_e$  та відповідний заряд  $Q_e$ , напругу наприкінці лінійної (номінальної) ділянки  $U_n$  та спожитий заряд  $Q_n$ .

Графіки залежності напруги АКБ від ступеня розряду, в перерахунку на одну АКБ, представлено на рис. 3. Визначені параметри для двох тестів представлено в табл. 1.

Розрахунок параметрів моделі отримується вирішенням наступної системи рівнянь, отриманої з (1) – (3)

$$B = 3/Q_e \quad (4)$$

$$U_f = E_0 - R_i \cdot i_{bt} + A$$

$$U_e = E_0 - R_i \cdot i_{bt} - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - Q_e} Q_e - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - Q_e} i_{bt} + A \cdot e^{-3} \quad (5)$$

$$U_n = E_0 - R_i \cdot i_{bt} - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - Q_n} Q_n - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - Q_n} i_{bt} + A \cdot e^{(-3 \cdot Q_n / Q_e)}$$

Результати розрахунку зведені в табл. 2. Використовуючи вирази (1) – (3), побудовано апроксимовані криві розряду АКБ при різних струмах навантаження, які показано на рис. 3.

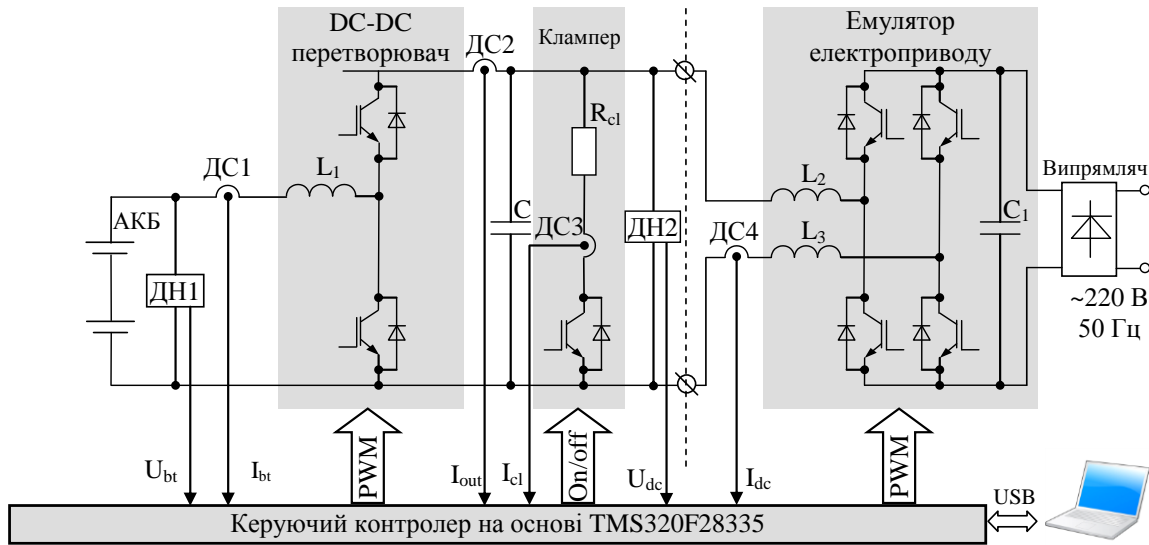


Рисунок 2 – Функціональна схема експериментальної установки

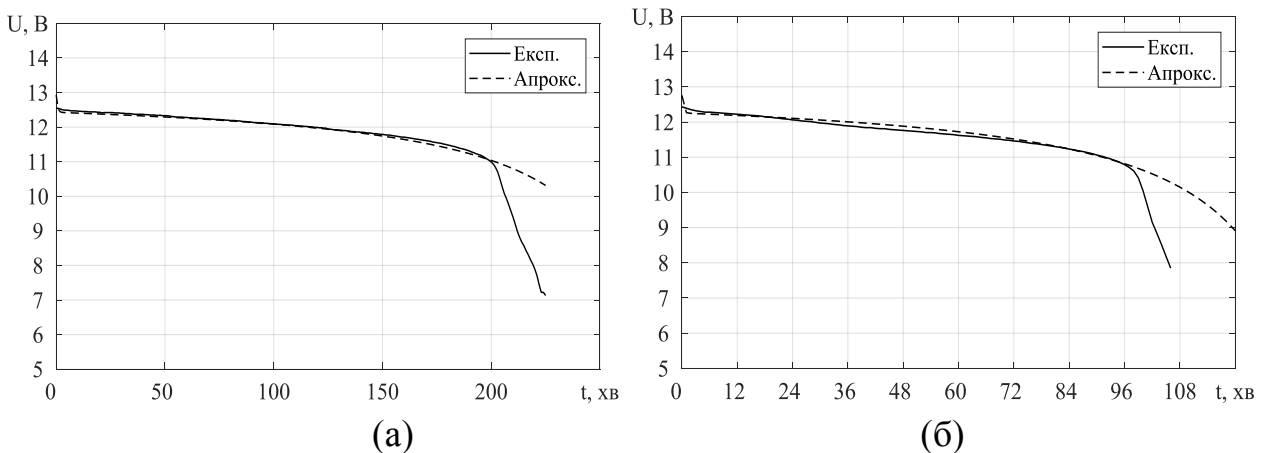


Рисунок 3 – Експериментальна і апроксимована криві розряду АКБ при  $i_{bt} = 1.5 \text{ A}$  (а) та при  $i_{bt} = 3 \text{ A}$  (б).

