

**Bartłomiej Mazan, Tomasz Detka**  
PIMOT, Warszawa

## **EKSPERYMENTALNE BADANIE WPŁYWU TEMPERATURY OGNIWA LITOWO-JONOWEGO NA POJEMNOŚĆ I DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ STOPNIA NAŁADOWANIA**

### **EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF TEMPERATURE OF LITHIUM-ION CELL ON ITS CAPACITY AND ACCURACY OF SOC CALCULATIONS**

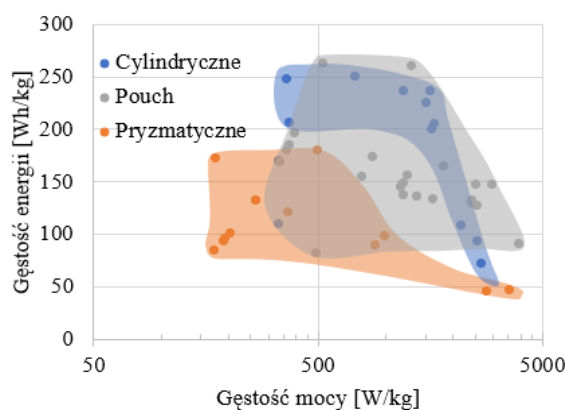
**Streszczenie:** W niniejszej publikacji przedstawiono i opisano metodę badania pojemności ogniwa w zależności od temperatury oraz wielkości obciążenia. Badaniu poddane zostało ogniwo cylindryczne o pojemności 3 Ah i wysokiej gęstości mocy, wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym. Badano pojemność ogniwa w temperaturach:  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  i  $45^{\circ}\text{C}$  oraz zbadano pojemność ogniwa przy obciążeniu prądem o natężeniu równym 0.5 C, 1 C oraz 2 C. Opisano także autorskie stanowisko badawcze zrealizowane w Zakładzie Elektromobilności w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji, na którym realizowane były badania. Wyniki badań porównane zostały z dokumentacją techniczną ogniwa w celu weryfikacji deklarowanej przez producenta pojemności. W artykule zaproponowano również zastosowanie zależności pojemności od temperatury ogniwa w algorytmie obliczającym stan naładowania baterii wg metody zliczania ładunku (ang. *Coulomb counting*). Pozwoli to w skrajnych warunkach temperaturowych zwiększyć dokładność obliczeń wartości stanu naładowania (SOC) o 13%, przy uwzględnieniu spadku pojemności ogniwa spowodowanego spadkiem temperatury ogniwa podczas badania.

**Abstract:** This publication presents and describes the method for testing cell capacity depending on temperature and load size. The research involved a cylindrical cell with a capacity of 3 Ah and high power density, used in the automotive industry. Cell capacity was tested at temperatures:  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  and  $45^{\circ}\text{C}$ , and cell capacity was tested at a load of 0.5 C, 1 C and 2 C. The author's research stand was also presented, that was made at the Department of Electromobility in the Automotive Industry Institute, where research was carried out. The test results were compared with the technical documentation of the cell in order to verify the capacity declared by the manufacturer. The article also proposes the use of the dependence of the capacity on the temperature of the cell in the algorithm that calculates the state of charge of the battery according to the Coulomb counting method. This will allow in extreme temperature conditions to increase the accuracy of the calculation of the state of charge (SOC) by 13%, taking into account the cell capacity drop caused by the temperature drop of the cell during the test.

**Słowa kluczowe:** badanie pojemności, ogniwa litowo-jonowe, ogniwo 18650, stan naładowania ogniwa  
**Keywords:** capacity test, rate test, li-ion cells, 18650 cell, state of charge estimation

## **1. Wstęp**

Magazynowanie energii w pojazdach jest bez wątpienia jednym z największych wyzwań dla transportu elektrycznego. Użytkownika pojazdu elektrycznego dotyczą bezpośrednio dwa zasadnicze parametry z tym związane: ilość energii możliwa do zmagazynowania oraz czas ładowania pojazdu. W bateriach elektrochemicznych przekłada się to na ilość skumulowanego materiału aktywnego w pojedynczych ogniwach (czyli w elementarnych jednostkach baterii), jakość tego materiału oraz na szybkość reakcji chemicznych w nich zachodzących. Wykres Ragone'a pozwala zestawić kluczowe parametry: grawimetryczną gęstość energii oraz grawimetryczną gęstość mocy.



