

DOI: 10.5604/20830157.1121381

METODY WYZNACZANIA STANU NAŁADOWANIA AKUMULATORÓW STOSOWANE W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH, URZĄDZENIACH PRZENOŚNYCH I W LABORATORIUM

Tomasz Rudnicki, Stefan Wójtowicz

Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Zakład Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych

Streszczenie. Stan naładowania akumulatora jest bardzo istotnym parametrem dla użytkownika pojazdu elektrycznego lub urządzenia przenośnego. Pozwala on oszacować pozostały czas pracy, a w przypadku pojazdów elektrycznych dostępny zasięg. Artykuł przedstawia najważniejsze metody służące do wyznaczania stanu naładowania akumulatorów, stosowane w urządzeniach przenośnych, pojazdach elektrycznych, a także w badaniach laboratoryjnych. Wyjaśniono istotę działania każdej z metod, opisano ich wady i zalety oraz możliwości zastosowania do konkretnych urządzeń.

Słowa kluczowe: akumulatory, stan naładowania, samochody elektryczne, spektroskopia impedancyjna

METHODS FOR DETERMINING THE STATE-OF-CHARGE OF BATTERIES USED IN ELECTRIC VEHICLES, MOBILE DEVICES, AND AT LABORATORY

Abstract. State-of-charge of battery is a very important parameter for any electrical vehicle or mobile device user. It allows estimating the time range and in the case of electric vehicles available distance range. The paper presents the main methods for determining the state-of-charge of batteries used in portable devices, electric vehicles, and at laboratories. The principle of each method, described here, their advantages and disadvantages and applicability to specific devices has been explained.

Keywords: batteries, state-of-charge, electric vehicles, electrochemical impedance spectroscopy

Wstęp

W dzisiejszych czasach produkuje się bardzo wiele urządzeń, posiadających własne źródło energii, którym jest najczęściej akumulator elektrochemiczny. Akumulatory kwasowo-ołowiowe są stosowane w większych aplikacjach takich jak pojazdy i samochody elektryczne, jako akumulatory rozruchowe w samochodach spalinowych, a także w zasilaniu awaryjnym. Ogniwa niklowo-wodorkowe używane są małych urządzeniach przenośnych jako zamienniki popularnych ogniw pierwotnych (R03, R06 itp.), a niklowo-kadmowe w elektronarzędziach. Technologia ogniw litowo-jonowych jest obecnie najbardziej rozpowszechniona (w kilku odmianach). Praktycznie wszystkie telefony komórkowe, laptopy, tablety i inne urządzenia przenośne są zasilane akumulatorami na bazie litu. Elektronarzędzia przenośne nowej generacji, a także już większość produkowanych samochodów elektrycznych jest zasilanych z akumulatorów litowo-jonowych. Niezależnie od technologii, każdy akumulator ma swoją określoną pojemność znamionową. Jest to ilość ładunku elektrycznego wyrażona w [Ah] jaką może oddać w pełni sprawny i naładowany akumulator do osiągnięcia stanu normalnego wyładowania. Jednym z ważniejszych parametrów mierzonych podczas pracy akumulatora jest stan jego naładowania (ang. SOC – State Of Charge). Przekłada się on bezpośrednio na pozostały czas pracy urządzenia, co w przypadku pojazdu jest równoznaczne z jego zasięgiem. Istnieje kilka metod wyznaczania stanu naładowania. W niniejszym artykule zostaną one opisane i porównane.

1. Test rozładowania

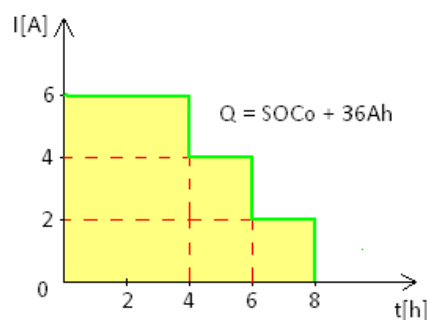
Jest to metoda, która pozwala najdokładniej oszacować stan naładowania. Stosuje się ją często do badania pojemności zasobników energii w pojazdach elektrycznych. Badanie jest wykonywane najczęściej w laboratorium. Polega na obciążeniu ogniwa lub baterii ogniwa odpowiednio dobranym stałym prądem i pomiarze czasu całkowitego rozładowania. Wadami tej metody jest czasochłonność i konieczność rozłączenia obwodu zasilania w urządzeniu badanym.

