

Bartłomiej Torbus, Tomasz Meinicke, Robert Tyrtańia
Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała

PRZEGLĄD OSIĄGÓW OGNIW LITOWO – JONOWYCH W ODNIESIENIU DO WYMAGAŃ WYNIKAJĄCYCH Z ZASTOSOWANIA W SAMOCHODOWYCH POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH

PERFORMANCE OVERVIEW OF LITHIUM-ION CELLS IN RELATION TO REQUIREMENTS RESULTING FROM ELECTRIC VEHICLE APPLICATION

Streszczenie: Ciągły wzrost sprzedaży pojazdów elektrycznych wymusza nieustanny rozwój technologii ogniw potrzebnych do budowy baterii trakcyjnych, które są jednym z najistotniejszych komponentów samochodu zasilanego energią elektryczną. Wobec tego zdecydowano się na przeprowadzenie szeregu prób mających na celu porównanie zachowania wybranych ogniw w założonych warunkach otoczenia oraz obciążenia. Przeprowadzone próby miały odzwierciedlić skrajne warunki pracy ogniw w pojeździe samochodowym, dzięki czemu uzyskane wyniki mogą istotnie pomóc np. w doborze ogniwa do pojazdów elektrycznych.

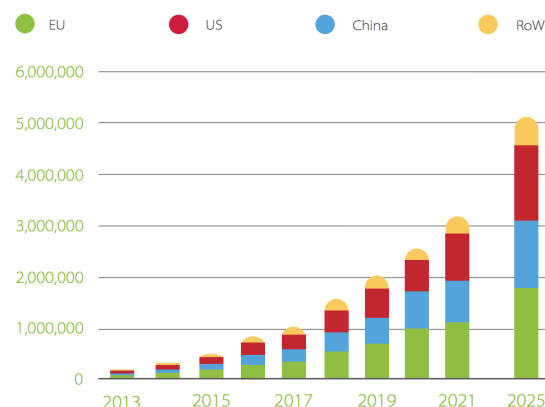
Abstract: Constant electric vehicles sales growth forces unceasing development of cell technology required for constructing traction batteries, which are one of the most important components of the vehicle powered by electrical energy. Therefore, series of load test has been carried out in order to comparison of selected cells behavior in determined ambient conditions and load. These tests were to reflect extreme conditions in road vehicle, so obtained results may be helpful for electric vehicle cell selection

Słowa kluczowe: samochody elektryczne, baterie Li-Ion, badania osiągnięć ogniw
Keywords: electric vehicles, Li-Ion batteries, Li-ion performance tests

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich lat odnotowuje się ciągły wzrost sprzedaży samochodów elektrycznych – w roku 2017 przekroczyła milion pojazdów w skali całego świata (wykres z prognozą na najbliższe lata przedstawiono na rys. 1). Wymusza to na producentach ciągły rozwój w zakresie źródeł zasilania tj. baterii, gdyż z perspektywy konsumenta, zasięg pojazdu jak też jego osiągi w różnych warunkach są kluczowym parametrem decydującym o zakupie.

Na sam zasięg pojazdu wpływa cały szereg czynników takich jak, temperatura otoczenia, styl jazdy kierowcy oraz rodzaj pokonywanej trasy (miejska, pozamiejska, górską), a także wiele innych czynników np. siła i kierunek wiatru, ciśnienie w oponach, rodzaj nawierzchni. Współczesne samochody elektryczne muszą zachowywać zasięg na akceptowalnym przez użytkownika poziomie oraz umożliwić użytkowanie niezależnie od zróżnicowanych warunków zewnętrznych.



Rys. 1. Prognozowana sprzedaż aut elektrycznych na świecie [1]

Najistotniejszym czynnikiem wpływającym na zasięg i osiągi pojazdu elektrycznego jest temperatura otoczenia [2] - zarówno zbyt wysoka, jak i zbyt niska powoduje zmiany temperatury ogniw i w konsekwencji obniżenie maksymalnych parametrów pracy baterii [3], co w skrajnych przypadkach może spowodować unieruchomienie pojazdu.