Rys. 1. Wykres Ragone'a dla ogniw litowo-jonowych dostępnych na rynku wg autorskiego przeglądu, z podziałem na rodzaj (kształt) ogniwa

Na Rys. 1 przedstawiono zestawienie ogniw litowo-jonowych dostępnych na rynku z uwzględnieniem ich rodzaju (kształtu). Punkty na wykresie oznaczają parametry konkretnych ogniw, natomiast zakreślone obszary powstały poprzez połączenie skrajnych punktów zamieszczonych na wykresie dla danego rodzaju (kształtu) ogniw, wyznaczając tym samym obszar właściwości tej grupy.

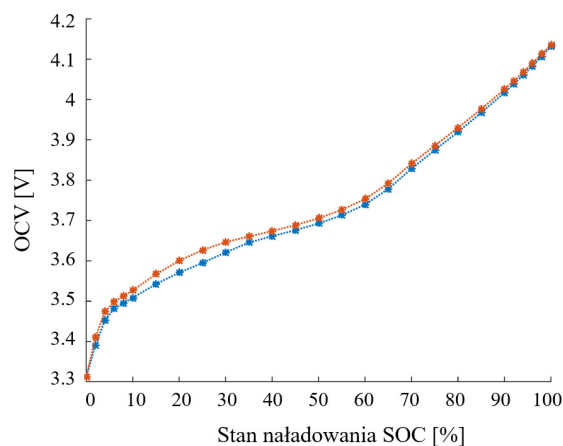
Ogniwa litowo-jonowe mają najwyższą gęstość energii spośród powszechnie stosowanych ogniw elektrochemicznych dostępnych na rynku oraz gęstość mocy na poziomie spełniającym potrzeby napędu pojazdów. Ze względu na popularyzację i rozwój technologii pojazdów elektrycznych, producenci konkurują o wykorzystanie ich ogniw w pojazdach produkowanych seryjnie. Technologia pozwalająca na produkcję tysięcy ogniw o identycznych parametrach jest dużym wyzwaniem ze względu chociażby na niedoskonałości procesów produkcji, które przyczyniają się z kolei do rozbieżności parametrów elektrycznych, które są coraz bardziej widoczne wraz ze starzeniem się ogniw. Istotne jest zatem wypracowanie metody pozwalającej na dokładne określanie parametrów ogniw, takich jak: aktualna pojemność, rezystancja wewnętrzna czy napięcie obwodu otwartego, która pozwoli dokładnie określić stan naładowania i stan zdrowia ogniwa. Określenie wartości wyżej wymienionych parametrów ogniw litowo-jonowych jest trudne ze względu na ich zależność od temperatury i stanu naładowania [1].

## 2. Ogniwa litowo-jonowe

Ogniwa litowo-jonowe są obecnie jednym z najbardziej zaawansowanych elektrochemicznych magazynów energii, produkowanych na skalę masową. W porównaniu do swoich poprzedników, tj. ogniw kwasowo-ołowiowych czy ogniw niklowo-metalkowo-wodorkowych, charakteryzują się wysokimi napięciami znamionowymi, co skutkuje również wysoką gęstością energii na poziomie nawet około 270 Wh/kg. Mają także najwyższą spośród ogniw elektrochemicznych sprawność, czyli stosunek energii uzyskanej podczas rozładowania do energii dostarczonej podczas ładowania, która przekracza zwykle 90% (zależnie od wielkości obciążenia). Wyróżniają się niską wartością samorozładowania wynoszącą mniej niż 5%/miesiąc [2] [3]. Charakteryzują się również nieliniową charakterystyką napięcia

rozładowania w funkcji stanu naładowania, a także są wrażliwe na zmiany temperatury [4]. Jednym z podstawowych parametrów ogniwa jest napięcie obwodu otwartego (ang. *Open Circuit Voltage*), którego przykładowy przebieg przedstawiono na Rys. 2.

