

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

## **OCENA WPŁYWU TEMPERATURY OTOCZENIA NA ZASIĘG, OBCIĄŻALNOŚĆ I MOŻLIWOŚĆ ROZRUCHU POJAZDU ELEKTRYCZNEGO ZASILANEGO Z BATERII TRAKCYJNEJ TYPU LI-ION**

### **EVALUATION OF THE INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON VEHICLE RANGE, BATTERY LOAD AND MOVABILITY OF ELECTRIC CAR POWERED BY LI-ION TRACTION BATTERY**

**Streszczenie:** Magazyny energii stosowane w pojazdach samochodowych, ze względu na zróżnicowane warunki użytkowania pojazdów, narażone są na skrajne zmiany temperatury. Znając ograniczenia termiczne baterii opartych na ogniwach Li-Ion, zdecydowano się na przeprowadzenie badań zasięgu i poprawności funkcjonowania pojazdu elektrycznego opartego o w/w ogniwa w zakresie wysokich i niskich temperatur otoczenia. W tym celu pojazd został poddany badaniom w klimatyzowanej komorze hamowni podwoziowej wg. wytycznych Regulaminu 101 EKG ONZ w różnych temperaturach otoczenia. W trakcie testów rejestrowano parametry elektrycznego układu napędowego, co pozwoliło na szerszą analizę wyników przeprowadzonych badań.

**Abstract:** Energy storage used in automotive industry is exposed to extreme temperature changes due to wide ambient conditions. Knowing the thermal limitations of Li-Ion based batteries, the vehicle range and usability tests of electric vehicle powered by those cells were conducted under both high and low ambient temperatures. For this purpose, drive tests in climatic dynamometer chamber were performed at several ambient temperature conditions, following UNECE 101 Regulation. During these tests, electric drivetrain parameters were recorded, which enabled further analysis of the obtained results..

**Słowa kluczowe:** samochody elektryczne, baterie Li-Ion, badania zasięgu

**Keywords:** electric vehicles, Li-Ion batteries, vehicle range tests

### **1. Wstęp**

Współczesny samochód osobowy jako środek transportu indywidualnego musi sprostać licznym wymaganiom użytkowników, w szczególności tym dotyczącym zachowania właściwości użytkowych w różnych warunkach klimatycznych. We współczesnych pojazdach elektrycznych kluczowymi wymaganiami są zachowanie na akceptowalnym poziomie zasięgu oraz możliwość użytkowania pojazdu w zróżnicowanych warunkach temperaturowych. W zależności od regionu świata w jakim pojazd jest użytkowany jego układ napędowy musi wykazać się odpornością na działanie wysokich, niskich bądź zmiennych - wysokich i niskich temperatur otoczenia przy zachowaniu zadawalających parametrów użytkowych i zasięgu.

Temperatura otoczenia ma wpływ na cały układ napędowy pojazdu elektrycznego, którego najbardziej wrażliwym na temperaturę elementem jest bateria trakcyjna. Bateria trakcyjna jest

elektrochemicznym magazynem energii, optymalnie pracującym w określonym, wąskim zakresie temperatur. Zarówno zbyt wysoka jak i zbyt niska temperatura wpływa na obniżenie wydajności magazynu energii [1], spadek zasięgu oraz osiągnięć całego zespołu napędowego, a w konsekwencji na obniżenie parametrów użytkowych pojazdu. Temperatura zewnętrzna wpływa również na sprawność mechaniczną układu przeniesienia napędu oraz systemu przetwarzania energii elektrycznej, co również negatywnie wpływa na zasięg pojazdu elektrycznego. Z powyższych względów podjęto próbę oceny podatności elektrycznego układu napędowego na zmienne warunki temperatury otoczenia.

W niniejszej publikacji autorzy prezentują metodologię oraz wyniki przeprowadzonych badań samochodu elektrycznego z baterią typu Li-Ion.

## 2. Opis badań

### 2.1. Cel badań

Celem badań było sprawdzenie wpływu temperatury otoczenia na zasięg, obciążalność i możliwość rozruchu pojazdu elektrycznego. Badanie pozwoliło na ocenę użyteczności pojazdu w zakresie wysokich i niskich temperatur otoczenia. Dodatkowo na podstawie danych zebranych z systemu elektronicznego pojazdu, możliwe było porównanie wydajności pakietu bateryjnego w różnych temperaturach.