W tej publikacji zaprezentowano sposób, w jaki starano się odwzorować skrajne warunki pracy baterii występujące w pojeździe samochodowym oraz wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań na wybranych ogniwach Li-Ion.

2. Opis badań

2.1. Cel badań

Przeprowadzone badania miały na celu zasymulowanie (w zakresie temperatury) skrajnych warunków, w jakich może się poruszać pojazd i sprawdzenie ich wpływu na pojemność oraz energię możliwą do pobrania z ogniw różnych producentów. Symulowane obciążenia impulsowe miały na celu odzwierciedlenie maksymalnego obciążenia baterii, co pozwoli na określenie możliwości użytkowania tych ogniw w niskich temperaturach.

2.2. Obiekt badań

Obiektami badań były ogniwa Li-Ion różnych marek, kwalifikowane przez producentów do użycia w pojazdach w pełni elektrycznych oraz hybrydowych. W badaniach sprawdzono m.in. baterie typu NCM oraz LFP o różnej budowie – pryzmatycznej oraz workowej. W opracowaniu zamieszczono wyniki z testów ogniw:

1. Soudon (NMC 3,65V 12.5Ah)
2. A123 AMP20M1HD-A(LFP 3,2V 20Ah)
3. CATL (NMC 3,7V 42Ah)
4. Delta P140(NMC 3,7V 50Ah)
5. ZG LFP020AH(LFP 3,2V 20Ah)

Poniżej przedstawiono zdjęcie zbiorcze ogniw, oznaczonych zgodnie z powyższą numeracją.

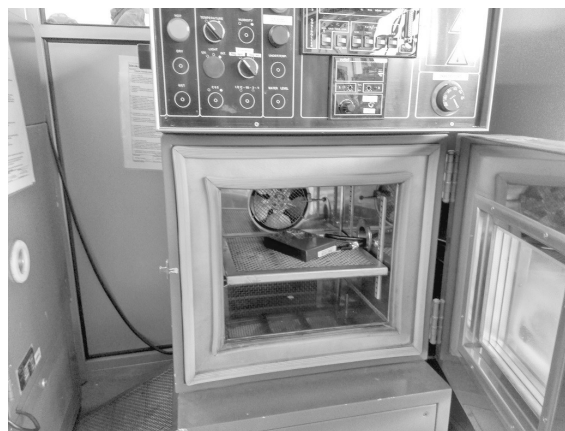
2.3. Opis stanowiska badawczego

Przeprowadzone próby zostały wykonane w komorach klimatycznych w Instytucie Badań i Rozwoju BOSMAL. Komory klimatyczne pozwalają na symulację warunków otoczenia w szerokim zakresie temperatur oraz wilgotności powietrza.

Próby badawcze były realizowane poprzez oprogramowanie wykonane w środowisku Labview służące do sterowania zasilaniem, obciążeniem, rejestracji i nadzorowania nad parametrami obiektu badań (temperatura, prąd, napięcie). Poniżej przedstawiono zdjęcie stanowiska badawczego (rys. 3).



Rys. 2. Zestawienie badanych ogniw



Rys. 3. Zdjęcie stanowiska badawczego

2.4. Opis cyklu badawczego

Z powodu znacznej różnicy nominalnej pojemności ogniw (12,5 - 50Ah) dla zapewnienia porównywalnych warunków testu były obciążane prądami proporcjonalnymi do ich nominalnych pojemności oznaczony jako C – tj. 1C dla ogniwa o nominalnej pojemności 5Ah wynosi 5A.