Innym istotnym parametrem jest wartość rezystancji wewnętrznej, która jest wielkością wynikającą z właściwości materiałów przewodzących wewnątrz ogniwa, takich jak rezystancja: anody, katody, elektrolitu, a także rezystancja na granicy faz elektrolitu z elektrodami. Wzrost rezystancji wewnętrznej wiąże się z degradacją ogniwa, czyli pogorszeniem stanu zdrowia tj. spadkiem jego pojemności całkowitej. Jednak należy zauważyć, iż wartość rezystancji wewnętrznej zależy również od stanu naładowania i temperatury ogniwa, dlatego przy ocenie stanu zdrowia (SOH – ang. *State of Health*) należy wziąć pod uwagę także te wielkości [1]. Wskaźnikiem mówiącym o stanie zdrowia ogniwa jest iloraz pojemności zdegradowanego ogniwa do pojemności początkowej, przy tych samych warunkach rozładowania.



Rys. 2. Przykładowy przebieg napięcia obwodu otwartego dla ogniwa NMC. (krzywa czerwona - ładowanie, krzywa niebieska - rozładowanie) [5]

## 3. Obiekt badań

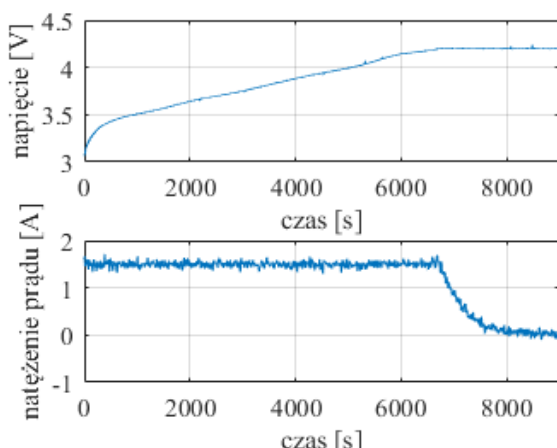
Badania przeprowadzono na ogniwie cylindrycznym typu 18650 (o średnicy 18 mm i długości 65 mm), które należy do grupy ogniw litowo-jonowych. Katoda ogniwa wykonana została ze stopu  $\text{LiNiCoAlO}_2$ , stąd ogniwo powszechnie określa się jako NCA. Wybrane parametry ogniwa przedstawiono w Tab. 1.

Producent w dokumentacji zaleca ładowanie ogniwa metodą CC-CV (ang. *Constant Current Constant Voltage*).

Tab. 1. Parametry techniczne badanego ogniwa

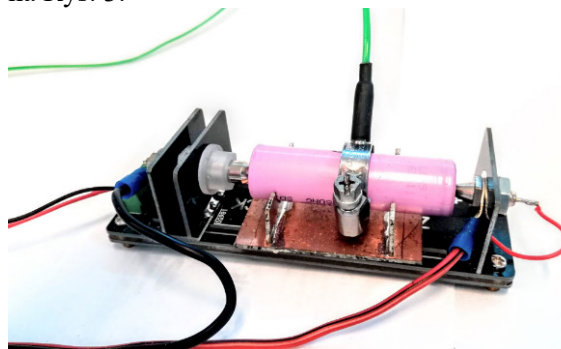
Materiał katodowy		LiNiCoAlO <sub>2</sub>
Pojemność ogniwa (0.2C, 25°C)		3 Ah
Napięcie znamionowe		3.6 V
Zakres napięć pracy		2.5 V – 4.2 V
Maksymalny ciągły prąd rozładowania		15 A
Standardowy prąd ładowania		1.5 A
Maksymalny ciągły prąd ładowania		4 A
Masa ogniwa		48 g
Wymiary	Średnica	18.33 mm
	Długość	65.85 mm
Grawimetryczna gęstość energii		225 Wh/kg
Grawimetryczna gęstość mocy		1125 W/kg

Oznacza to ładowanie ogniwa prądem o stałym natężeniu – *Constant Current*, w tym przypadku równym 1.5 A (tj. 0.5 C), a następnie po osiągnięciu przez ogniwo maksymalnej dozwolonej wartości napięcia tj. 4.2 V, należy utrzymywać stałą wartość napięcia ogniwa. Proces ładowania kończy się po osiągnięciu odpowiednio niskiej wartości natężenia prądu ładowania. Na potrzeby badania ustalono tą wartość natężenia prądu na poziomie 0.01 A. Przebiegi prądowo-napięciowe procesu ładowania ogniwa przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Przebieg napięcia ładowania (górny wykres) oraz prądu ładowania (dolny wykres)

