

mgr inż. Piotr Bigaj
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

INTELIĞENTNY SYSTEM MONITOROWANIA I ESTYMACJI ŁADUNKU SOC DLA BATERII LITOWO-JONOWYCH I LITOWO-POLIMEROWYCH

Praca podejmuje tematykę szacowania i określania pozostałej ilości ładunku elektrycznego (State-of-Charge) baterii litowych. W ramach pracy opracowano nowatorski sposób wyliczania SOC dla systemów bateryjnych o różnych gęstościach mocy. Temat przedstawiony został w ujęciu teoretycznym i praktycznym – jako metoda gotowa do zaimplementowania w systemie wbudowanym. Algorytm metody został przepisany na język programowania pakietu Matlab i przetestowany na zbiorze baterii w celu wykazania poprawności rozumowania autora

INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING AND ESTIMATION OF STATE OF CHARGE FOR LITHIUM-ION AND LITHIUM-ION POLYMER BATTERIES

This work is concerned on a subject of estimating and determining the remaining electrical charge (State-of-Charge) for lithium based batteries. The matter is presented taking into account theoretical and practical background. In a result a innovative, ready-to-use method for battery-supplied embedded systems is introduced. The algorithm was implemented in programming language of Matlab, and then tested on a set of batteries for validation.

1. WPROWADZENIE

Obecnie coraz więcej produkowanych urządzeń elektronicznych jest mobilnych, a co za tym idzie posiada autonomię zasilania. Tendencja ta dotyczy nie tylko sprzętu powszechnego użytku, od telefonów komórkowych po przenośne komputery, ale jest zauważalna w każdej dziedzinie, która korzysta z dobrodziejstw elektroniki. Autonomia zasilania zyskuje sobie tym więcej zwolenników, im lepsze są dostępne źródła energii. W rozumieniu zwykłego użytkownika takie źródło powinno cechować się małymi wymiarami i masą oraz zapewniać długi czas pracy urządzenia mobilnego. Te jakościowe parametry przekładają się na parametry ilościowe w postaci grawimetrycznych i wolumetrycznych współczynników gęstości energii określanych dla poszczególnych chemii baterii. Obecnie na rynku dominuje osiem głównych typów baterii wielokrotnego użytku: kwasowo-ołowiowe, żelowe, niklowo-kadmowe, niklowo-wodorotlenkowe, alkaiczne, litowo-jonowe, litowo-jonowo-polimerowe zwane powszechnie litowo-polimerowymi i litowo-żelazowe [1][5]. W urządzeniach mobilnych, gdzie gęstość energii i energia właściwa jest sprawą priorytetową tj. tam, gdzie bateria o małej objętości i wadze musi zgromadzić jak największe ilości energii dominuje technologia na bazie litu a w szczególności baterie litowo-jonowe i litowo-polimerowe [3].

Jedną z najistotniejszych informacji, jakie musi posiadać operator mobilnego urządzenia, jest informacja o przewidywanym czasie pracy przed ponownym ładowaniem akumulatora. W urządzeniach, w których pobór mocy jest stały, czas ten jest wprost proporcjonalny do ilości ładunku pozostałego w baterii. W sytuacji, gdy pobór mocy jest zmienny i niedeterministyczny (np. w robotach mobilnych), taki czas może być określony jako przedział. Im większa dynamika zmian poboru mocy tym przedział ten szerszy, a co za tym idzie, mniej oddający rzeczywistość. Jednym z parametrów, który można oszacować z deterministyczną niepewnością pomiaru jest ilość ładunku pozostałego w baterii

(SOC – ang. State-of-Charge). Daje ona użytkownikowi – wraz z parametrami pochodnymi - wyobrażenie o czasie, w jakim może pracować z urządzeniem. SOC daje podobne wyobrażenie o pracy z urządzeniem, jak wskaźnik poziomu paliwa w samochodzie dla kierowcy [3].

2. DEFINICJE

W literaturze dotyczącej tematyki baterii spotyka się różne definicje związane z szacowaniem energii pozostałej w baterii. Dlatego termin *SOC* jest dla wielu mylący. Użytkownik nie może wykorzystać całego ładunku zawartego w baterii, co jest spowodowane warunkami, w jakich bateria aktualnie pracuje lub pracowała. Na przykład ogniwo pracujące w niskiej temperaturze osiągnie napięcie, świadczące o końcu możliwości użytkowania takiej baterii, wcześniej niż w sytuacji, gdyby bateria pracowała w warunkach nominalnych tj. w 25 °C. Różnica ta może wynosić ponad 30 % [2], więc niepewność pomiaru na tym poziomie traktować należy jako niepewność grubą. Czym innym jest więc *SOC*, a czym innym ładunek dostępny dla użytkownika Cap_{rem} .

W związku ze wspomnianym wcześniej brakiem jednolitego nazewnictwa i definicji, w zakresie tego referatu autor postanowił ujednoczyć definicje nasypujących pojęć:

SOC – w amperogodzinach [Ah] jest ładunkiem zawartym w baterii w danej chwili. Może być też wyrażana jako część procentowa nominalnej pojemności baterii, tj. 100 % określa baterię naładowaną w pełni, a 0 % baterię nienaładowaną.

