

# Uniwersalna metoda wyznaczania stanu naładowania oraz ładunku całkowitego akumulatorów bazująca na liczniku ładunku

**Streszczenie.** W artykule zostanie opisana metoda wyznaczania stanu naładowania oraz ładunku całkowitego akumulatorów w oparciu o licznik ładunku. Metoda cechuje się dużą uniwersalnością ze względu na możliwość zastosowania dla różnych rodzajów akumulatorów. Została z powodzeniem przetestowana w akumulatorach litowo-jonowych, litowo-żelazowo-fosforanowych, niklowo-kadmowych oraz kwasowo-ołowiowych. Sprawdzają się użycia prostych obliczeń algebraicznych, dzięki czemu może być łatwo implementowana za pomocą prostych 8-bitowych układów mikrokontrolerowych.

**Abstract.** The article will describe a method which, based on the charge meter, allows the determination of the state of charge and total charge of batteries. The method is versatile due to the possibility of using it for various types of batteries. The method stayed Successfully tested in lithium-ion, lithium-iron-phosphate, nickel-cadmium and lead-acid batteries. It boils down to the use of simple algebraic calculations, so it can be easily implemented with simple 8-bit microcontroller ICs. (The universal method of determining the state of charge and total charge of batteries based on the coulomb counter).

**Słowa kluczowe:** licznik ładunku, stan naładowania akumulatora, ładunek całkowity.

**Keywords:** the coulomb counter, the state of charge, the total charge of battery.

## Wstęp

Określenie bieżącego stanu naładowania akumulatora jest kluczowe w zarządzaniu energią akumulatora. W tym celu estymuje się bieżący poziom ładunku zgromadzonego w akumulatorze w odniesieniu do ładunku całkowitego, który może pomieścić akumulator w pełni naładowany. Wyznaczanie stanu naładowania wymaga ciągłego monitorowania parametrów akumulatora. Najbardziej rozpowszechnione metody estymacji stanu naładowania bazują na śledzeniu stanu licznika ładunku, napięcia w obwodzie otwartym czy też impedancji wewnętrznej akumulatora [1, 2, 3, 4, 5]. Bez względu na przyjętą metodę, szacowanie jest procesem obciążonym sporym błędem wynikowym, rzędu kilku – kilkunastu procent [1, 8, 9, 10]. Przyczyną tej niedokładności jest niejednoznaczność bieżącej wartości ładunku całkowitego  $Q_{TOT}$ , za którą odpowiada przede wszystkim jego fluktuacja w efekcie zmian prądu podczas ładowania i rozładowania oraz zmian temperatury otoczenia. Na ładunek całkowity wpływa również spadkowy efekt starzeniowy. Dodatkowo poziom zmian  $Q_{TOT}$  zależy od rodzaju akumulatora, ze względu na budowę chemiczną.

W pracy zaproponowano bazującą na liczniku ładunku uniwersalną metodę wyznaczania stanu naładowania przeznaczoną dla następujących rodzajów akumulatorów: litowo-jonowy (Lion), litowo-polimerowy (Li Polymer), litowo-żelazowo-fosforanowy (LiFePO<sub>4</sub>), niklowo-kadmowy (NiMh), kwasowo-ołowiowy.

## Parametry określające stan naładowania akumulatora

Do określenia stanu naładowania zastosowano parametr SOC (ang. SOC – State Of Charge), który wyraża w procentach bieżący ładunek  $Q_{BAT}$  zgromadzony w akumulatorze w stosunku do ładunku całkowitego  $Q_{TOT}$ , czyli akumulatora w pełni naładowanego:

$$(1) \quad SOC = \frac{Q_{BAT}}{Q_{TOT}} 100\%.$$

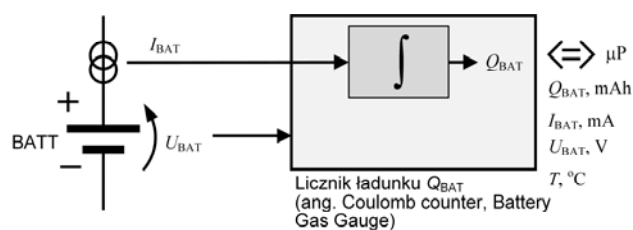
W celu monitorowania procesów starzenia akumulatora wyznaczany jest parametr SOH (ang. SOH – State Of Health), który wyraża w procentach ładunek całkowity  $Q_{TOT}$