### 2.2. Obiekt badań



Rys. 1. Widok ogólny opisywanego pojazdu [2]

Obiektem badań był samochód elektryczny zbudowany na bazie samochodu z silnikiem spalinowym marki Fiat 500. Pojazd wyposażony został w baterię trakcyjną typu Li-Ion, opartą na 72 ogniwach firmy Kokam o pojemności 53 Ah, połączonych szeregowo. Pakiet wyposażony jest w układ chłodzenia/grzania oparty o ogniwa Peltiera. Bateria pozwala na zmagazynowanie ok. 14 kWh energii. Źródłem napędu jest elektryczny silnik synchroniczny typu PMSM, produkcji KOMEL model SMKwsg132-6, sterowany za pośrednictwem falownika Sevcon Gen4 Size 8.

W układzie przeniesienia napędu znajduje się 5-biegowa przekładnia zautomatyzowana, przejęta ze spalinowej wersji pojazdu. Algorytm zmiany biegów zawarty jest w centralce sterującej, która na podstawie żądań kierowcy dobiera odpowiednie przełożenie w skrzyni biegów. [2]

### 2.3. Opis stanowiska badawczego

Badania przeprowadzone zostały na stanowisku hamowni podwoziowej wyposażonej w komorę klimatyczną pozwalającą na przeprowadzenie badań w szerokim zakresie temperatur.

Hamownia podwoziowa wykorzystywana w trakcie badań pozwala na pełną symulację oporów ruchu badanego pojazdu, po wcześniej-

szym ustawieniu parametrów zebranych w trakcie badań drogowych. Dokładny pomiar przejechanego przez pojazd dystansu prowadzony był przez układ sterujący hamowni, natomiast parametry pracy baterii mierzone były przez systemy elektroniczne pojazdu.

### 2.4. Opis cyklu badawczego

Zakres badań obejmował wykonanie czterech cykli pomiaru zasięgu w różnych temperaturach otoczenia. Każdy pojedynczy cykl składał się z etapu ładowania baterii, etapu kondycjonowania pojazdu w docelowej temperaturze oraz etapu właściwego pomiaru zasięgu.

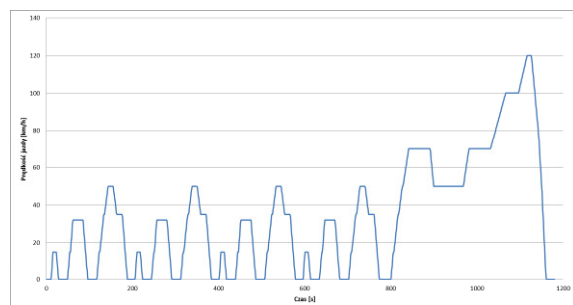
W ramach pierwszego etapu obejmującego ładowanie – pojazd został podłączony do źródła zasilania w celu uzupełnienia energii w pakiecie akumulatorów.

W ramach drugiego etapu obejmującego kondycjonowanie – pojazd został umieszczony w komorze klimatycznej hamowni na 12 godzin, w celu ustabilizowania temperatury całego zespołu napędowego.

W ramach trzeciego etapu obejmującego pomiar zasięgu – pojazd został umieszczony na stanowisku rolkowym hamowni w celu sprawdzenia możliwości napędu elektrycznego.

Pomiar zasięgu prowadzony był przez powtarzane jeden po drugim przejazdy zgodne z cyklem NEDC, aż do momentu wyłączenia się zespołu napędowego lub nie osiągnięcia krzywej przejazdu przy prędkości 50 km/h.

Cykl jezdny NEDC składa się z części symulującej przejazd w warunkach jazdy miejskiej UDC (Urban Driving Cycle) oraz części symulującej przejazd w warunkach jazdy pozamiejscowej EUDC (Extra-Urban Driving Cycle). Całość cyklu trwa 1180 sekund, natomiast przebyty dystans to około 11 km. Średnia prędkość przejazdu w całym cyklu NEDC wynosi 33,6 km/h. Przebieg prędkości jazdy w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 2. [3]



Rys. 2. Przebieg prędkości w funkcji czasu (test NEDC) [3]

### 3. Przebieg badań

#### 3.1. Wpływ temperatury na zasięg obciążalności i możliwości rozruchu pojazdu.

Przeprowadzono badania w czterech różnych warunkach temperaturowych (-15°C, 0°C, 14°C, 30°C). W celu zobrazowania rzeczywistego stopnia schłodzenia lub nagrzania baterii przedstawiono średnią temperaturę ogniw w momencie rozpoczęcia przejazdów w tabeli 1. Różnica pomiędzy temperaturą zewnętrzną, a średnią temperaturą ogniw, wynika z czasu kondycjonowania pojazdu w komorze klimatycznej.

