

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.104.0009

Michał KRYSKOWIAK*, Amadeusz GAŚSIOREK*
Norbert MIELCZAREK*

UKŁAD EKSPERYMENTALNY MONITORUJĄCY STAN NAŁADOWANIA BATERII AKUMULATOROWEJ

W artykule zaprezentowano układ eksperymentalny umożliwiający monitorowanie stanu naładowania (SOC) konwencjonalnej baterii akumulatorowej typu kwasowo-ołowiowego. Opisano m.in. wybrane metody pozwalające oszacować stan naładowania. W następnej kolejności zaprezentowano, opracowane w ramach prowadzonych prac, algorytmy, które następnie zostały zaimplementowane w systemie procesorowym. Przedstawiono także zbudowany model symulacyjny pozwalający na dodatkową weryfikację poprawności funkcjonowania przedstawionego na łamach niniejszego artykułu rozwiązania.

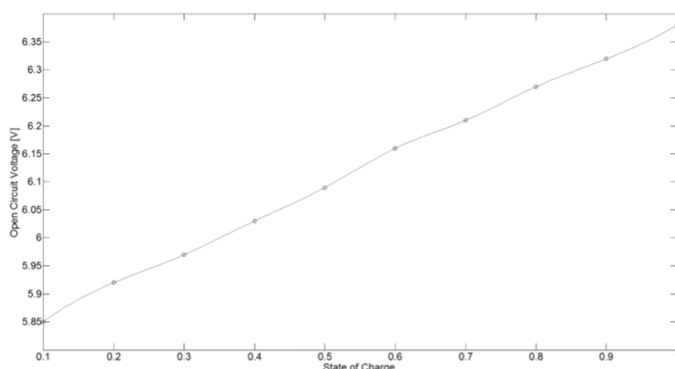
SŁOWA KLUCZOWE: bateria akumulatorowa, rezystancja wewnętrzna, stan naładowania (SOC).

1. WYBRANE METODY SZACOWANIA STANU NAŁADOWANIA AKUMULATORA KWASOWO-OŁOWIOWEGO

1.1. Metoda napięciowa

Metoda napięciowa, tzw. OCV (open circuit voltage method) bazuje na pomiarze napięcia na zaciskach baterii w stanie jałowym oraz charakterystykach dostarczanych przez producentów akumulatorów, które to przedstawiają zależność napięcia w stanie jałowym w funkcji stanu naładowania (rys. 1). Ten sposób może być wykorzystywany w praktyce tylko w przypadku konwencjonalnych akumulatorów kwasowo-ołowiowych, ze względu na kształt opisywanej charakterystyki (przykładowo dla ogniw litowych, czy też litowo – jonowych ma ona przebieg zbyt płaski w szerokim zakresie, uniemożliwiając tym samym poprawne oszacowanie stanu naładowania) [3]. Należy zaznaczyć, że poważnym ograniczeniem tej metody jest brak możliwości uwzględnienia spadku napięcia na rezystancji wewnętrznej, która to ulega zmianie w trakcie eksploatacji badanego obiektu, co dodatkowo ogranicza dokładność opisywanego rozwiązania.

* Politechnika Poznańska



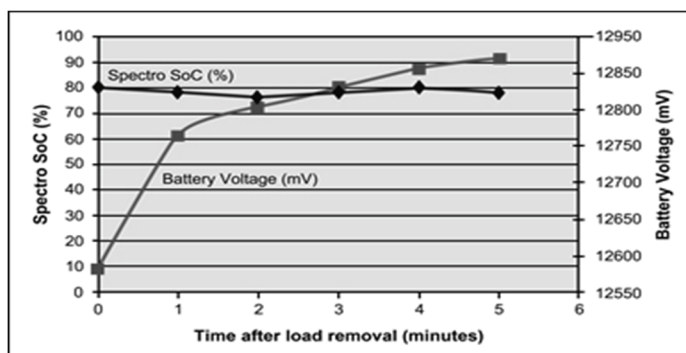
Rys. 1. Przykładowa charakterystyka napięcia biegu jałowego w funkcji stanu naładowania [3]