Wartości prądów w wybranych cyklach zostały oszacowane dla baterii trakcyjnej dla elektrycznego samochodu segmentu A (masa ok. 1100kg) tj. o pojemności 12-18kWh (zasięg 80-120km), przy ok. 360V napięcia nominalnego. Jako maksymalne ciągłe obciążenie przyjęto 60kW (prąd max. 200A, 5C). Moc niezbędną do komfortowego przyspieszenia oszacowano na 36kW(prąd 120A, 3C). Natomiast minimalną moc niezbędną do bezpiecznego poruszania się w ruchu drogowym – 24kW(prąd min. 80A, 2C). Dane te zostały oszacowane na podstawie obliczeń teoretycznych, a także doświadczeń praktycznych wynikających z prac na wcześniejszych prototypach [3].

Dla każdego ogniwa zakres badań obejmował przeprowadzenie 4 cykli badawczych:

1. Obciążenie prądem 5C w pokojowej temperaturze otoczenia.
2. Obciążenie prądem 3C w temperaturze otoczenia -5°C .
3. Obciążenie prądem zmiennym zgodnym z rys 4. w temperaturze otoczenia -5°C .
4. Obciążenie prądem 2C w temperaturze otoczenia -20°C .

Każdy cykl składał się z etapu ładowania ogniwa w temperaturze pokojowej, kondycjonowania ogniwa przez 8h w docelowej temperaturze komory oraz rozładowania zgodnie z prądem dla danego cyklu i ogniwa.

Pierwszy cykl miał na celu sprawdzenie maksymalnego przewidywanego obciążenia w całym zakresie pracy ogniwa, aż do jego całkowitego rozładowania – tj. do osiągnięcia minimalnego napięcia pracy określonego przez producenta.

Cykl drugi miał na celu sprawdzić, czy bateria po wychłodzeniu do -5°C np. zimą będzie w stanie oddać tyle mocy, aby zapewnić komfortową jazdę w całym zakresie pracy baterii.

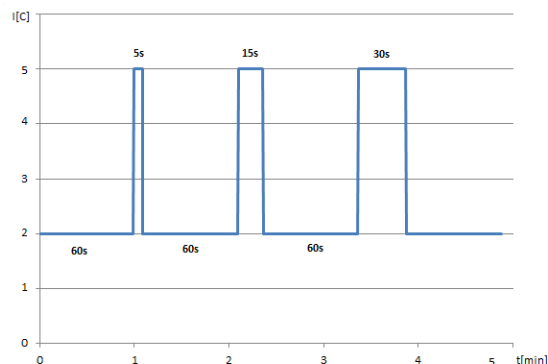
Kolejny cykl miał za zadanie sprawdzenie, czy bateria po wychłodzeniu do -5°C będzie w stanie oddać chwilowo przyjętą moc maksymalną (5C), nie powodując późniejszych problemów z normalną jazdą (2C). Przebieg prądowy tej próby przedstawiono na rys 4.

Ostatnią próbą było wychłodzenie ogniwa do zakładanej minimalnej temperatury pracy (-20°C) oraz zweryfikowanie, czy bateria będzie mogła oddać moc niezbędną do rozruchu pojazdu i bezpiecznej jazdy.

3. Przebieg badań

3.1. Użyteczność ogniw w pokojowej temperaturze otoczenia przy pełnym ciągłym obciążeniu

Pierwszy cykl badań ogniw oprócz sprawdzenia czy bateria jest w stanie pracować pod ciągłym maksymalnym przewidywanym obciążeniem (5C) w temperaturze otoczenia 23°C , pozwolił zmierzyć pojemność oraz oddaną energię – wyniki zestawiono w tabeli nr 1.



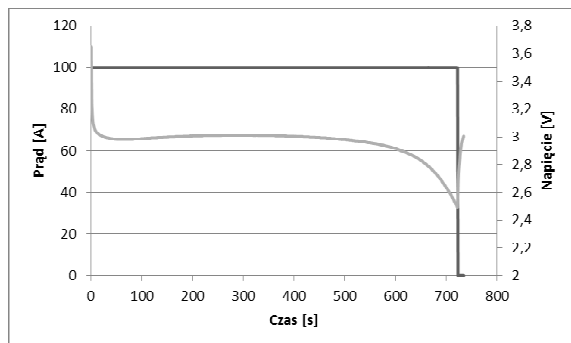
Rys. 4. Wykres cyklu zmiennego obciążenia prądowego

Tab.1. Zestawienie uzyskanych pojemności oraz energii w próbie nr 1.