Tab. 1. Początkowa średnia temperatura baterii po okresie kondycjonowania.

$T_{zew}$ [°C]	$T_{sr}$ [°C]
-15	-9
0	1
14	15
30	31

Analizując średnią temperaturę ogniw po okresie kondycjonowania (wynoszącym 12 godzin), w przypadku pomiaru w temperaturze -15°C, można zaobserwować różnice pomiędzy temperaturą zewnętrzną, a średnią temperaturą ogniw. Różnica wynika z dużego gradientu temperatur pomiędzy temperaturą nagrzanej baterii (po etapie ładowania), a temperaturą wewnątrz komory klimatycznej, przez co dwunastogodzinny czas kondycjonowania okazał się być niewystarczający do wyrównania temperatury baterii z temperaturą otoczenia. Podczas testu w temperaturze 30°C, przejazd został przerwany po 50 km przez system zarządzania baterią (BMS) ze względu na zbyt wysoką temperaturę ogniw. Obciążanie baterii i zasilanie układu napędowego w temperaturze otoczenia 30°C spowodowało nadmierny wzrost temperatury ogniw powyżej wartości dopuszczalnej. Wartości zarejestrowanych temperatur na ogniwach przedstawia tabela nr 2.

Według wskazań systemu zarządzania baterią pojazdu pozostało ok. 42% szacowanej pojemności baterii, która mogłaby zostać wykorzystana do napędu pojazdu po wychłodzeniu pakietu baterijnego.

W temperaturze -15°C w pierwszym cyklu EUDC pojazd nie osiągnął docelowej prędkości przejazdu (120 km/h), ze względu na ograniczenie wydajności prądowej wychłodzonych

ogniw. W kolejnych powtórzeniach cyklu EUDC brak możliwości osiągnięcia zadanej prędkości nie występował dzięki podniesieniu temperatury ogniw w czasie pracy oraz rozgrzaniu układu napędowego. Zestawienie przebytych dystansów przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zestawienie zasięgów pojazdu w różnych warunkach temperaturowych

$T_{zew}$ [°C]	Dystans [km]
-15	62
0	77
14	94
30	50

W trakcie badań w żadnej z temperatur nie odnotowano utrudnionego rozruchu pojazdu i ograniczeń w możliwości rozpoczęcia jazdy.

#### 3.2. Wpływ temperatury zewnętrznej na zużycie energii

W trakcie trwania pomiarów zasięgu rejestrowane były parametry napędu pojazdu z wewnętrznej sieci CAN (m.in. prąd chwilowy, napięcie chwilowe, temperatury wszystkich ogniw oraz prędkość pojazdu). Na podstawie zebranych danych, obliczone zostały wartości energii zużytej podczas przejazdu pierwszego cyklu NEDC. Energia pobrana z baterii została wyliczona poprzez scałkowanie przebiegu mocy chwilowych uzyskanych z iloczynu prądu i napięcia. Otrzymane wartości przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Zestawienie zużycia energii

$T_{zew}$ [°C]	Energia [kWh]
-15	2,41
0	2,08
14	1,82
30	1,70

#### 3.3. Wpływ temperatury na maksymalną moc chwilową pobieraną z baterii przez zespół napędowy

Na podstawie danych zebranych z sieci elektronicznej pojazdu obliczono moc pobieraną z baterii przy prędkości 107,5 km/h w fazie przyspieszania z prędkości 100km/h do 120km/h, w trakcie trwania pierwszego cyklu EUDC. Prędkość 107,5 km/h była maksymalną osiągniętą prędkością w przejeździe pierwszego cyklu EUDC w temperaturze otoczenia -15°C. W tabeli 5 przedstawiono wyniki obliczeń mocy chwilowej pobieranej z pakietu baterijnego,

przy pełnym wciśnięciu pedału przyspieszenia. Wymusiło to maksymalne obciążenie zespołu napędowego przy tej samej prędkości jazdy. Dzięki temu możliwe było porównanie i ocena odporności układu bateryjnego na wysokie obciążenie zespołu napędowego w różnych temperaturach otoczenia.