Cap_{rem} jest ładunkiem w [Ah] dostępnym dla użytkownika w zależności od warunków zewnętrznych. Oznacza to, że Cap_{rem} jest równa lub mniejsza niż *SOC*. Podobnie jak w przypadku *SOC*, również i w tym przypadku jednostką może być [%].

t_{rem} jest szacowanym czasem użytkowania baterii do momentu, w którym ponowne jej ładowanie będzie konieczne.

3. WYZWANIA W WYZNACZANIU SOC

Z punktu widzenia użytkownika baterii najważniejszą charakterystyką opisującą pracę baterii jest charakterystyka prądowo-napięciowa. Wiele niskobudżetowych urządzeń bazuje na pomiarze bezpośrednim tej charakterystyki i na tej podstawie oznacza ilość ładunku w baterii. Wynika to z prostoty takiego pomiaru, ale daje mizerne efekty w sytuacjach, w których dynamika zmian obciążenia baterii jest typowo większa niż 20 dB¹. Takie podejście z punktu widzenia zastosowania w aplikacjach profesjonalnych jest niedopuszczalne. Stąd konieczność opracowania metod o lepszych dokładnościach.

Parametry użytkowe *SOC* i Cap_{rem} są zależne od wielu czynników takich jak: temperatura pracy baterii, prąd pobierany przez baterię, wiek baterii, szybkość samorozładowania, liczba cykli ładowania/rozładowania jakie bateria przeszła, ile razy bateria pracowała poza obszarem nominalnym (np. ile razy została głęboko rozładowana), czy zapewniono baterii odpowiednie przechowywanie, rozrzuty produkcyjne, uszkodzenia mechaniczne, wydajność procesu ładowania, wydajność procesu rozładowywania itp.

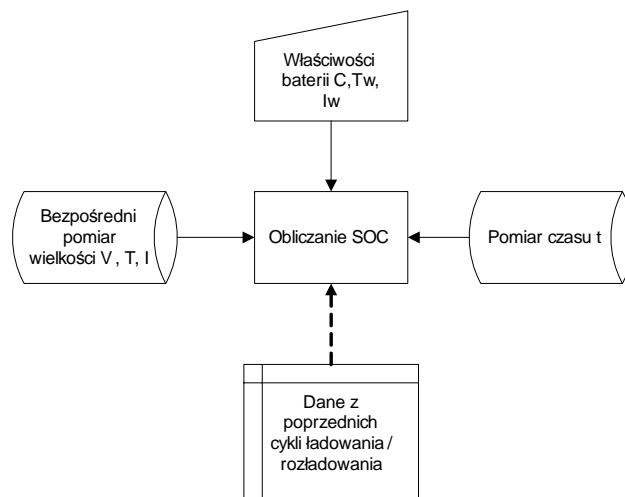
Wielkości te są w większości właściwie niemierzalne w rzeczywistym środowisku, gdyż nie jest możliwe zmierzenie niektórych z wymienionych parametrów wprost lub metodą elektryczną. Dlatego też istnieje konieczność takiego uproszczenia zagadnienia pomiaru *SOC*,

¹ Dla baterii o rezystancji wewnętrznej 100 mΩ i prądzie 1-10 A zmiana napięcia na celi baterii to 0,9 V, przy użytecznym zakresie pracy 4,2-3,0 V.

aby uzyskiwać zadowalające rezultaty, a jednocześnie nie wprowadzać zbędnych komplikacji do systemu.

4. PROPONOWANA METODA OBLICZANIE SOC I PARAMETRÓW POCHODNYCH

Schemat proponowanej przez autora metody szacowania SOC pokazany jest na rys. 1.



Rys. 1. Schemat z proponowanego systemu określenia SOC. Linia przerywana oznacza brak konieczności dołączenia bloku danych z poprzednich cykli ładowania/rozładowania w proponowanej metodzie

Aby poprawnie przyjąć założenia wstępne dotyczące baterii, potrzebna jest znajomość właściwości jej pracy tj. nominalnej pojemności C w [Ah], zakresu temperatury pracy T_w tj. maksymalnej i minimalnej temperatury pracy i zakresu prądowego jej pracy I_w tj. maksymalnego prądu ciągłego, który można pobrać z baterii bez jej uszkodzenia.

Metoda opiera się na pomiarze bezpośrednim wielkości elektrycznych: V – napięcia na baterii, T – temperatury baterii, I – prądu płynącego przez baterię.

Drugą grupą danych wejściowych stanowią pomiary czasu rzeczywistego oraz czasu relaksacji, na których podstawie można wnioskować o aktualnej kondycji baterii *SOH* (ang. *State-Of-Health*)

Trzecią grupą są dane o przebiegu procesów rozładowania, które miały miejsce w przeszłości. Dane te dotyczą Q_{out} – ładunku pobranego z baterii w czasie rozładowania, I_{outavg} – średniego prądu pobieranego w trakcie rozładowania baterii w aktualnym cyklu, oraz T_{avg} – średniej temperatury z jaką pracowała bateria. Istotne jest to, że posiadając wiedzę na temat historii danej baterii, można zaimplementować adaptacyjność systemu, co znacznie polepsza ilościowo jego pracę.