1.2. Metoda gęstości względnej

Pomiar ciężaru właściwego elektrolitu (specific gravity hydrometer metod) jest równoważny z badaniem stężenia kwasu siarkowego w elektrolicie. Podczas procesu rozładowywania akumulatora materiał aktywny jest stopniowo zużywany, a w konsekwencji jego stężenie maleje. Test ciężaru właściwego można wykonać przy użyciu tradycyjnego areometru, co jest jednak procesem czasochłonnym i trudnym do realizacji w sposób ciągły podczas typowych warunków eksploatacyjnych. Z tego powodu preferowana jest inna metoda, która bazuje na wykorzystaniu czujnika umiejscowionego wewnątrz celi akumulatora umożliwiającego monitorowanie stężenia kwasu siarkowego. Niestety takie rozwiązanie wymaga zastosowania specjalnych konstrukcji baterii, co z kolei wiąże się z większym nakładem finansowym oraz ogranicza uniwersalność proponowanego rozwiązania w powszechnie stosowanych aplikacjach, zwłaszcza tych budżetowych [4, 5].

1.3. Metoda impedancyjna

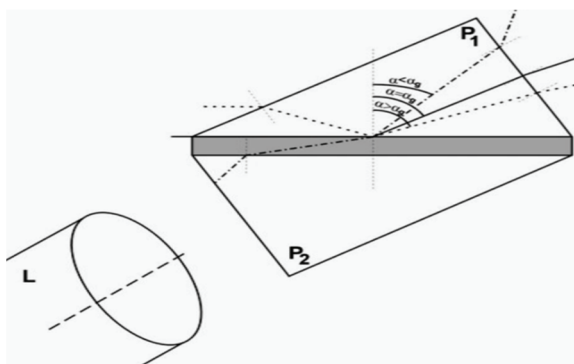
Impedancja to kolejna wielkość fizyczna charakteryzująca baterię, która zmienia się wraz z procesami ładowania, bądź też rozładowania. Zmiana aktywnych substancji chemicznych w celi wpływa na impedancję. W konsekwencji na jej podstawie możliwe jest oszacowanie stanu naładowania obiektu. Niestety sposób ten odznacza się dużym stopniem komplikacji oraz trudnością związaną z koniecznością uwzględnienia warunków temperaturowych. Jedną z zalet tej metody jest natomiast możliwość rozdzielenia reakcji elektrodowej od procesów dyfuzyjnych. Przykładowe charakterystyki uzyskane metodą impedancyjną zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki stanu naładowania i napięcia w funkcji czasu dla baterii kwasowo-ołowiowej dla metody impedancyjnej [5]

1.4. Metoda refraktometryczna

Za pomocą refraktometru można zmierzyć współczynnik załamania światła badanej cieczy. Ponieważ współczynnik załamania światła jest wprost proporcjonalny do stężenia substancji, można te dwie wielkości sprząc ze sobą i odczytywać jednocześnie. Stosowany refraktometr Abbego posiada dwie skale - jedną do odczytu współczynnika załamania światła, a drugą do odczytu stężenia badanej substancji w procentach. Działanie przyrządu bazuje na zjawisku całkowitego odbicia wewnętrznego (pomiar kąta granicznego α_g). Zasadniczym elementem refraktometru są dwa pryzmaty (P_1) i (P_2). Do odczytów służy lunetka (L) (rys. 3) [9].



Rys. 3. Sposób wyznaczania stężenia roztworu za pomocą metody refraktometrycznej [9]

Całkowite odbicie wewnętrzne zachodzi tylko przy przejściu z ośrodka optycznie gęstszego do rzadszego. Dlatego pryzmaty do refraktometru buduje się z substancji o możliwie dużym współczynniku załamania. Pryzmat P_2 jest umocowany zawiasowo i jest uchylony do góry. Badaną cieczą umieszcza się na pryzmacie refraktometrycznym P_1 i zamyka pryzmatem P_2 . Jeśli układ ten oświetlimy

wiązką nierównoległą, to zależnie od kąta padania światła na powierzchnię graniczną, promień świetlny dotrze do drugiego pryzmatu i dalej do lunetki albo ulegnie całkowitemu odbiciu wewnętrznemu na tej powierzchni. Pole widzenia w okularze lunety będzie podzielone na część jasną i ciemną. Linia podziału obu części jest bardzo wyraźna, a jej położenie w polu widzenia lunety zależy od wartości kąta granicznego badanej substancji. Częściej interesuje nas współczynnik załamania niż kąt graniczny, więc skala przyrządu rzutowana w pole widzenia okularu podaje od razu wartości współczynników załamania.