Ogniwo	1*	2	3	4	5
Uzyskana pojemność [Ah]	8,56	19,18	41,94	50,27	20,06
Uzyskana pojemność [% nom.]	68,5	95,9	99,9	100,1	100,2
Uzyskana energia [Wh]	28,61	56,37	139,8	170,4	59,29
Uzyskana energia [% nom.]	63,6	86,7	90	92,1	92,6

*Pojemność do momentu przerwania próby z powodu przekroczenia dopuszczalnej temperatury ogniwa (60°C)

Próba na ogniwie nr 1. została przerwana z powodu przekroczenia maksymalnej dopuszczalnej temperatury (60°C), pozostałe ogniwa ukończyły próbę z powodu osiągnięcia minimalnego napięcia pracy. Z ogniw, które ukończyły próbę udało się pobrać całą dostępną pojemność (95,9 – 100,2% wartości nominalnej), jednak z powodu dużego obciążenia spadek napięcia na ogniwach był znaczny, co spowodowało, że energia pobrana z pakietu była już zdecydowanie mniejsza (86,7-92,6% energii nominalnej ogniw). W stosunku do parametrów nominalnych najwięcej pojemności oraz energii udało się odebrać z ogniwa nr 5, którego wykres rozładowania przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przykładowy cykl rozładowania ogniwa 5 prądem 5C

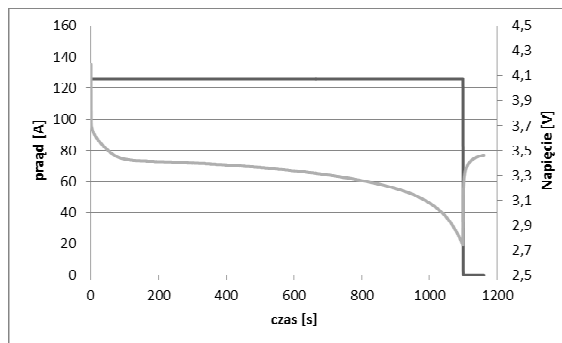
3.2. Użyteczność ogniw w temperaturze otoczenia -5°C przy umiarkowanym obciążeniu

Drugi cykl pomiarów miał na celu sprawdzenie zachowania się ogniw przy umiarkowanym obciążeniu (3C) w niskich temperaturach otoczenia. Podobnie jak w poprzedniej próbie, oprócz weryfikacji możliwości użytkowania ogniw w niskich temperaturach, rejestrowano odebraną pojemność oraz energię - dane zebrano poniżej w tabeli nr 2.

Tab. 2. Zestawienie danych z próby nr 2

Ogniwo	1	2	3	4	5
Uzyskana pojemność [Ah]	9,8	14,11	38,47	45,88	17,55
Uzyskana pojemność [% nom.]	78,4	70,5	91,6	91,8	87,8
Uzyskana energia [Wh]	31,4	38,99	127,2	155,7	48,3
Uzyskana energia [% nom.]	69,8	60	81,9	84,2	75,5

Wszystkie ogniwa ukończyły próbę osiągając minimalne napięcie pracy – jednak pojemność pobrana z ogniw była już zdecydowanie mniejsza od pojemności nominalnych (70,5 - 91,8% pojemności nominalnej ogniwa). Dodatkowo znaczny spadek napięcia ogniwa wynikający z mocnego obciążenia negatywnie wpłynął na możliwość pełnego pozyskania energii (60 – 84,2% energii nominalnej). Ogniwa 3 i 4 w tej próbie uzyskały pojemności najbliższe wartości nominalnych. Przykładowy wykres rozładowania ogniwa 3 przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przykładowy cykl rozładowania prądem 3C ogniwa 3 w temperaturze otoczenia -5°C