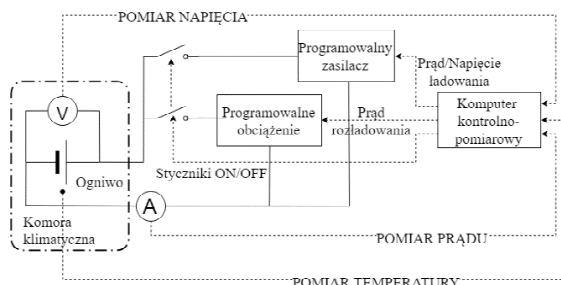
Oscylacje natężenia prądu wynikające z zakłóceń generowanych przez aparaturę badawczą oraz metody pomiaru prądu zostały wyeliminowane przez zastosowanie filtra dolnoprzepustowego. Ogniwo będące obiektem badań podłączone do aparatury badawczej przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Badane ogniwo oraz sposób jego podłączenia do aparatury pomiarowej

#### 4. Stanowisko badawcze

Badanie zostało wykonane na autorskim stanowisku. Składa się ono z: komputera National Instruments PCI wraz z monitorem, myszą oraz klawiaturą, zasilacza programowalnego, programowalnego obciążenia oraz modułu z urządzeniami pomocniczymi. Schemat stanowiska przedstawiono na Rys. 4.



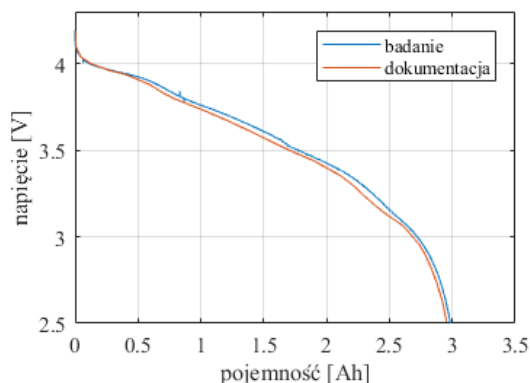
Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego

#### 5. Badanie pojemności

Ogniwo poddano testom pojemności w zmiennej temperaturze otoczenia oraz przy zmiennym obciążeniu, w celu określenia wpływu temperatury oraz wielkości obciążenia na pojemność ogniwa. Przed każdym badaniem ogniwo było ładowane w temperaturze otoczenia 25°C metodą CC-CV, następnie kondycjonowane było w komorze klimatycznej na 1 h przed rozpoczęciem badania. W celu ograniczenia efektu samorozładowania i jednocześnie zapewnienia, że badaniu poddane zostanie ogniwo po czasie relaksacji, ogniwo poddawane było testom w czasie od 2 do 12 h od momentu ukończenia

ładowania. Minimalne napięcie pracy ogniwa zdefiniowane przez producenta i przedstawione w Producent w dokumentacji zaleca ładowanie ogniwa metodą CC-CV (*ang. Constant Current Constant Voltage*).

Tab. 1, określa napięcie, w którym przerywany jest proces rozładowywania ogniwa (tzw. *cut-off voltage*). W pierwszej kolejności ogniwo rozładowywano prądem o natężeniu 1 C (tj. 3 A) w temperaturze otoczenia 25°C, tak aby możliwe było porównanie przebiegu z dokumentacją techniczną producenta. Wyniki przedstawiono na Rys. 5.