Takie podejście do pomiaru SOC można opisać zależnością rekurencyjną:

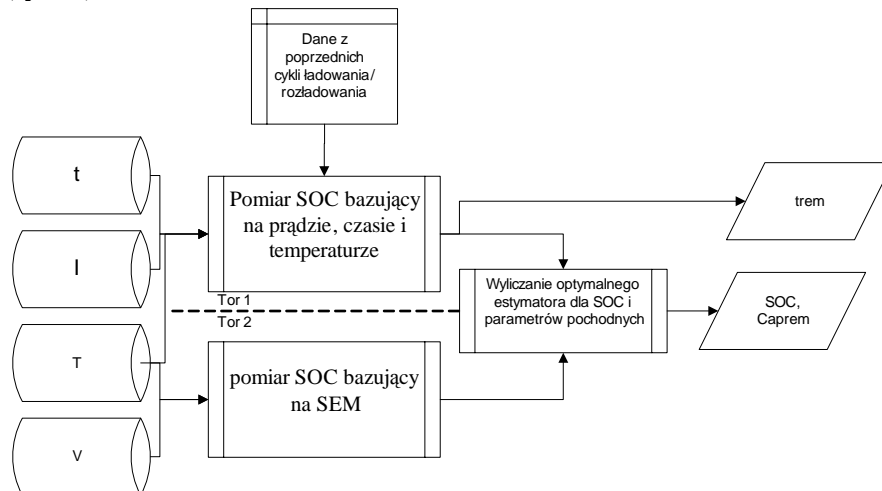
$$SOC_n = f(I, V, T, t, SOC_{n-1}) \quad (1)$$

Funkcja f jest nie tylko wielowymiarowa, ale w rzeczywistości silnie nieliniowa. Zastosowanie jej wymaga w praktycznej implementacji linearyzacji zjawisk zachodzących w baterii, gdyż tylko wtedy możliwe jest wykorzystanie tak wielu zmiennych. Wiele wejść do systemu zapewnia zminimalizowanie wariacji pomiaru, zakładając, że w metodzie użyty zostanie optymalny estymator (rys. 2).

Zauważyć należy, że dane dotyczące historii baterii mogą być dostarczane do systemu, ale nie muszą. Większa liczba danych wejściowych oznacza większą wiarygodność estymatora przez zmniejszenie odchylenia standardowego, jednak metoda nie może pracować poprawnie jedynie wtedy, gdy dostarczone są wszystkie dane wejściowe (rys. 1). Jest to związane z faktem, że projektowana była w ten sposób, aby mogła być zaimplementowana zarówno w systemach *BMS* (ang. *Battery Management Systems*), które związane są z konkretnym egzemplarzem baterii, jak również dla urządzeń zasilanych różnymi egzemplarzami tego samego typu baterii.

Metoda proponowana przez autora bazuje na pomiarach bezpośrednich, które następnie dają po wielokrotnym przetworzeniu wynik odzwierciedlający aktualny stan *SOC*. Należy sobie zdać sprawę, że wartości mierzone bezpośrednio, takie jak napięcie baterii, prąd przez nią płynący czy jej temperatura dają nikłą informację o *SOC*. Dopiero wartości takie jak Siła Elektromotoryczna (*SEM*) baterii, ładunek pobrany z baterii, czas relaksacji po obciążeniu, czy aktualny nadpotencjał mogą być wykorzystane do obliczenia *SOC*.

Dane pochodzące z pomiarów bezpośrednich baterii w trakcie jej rozładowywania są przetwarzane dwutorowo: osobno prąd przez baterię i osobno napięcie tej baterii. Mamy więc dwie ścieżki obróbki danych, które – ponieważ są niezależne – mogą być przetwarzane równoległe (rys. 2)



Rys. 2. Metoda szacowania *SOC* i parametrów pochodnych bazująca na pomiarze prądu, czasu, temperatury oraz *SEM* niezależnie w dwóch torach