2. Zliczanie ładunku (Coulomb counting)

Jest to najbardziej rozpowszechniona metoda służąca do określania stanu naładowania akumulatora zarówno w urządzeniach przenośnych jak i samochodach elektrycznych. W tej metodzie ilość ładunku zgromadzonego w akumulatorze jest szacowana na podstawie ciągłej kontroli jego przepływu – dokładnym pomiarze prądu ładowania i rozładowania. Stan naładowania akumulatora jest obliczany za pomocą całki prądu po czasie jego przepływu:

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{Q_{zn}} \int_{t_0}^t (I_a - I_s) dt \quad (1)$$

gdzie: SOC_0 – początkowy stan naładowania, Q_{zn} – pojemność znamionowa akumulatora, I_a – prąd pobierany lub dostarczany do akumulatora, I_s – prąd strat.

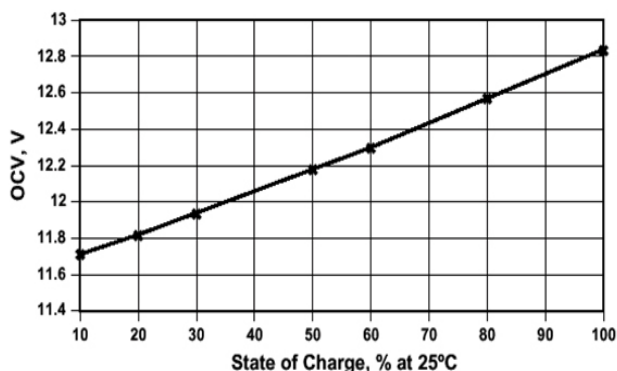


Rys. 1. Przebieg prądu ładowania akumulatora. Ładunek dostarczony do akumulatora jest całką prądu ładowania po czasie i jest równy polu powierzchni pod wykresem prądu

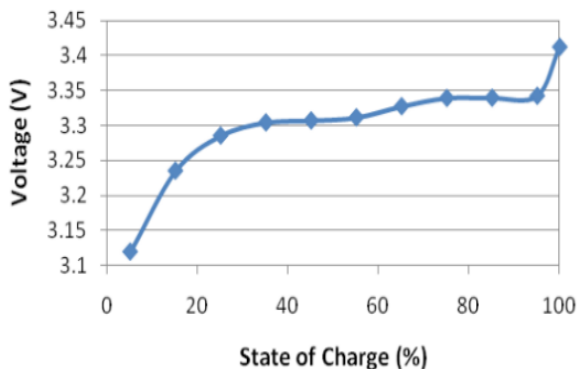
Błędy pomiaru w tej metodzie wynikają z dwóch głównych powodów: niedokładnego pomiaru prądu i strat energii podczas ładowania. Metoda nie uwzględnia również prądu samorozładowania akumulatora (nie jest zalecana do pracy z akumulatorami kwasowo-ołowiowymi, które mają wysoki współczynnik samorozładowania). Aby zmaksymalizować dokładność tej metody konieczna jest okresowa kalibracja układu.

3. Pomiar napięcia spoczynkowego akumulatora

Jest to najprostsza metoda, wykorzystująca zależność napięcia na zaciskach akumulatora od stanu naładowania (napięcie akumulatora rozładowanego jest zawsze niższe niż naładowanego). Jej dokładność może być dość wysoka, ale muszą być spełnione określone warunki. Wiarygodne wyniki są otrzymywane przy całkowicie nieobciążonym akumulatorze, w stanie równowagi termodynamicznej (przy ustabilizowanym napięciu spoczynkowym). Zaburzenia stanu równowagi są spowodowane pobieraniem lub oddawaniem prądu przez akumulator i mogą się utrzymywać jeszcze przez wiele godzin po zakończeniu tych procesów. Każdy rodzaj ogniwa ma swoją własną charakterystykę napięcia od stanu naładowania. Metoda pomiaru napięcia jest najbardziej odpowiednia dla ogniw kwasowo-ołowiowych, ponieważ posiadają one liniową charakterystykę $V(\text{SoC})$. W przypadku ogniw litowo-jonowych napięcie rozładowania jest praktycznie niezmiennie w dużym zakresie SoC, co komplikuje zastosowanie tej metody. Metoda napięciowa jest najczęściej stosowana w pojazdach golfowych, skuterach elektrycznych i wózkach inwalidzkich.



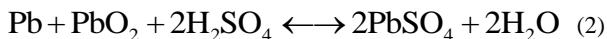
Rys. 2. Zależność napięcia spoczynkowego akumulatora kwasowo-ołowiowego od stanu naładowania



Rys. 3. Zależność napięcia spoczynkowego akumulatora litowo-jonowego od stanu naładowania

4. Pomiar gęstości elektrolitu

Alternatywną metodą wyznaczania stanu naładowania jest pomiar gęstości elektrolitu. Może być on stosowany jedynie do akumulatorów kwasowo-ołowiowych i niklowo-kadmowych z ciekłym elektrolitem. Podczas rozładowania akumulatora kwasowo-ołowiowego zachodzi reakcja kwasu siarkowego z ołowiem, w wyniku czego powstaje siarczan ołowiu i woda:

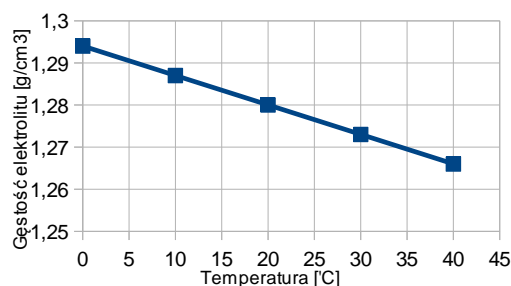


Kwas siarkowy jest zatem zużywany przez co gęstość elektrolitu maleje. Podczas ładowania zachodzą odwrotne reakcje, gęstość elektrolitu rośnie. Gęstość kwasu zmienia się w przedziale od 1,3 g/cm³ przy pełnym naładowaniu do 1,1 g/cm³ przy pełnym rozładowaniu i jest wprost proporcjonalna do stanu naładowania. Do jej pomiaru służy przyrząd zwany areometrem.

Tabela 1. Zależność gęstości elektrolitu od stanu naładowania w 12 voltowym akumulatorze kwasowo-ołowiowym

Stan naładowania akumulatora	Uśredniona wartość gęstości elektrolitu	Napięcie spoczynkowe akumulatora
100%	1,265	12,65
75%	1,225	12,45
50%	1,190	12,24
25%	1,155	12,06
0%	1,120	11,88

Niestety każda metoda pomiaru SoC niesie za sobą ryzyko błędów. Nawet w dwóch akumulatorach tego samego typu, od tego samego producenta, gęstości elektrolitu przy pełnym naładowaniu lub rozładowaniu mogą się różnić. Również zmiana temperatury elektrolitu wpływa na zmianę jego gęstości.



Rys. 4. Zależność gęstości elektrolitu od temperatury w stanie pełnego naładowania akumulatora

Aby zwiększyć dokładność tej metody, pomiar należy wykonywać w stałej temperaturze, a także po ustabilizowaniu się elektrolitu – po kilku godzinach od zakończenia ładowania lub rozładowywania.

5. Badanie rezystancji wewnętrznej ogniwa

Kolejną metodą służącą do oszacowania stanu naładowania akumulatora jest pomiar jego rezystancji wewnętrznej. Do wyznaczenia rezystancji wewnętrznej metodą techniczną przeprowadza się dwa pomiary:

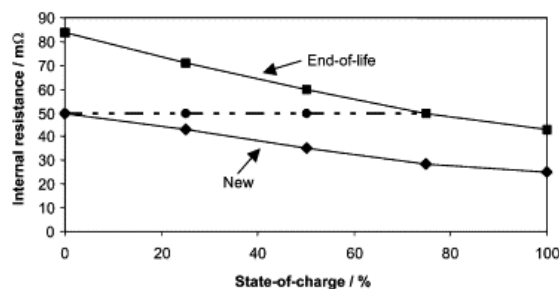
- pomiar napięcia spoczynkowego U_0 ,
- pomiar napięcia akumulatora obciążonego U_{obc} rezystorem o znanej wartości R_z .

Rezystancję wewnętrzną oblicza się według wzoru:

$$R_w = R_z \left(\frac{U_0}{U_{obc}} - 1 \right) \quad (3)$$

gdzie: R_w – rezystancja wewnętrzna ogniwa, R_z – rezystancja obciążenia, U_0 – napięcie nieobciążonego akumulatora, U_{obc} – napięcie akumulatora pod obciążeniem.

Rezystancja wewnętrzna ma ścisły związek ze stanem naładowania akumulatora, lecz nie jest to zależność liniowa. W przypadku akumulatorów kwasowo-ołowiowych najmniejsza rezystancja występuje przy pełnym naładowaniu, a największa przy całkowitym rozładowaniu. Charakterystyka $R_w(\text{SoC})$ dla ogniw niklowo-wodorkowych oraz litowo-jonowych ma już inny charakter i jest zależna od sposobu rozładowania.



Rys. 5. Zależność rezystancji wewnętrznej akumulatora kwasowo-ołowiowego od stanu naładowania. Porównanie charakterystyk dla akumulatora nowego i zużytego

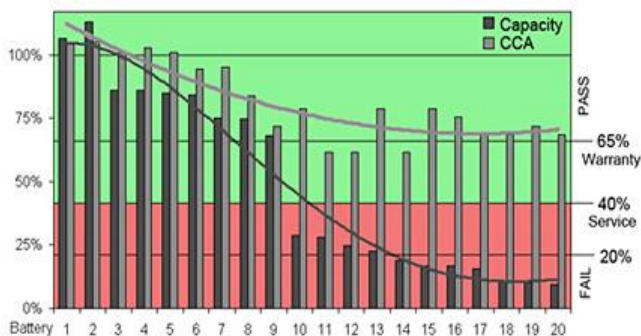
Wartość rezystancji zależy w dużym stopniu od czasu pomiaru pod obciążeniem, a także temperatury. Analiza wyników ze względu na nieliniowe charakterystyki jest dość trudna. Ta metoda jest bardziej miarodajna w wyznaczeniu SoH (*ang. State-of-Health*) – „stanu zdrowia” akumulatora.