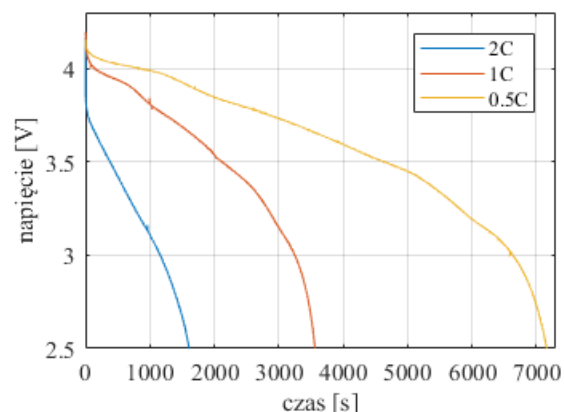


Rys. 5. Porównanie charakterystyki rozładowania w funkcji pojemności ogniwa dla obciążenia 1C

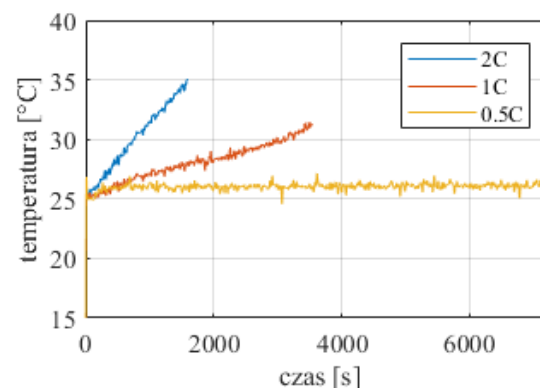
Pojemność ogniwa została obliczona zgodnie z zależnością (1), gdzie  $i(t)$  odpowiada przebiegowi natężenia prądu obciążenia w czasie, po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego. Pozwoliło to na przedstawienie przebiegów napięć w dziedzinie pojemności.

$$Q_{full} = \int i(t) dt \quad (1)$$

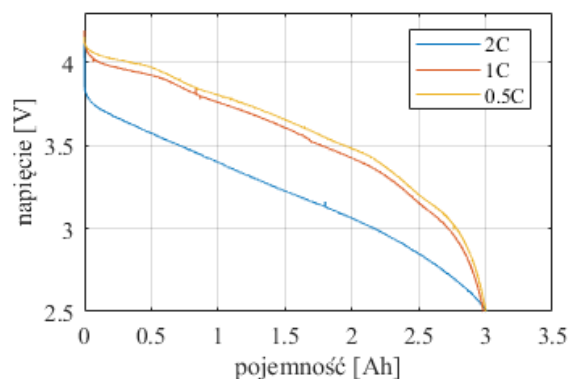
Następnie przeprowadzono badania dla prądu 0.5 C oraz 2 C, również w temperaturze otoczenia 25°C, jednak brak informacji producenta dotyczącej pojemności ogniwa dla tych wartości obciążeń uniemożliwiło analogiczne porównanie. Zestawiono natomiast przebiegi napięć i temperatur (na obudowie ogniwa) dla obciążenia prądami 0.5 C, 1 C oraz 2 C w dziedzinie czasu. Pomiar temperatury wykonany został na obudowie w środkowej części ogniwa, co można zauważyć na Rys. 3.



Rys. 6. Przebieg napięcia ogniwa dla obciążeń 0.5 C, 1 C i 2 C podczas rozładowania

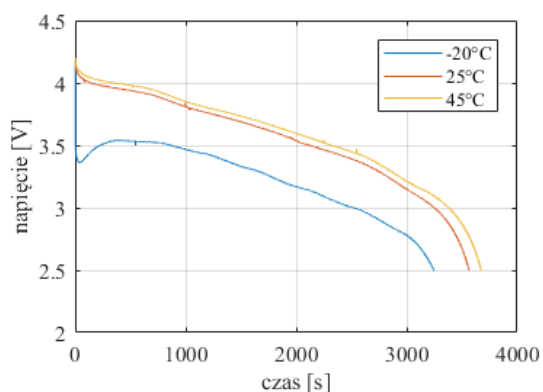


Rys. 7. Temperatura na obudowie ogniwa dla obciążeń 0.5 C, 1 C i 2 C podczas rozładowania.