5. POMIAR *SOC* BAZUJĄCY NA PRĄDZIE, CZASIE i TEMPERATURZE

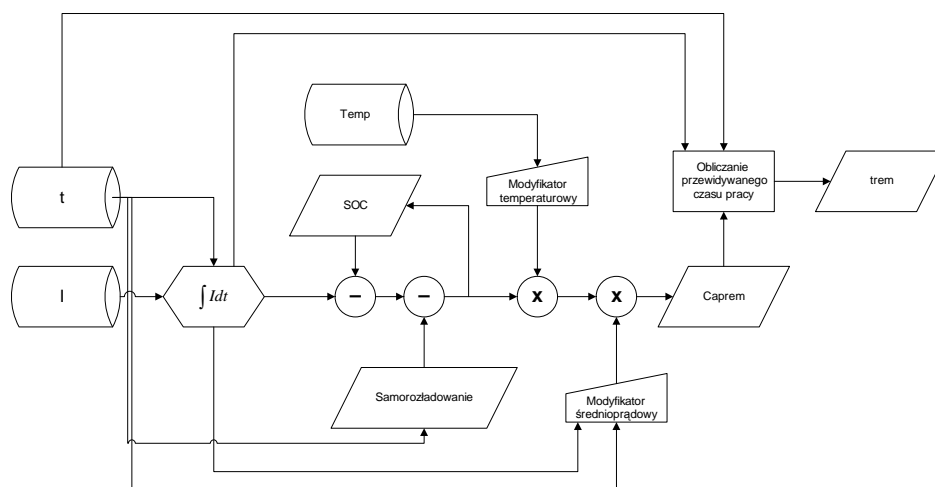
Na rys. 3 przedstawiony został ogólny schemat pomiaru *SOC* i parametrów skojarzonych, który bazuje na całkowaniu prądu (ang. *Coulomb Counting*). Danymi wejściowymi dla tej metody są prąd płynący przez ogniwo I , czas względny t oraz temperatura T (rys. 3). Na podstawie prądu płynącego przez ogniwo oraz czasu liczony jest ładunek, który został

przekazany do/z baterii jako $\int_{t_0}^{t_1} Idt$. Wartość ta jest odejmowana od poprzedniej wartości

SOC_{n-1} tworząc aktualną wartość SOC_n . Jeżeli wartość prądu do/z ogniwa jest równa zeru, to $\int_{t_0}^{t_1} Idt$ jest równa zeru, a SOC_{n-1} jest zmniejszane jedynie przez samorozładowanie baterii.

Faktem jest, że czynnik samorozładowania podczas normalnej pracy ma tak mały wymiar

ilościowy, że można go pominąć, algorytm jednak zakłada, że może zdarzyć się sytuacja, w której ogniwo będzie przechowywane przez pewien czas nie używane. W takiej sytuacji błędem byłoby pominięcie zjawiska samorozładowania.



Rys. 3. Ogólny schemat pomiaru SOC bazującego na pomiarze prądu, czasu i temperatury. Dane wejściowe to I , t , T , dane wewnętrzne to $\int Idt$. Danymi wyjściowymi są SOC_n , Cap_{rem} , t_{rem} .

Ponieważ – jak zostało wykazane w poprzednim rozdziale – nie wszystkie ładunki zawarte w baterii są dostępne dla jej użytkownika, należy odpowiednio zmodyfikować wartość SOC , aby uzyskać ładunek dostępny dla użytkownika w zależności od warunków, w jakich bateria pracuje. Warunki te mają dwie składowe: temperaturową i prądową, gdyż są to dwa parametry silnie modyfikujące Cap_{rem} względem SOC . Modyfikator temperaturowy jest pewną funkcją temperatury, która może być przybliżoną funkcją liniową lub, gdy ogniwo nie pracuje w szerokim zakresie temperatury, funkcją skoku jednostkowego. Modyfikator

średnioprądowy bazuje na średnim prądzie tj. $\frac{\int_0^{t_{op}} Idt}{t_{op}}$ ² i również przybliżana jest zależnością

liniową lub funkcją skoku jednostkowego. Aktualna wartość Cap_{rem} jest więc wartością proporcjonalną do SOC , a współczynnikiem proporcjonalności jest wynik z mnożenia modyfikatora temperaturowego i modyfikatora średnioprądowego. Na podstawie średniego prądu pobieranego z baterii do momentu policzenia Cap_{rem} szacowany jest czas, w jakim ogniwo będzie mogło pracować bez konieczności ponownego ładowania. Szacunek ten opiera się na założeniu, że bateria będzie używana w podobny sposób, jak do momentu policzenia Cap_{rem} ³.

Jakkolwiek wartość SOC , pomijając wpływ samorozładowania, jest wartością nierosnącą, co jest zgodne z intuicją użytkownika takiej baterii, nie można jednak określić w sposób jednoznaczny monotoniczności Cap_{rem} i t_{rem} w czasie. Dzieje się tak dlatego, że modyfikatory temperaturowy i średnioprądowy są zmienne w czasie przy zmiennych warunkach użytkowania baterii. Zjawisko jest z punktu widzenia procesów zachodzących w ogniwie całkowicie poprawne, może być jednak zaskoczeniem dla użytkownika, który np. po przeniesieniu baterii do pomieszczenia o wyższej temperaturze uzyska informację z systemu, że dostępny czas jej użytkowania wzrósł bez ładowania ogniwa.

² t_{op} jest czasem w którym wykonywany jest pomiar

³ Tj. warunki zewnętrzne będą zbliżone i zachowany będzie średni pobór mocy.