w stosunku do deklarowanego przez producenta ładunku nominalnego  $Q_N$ :

$$(2) \quad SOH = \frac{Q_{TOT}}{Q_N} 100\%.$$

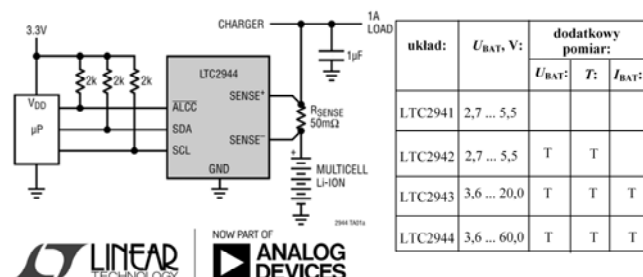
## Licznik ładunku

Na rys. 1 przedstawiono koncepcję licznika ładunku. Układ zlicza ładunek zgromadzony w akumulatorze  $Q_{BAT}$  na podstawie prądu  $I_{BAT}$ , po scałkowaniu w integratorze. Wartość  $Q_{BAT}$  rośnie podczas ładowania i spada w trakcie rozładowania. Układ opcjonalnie może oferować pomiar dodatkowych parametrów akumulatora: prąd  $I_{BAT}$ , napięcie  $U_{BAT}$ , temperatura otoczenia  $T$ , ułatwiając detekcję stanu pełnego naładowania i rozładowania.



Rys. 1. Koncepcja licznika ładunku

W pracy zastosowano scalone liczniki ładunku dostępne w ofercie Analog Devices (rys. 2) [6, 7].



Rys. 2. Układy scalone z licznikiem ładunku dostępne w ofercie Analog Devices

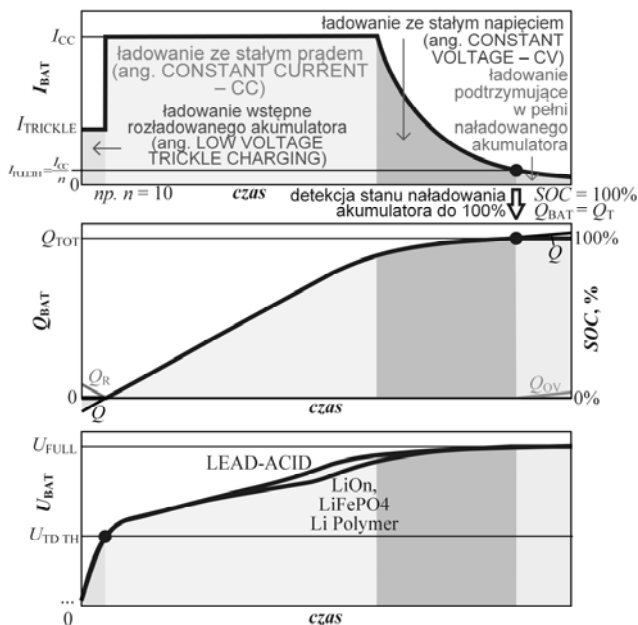
## Proces ładowania

Podczas ładowania licznik ładunku  $Q$  dostarczanego do akumulatora zwiększa swoją wartość. Monitorowanie procesu ładowania rozróżnia 4 fazy (rys. 3):

1. Ładowanie wstępne całkowicie rozładowanego akumulatora ( $SOC = 0\%$ , bieżący ładunek akumulatora  $Q_{BAT} = 0$ ) – zazwyczaj stałym prądem o ograniczonej wartości  $I_{TRICKLE}$  stanowiącej ułamek stałego prądu  $I_{CC}$  płynącego w trybie CC. Licznik  $Q$  zmniejsza do zera ładunek resztkowy  $Q_R$ , który został uprzednio wybrany z akumulatora w stanie całkowitego rozładowania.
2. Ładowanie w trybie CC (ang. constant current) ze stałym prądem  $I_{CC}$  – rozpoczyna się w momencie wyzerowania  $Q_R$ . Licznik  $Q$  zwiększa od zera wartość  $Q_{BAT}$ .
3. Ładowanie w trybie CV (ang. constant voltage) ze stałym napięciem  $U_{BAT}$  (w przybliżeniu) – prąd maleje wykładniczo od wartości początkowej  $I_{CC}$  do umownej wartości  $I_{FULLTH}$ , determinującej osiągnięcie stanu pełnego naładowania  $SOC = 100\%$ ,  $Q_{BAT} = Q_{TOT}$ .

$$(3) \quad I_{FULLTH} = \frac{I_{CC}}{n}, \text{ przy czym typowo: } n = 10.$$

4. Ładowanie podtrzymujące prądem kontynuującym wykładniczy spadek poniżej wartości  $I_{FULLTH}$ . Licznik  $Q$  zwiększa od zera ładunek nadmiarowy  $Q_{OV}$ , który gromadzi się w akumulatorze ponad ładunek  $Q_{TOT}$ .