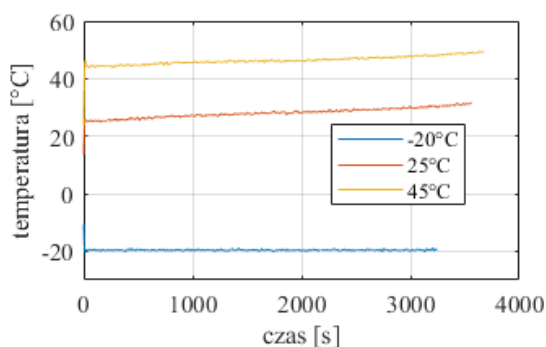


Rys. 8. Przebieg napięcia ogniwa dla obciążeń 0.5 C, 1 C i 2 C w funkcji pojemności

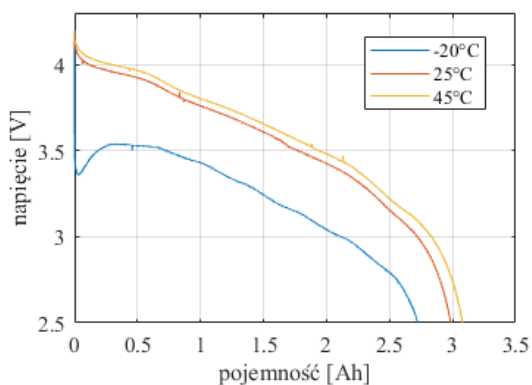
W drugiej części badania wykonano test pojemności dla obciążenia prądem 1 C w temperaturach otoczenia równych odpowiednio - 20°C, 25°C oraz 45°C.



Rys. 9. Przebieg napięcia ogniwa obciążonego prądem 1 C w różnych temperaturach otoczenia



Rys. 10. Temperatura na obudowie ogniwa obciążonego prądem 1 C w różnych temperaturach otoczenia



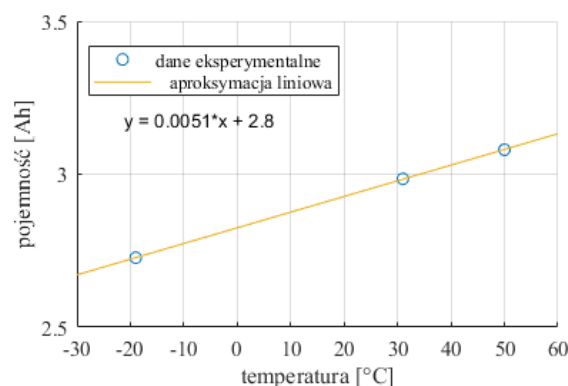
Rys. 11. Przebieg napięcia ogniwa obciążonego prądem 1 C w różnych temperaturach otoczenia w dziedzinie pojemności

Badania pojemności ogniwa w różnych temperaturach wykazują wyraźną zależność pojemności od zmierzonej temperatury ogniwa. Wraz ze wzrostem temperatury pojemność ogniwa rosła. Na Rys. 12 umieszczono wartości pojemności ogniwa w dziedzinie temperatury, która została zmierzona na obudowie ogniwa w chwili zakończenia badania. Zauważono wyraźną korelację pomiędzy tymi wartościami i podjęto próbę aproksymacji tej zależności funkcją li-

niową, która umieszczona została na tym samym wykresie. Aproksymowaną funkcję pojemności badanego ogniwa od temperatury przedstawia zależność:

$$Q(T) = 0.0051 \cdot T + 2.8 \quad (2)$$

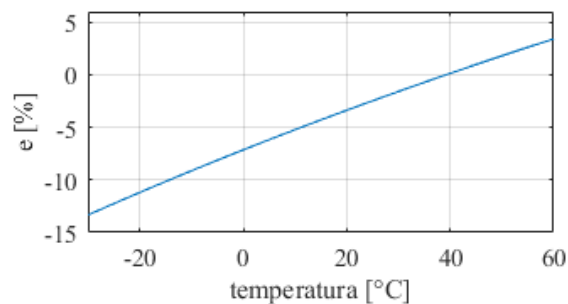
Zmienna  $T$  oznacza temperaturę w stopniach Celsjusza. Powyższą zależność, ze względu na małą liczbę punktów pomiarowych, należy poprzeć większą liczbą pomiarów w dalszych badaniach. Jednak w celu oceny wpływu temperatury na dokładność obliczeń stanu naładowania, w dalszej części pracy wykorzystano zależność (2).