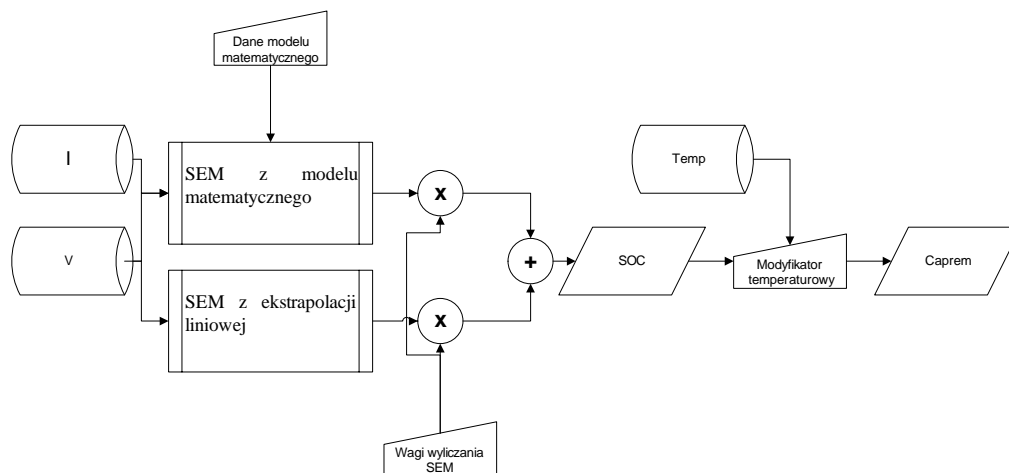
6. POMIAR SOC BAZUJĄCY NA SIŁE ELEKTROMOTORYCZNEJ

Jak zostało pokazane w [8] oraz badaniach przeprowadzonych przez autora pomiar *SEM* ogniwa jest dobrym wyznacznikiem *SOC*. Krzywe pokazujące zależność $SEM(SOC)$ wykazują dużą powtarzalność zarówno dla określonego egzemplarza baterii w czasie, jak i dla grupy baterii jednego typu [8].

W literaturze spotyka się wiele praktycznych sposobów pomiaru siły elektromotorycznej. Aylor, Thieme i Johnson [9] proponują metodę polegającą na pomiarze czasu relaksacji baterii. Metoda ta ma jednak jedną podstawową wadę: obliczenia mogą być przeprowadzone jedynie w warunkach equilibrium (patrz rozdz. 7), a to wyklucza stosowanie jej w urządzeniach, gdzie bateria dostarcza mocy w sposób ciągły.

Autor zdecydował się na zastosowanie dwóch metod służących wyliczeniu *SEM*: ekstrapolacji liniowej oraz matematycznego modelu opisu zjawiska nadpotencjału w stanie nierównowagowym baterii.

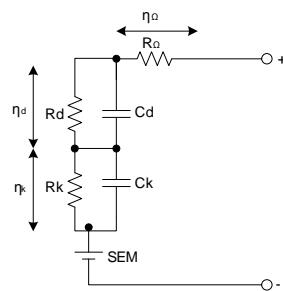
Schemat blokowy opracowanej metody bazującej na *SEM* został pokazany na rysunku poniżej (rys. 4)



Rys. 4. Schemat metody szacowania SOC bazującego na wyliczeniu SEM przez ekstrapolację liniową i matematyczny model baterii

7. POMIARY SIŁY ELEKTROMOTORYCZNEJ

Bateria w trakcie swojej pracy może znajdować się z stanie równowagi (equilibrium), gdzie żaden prąd nie płynie w obwodzie zewnętrznym albo w stanie nierównowagi, gdzie prąd jest pobierany z baterii lub jest ona ładowana [6]. W stanie nierównowagi procesy utleniania przeważają nad procesami redukcji bądź na odwrót i pojawia się nadpotencjał związany z reakcją transferu ładunku elektrycznego do/z obwodu zewnętrznego. Nadpotencjał jest związany ze zjawiskami kinetycznymi ruchu jonów/elektronów (nadpotencjał kinetyczny η_k) oraz zjawiskami dyfuzji (nadpotencjał dyfuzyjny η_d). Zjawisko nadpotencjału jest widoczne w obwodzie zewnętrznym jako spadek napięcia na ogniwie. Zmiany nadpotencjałów w fizycznie działającym systemie zasilanym bateryjnie są niemierzalne, tj. nie można w sposób ilościowy określić osobno nadpotencjału kinetycznego i dyfuzyjnego. Dla systemów wyliczających SOC nie jest to jednak niezbędne, gdyż nadpotencjały te można zamodelować elektrycznie (rys. 5)[7],[4].