1.5. Metoda Coulomb Counting

Metoda ta jest w dzisiejszych czasach bardzo popularna. Znajduje zastosowanie nie tylko w przypadku konwencjonalnych baterii akumulatorowych wykonanych w technologii kwasowo-ołowiowej, ale także dla nowoczesnych rozwiązań ogniw chemicznych dostępnych na rynku. Bardzo często wykorzystywana jest w przypadku mobilnego sprzętu elektronicznego, jak i w medycynie. Coulomb Counting, jak sama nazwa wskazuje, polega na wyznaczeniu przepływającego ładunku elektrycznego w czasie. Bazuje ona na podstawowych zależnościach, które można wyrazić następującymi zależnościami matematycznymi, a mianowicie:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} / dt \quad (1)$$

$$i(t) dt = dq / \int \quad (2)$$

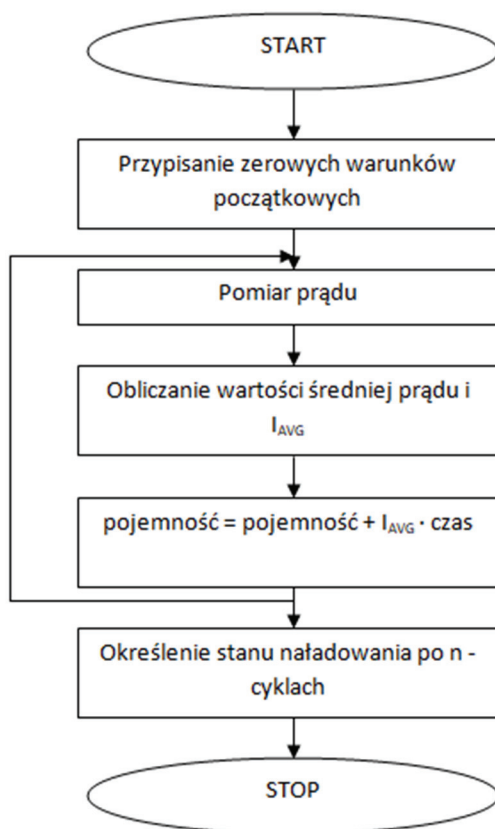
$$q = \int i(t) dt \quad (3)$$

gdzie: i – prąd elektryczny, q – ładunek elektryczny, t - czas.

2. ZAIMPLEMENTOWANE ALGORYTMY SZACOWANIA STANU NAŁADOWANIA BATERII AKUMULATOROWEJ

2.1. Uproszczona metoda Coulomb Counting

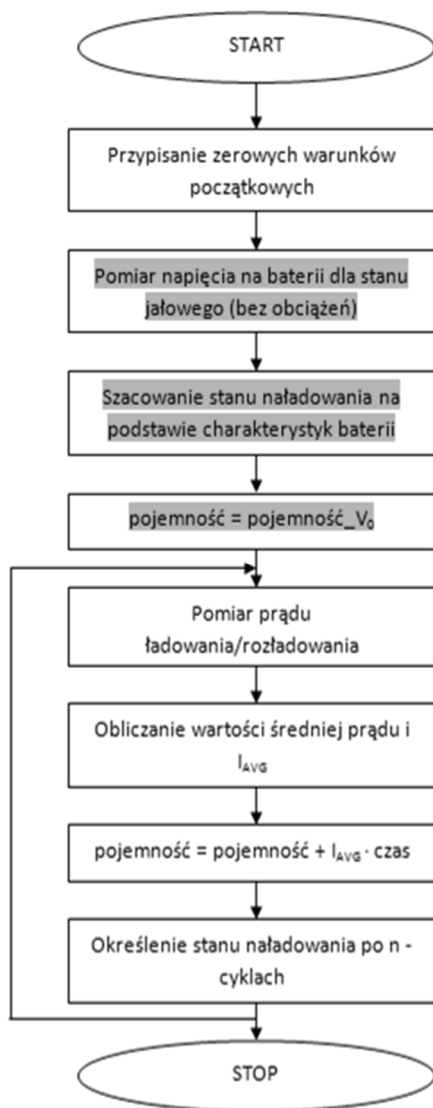
W trakcie początkowych prac opracowano algorytm bazujący na metodzie Coulomb Counting, którego schemat blokowy zaprezentowano na rys. 4. W etapie początkowym następuje przypisanie zerowych warunków początkowych. Następnie na podstawie wyznaczenia wartości średniej prądu ładowania bądź rozładowania badanej baterii akumulatorowej oraz czasu trwania rozpatrywanych procesów i liczby ich cykli następuje określenie stanu naładowania badanego obiektu. Przy czym przyjęto, że: $I_{AVG} > 0$ – oznacza ładowanie, natomiast $I_{AVG} < 0$ – rozładowywanie (gdzie I_{AVG} – wartość średnia prądu baterii akumulatorowej).



