

УДК 621.31:004.421

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/10>**Васюченко П.В.**

Українська інженерно-педагогічна академія

Волков І.І.

Українська інженерно-педагогічна академія

Крохмаль Д.Ю.

Українська інженерно-педагогічна академія

ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ У СЕРЕДОВИЩЕ MATLAB

Під час використання електричної енергії вкрай актуальним стає питання акумулювання електричної енергії. Враховуючи особливості використання електроенергії, необхідність підтримання балансу потужностей, потрібно все більше уваги приділяти підвищенню ефективності використання акумулювального обладнання, створенню нових технічних рішень, упровадженню сучасних високоефективних технологій у цей технологічний напрям. Перед науковцями і технічним фахівцями виникають питання щодо розробки нових технічних рішень, перевірки гіпотез, що виникають, запропонованих рішень, що дозволяють підвищити техніко-економічні показники використання акумуляторних систем на етапі як проектування, розробки та впровадження, так і функціонування та експлуатації.

Для зниження витрат на експериментальні дослідження, часу проведення таких досліджень доцільним є застосування методів математичного моделювання, створення математичної моделі, що описує експлуатаційні характеристики акумуляторної батареї.

Зважаючи на це, виникає необхідність в одержанні достовірної й оперативної інформації про поточний стан і про експлуатаційні характеристики АБ. Методи оперативної оцінки станів АБ ґрунтуються на характеристиках, отриманих побічно (у результаті аналізу параметрів пристрою). Для цього потрібна математична модель, що описує основні характеристики акумуляторної батареї.

Метою статті є розробка математичної моделі АБ і методики вибору параметрів математичної моделі, що дозволяє підвищити вірогідність достовірної оцінки експлуатаційних характеристик.

У статті розглянуто особливості математичного моделювання акумуляторних батарей у середовищі Matlab. З огляду на основні підходи до моделювання акумуляторних батарей, обрано метод опису даних, отриманих у результаті аналізу наявних варіантів. Здійснено порівняння результатів моделювання наявної і розробленої за результатами незалежного експерименту моделі.

Ключові слова: математичне моделювання, акумулювання енергії, акумуляторні батареї, середовище Matlab, модель акумуляторної батареї.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку нетрадиційної енергетики потенціал акумулювання електричної енергії має велике значення [1]. Розвиток електроніки сприяє збільшенню кількості портативної техніки. Так, з'являються нові пристрої, зростає потреба в компактних переносних пристроях. Акумуляторні батареї широко застосовуються як джерела живлення, тому для грамотної розробки систем із їх використанням необхідно здійснювати математичне моделювання.

Основною експлуатаційною характеристикою АБ є її номінальна ємність. Прямий вимір номінальної ємності пов'язаний із розрядом АБ, що займає багато часу й вимагає відключення АБ від системи, що живиться нею. На зниження роз-

рядної ємності акумуляторної батареї впливає внутрішній опір АБ, що є важливою характеристикою акумуляторної батареї, визначаючи продуктивність акумулятора. У наявних математичних моделях внутрішній опір вважається постійним, але на практиці він збільшується. На збільшення внутрішнього опору впливає ступінь зарядженості й температура, що призводить до швидкого падіння розрядної напруги і, як наслідок, до зниження розрядної ємності акумулятора.

Зважаючи на це, виникає необхідність в одержанні достовірної й оперативної інформації про поточний стан й експлуатаційні характеристики АБ. Методи оперативної оцінки станів АБ ґрунтуються на характеристиках, отриманих побічно (у результаті аналізу параметрів пристрою). Для

цього потрібна математична модель, яка описує основні характеристики акумуляторної батареї.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням хімічних джерел живлення займалися Н.В. Коровін, А.М. Скудін, Я.М. Скоков. У роботах К.К. Васильєва, М.Н. Служивого, В.В. Савенкова, А.Б. Сазанова наведені рішення моделювання, розробки та експериментальних досліджень електротехнічних систем акумулявання електричної енергії. Наведені переваги та недоліки тих чи інших видів акумуляторних батарей, їх електричні характеристики.