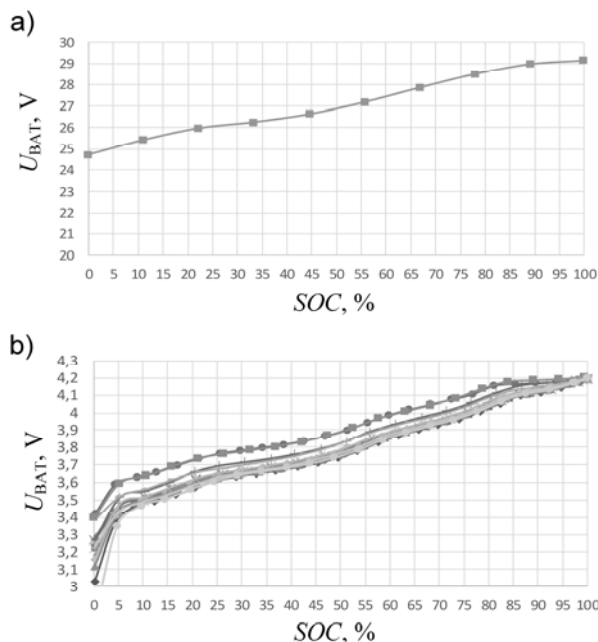
Rys. 3. Proces ładowania akumulatora

Na rys. 4a,b przedstawiono przykładowe charakterystyki  $U_{BAT} = f(SOC)$  będące efektem monitorowania procesu ładowania akumulatorów. Na rys. 4a pokazano charakterystykę 8. ogniowego akumulatora LiFePO4 x 8s, o pojemności znamionowej  $Q_N = 42\ 000$  mAh, natomiast rys. 4b przedstawia rozrzut charakterystyk 15 egzemplarzy pojedynczych ogniów LiOn o pojemności znamionowej  $Q_N = 2\ 500$  mAh.

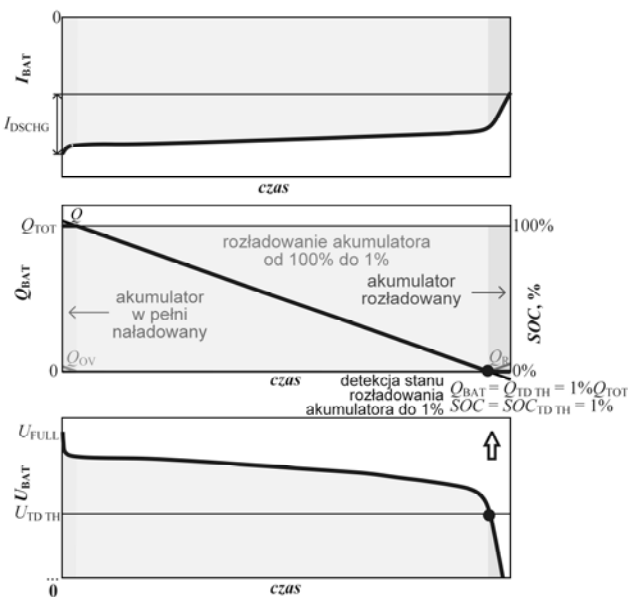
## Proces rozładowania

Podczas rozładowania (prąd akumulatora  $I_{BAT} < 0$ ) licznik ładunku  $Q$  dostarczanego do akumulatora zmniejsza swoją wartość. Monitorowanie procesu rozładowania rozróżnia 3 fazy (rys. 5):

1. Rozładowanie akumulatora w pełni naładowanego ( $SOC = 100\%$ ,  $Q_{BAT} = Q_{TOT}$ ). Licznik  $Q$  zmniejsza do zera ładunek nadmiarowy  $Q_{OV}$ , który został uprzednio dostarczony ponad ładunek całkowity  $Q_{TOT}$ .