Для визначення сталої часу, а також для уточнення параметрів моделі, проводиться тест, що включає наступні стадії: розряд АКБ постійним струмом протягом 30 с (ділянка I), ненавантажений режим протягом 30 с (ділянка II) та заряд АКБ відповідним струмом упродовж 250 с (ділянка III). Початкова напруга обирається таким чином, щоб робоча точка під час всього експерименту не виходила за межі точок 2 і 3 на кривій розряду (рис. 1), а експоненційна складова напруги в початковий момент часу була нехтувано малою. На рис. 4 (а, б) зображено графіки перехідних процесів тестування для струмів 1 А та 1.5 А відповідно.

З отриманих графіків перехідних процесів визначено параметри моделі відповідно до рівнянь (1) – (3). Параметри зведені в табл. 2.

**Висновки.** Представлено верифікацію модифікованої моделі Шеферда для свинцево-кислотної АКБ. Проведено процедуру ідентифікації параметрів на

основі статичних та динамічних характеристик. Результуюча динаміка, що отримана під час експерименту, співпадає з результатами моделювання з достатньою точністю для використання в електротранспорті.

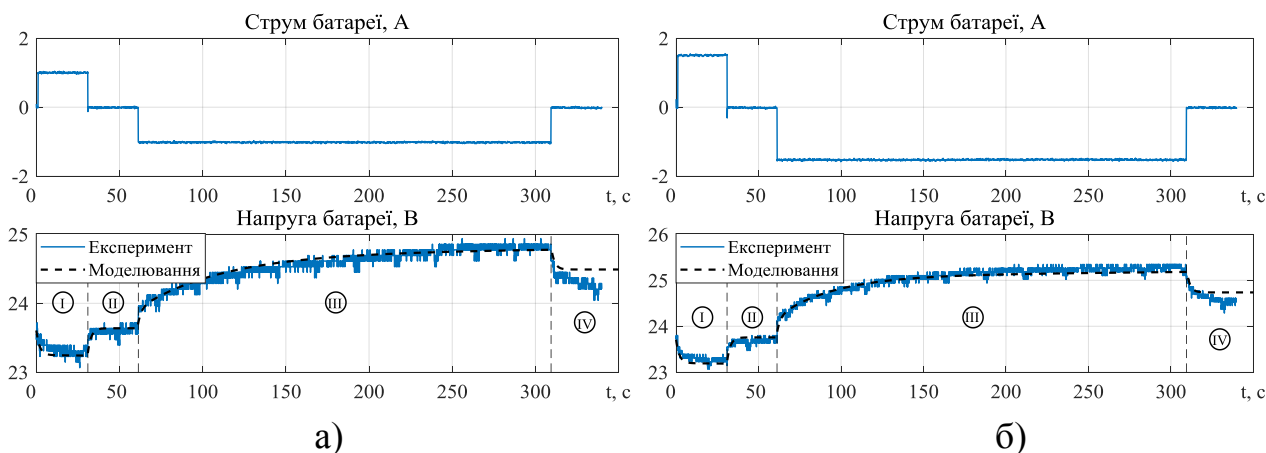


Рисунок 4 – Експериментальні графіки перехідних процесів напруги і струму двох АКБ при розряді-заряді зі струмом 1 А (а) та 1,5 А (б).

Таблиця 1 – Експериментальні параметри з кривої розряду

Струм розряду	Параметр				
	$U_f$ , В	$U_e$ , В	$Q_e$ , А год	$U_n$ , В	$Q_n$ , А год
1,5А	13	12,45	0,045	11	5
3А	13	12,35	0,04	10,77	4,85

Таблиця 2 – Ідентифіковані параметри АКБ

Параметр	Струм		Параметр	Струм		Параметр	Струм	
	1.5А	3А		1.5А	3А		1 А	1.5 А
$E_0$ , В	12.6	12.6	$Q$ , А·год	7.4	7,4	$T_f$ , с	2	2
$K_1$ , В/(А·год)	0.07 3	0.07 5	$A$ , В	0.4	0.5	$A$ , В	0.55	0.5
$K_2$ , Ом	0.07 3	0.07 5	$B$ , (А·год) <sup>-1</sup>	65	63	$B$ , (А·год) <sup>-1</sup>	60	60
3 кривої розряду						3 перехідного процесу		

#### Перелік посилань

1. Khaligh A. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art / A. Khaligh, Z. Li // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2010. – Vol. 59. – № 6. – P. 2806-2814.
2. Algorithms for Advanced Battery-Management Systems / N.A. Chaturvedi [et al.] // IEEE Control Systems Magazine. – 2010. – Vol. 30. – № 3. – P. 49-68.
3. Tremblay O. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / O. Tremblay // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – Vol. 3.
4. Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles / B.S. Bhangu [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2005. – Vol. 54. – № 3. – P. 783-794.
5. A novel rapid charger for lead-acid batteries with energy recovery / H.-J. Chiu [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21. – № 3. – P. 640-647.