Постановка завдання. Метою статті є розробка математичної моделі АБ і методики вибору параметрів математичної моделі, що дозволяє підвищити вірогідність достовірної оцінки експлуатаційних характеристик.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Модель АКБ у середовищі Matlab

Батарейний блок реалізує узагальнену динамічну модель [2] (рис. 1).

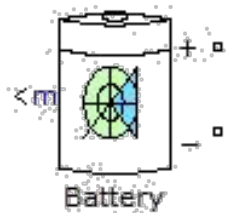


Рис. 1

Заряд і розряд динамічної моделі батареї перевіряються експериментально за допомогою чотирьох найбільш відомих типів акумуляторних батарей, як-от:

- нікель-кадмієвий;
- нікель-метал-гідридний;
- літій-іонний;
- свинцево-кислотний.

Особливістю цієї моделі є простота одержання експлуатаційних характеристик. Необхідно всього три параметри для введення в блок: номіналь напруга, В (Nominal Voltage); номінальна ємність, А/год (Rated Capacity); початковий стан заряду, % (Initial State-Of-Charge).

Еквівалентна схема батареї наведена на рисунку 2 [3].

Нижче представлені формули, що розраховують моделі розряду й заряду акумуляторних батарей у батарейному блоці [5]:

Для свинцево-кислотних АБ

Модель розрядки ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)}, 0 \right) \quad (1.1)$$

Модель зарядки ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)}, \frac{1}{a} \right) \quad (1.2)$$

Для літій-іонної АБ

модель розрядки ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (1.3)$$

Модель зарядки ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (1.4)$$

Для Нікель-кадмієвої і Нікель-метал-гідридної АБ

Модель розрядки ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)}, 0 \right) \quad (2.5)$$

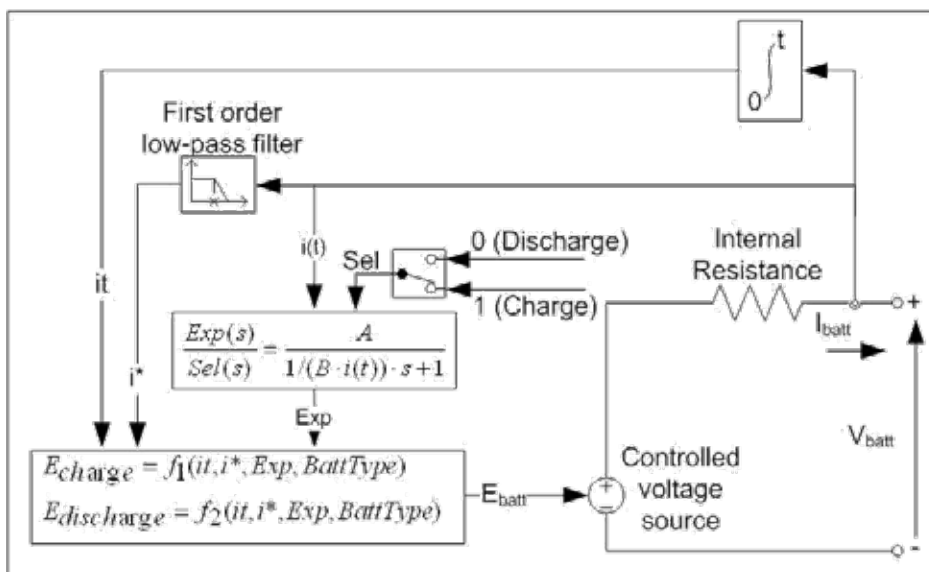


Рис. 2. Еквівалентна схема АКБ у середовищі MATLAB

Модель зарядки ($i^* < 0$)

$$f_2(i^*, i^*, i, E_{exp}) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|i| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i} \cdot i + \text{ExpPlace}^{-1} \left(\frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sud}(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (2.6)$$