Rys. 4. Rzeczywiste charakterystyki  $U_{BAT} = f(SOC)$ : a) 8. ogniowy akumulator LiFePO4 x 8s o pojemności znamionowej  $Q_N = 42\ 000$  mAh; b) rozrzut charakterystyk 15 egzemplarzy pojedynczych ogniów LiOn o pojemności znamionowej  $Q_N = 2\ 500$  mAh



Rys. 5. Proces rozładowania akumulatora (rezystancja obciążenia  $R_L = \text{const}$ )

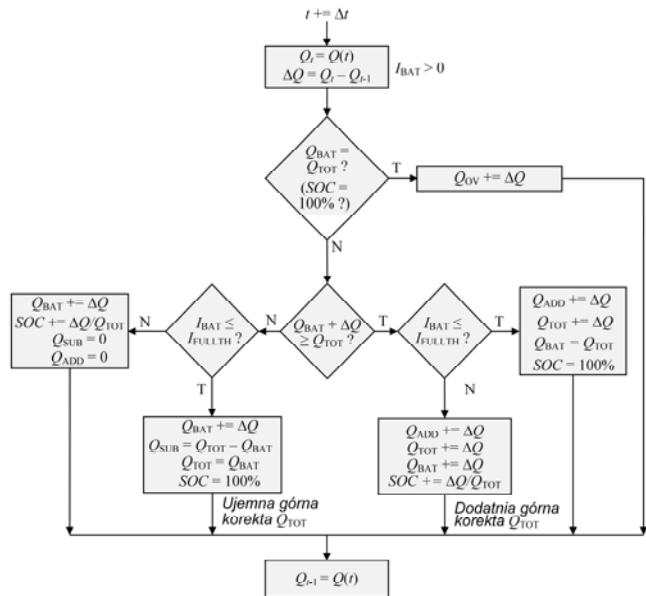
2. Rozładowanie od momentu wyzerowania się  $Q_{OV}$ . Licznik  $Q$  zmniejsza bieżący ładunek akumulatora  $Q_{BAT}$  od wartości początkowej  $Q_{TOT}$  ( $SOC = 100\%$ ). Zmniejszanie się  $Q_{BAT}$  pociąga za sobą spadek SOC aż do osiągnięcia umownej wartości progowej  $SOC_{TDTH} = 1\%$ , która odpowiada spadkowi napięcia akumulatora do poziomu  $U_{BAT TDTH}$ , co determinuje stan pełnego rozładowania akumulatora. Bieżąca faza rozładowania trwa aż do wyzerowania się  $Q_{BAT}$  ( $SOC = 0\%$ ).

3. Dalsze rozładowanie przy  $Q_{BAT} = 0$ ,  $SOC = 0\%$  powoduje wybranie z akumulatora ładunku resztkowego  $Q_R$ , którego wartość zwiększa się od zera wraz ze wzrostem wskazania licznika  $Q$ .

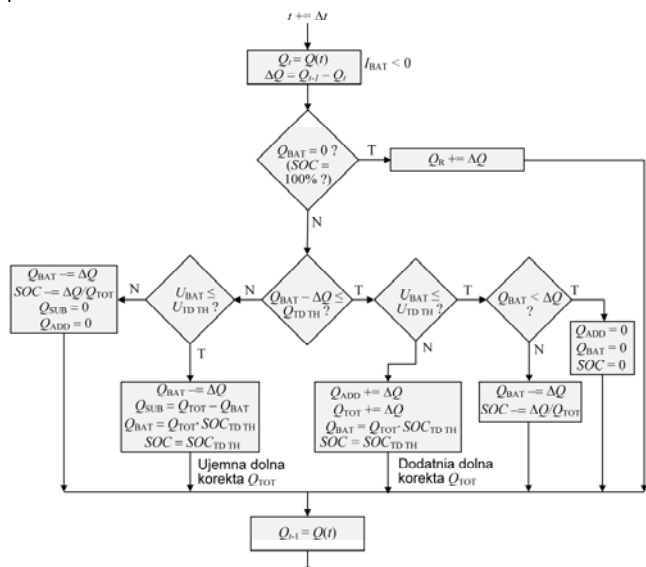
### Algorytm korekcji ładunku całkowitego

W opisywanej metodzie przewidziano korektę wartości ładunku całkowitego  $Q_{TOT}$  w dwóch stanach:

- w momencie detekcji stanu pełnego naładowania – gdy wykonywana jest tzw. górna (dodatnia lub ujemna) korekta  $Q_{TOT}$  (rys. 6),
- w momencie detekcji stanu całkowitego rozładowania – gdy wykonywana jest tzw. dolna (dodatnia lub ujemna) korekta  $Q_{TOT}$  (rys. 7).