3.3. Obciążalność ogniw w niskiej temperaturze otoczenia (-5°C)

Kolejny cykl pomiarowy składał się z minimalnego ciągłego obciążenia (2C) oraz impulsowego obciążenia maksymalnego (5C). Celem próby było zweryfikowanie możliwości obciążenia ogniwa oraz zliczenie ilości cykli (rys. 4) do momentu uzyskania minimalnego napięcia pracy ogniwa. Zebrane rezultaty przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zestawienie danych z cyklu nr 3

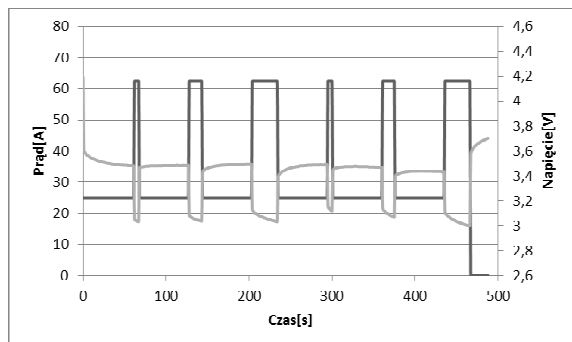
Ogniwo	1	2	3	4	5
5s pełnego obciążenia	OK	OK	OK	OK	OK
15s pełnego obciążenia	OK	OK	OK	OK	OK
30s pełnego obciążenia	OK	OK	OK	OK	OK
Ilość pełnych cykli	1	2	4	4	4

Wszystkie przebadane ogniwa umożliwiają chwilowe maksymalne obciążenia w temperaturze otoczenia -5°C. Ogniwa nr 3, 4 oraz 5 pozwoliły na wykonanie 4 pełnych cykli (ok. 70% nominalnej pojemności). Na wykresie (rys. 7.) pokazano przebieg cyklu dla ogniwa nr 1.

3.4. Użyteczność ogniw w temperaturze otoczenia -20°C przy obciążeniu 2C

Celem ostatniego cyklu było sprawdzenie czy po ekstremalnym wychłodzeniu (w temperaturze otoczenia -20°C) ogniwa nadal będą w stanie zapewnić minimalne zakładane obciążenie (2C). Głównym problemem w bardzo niskiej temperaturze jest znaczny wzrost rezystancji wewnętrznej ogniwa spowodowany zmniejszoną ruchliwością jonów w elektrolicie [5].

Ilość uzyskanej pojemności oraz energii przedstawiono w tabeli nr 4.



Rys. 7. Przykładowy cykl rozładowania zmiennym prądem ogniwa 1 w temperaturze otoczenia -5°C

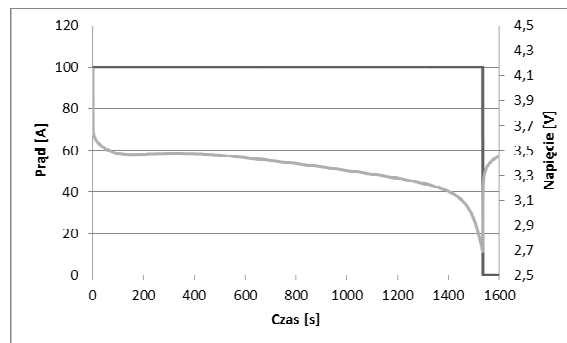
Tab. 4. Zestawienie danych z próby nr 4.