де:

E_{batt} – нелінійна напруга (В);

E_0 – постійна напруга (В);

$\text{Exp}(s)$ – експонентна динаміка зони (В);

$\text{Sel}(s)$ – представляє режим роботи від акумулятора;

лятора;

$\text{Sel}(s) = 0$ під час розрядки батареї;

$\text{Sel}(s) = 1$ під час зарядки акумулятора;

K – постійна поляризації (Ач-Ач⁻¹);

i^* – низькочастотна поточна динаміка (А);

i – струм батареї (А);

i_t – витягнута ємність (Ач);

Y – експонентна ємність (Ач)⁻¹;

Q – максимальна ємність батареї (Ач);

A – експонентна напруга (В).

Параметри еквівалентної схеми можуть бути змінені, щоб представляти певний тип батареї, заснований на його розрядних характеристиках. Типова розрядна крива складається з трьох областей (рисунк 3) [4].

Перша область становить експонентне спадання напруги, коли акумулятор заряджений. Залежно від типу акумулятора ця область більш-менш широка.

Друга область показує напругу, яка може бути витягнута з акумулятора, поки напруга не впаде нижче номінальної напруги батареї.

Третя область показує повний розряд акумулятора, коли напруга падає дуже швидко.

Вкладка блок-параметрів

Тип батареї дозволяє вибрати тип АБ зі списку визначених моделей поведінки для чотирьох типів батарей, як-от:

- свинцево-кислотні;
- літій-іонний;
- нікель-кадмієві;
- нікель-метал-гідридні.

Номінальна напруга, В. Номінальна напруга представляє кінець лінійної зони характеристик розряду.



Рис. 4

Номінальна ємність, А/ч. Номінальна ємність – мінімальна ефективна ємність батареї.

Початковий стан заряду, %. Початковий стан заряду позначається як SOC. Якщо значення рівне 100%, то акумулятор є повністю зарядженим. А за умов значення 0% акумулятор є вирядженим («порожнім»). Цей параметр уживається як початкова умова для моделювання й не впливає на криву розряду.

Максимальна ємність, А/ч. Максимальна теоретична ємність, коли виникає розрив у напрузі батареї. Значення цього параметра, як правило, дорівнює 105% від номінальної ємності.

Номінальний струм розряду, А. Номінальний струм розряду, для яких була обмірювана крива розряду.

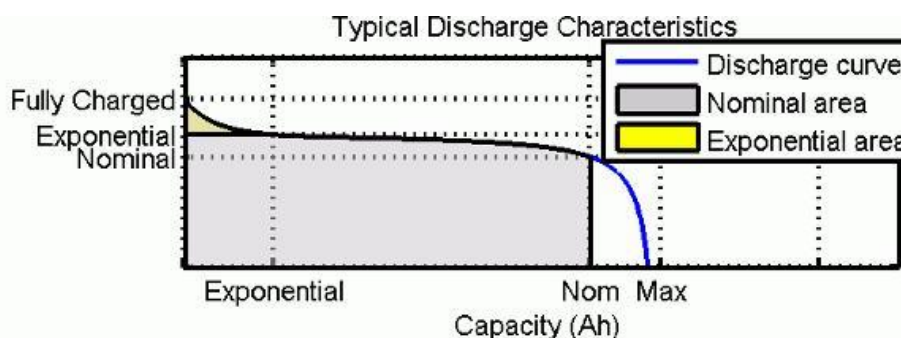


Рис. 3. Типова розрядна крива

Внутрішній опір, Ом. Внутрішній опір постійний під час циклів заряду й розряду й не міняється залежно від амплітуди струму.

Ємність за номінальної напруги, А/ч. Пропускна здатність із батареї, поки напруга не падає нижче номінальної напруги.