Rys. 4. Schemat algorytmu uproszczonej metody Coulomb Counting

2.2. Zmodyfikowana metoda Coulomb Counting

Algorytm w wersji uproszczonej bazujący na metodzie Coulomb Counting ma tą wadę, że nie jest znany stan początkowy naładowania baterii. W celu zwiększenia dokładności szacowania stanu naładowania badanego akumulatora dokonano jego dalszej modyfikacji (rys. 5). W początkowym etapie, zamiast przypisywania zerowych warunków początkowych, następuje oszacowanie stopnia naładowania na podstawie metody napięciowej opisanej w punkcie 1.1. niniejszego artykułu. Takie rozwiązanie wiąże się jednak z koniecznością rozbudowy warstwy sprzętowej systemu SOC ze względu na konieczność pomiaru nie tylko prądu ładowania (bądź rozładowania), ale i również napięcia na zaciskach baterii akumulatorowej (w stanie jałowym).



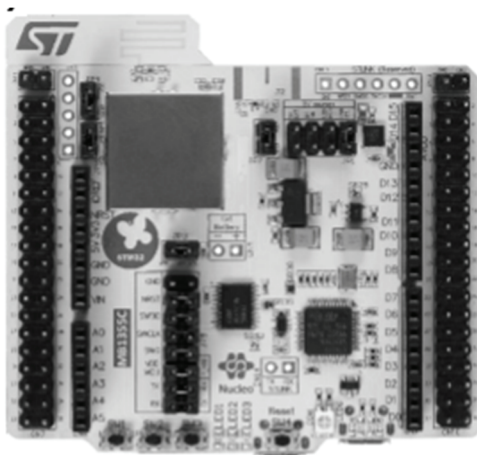
Rys. 5. Schemat opracowanego algorytmu zmodyfikowanej metody Coulomb Counting

3. BUDOWA MODELU EKSPERYMENTALNEGO

3.1. Platforma cyfrowa

Opracowane algorytmy zaimplementowano w systemie cyfrowym bazującym na mikrokontrolerze STM32WB55. Wyposażony jest on w dwa niezależne rdzenie, a mianowicie:

- Arm® Cortex®-M4 taktowany częstotliwością 64 MHz (procesor aplikacji),
 - Arm® Cortex®-M0 pracujący z częstotliwością 32 MHz (procesor sieciowy).
- Dzięki takiemu rozwiązaniu architektura ta została zoptymalizowana pod kątem realizacji zadań w czasie rzeczywistym, a także elastycznego wykorzystania zasobów i zarządzania energią [1]. Ponadto system ten wyposażony jest w dwukanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy o rozdzielczości 12-bitowej, co umożliwiło zaimplementowanie opracowanego algorytmu szacowania stanu naładowania w wersji zmodyfikowanej, wymagającego pomiaru zarówno napięcia na zaciskach baterii akumulatorowej, jak i jej prądu ładowania/rozładowania. Poglądowe zdjęcie wybranej platformy cyfrowej zaprezentowano na rys. 6 [2].