Rys. 6. Algorytm wyznaczania stanu naładowania akumulatora podczas ładowania



Rys. 7. Algorytm wyznaczania stanu rozładowania akumulatora podczas rozładowania

Ujemna górna korekta zachodzi, gdy w momencie spadku prądu ładowania do wartości  $I_{FULL TH}$ , ładunek akumulatora  $Q_{BAT}$  nie osiągnął wartości ładunku całkowitego  $Q_{TOT}$  ( $Q_{BAT} < Q_{TOT}$ ). Wówczas ładunek całkowity jest zmniejszany o wartość  $Q_{SUB}$ :

$$(4) \quad Q_{SUB} = Q_{TOT} - Q_{BAT}$$

Dodatnia górna korekta występuje w sytuacji, gdy ładunek akumulatora  $Q_{BAT}$  osiągnął wartość  $Q_{TOT}$  ( $SOC = 100\%$ ) zanim prąd ładowania spadł do wartości  $I_{FULL TH}$ . W takiej sytuacji do momentu spadku prądu

ładowania do  $I_{FULL TH}$  zliczany jest ładunek korekcyjny  $Q_{ADD}$ , o który powiększony zostaje ładunek  $Q_{TOT}$ .

Ujemna dolna korekta jest wykonywana podczas rozładowania, gdy napięcie akumulatora spadnie do poziomu  $U_{BAT TH TD}$  przy stanie naładowania  $SOC > 1\%$ . W tym wypadku obliczany jest niedobór ładunku całkowitego  $Q_{SUB}$ :

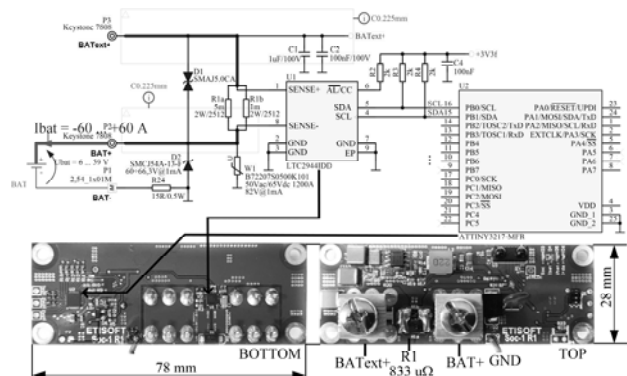
$$(5) \quad Q_{SUB} = (SOC - 1\%) \cdot Q_{TOT},$$

o który następnie pomniejszany jest ładunek całkowity.

Dodatnia dolna korekta ma miejsce, gdy podczas rozładowania stan naładowania spadnie do wartości  $SOC = 1\%$ , lecz napięcie akumulatora utrzymuje się na poziomie  $U_{BAT} > U_{BAT TH TD}$ . W takiej sytuacji do momentu spadku  $U_{BAT}$  do wartości  $U_{BAT TH TD}$  zliczany jest ładunek  $Q_{ADD}$ , o który następnie zostaje powiększony ładunek całkowity.

### Realizacja praktyczna

Opisywaną w pracy metodę wyznaczania stanu naładowania oraz ładunku całkowitego zaimplementowano w kompaktowym module przeznaczonym do monitorowania akumulatorów LiOn, LifePO4 oraz Lead-acid (rys. 8).



Rys. 8. Kompaktowy moduł monitorujący stan naładowania akumulatorów LiOn, LifePO4, Lead-acid z portem komunikacyjnym IrDA,  $U_{BAT}$ : 6 ÷ 60 V,  $I_{BAT}$ : ± 60 A

Moduł pracuje w szerokim zakresie napięcia oraz prądu akumulatora:  $U_{BAT}$ : 6 ÷ 60 V,  $I_{BAT}$ : ± 60 A. Wyposażony w port komunikacyjny IrDA wysyła na bieżąco informacje do modułu zarządzającego.