Експонентна зона. Напруга (U_{exp}) і ємність (Q_{exp}) властиві кінцю експонентної зони. Напруга визначається в інтервалі U_{nom} до U_{full} , ємність в інтервалі від 0 до Q_{nom} .

Вкладка виду характеристики розряду

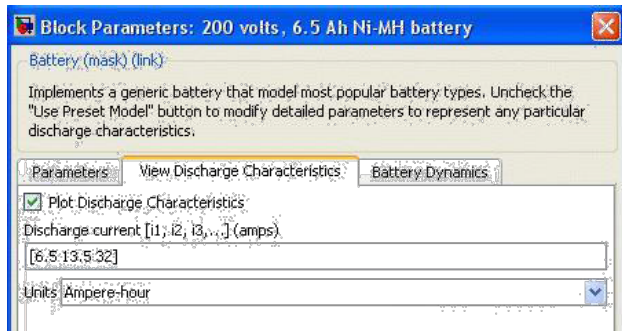


Рис. 5

Ділянка характеристики розряду (Plot Discharge Characteristics). Використовується під час вибору ділянок фігури, що містить два графіки. Перший графік показує номінальну криву розряду за умов номінального струму розряду, а другий – криві розряду в заданих струмах. Коли прапорець активний, то графа залишається включеною й оновлюється під час зміни параметра в діалоговому вікні.

Розрядний струм (Discharge current). Дозволяє задавати різні значення розрядного струму. Розрядні характеристики цих струмів представлені в другій частині графіка.

Одиниці виміру (Units). Ця графа дозволяє задавати час або ампер-годину як вісь X для графіка.

Вкладка динаміки батареї

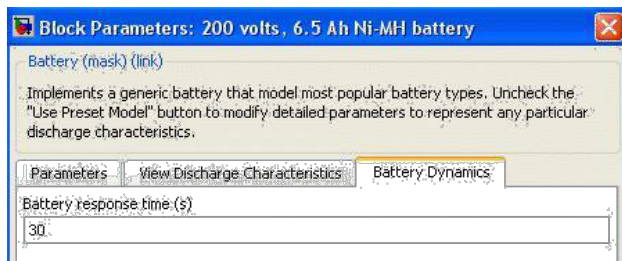


Рис. 6

Час відгуку батареї (на 95% від кінцевого значення). Це значення презентує динаміку напруги.

Пропонована модель заснована на певних допущеннях і обмеженнях [6]:

Допущення моделі:

- внутрішній опір передбачається постійним під час циклів зарядки й розрядки й не залежить від амплітуди струму;
- параметри моделі виводяться з розряду характеристики й ухвалюються рівними для зарядки;
- ємність батареї не змінюється залежно від амплітуди струму;
- температура не впливає на поведінку моделі;
- саморозряд відсутній;
- ефект пам'яті відсутній.

Обмеження моделі:

- мінімальна напруга батареї дорівнює 0 V, а максимальна – $2 \cdot E_0$.
- мінімальна ємність батареї – 0 А/год, а максимальна не може бути більше 100%.

У програмному забезпеченні Matlab/Simulink зроблене моделювання батарейного блока Battery. Моделювання зроблене згідно зі схемою, показаною на рисунку 7.

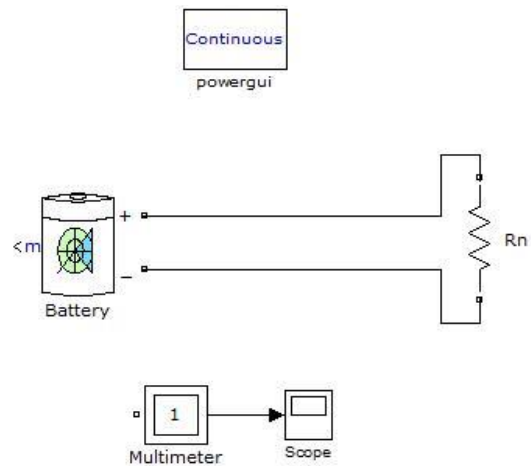


Рис. 7. Схема моделювання в блок Battery зі списку АБ обрані Нікель-метал-гідридна акумуляторна батарея