6. Spektroskopia impedancja

Spektroskopia impedancyjna (*ang. EIS – Electrochemical Impedance Spectroscopy*) jest powszechnie stosowaną metodą w badaniach elektrochemicznych. Mechanizm tej metody polega na naruszeniu równowagi układu badanego poprzez „wstrzyknięcie” sygnału zmiennoprądowego o znanej amplitudzie i częstotliwości. Odpowiedź następuje w formie prądowej o amplitudzie pomniejszonej o impedancję badanego obiektu i przesunięciu fazowym względem sygnału zadanego. Na podstawie powyższych danych obliczana jest impedancja. Pomiary są dokonywane w zadanym przedziale częstotliwości. Nowatorskim rozwiązaniem jest zastosowanie tej metody do badań akumulatorów.



Rys. 6. Urządzenie do pomiaru pojemności i zdolności rozruchowej akumulatora



Rys. 7. Prezentacja wyników z 20 badanych ogniw

Interpretacja wyników takiego badania jest jednak dość skomplikowana, szczególnie dla ogniw litowo-jonowych (rozbudowane schematy zastępcze zawierające nieliniowe elementy). Dla akumulatorów kwasowo-ołowiowych istnieją urządzenia, które potrafią wyznaczyć ich pojemność i zdolność rozruchową.

7. Wnioski

W niniejszym artykule zostały przedstawione i opisane w skrócie najpopularniejsze metody, służące do wyznaczania stanu naładowania akumulatora. Większość z nich ma zastosowanie głównie do akumulatorów kwasowo-ołowiowych, lecz niektóre z nich nadają się również do innych rodzajów ogniw. Najczęściej stosowaną obecnie techniką jest zliczanie ładunku (Coulomb counting, Ah counting), ponieważ jest to najbardziej bezpośrednia, dość dokładna i nie zakłócająca pracy urządzenia metoda, a zarazem łatwa do zainstalowania w układzie. Czasami stosowana jest w połączeniu z innymi metodami. Test rozładowania i pomiar impedancji wewnętrznej są przeprowadzane najczęściej w laboratorium. Przy pomocy spektrografii impedancyjnej można już testować akumulatory rozruchowe. Dla ogniw litowo-jonowych jest ona nadal w fazie rozwojowej.

Literatura

- [1] Chwiedoruk S.: Układ diagnostyki akumulatorów UDA. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, 1, 2007, s. 123-130.
- [2] Czerwiński A.: Akumulatory baterie ogniwa. WKŁ, Warszawa 2005
- [3] May G.J.: Valve-regulated lead-acid batteries for stop-and-go applications. Journal of Power Sources, vol. 133, 1/2004, pp. 110-115.
- [4] Piller S., Perrin M., Jossen A.: Methods for state-of-charge determination and their applications. Journal of Power Sources, vol. 96, 1/2001, pp. 113-120.
- [5] Rudnicki T.: Tendencje rozwojowe samochodów elektrycznych. Praca magisterska. Politechnika Warszawska 2011
- [6] Wang H., Liu Y., Fu H., Li G.: Estimation of State of Charge of Batteries for Electric Vehicles. International Journal of Control and Automation, vol. 6, 2/2013, pp. 185-194.
- [7] www.batteryuniversity.com
- [8] www.digikey.com
- [9] lniedzicki.ch.pw.edu.pl
- [10] simslab.uwaterloo.ca
- [11] www.cadex.com

Mgr inż. Tomasz Rudnicki
e-mail: t.rudnicki@iel.waw.pl



Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej o specjalności Maszyny Elektryczne w 2011 r. Jest pracownikiem Instytucji Elektrotechniki w Warszawie, gdzie zajmuje się tematyką zasilania pojazdów elektrycznych. Prowadzi badania ogniw litowo-jonowych, superkondensatorów i układów sterujących pracą magazynów energii.

Dr inż. Stefan S. Wójtowicz
e-mail: s.wojtowicz@iel.waw.pl



Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej w 1973 roku. Pracował w Instytucie Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej, jako asystent i adiunkt. Od 1978 roku zatrudniony jest w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Jego zainteresowania naukowe związane były z systemami pomiarowymi i diagnostycznymi. Jest autorem i współautorem ponad 150 publikacji w tym książek, monografii, artykułów i referatów naukowych i publicystycznych.

otrzymano/received: 12.11.2013

przyjęto do druku/accepted: 13.01.2014