Rys. 5. Uproszczony model elektryczny baterii z przedstawionymi nadpotencjałami kinetycznym, dyfuzyjnym i omowym

Dzięki czemu zjawisko to może być opisane równaniem:

$$\eta(Q_{in}, T, I, t) = \eta_{\Omega}(T, I, t) + \eta_d(T, I, t) + \eta_k(T, I, t) = I \left(R_{\Omega k} + R_d \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_d}} \right) + \frac{E_q}{Q_{in}} \right) \quad (2)$$

gdzie:

I – prąd rozładowujący baterii

$R_{\Omega k}$ – rezystancja modelująca nadpotencjał omowy i kinetyczny [Ω]

R_d – rezystancja modelująca nadpotencjał dyfuzyjny [Ω]

τ_d – dyfuzyjna stała czasowa [s]

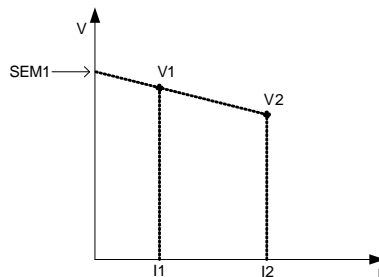
E_q – Znormalizowana energia. Parametr ten opisuje energię, która nie może zostać użyta przy wzroście prądu (wyraża on różnicę Cap_{rem} i SOC)

Q_{in} – ilość ładunku pozostała w baterii. Parametr ten wyraża SOC .

Równanie (2) jest gotową formułą wyprowadzoną przez autora na podstawie zależności opisywanych w [7]. Zasadność tego uproszczenia została potwierdzona eksperymentalnie przez autora.

Równanie (2) jest zależnością rekurencyjną i aby móc z niej skorzystać, należy określić wartości wyżej wymienionych parametrów. Najprostszą metodą jest porównanie charakterystyki eksperymentalnej $\eta_{eks}(Q_{in})$, tak, aby minimalizować wyrażenie $|\eta(Q_{in}, T, I, t) - \eta_{eks}(Q_{in})|$. Interpolacja musi zostać przeprowadzona dla wartości temperatury charakterystycznych dla pracy danej baterii.

Jak łatwo przewidzieć, opierając algorytm wyliczania SEM jedynie na tym modelu, algorytm SOC mógłby być zubożony w przypadku, gdy takich danych system by nie miał. Dlatego też należy zastosować równoległe inny algorytm wyliczania SEM .



Rys. 6. Sposób pomiaru SEM poprzez ekstrapolację liniową dla dwóch punktów pomiarowych

Autor zdecydował się na zastosowanie metody ekstrapolacji liniowej. Jej zasadę przedstawiono na rys. 6. Każdy płynący do obciążenia prąd powoduje stan nierównowagowy baterii. Każdy z dwóch prądów rozładowania I_1 i I_2 powoduje zgodnie ze zjawiskiem nadpotencjału napięcie ogniwa V_1 , V_2 . Ekstrapolując dwa otrzymane punkty można wyznaczyć SEM ogniwa, która jest napięciem na ogniwie przy braku płynącego prądu, tj. w stanie equilibrium. Moment pomiaru musi być odsunięty w czasie od momentu zmiany prądu przez baterię o przynajmniej $3R_{bat}C_{bat}$ ⁴, gdyż dopiero wtedy napięcie na baterii jest stabilne. Jednocześnie między kolejnymi momentami, w których mierzone jest napięcie i prąd względna zmiana SOC nie może przekroczyć 5 %.

8. EKSPERYMENT

Prezentowana metoda została zaimplementowana w postaci programu w języku programowania pakietu Matlab. Baterie biorące udział w eksperymencie były pojedynczymi ogniwami oraz bateriami wielocelowymi (patrz tab. 1). Do pełnej kontroli procesu ładowania użyta została ładowarka Hyperion EOS0720i wyposażona w balanser. Rozładowanie baterii i pomiary charakterystyk napięciowo-prądowo-temperaturowych realizowano przy użyciu programowalnego obciążenia prądu stałego IT8516C oraz komputera z dedykowanym oprogramowaniem. Dane w postaci tabelaryzowanej były następnie przetwarzane przez program realizujący pomiar SOC i parametrów pochodnych. Dzięki temu można było prześledzić sprawdzalność szacunku prezentowanej metody wyznaczania SOC każdej baterii przy znanej pełnej charakterystyce rozładowani

Tab. 1. Baterie biorące udział w eksperymencie

Lp	Nazwa/Typ baterii	Liczba cel	Pojemność [mAh]	Prąd maksymalny [C]	Liczba sztuk
1	Pro Lite v2 LiPO	1	250	50	5
2	ThunderPower TP220-3SXV LiPO	2	2250	60	5
3	ThunderPower TP5000-2SPL2 LiPO	2	5000	40	5
4	Kokam SLPB70460330LiPO ⁵	5	100000	3	1

Zachowanie użytkownika baterii było imitowane poprzez odpowiednie zaprogramowanie obciążenia. Baterie rozładowywane były stałym prądem, pobierana była z nich stała moc, obciążane były stałą rezystancją lub imitowane było zachowanie zmienne (tab. 2). Wszystkie parametry rozładowania proporcjonalne były do pojemności nominalnej baterii C. Każdy z eksperymentów⁶ powtórzony został 2 razy, co w sumie daje 117 pomiarów dla każdej z baterii. Eksperyment Random powtórzony został 10 razy ze względu na to, że imituje on w najlepszy sposób losowe zachowanie użytkownika np. robota mobilnego. 1 sztuka każdego typu baterii z wierszy 1-3 z tab. 1 została naładowana i przez okres 4 miesięcy badane było samorozładowanie tych baterii bazując na SEM. Faza testów zaprezentowana w tym artykule przeprowadzana była w 25 °C.