Згідно з практичним дослідженням батарейний блок опору в навантаженні $R_n = 1$ Ом. У блок внесені основні дані: U – Номінальна напруга, В; Q – номінальна ємність, Ач; SOC – початковий стан заряду, %. Це взято з практичного дослідження трьох акумуляторних батарей. Вихідним параметром є напруга на навантаженні U (В).

Для АБ типу ВТУ 3000 (1) початкові значення:
 $U = 1.113$ В
 $Q = 0,155$ Ач
 $SOC = 100\%$.

Результат виміру: графік залежності напруги на навантаженні U від часу t показано на рисунку 8.

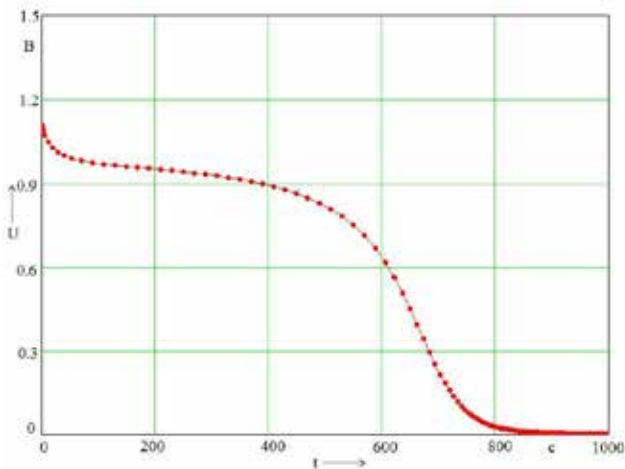


Рис. 8. Графіки залежності напруги на навантаженні U від часу t

Для АК типу ВТУ 3000 (2) початкові значення:
 $U = 1.147$ В
 $Q = 0,276$ Ач
 $SOC = 100\%$.

Результат виміру: графік залежності напруги на навантаженні U від часу t показано на рисунку 9.

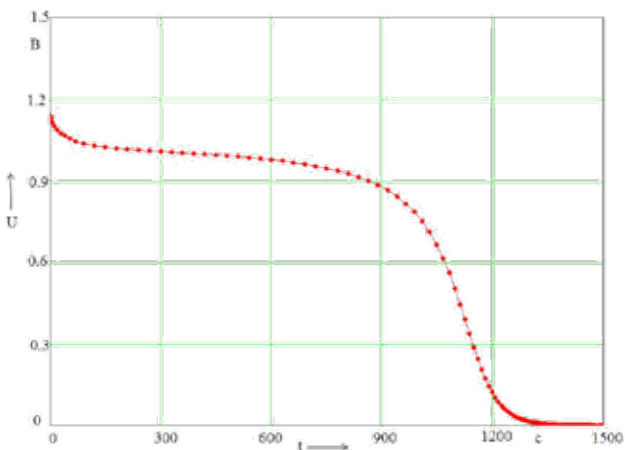


Рис. 9. Графіки залежності напруги на навантаженні U від часу t

Для АК типу Camelion 2100 mAh початкові значення:

$U = 1.156$ В
 $Q = 1,376$ Ач
 $SOC = 100\%$.

Результат виміру: графік залежності напруги на навантаженні U від часу t показано на рисунку 10.