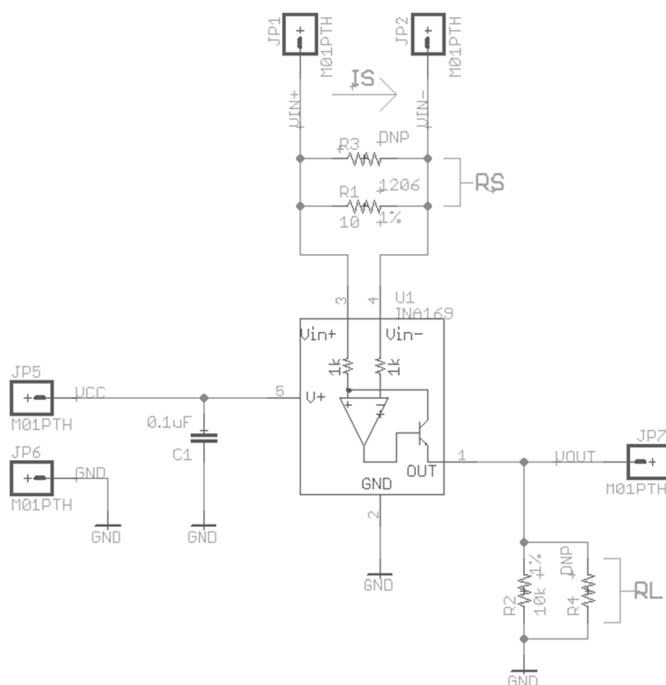
Rys. 6. Zastosowana platforma cyfrowa bazująca na mikrokontrolerze STM32WB55 [6]

3.2. Część pomiarowa systemu

W celu umożliwienia dokonania pomiaru napięcia w stanie jałowym badanego akumulatora wykorzystano układ OKYSTAR OKY3509-1 bazujący na klasycznym dzielniku napięcia o zakresie pomiarowym wynoszącym od 0 V do 25 V.

Pomiar prądu ładowania zrealizowano natomiast wykorzystując układy INA169 oraz Pololu ACS711EX.

Pierwszy z nich bazuje na boczniku rezystancyjnym oraz wzmacniaczu pomiarowym (rys. 7). Jego wadą jest brak możliwości pomiaru prądu dwukierunkowego, co stanowi pewne ograniczenie w przypadku pracy baterii akumulatorowej w trybie ładowania i rozładowania.



Rys. 7. Schemat układu SPARKFUN ELECTRONICS SEN-12040 [10]

Układ Pololu ACS711EX, w przeciwieństwie do poprzednio opisanego rozwiązania, umożliwia pomiar prądu dwukierunkowego. Ponadto zapewnia separację galwaniczną w wyniku zastosowania przetwornika hallotronowego. Pewnym ograniczeniem układu jest natomiast zakres wartości mierzonych sygnałów prądowych wynoszący $\pm 31\text{A}$, co przyczyniło się do zmniejszenia dokładności ze względu na niższe wartości mierzonych prądów w trakcie wykonywanych badań testowych.

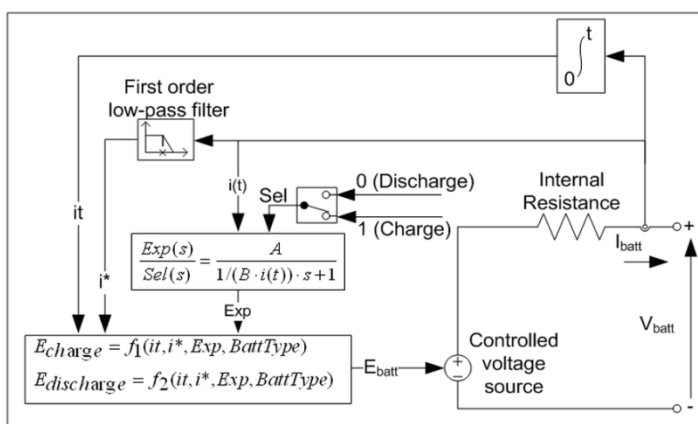
4. BADANIA SYMULACYJNE I EKSPERYMENTALNE

Obiektem badań był konwencjonalny akumulator żelowy, którego podstawowe dane przedstawiono w tabeli 1 (kolor zielony) [7].

W celu weryfikacji poprawności działania zbudowanego układu eksperymentalnego otrzymane wyniki porównano z danymi katalogowymi producenta oraz rezultatami symulacji wykonanych w środowisku MathWorks Matlab [8]. W tym celu konieczne było również zbudowanie modelu cyfrowego. Wykorzystano dostępne biblioteki umożliwiające uwzględnienie wybranych parametrów badanego obiektu (rys. 8). Badano zarówno proces ładowania, jak i rozładowania. Próby były powtarzane cyklicznie.

Tabela 1. Podstawowe dane badanego akumulatora [7].