⁴ $R_{bat}C_{bat}$ jest stałą czasową za którą odpowiada głównie pojemność dyfuzyjna C_d Jak wynika z doświadczeń eksperymentalnych autora pojemność C_k jest 2-3 rzędy wielkości mniejsza.

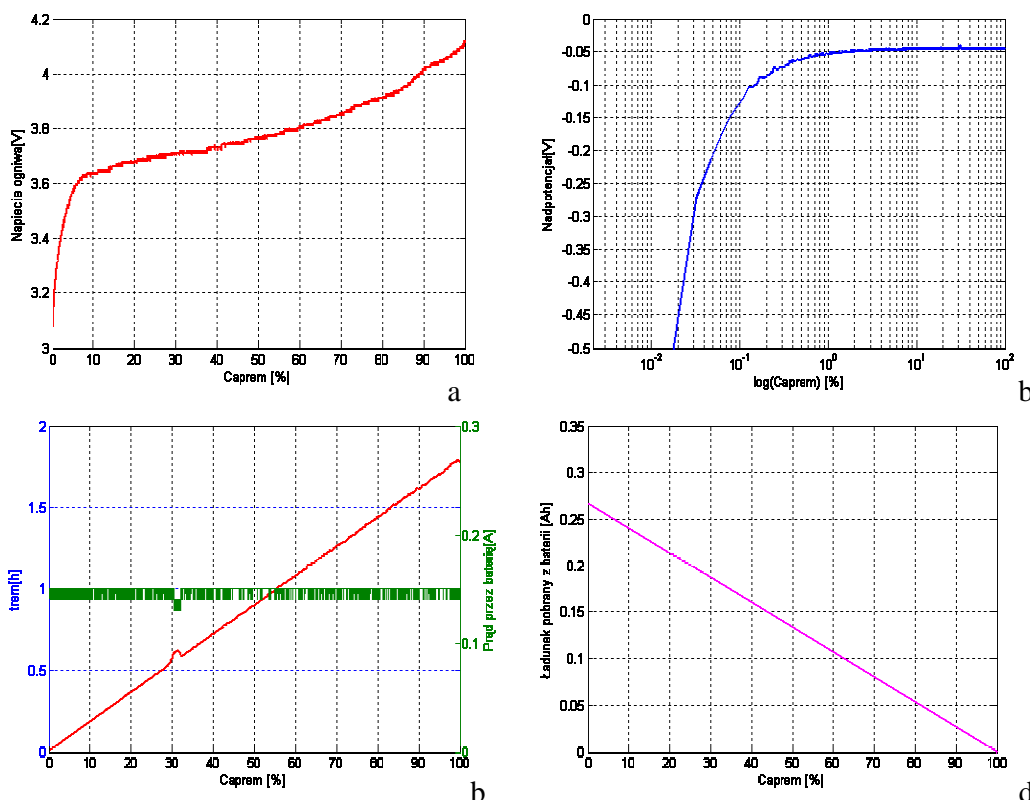
⁵ Bateria była specjalnie pakietowana na potrzeby eksperymentu.

⁶ Oprócz eksperymentu „Random”

Tab. 2. Eksperymenty sprawdzające wiarygodność proponowanej metody szacowania SOC i parametrów pochodnych

Stały prąd	0,1 C	0,2 C	0,3 C	0,4 C	0,6 C	0,8 C	1 C	1,2 C	1,5 C	2 C
Stała moc	0,1 CV	0,2 CV	0,4 CV	0,6 CV	0,8 CV	1 CV	1,5 CV	2 CV	4 CV	8 CV
Stała rezystancja	$V_{zn}^7/0,1 C$	$V_{zn}/0,2 C$	$V_{zn}/0,4 C$	$V_{zn}/0,6 C$	$V_{zn}/0,8 C$	$V_{zn}/1 C$	$V_{zn}/1,5 C$	$V_{zn}/2 C$	$V_{zn}/4 C$	$V_{zn}/8 C$
Zmienne zachowanie użytkownika	0 C 0,2 C 0,4 C	0 C 0,2 C 0,6 C	0 C 0,4 C 0,8 C	0 C 1 C 2 C	0 C 3 C 0,5 C	0 C 1 C 0,1 C	0,1 C 1 C 3 C	0,1 C 0,6 C 0,2 C	0,2 C 0,4 C	Rando m ⁸

W przypadku stałego obciążenia prądem, mocą, rezystancją wyniki są powtarzalne (rys. 7), a metoda opracowana przez autora daje błędy pomiaru 1 %⁹, błąd szacunku t_{rem} jest więc również równy 1 %. Ponieważ modyfikator temperaturowy w przypadku tych badań jest równy 1, jedynie modyfikator prądowy różni SOC i Cap_{rem} . Predykcja czasu użytkowania baterii w przypadku takiego obciążenia bardzo dobrze oddaje rzeczywistość. Różnice parametrów SOC i spokrewnionych przedstawione zostały na rys. 7. Przedstawione wyniki są uśrednieniem pomiarów z tab. 2 dla baterii Pro Lite v2 LiPO.