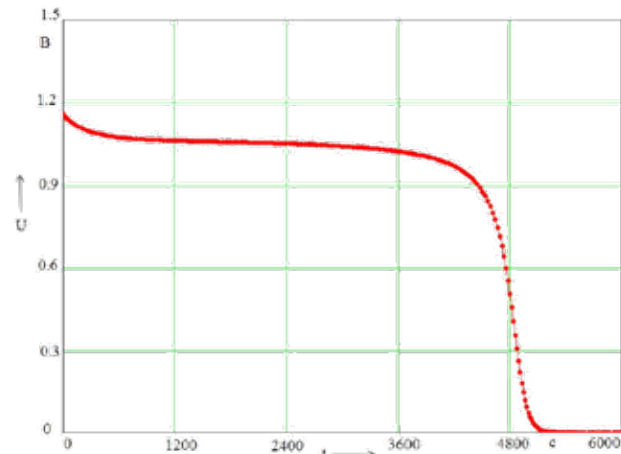


Рис. 10. Графіки залежності напруги на навантаженні U від часу t

Висновки. Батарейний блок у програмному забезпеченні Matlab/Simulink дозволяє моделювати 4 основні типи акумуляторних батарей. Особливістю цієї моделі є простота одержання експлуатаційних характеристик. Необхідно всього три параметри для введення в блок: номінальна напруга, номінальна ємність, початковий стан заряду. Але блок не враховує зміну внутрішнього опору.

Експериментальне моделювання обраних для дослідження нікель-метал-гідридних акумуляторних батарей показало, що математична модель адекватна протягом усієї розрядної характеристики.

Так, немає необхідності проводити експериментальне дослідження акумуляторної батареї, що займає більше часу й передбачає високу трудомісткість.

Список літератури:

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року України «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>
2. Tremblay, O.; Dessaint, L.-A.; Dekkiche, A.-I., A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE, pp. 284–289, 9–12 Sept. 2007.
3. Zhu, C., X. Li, L. Song, and L. Xiang, “Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack”. *Journal of Power Sources*. Vol. 223, pp. 155–164.
4. Saw, L.H., K. Somasundaram, Y. Ye, and A.A.O. Tay, “Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles”. *Journal of Power Sources*. Vol. 249, pp. 231–238.

5. Shepherd, C. M., Design of Primary and Secondary Cells – Part 2. An equation describing battery discharge. *Journal of Electrochemical Society*, Volume 112, July 1965, pp. 657-664.
6. Rynkiewicz, R., Discharge and charge modeling of lead acid batteries, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual, vol. 2, no., pp. 707-710 vol. 2, 14–18 Mar 1999.

Vasiuchenko P.V., Volkov I.I., Krokhmal D.Yu. FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF BATTERIES IN THE MATLAB ENVIRONMENT

When using electric energy, the issue of accumulating electric energy becomes extremely relevant. Taking into account the peculiarities of electricity use, the need to maintain a balance of capacities, it is necessary to pay more and more attention to improving the efficiency of using storage equipment, creating new technical solutions, and introducing modern fisocoeffective technologies in this technological direction. Scientists and technical specialists are faced with the development of new technical solutions, testing emerging hypotheses, proposed solutions that allow improving the technical and economic performance of battery systems, both at the design, development and implementation stage, and at the stage of operation and operation.

To reduce the cost of experimental research, the time of conducting such research, it is advisable to use mathematical modeling methods, create a mathematical model describing the operational characteristics of the battery.

In this regard, there is a need to obtain reliable and up-to-date information about the current state and operational characteristics of the AB. methods of operational assessment of the AB state are based on the characteristics obtained indirectly as a result of analyzing the device parameters. To do this, you need a mathematical model that describes the main characteristics of the battery.

The purpose of the article is to develop a mathematical model of AB and a methodology for selecting parameters of the mathematical model, which makes it possible to increase the reliability of a reliable assessment of operational characteristics.

The article considers the features of mathematical modeling of batteries in the Matlab environment. Taking into account the main approaches to battery modeling, a method for describing data obtained as a result of analyzing existing options was chosen. The results of modeling the existing model and the developed one with the results of an independent experiment are compared.

Key words: *mathematical modeling, energy storage, batteries, Matlab environment, battery model.*