Battery model	GS645			
Designed Floating Life	3-5 Years			
Capacity (25°C)	20hR(0.225A, 5.25V)	10hR(0.448A, 5.25V)	5hR(0.82A, 5.25V)	1hR(3.25A, 4.80V)
	4.5Ah	4.48Ah	4.1Ah	3.25Ah
Dimensions	Length	Width	Height	Total Height
	70±1mm	47±1mm	101±1mm	107±1mm
Approx. weight (±5%)	0.72Kg			
Internal resistance	Full charged at 25°C: Approx. 25mOhms			
Self discharge	3% of capacity declined per month at 25°C (average)			
Capacity Affected by Temp.(20HR)	40 °C	25 °C	0 °C	-15 °C
	102%	100%	85%	65%
Charge Voltage (25°C)	Cycle use		Float use	
	7.2-7.5V(-15mV/°C), max. Current: 1.35A		6.75-6.9V(-10mV/°C)	



Rys. 8. Model akumulatora zamodelowany przy użyciu środowiska MathWorks Matlab [8]

5. PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy było zbudowanie układu eksperymentalnego umożliwiającego oszacowanie stanu naładowania konwencjonalnego akumulatora kwasowo-olowiowego. W tym celu, na podstawie przeglądu stosowanych metod SOC, opracowano algorytmy w wersji uproszczonej oraz zmodyfikowanej bazujące na tzw. Coulomb Counting. W następnym etapie wybrano platformę cyfrową oraz peryferia umożliwiające dokonanie pomiaru niezbędnych sygnałów elektrycznych badanego obiektu i dokonanie implementacji stosownych algorytmów.

W celu dokonania weryfikacji poprawności działania zbudowanego układu eksperymentalnego uzyskane wyniki badań porównano nie tylko z danymi producenta akumulatora, ale również i z rezultatami otrzymanymi na drodze symulacji komputerowej. Otrzymane dane pozwoliły potwierdzić prawidłowość działania systemu. W ramach dalszych prac dobrane zostaną przetworniki pomiarowe prądu umożliwiające uzyskanie większej dokładności, zależnie od zakresu mierzonych sygnałów, a samo urządzenie zostanie zainstalowane na autonomicznej platformie jezdnej o uniwersalnym przeznaczeniu.

LITERATURA

- [1] Brown Geoffrey: Discovering the STM32 Microcontroller, June 5, 2016.
- [2] Noviello Carmine: Mastering STM32, October 2016.
- [3] D.Jaya Deepti, V. Ramanarayanan, "State of Charge of Lead Acid Battery", Proceedings of India International Conference on Power Electronics, 2006.
- [4] Barrie Lawson, "State of Charge (SOC) Determination", Woodbank Communications, Electropaedia: <http://www.mpoweruk.com/soc.htm>, 2019.
- [5] Battery University – How to measure state of charge http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge, 2019.
- [6] Strona internetowa firmy ARM <https://www.arm.com/> (01.01.2020).
- [7] Strona importera sprzętu elektronicznego m.in. akumulatorów żelowych <http://www.prolech.com.pl/index.php?mod=przedmiot&id=37> (01.01.2020).
- [8] Strona internetowa firmy MathWorks <https://matlabacademy.mathworks.com/> (01.01.2020).
- [9] Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Fizyki i Biofizyki ćw. Wyznaczenie stężenia roztworów metodą refraktometryczną.
- [10] Schemat układu SPARKFUN ELECTRONICS SEN-12040 http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Current/INA169_Breakout.pdf, 2019.

EXPERIMENTAL SYSTEM MONITORING THE BATTERY CHARGE STATUS

The article presents an experimental system enabling the monitoring of the state of charge (SOC) of a conventional lead-acid battery. Described include selected methods to estimate the state of charge. Next, algorithms developed as part of the work were presented, which were then implemented in the processor system. A constructed simulation model was also presented, which allows additional verification of the correctness of functioning of the solution presented in this article. To this end, based on the review of the SOC methods used, algorithms have been developed in a simplified and modified version based on the so-called Coulomb Counting. In order to verify the correct operation of the constructed experimental system, the obtained test results were compared not only with the battery manufacturer's data, but also with the results obtained by computer simulation. (Received: 20.02.2020, revised: 06.03.2020)