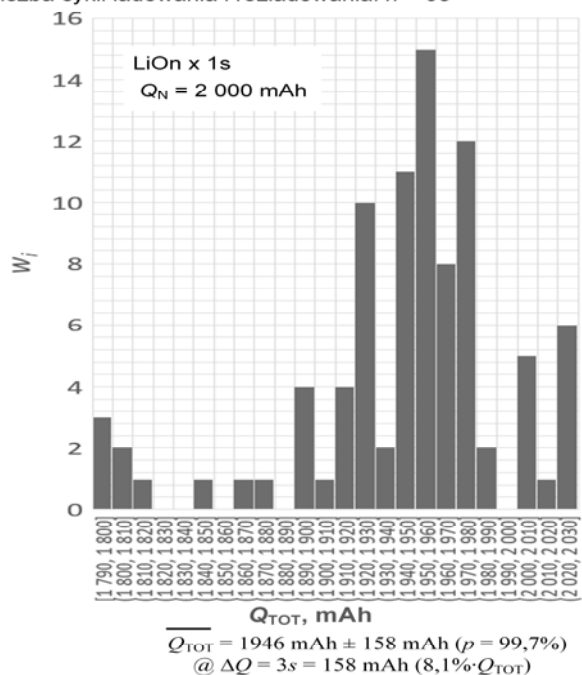
### Wyniki

Zadowolające działanie korygujące wartość ładunku całkowitego  $Q_{TOT}$  wykazano przeprowadzając serie  $n = 95$  naprzemiennych pełnych cykli ładowania i rozładowania przykładowego akumulatora o pojemności znamionowej  $Q_N = 2000$  mAh. W efekcie przeprowadzonych testów uzyskano histogram wartości  $Q_{TOT}$  wyznaczonych w kolejnych cyklach ładowania i rozładowania (rys. 9).

Z przedstawionej analizy można odczytać następujące parametry statystyczne:

- wartość średnia ładunku całkowitego  $\overline{Q_{TOT}} = 1946$  mAh,
- średnie odchylenie standardowe wyznaczanego ładunku całkowitego  $\sigma = 50,9$  mAh, co oznacza, że dokładność szacowania  $Q_{TOT}$  kształtuje się na akceptowalnym poziomie:
  - $\overline{Q_{TOT}} = 1946 \text{ mAh} \pm 50,9 \text{ mAh} (\pm 2,7\% \cdot \overline{Q_{TOT}})$  – obejmując 68% wszystkich przypadków,
  - $\overline{Q_{TOT}} = 1946 \text{ mAh} \pm 158 \text{ mAh} (\pm 8,1\% \cdot \overline{Q_{TOT}})$  – obejmując 99,7% wszystkich przypadków.

liczba cykli ładowania i rozładowania:  $n = 95$



Rys. 9. Histogram ładunku całkowitego  $Q_{TOT}$  wyznaczonego w przykładowym pojedynczym ogniwie LiOn

**Autor:** dr inż. Tomasz Adrikowski [tomasz.adrikowski@polsl.pl](mailto:tomasz.adrikowski@polsl.pl), Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

## LITERATURA

- [1] W. Y. Chang, The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. Hindawi Publishing Corporation, ISRN Applied Mathematics Vol. 2013.
- [2] J. Chiasson and B. Vairamohan, Estimating the state of charge of a battery, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 3 (2005), 465–470.
- [3] T. Dong, J. Li, F. Zhao et al., Analysis on the influence of measurement error on state of charge estimation of LiFePO4 power battery, in Proceedings of the International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment (ICMREE '11), Shanghai, China 2011, 644–649.
- [4] K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, and Y. C. Hsieh, Enhanced Coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries, Applied Energy, vol. 86, no. 9 (2009), 1506–1511.
- [5] A. H. Anbuky and P. E. Pascoe, VRLA battery state of charge estimation in telecommunication power systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 3 (2000), 565–573.
- [6] LTC2942 - I2C 2.7 V to 5.5 V Battery Gas Gauge with Temperature, Voltage Measurement, Linear Technology Corporation 2017.
- [7] LTC2944 - I2C 60V Battery Gas Gauge with Temperature, Voltage and Current Measurement. Linear Technology Corporation 2017.
- [8] V. Pop, H. J. Bergveld, P. H. L. Notten, J. H. G. Op het Veld, and P. P. L. Regtien, Accuracy analysis of the state-of-charge and remaining run-time determination for lithium-ion batteries, Measurement, vol. 42, no. 8 (2009), 1131–1138.
- [9] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley, State of charge determination from EMF voltage estimation: using impedance, terminal voltage, and current for lead-acid and lithium-ion batteries, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 5 (2007), 2550–2557.
- [10] S. Lee, J. Kim, J. Lee, and B. H. Cho, State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open circuit voltage versus state-of-charge, Journal of Power Sources, vol. 185, no. 2 (2008), 1367–1373.