Ogniwo	1	2	3	4	5
Uzyskana pojemność [Ah]	6,94	9,41	36	42,72	0,02
Uzyskana pojemność [% nom.]	55,6	47,1	85,7	85,4	0
Uzyskana energia [Wh]	21,74	24,77	114,5	143,29	0,05
Uzyskana energia [% nom.]	48,3	38,1	73,8	77,4	0

Tylko ogniwa 3 oraz 4 wykazały się dużą odpornością na obciążenie w tak niskiej temperaturze. Spadek pojemności oraz energii dla ogniwa 1 oraz 2 jest bardzo duży (ok. 50% wartości nominalnych). Natomiast ogniwo 5 nie mogło być eksploatowane nawet z lekkim obciążeniem przy tak niskiej temperaturze otoczenia. Przykładowy wykres rozładowania ogniwa 4 załączono na wykresie na rys 8.

4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone próby maksymalnego obciążenia pokazały, że tylko ogniwo nr 1, nie może stale pracować przy ciągłym prądzie 5C ze względu na przegrzewanie się. Pozostałe ogniwa ukończyły próbę normalnie, uzyskując pojemności bardzo zbliżone do nominalnych. W celu umożliwienia pracy ciągłej ogniwa nr 1 przy maksymalnym zakładanym prądzie oraz zwiększenia żywotności, należy zastosować system chłodzenia [6].



Rys. 8. Przykładowy cykl rozładowania prądem 2C ogniwa 4 w temperaturze otoczenia -20°C

Ogniwa typu LFP bardzo dobrze sprawują się w takich obciążeniach nie generując przy pracy dużego ciepła.

Przy umiarkowanym obciążeniu (3C) dla temperatury otoczenia -5°C wszystkie przebadane ogniwa pozwalają na ciągłą pracę. Zauważalny spadek pojemności rzędu 20-30% wystąpił dla ogniwa nr 1 oraz 2. W bateriach opartych o te ogniwa, koniecznym będzie zastosowanie systemu dogrzewania ogniwa.

Próba obciążalności ogniwa w niskiej temperaturze otoczenia (-5°C), pokazała iż wszystkie ogniwa pozwalają na impulsową pracę z maksymalnym obciążeniem, ale dla ogniwa nr 1 oraz 2 taka eksploatacja baterii nie jest możliwa w sposób ciągły. System nadzorujący baterię będzie musiał odpowiednio wcześniej ograniczać maksymalny prąd, aby nie dopuścić do przedwczesnego rozładowania baterii.

Ostatnia próba użyteczności ogniwa w ekstremalnie niskiej temperaturze (-20°C) pokazała, że dla ogniwa nr 1, 2 oraz 5 koniecznym jest zastosowanie systemu ogrzewania ogniwa, ze względu na znacznie ograniczoną pojemność (ok. 50% nominalnej) lub nawet brak możliwości bezpiecznej jazdy.

5. Literatura

- [1]. Office for low emission vehicles, The Plug-In Vehicle Infrastructure Strategy, 2011.
- [2]. B.Torbus, R. Tyrtania, M. Meinicke "Ocena wpływu temperatury otoczenia na zasięg, obciążalność i możliwość rozruchu pojazdu elektrycznego zasilanego z baterii trakcyjnej typu li-ion.", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 113, str. 43 - 47, 2017.
- [3]. A. Czerwiński "Akumulatory baterie ogniwa", *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, 2015.
- [4]. R. Tyrtania, M. Meinicke, K. Kudzia "Projekt pojazdu elektrycznego z automatyczną skrzynią biegów zbudowanego z wykorzystaniem spalinowej wersji pojazdu segmentu A (Fiat 500).", *Maszyny*

Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 105, str. 83 - 88, 2015.

[5] S.S. Zhang, K. Xu, T.R. Jow "The low temperature performance of Li-ion batteries", *Journal of Power Sources*, nr 115, str. 137–140, 2003.

[6] Ahmad A. Pesaran "Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions", *Advanced Automotive Battery Conference* Las Vegas, Nevada, February 6-8, 2001.

Autorzy

mgr inż. Bartłomiej Torbus

mgr inż. Tomasz Meinicke

mgr inż. Robert Tyrtania

Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji
BOSMAL Sp. z o.o.

Ul. Sarni stok 93, 43-300 Bielsko-Biała