Rys. 7. Charakterystyki baterii Pro Lite v2 LiPO dla rozładowania prądem stałym 0,6 C a – Napięcie na baterii w funkcji Cap_{rem} , b – nadpotencjał [V] wyliczony z zależności (2), c – szacowany czas użytkowania baterii w funkcji Cap_{rem} , d – ładunek elektryczny [Ah] pobrany z baterii w funkcji Cap_{rem}

Błąd pomiaru SOC i parametrów pochodnych wzrasta przy zmiennym zachowaniu użytkownika i osiąga wartość 4,4 %¹⁰ dla Cap_{rem} przy eksperymencie Random. Wartość t_{rem}

⁷ Napięcie znamionowe baterii tj. 3,6 V dla baterii Li-Ion i 3,7 V dla baterii LiPO

⁸ W trakcie eksperymentu pobierany był losowy prąd z losowym interwałem czasowym

⁹ Błąd ten może zostać oszacowany jedynie po zakończeniu pomiaru, gdyż dopiero wtedy dostępna jest informacja dotycząca całości ładunku pobranego z baterii.

zgodnie z przewidywaniem autora rozminęła się z rzeczywistością, gdyż nie można dokonać predykcji zachowań użytkownika. Pozostałe parametry: SOC , Cap_{rem} oraz SOC są szacowane na odpowiednio lepszym poziomie.

9. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W pracy zaprezentowano propozycję metody szacowania SOC oraz parametrów pochodnych. Opisano szczegółowo metodologię proponowanej metody oraz pokazano serię eksperymentów, które dowodzą poprawności dobranych narzędzi.

W literaturze [10], [1], [7] systemy szacujące SOC z błędem na poziomie 5 % przy zmiennym, ale periodycznym zachowaniu ocenia się jako dokładne. Autor nie spotkał opracowania, które zawierałoby wyniki pomiarów dla zmiennego obciążenia, które odpowiadałoby eksperymentowi Random.

Kolejnym krokiem jest zaimplementowanie opisanej metody w systemie mikroprocesorowym tak, aby można było stworzyć część systemu inteligentnej baterii. Koncepcja takiego urządzenia powstała, a autor jest na etapie uruchamiania pierwszego prototypu urządzenia szacującego. Wtedy będzie można zbadać wpływ błędów pomiaru wynikających z budowy toru pomiarowego napięcia i prądu. Budowa odpowiedniego toru jest w tym przypadku trywialna, gdyż dynamika sygnałów osiąga 72 dB, co przy zasilaniu systemów mikroprocesorowych napięciem 3,3 V daje bardzo niskie poziomy sygnałów użytecznych.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] P. Bigaj, *Call-notification spread-system*, Master Thesis On Faculty Of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science And Electronics, 2008.
- [2] Cell Specification Data SLPB 70460330, Kokam Co., Ltd.
- [3] R.A. Powers, *Batteries for Low Power Electronics*, Proceedings of the IEEE, vol. 83 (April 1995), no. 4, 687-693.
- [4] J.R. van Beek, H.C. Donkersloot, J.J.G. Willems, *Rechargeable Hydride Electrodes for Ni-H₂ Batteries Based Upon Stable Hydrogen-Storing Materials*, Proceedings of the 14th Int. Power Sources Symposium (Brighton, UK, September 1984), chapter 22 in Power Sources, vol. 10, 317-338.
- [5] P.H.L. Notten, *Rechargeable Nickel-Metal Hydride Batteries: from Concept to characteristics*, Chemical Industry, vol. 54, 102-115.
- [6] J.O'M Bockris, D.M. Drazic, *Electro-Chemical Science*, Taylor&Francis Ltd., London, 1972
- [7] H.J. Bergveld, W.S. Kruijt, P.H.L. Notten, *Battery Management Systems – Design by Modeling* vol.1, 2002
- [8] J. Moleda, A. Stoklosa, T. Bak, *Modification In the Electronic Structure of Cobalt Bronze Li_xCoO₂ and the Resulting Electrochemical Properties*, Solid State Ionics, vol. 36, no 1&2 53-58, October 1989.
- [9] J.H. Aylor, A. Thieme, B.W. Johnson, *A Battery State-Of-Charge Indicator for Electric Wheelchairs*, IEEE Trans. On industrial electronics, vol. 39, no.5, 398-409, October 1992.
- [10] E. Meissner; G. Richter, *Battery Monitoring and Electrical Energy Management - Precondition for future vehicle electric power systems*, Journal of Power Sources, vol. 116, Number 1, 79-98(20), July 2003.

¹⁰ Błąd ten może zostać oszacowany jedynie po zakończeniu pomiaru, gdyż dopiero wtedy dostępna jest informacja dotycząca całości ładunku pobranego z baterii.