Rys. 12. Zależność pojemności ogniwa od temperatury

Wykorzystując zależność liniową pojemności od temperatury opisaną wzorem (2) obliczono względną różnicę pojemności zależnej od temperatury i wartości znamionowej pojemności ogniwa zgodnie ze wzorem (3), a następnie przedstawiono tę wartość w funkcji temperatury na Rys. 13.

$$e(T) = \frac{Q(T) - Q_{nom}}{Q(T)} \cdot 100\% \quad (3)$$



Rys. 13. Względna różnica zmierzonej pojemności ogniwa w stosunku do wartości znamionowej

Na Rys. 13 kształt krzywej opisującej rozbieżność rzeczywistej pojemności od pojemności znamionowej wynika z przyjętego założenia o liniowej zależności rzeczywistej pojemności od temperatury na obudowie ogniwa.

Zależność pozwalającą obliczyć stan naładowania ogniwa z uwzględnieniem zależności pojemności od temperatury ogniwa  $Q(T)$  przedstawia wzór (4):

$$SoC = \eta \frac{\int i(t) dt}{Q(T)} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie  $\eta$  oznacza sprawność ogniwa, a  $i(t)$  definiuje przebieg prądu w czasie.

## 6. Wyniki i podsumowanie

Tabela 1. Wyniki badania pojemności ogniwa

Warunki badania	Pojemność ogniwa
temp. -20°C, prąd 1 C	2.73 Ah
temp. 25°C, prąd 0.5 C	3.00 Ah
temp. 25°C, prąd 1 C	2.98 Ah
temp. 25°C, prąd 2 C	3.01 Ah
temp. 45°C, prąd 1 C	3.08 Ah

Na podstawie wyników zamieszczonych w Tabeli 1 zauważono pomijalny wpływ wielkości natężenia prądu rozładowania na pojemność ogniwa (efekt Peukerta), co wynika z właściwości badanego ogniwa, które zaliczane jest do grupy ogniwa o dużej gęstości mocy (ang. *high power*). Zauważono natomiast silny wpływ temperatury otoczenia na pojemność ogniwa. Zakładając liniowy wpływ temperatury na pojemność ogniwa, w skrajnym punkcie pracy, tj. dla temperatury równej -30°C względna różnica pojemności wynosi aż 13%. Zatem w przypadku, gdy stan naładowania ogniwa obliczany jest według zależności (4), definiującej metodę obliczania ładunku (ang. *Coulomb counting*), zastosowanie liniowej zależności pojemności od temperatury pozwala w znacznym stopniu poprawić dokładność obliczeń SOC. Podczas

dalszych badań należy rozszerzyć zakres temperatur otoczenia i uzyskać większą liczbę punktów pomiarowych w celu potwierdzenia i dokładnego określenia zależności pojemności ogniwa od temperatury.

## 7. Literatura

- [1]. T. B. Reddy, "Linden's Handbook of Batteries", czwarte red. ed., McGrawHill, 2011.
- [2]. M. L. A. H. A. M. M.A. Hannan, „A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle application: Challenges and recommendations.”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 834-854, 2017.
- [3]. „Rechargeable Energy Storage Systems for Plug-in Hybrid Electric Vehicles—Assessment of Electrical Characteristics”, Energies, pp. 2960-2963, sierpień 2012.
- [4]. A. J. Peter Keil, „Calendar Aging of NCA Lithium-Ion Batteries Investigated by Differential Voltage Analysis and Coulomb Tracking”, Journal of The Electrochemical Society, pp. A6066-A6074, 2017.
- [5]. S. J. B. M. Ines Baccouche, „Improved OCV Model of a Li-Ion NMC Battery for Online SOC Estimation Using the Extended Kalman Filter.”, Energies, p. 764, 10 2017.

## Autorzy

inż. Bartłomiej Mazan – pracownik Zakładu Elektromobilności PIMOT, absolwent Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej (b.mazan@pimot.eu).

mgr inż. Tomasz Detka - kierownik Zakładu Elektromobilności PIMOT, doktorant Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (t.detka@pimot.eu).

## Informacje dodatkowe

Stanowisko badawcze oraz szereg badań wykonane zostały w ramach projektu Dofinansowania Działalności Statutowej Przemysłowego Instytutu Motoryzacji „Metody badawcze ogniwa litowo-jonowych” zrealizowanego w Zakładzie Elektromobilności.