Tab. 5. Zestawienie mocy pobieranej z baterii przy prędkości 107 km/h

$T_{zew}$ [°C]	Moc [kW]
-15	29,17
0	36,36
14	40,51
30	39,58

### 3.4. Wpływ temperatury na sprawność pakietu bateryjnego

Analizując całkowitą ilość energii pobranej z pakietu bateryjnego w trakcie testu można zaobserwować, że im niższa temperatura ogniw tym mniej energii zostało wyprowadzonej z baterii. Oznacza to, że wraz ze spadkiem temperatury sprawność magazynu energii maleje. Wartości energii pobranej przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Zestawienie całkowitej energii pobranej z pakietu w zależności od temperatury zewnętrznej

$T_{zew}$ [°C]	Całkowita energia pobrana z pakietu [kWh]
-15	12,14
0	12,83
14	14,56
30	7,14*

\*nie ukończono testu z powodu przegrzania pakietu bateryjnego

Tab. 7. Zestawienie temperatury najchłodniejszego ogniwa ( $T_{min}$ ) i najcieplejszego ogniwa ( $T_{max}$ ) w zależności od temperatury zewnętrznej

$T_{zew}$ [°C]	Temperatura ogniw na początku testu		Temperatura ogniw na końcu testu	
	$T_{min}$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$T_{min}$ [°C]	$T_{max}$ [°C]
-15	-11	-7	15	23
0	0	3	21	27
14	14	17	28	33
30	29	42	34	53

W tabeli 7 przedstawiono temperaturę najchłodniejszego i najcieplejszego ogniwa pakietu bateryjnego na początku i końcu testu w zależności od temperatury zewnętrznej.

### 4. Podsumowanie i wnioski

Wraz ze spadkiem temperatury otoczenia z 14°C do -15°C można zaobserwować zdecydowane zmniejszenie zasięgu pojazdu. Spowodowane m.in. spadkiem sprawności baterii. Wynika to ze zmniejszonej ruchliwości jonów w elektrolicie, co wpływa na znaczny wzrost rezystancji wewnętrznej samego ogniwa [4,5]. Należy również podkreślić, że na sprawność całego układu mają także wpływ sprawności mechaniczne przeniesienia napędu w różnych temperaturach. W temperaturze 30°C nastąpiło wyłączenie układu spowodowane przegrzaniem ogniw, jednakże po ochłodzeniu pakietu możliwe byłoby dalsze kontynuowanie jazdy. W celu ograniczenia wpływu temperatury otoczenia na zasięg pojazdu należałoby wprowadzić skuteczniejszy układ chłodzenia baterii oraz zabezpieczyć ją przed nadmiernym wychłodzeniem [6].

Analizując zużycie energii przez pojazd w pierwszych cyklach NEDC można zaobserwować wzrost zużycia energii pobieranej z baterii trakcyjnej wraz ze spadkiem temperatury otoczenia. Spowodowane jest to obniżeniem sprawności mechanicznej układu przeniesienia napędu w niskich temperaturach oraz obniżeniem sprawności systemu przetwarzania energii, będącym następstwem znacznego spadku napięcia baterii trakcyjnej.

Na podstawie zestawienia maksymalnych mocy chwilowych z tabeli 5, można zaobserwować, że w niskich temperaturach przy wychłodzeniu ogniw baterii jej obciążalność jest niższa. Spowodowane jest to wzrostem rezystancji wewnętrznej ogniw, co powoduje znaczne zwiększenie spadku napięcia pod obciążeniem, następstwem czego jest ograniczenie mocy pakietu bateryjnego. Dla badanego pojazdu spadek obciążalności wyniósł 25%. W połączeniu z obniżeniem sprawności mechanicznej i elektrycznej całego układu transmisji mocy, odczuwalny jest znaczny spadek dynamiki pojazdu.

W wysokich temperaturach otoczenia problemem staje się kumulacja ciepła w ogniwach podczas obciążania, co w skrajnym przypadku doprowadziło do rozłączenia układu zasilania i przerwanie możliwości jazdy.

W przeprowadzonych badaniach nie stwierdzono wpływu temperatury na możliwość rozruchu pojazdu i rozpoczęcia jazdy.

## 5. Literatura

- [1]. Yan Ji, Yancheng Zhang, Chao-Yang Wang: "Li-Ion Cell Operation at Low Temperatures", *Journal of The Electrochemical Society*, nr 160, str. A636 - A649, 2013.
- [2]. 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.
- [3]. Regulamin nr 101 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych.
- [4]. A. Czerwiński: "Akumulatory baterie ogniwa", *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, 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