

# Wpływ warunków pracy pakietów trakcyjnych na eksploatację autobusów z napędem elektrycznym

## The impact of working conditions package traction on the exploitation of buses with electric drive



**Marcin Koniak**

*mgr inż.*

Wydział Transportu Politechniki  
Warszawskiej

koniakm@wt.pw.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule opisany jest wpływ czynników związanych z pracą akumulatorów trakcyjnych na ich parametry, a co za tym idzie na eksploatację autobusu nimi zasilanego. Autor we wstępie wskazał zalety transportu opartego na pojazdach z napędem elektrycznym, które przyczyniają się do jego rozwoju. Stwierdził także, że większość wad autobusów elektrycznych związana jest z zastosowanymi w nich akumulatorami. Przedstawione zostały najpopularniejsze typy zasobników energii stosowanych w autobusach elektrycznych. W dalszej części artykułu wymieniony został szereg czynników wraz z ich wpływem na eksploatację akumulatora. Opisane zostały m.in. temperatura, liczba cykli, głębokość rozładowania, czy prąd pracy. Problemy wynikające z zastosowania akumulatorów litowo-jonowych można ograniczyć w poprzez właściwy dobór jego typu poprzedzony analizą jego przyszłych warunków pracy.

**Słowa kluczowe:** *Pakiet trakcyjny; Napęd elektryczny*

**Abstract:** This paper described the impact of the traction batteries operating conditions on their parameters and the operation of the electric bus. The author in introduction pointed out the advantages of transport based on vehicles with electric drive. He also said that most of the electric buses disadvantages is related to the batteries. The most popular types of energy storage devices used in electric buses have been presented. The rest of this paper is mentioned a number of factors and their impact on the battery exploitation. Are described, among others, temperature, number of cycles, depth of discharge, the operating current. Problems arising from the use of lithium-ion batteries can be reduced by proper selection of its type preceded by an analysis of its future operating conditions.

**Keywords:** *Package traction; Electric drive*

Rozwój transportu publicznego opartego na wykorzystaniu autobusów elektrycznych stał się faktem, wzrost tego rynku ocenia się go na około 19% rocznie [1]. Za takim scenariuszem przemawia kilka czynników. Pierwszym z nich są zalety wynikające wycofania się z autobusów spalinowych, a co za tym idzie przeniesienie produkcji zanieczyszczeń z gęsto zaludnionych miast poza nie. Należy przy tym zwrócić uwagę, że elektrycznie węglowe wyposażone są w bardzo sprawne układy oczyszczania spalin kominowych, co skutkuje ich niewielkim negatywnym wpływem na środowisko. Kolejną zaletą środków elektrycznego transportu miejskiego jest ich cicha praca, co w przypadku ciasno zabudowanych ulic o dużym natężeniu ruchu jest istotnym

parametrem. Istotny jest także niższy nawet trzykrotnie koszt, przejechania 1 km przez autobus elektryczny w porównaniu do spalinowego. Ten parametr poprawiają zastosowane obecnie w tego typu pojazdach układy odzysku energii hamowania. Niestety transport z wykorzystaniem pojazdów elektrycznych nie jest pozbawiony wad. Właściwie wszystkie z nich związane są z zastosowaniem baterii chemicznych jako magazynu energii. Ze względu na wysoki koszt akumulatorów oraz ich znaczną wagę i objętość stanowią one istotne ograniczenie zasięgu autobusu elektrycznego w porównaniu ze spalinowym. Dodatkowo wymagają infrastruktury do ładowania w wyznaczonych miejscach trasy. Infrastruktura ta może wpływać niekorzystnie na miejskie

sieci rozdzielcze, co również wymaga analiz na etapie inwestycji. Akumulatory trakcyjne jako element autobusu stanowiący przeszło 30 % jego wartości są przedmiotem wielu analiz w zakresie ich właściwej eksploatacji. Przedmiotem niniejszego artykułu będzie przegląd warunków pracy akumulatorów trakcyjnych w odniesieniu do ich eksploatacji w autobusach elektrycznych.

### Typy akumulatorów wykorzystywane w pojazdach elektrycznych

Najczęściej wykorzystywanym w pojazdach elektrycznych typem magazynu energii są pakiety oparte na grupie ogniw litowo-jonowych. Wykorzystanie litu jest uzasadnione jego:

- najwyższą elektrododatnością na poziomie 4 V,
- wysoką gęstością energii na poziomie 200 Wh/kg, 400 Wh/L.
- szerokim zakresem temperatur pracy podawanym najczęściej w zakresie -40 +60 °C
- wysoką gęstością mocy i energii,
- długimi czasami pracy kalendarzowej
- dużą liczbą cykli pracy.

Wspólną cechą grupy akumulatorów litowo - jonowych jest ich budowa oparta na elektrodzie dodatniej z tlenków metali zawierających lit, elektrodzie ujemnej z porowatego węgla oraz elektrolicie zawierającym sole litowe rozpuszczone w mieszaninie organicznych rozpuszczalników. To właśnie różnice w składzie wymienionych elementów decydują o właściwościach użytkowych i eksploatacyjnych konkretnej technologii. Obecnie najczęściej wykorzystywane są akumulatory oparte na następujących związkach LiNiCoAlO<sub>2</sub> (NCA), LiNiMnCoO<sub>2</sub> (NMC), LiFePO<sub>4</sub> (LFP) oraz Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (LTO).

Przykładem ogniwa wykorzystującego związek LiNiCoAlO<sub>2</sub> jest bardzo popularny Panasonic NCR18650B. Ogniwo to zostało docenione przez firmę Tesla i jest wykorzystywane w ich pojazdach. Charakteryzuje się bardzo wysoką energią właściwą 243 Wh/kg i gęstością energii 676 Wh/L. Takie parametry pozwalają na budowanie pakietów trakcyjnych o stosunkowo niewielkim rozmiarze i dużej pojemności. Dodatkowym bardzo istotnym argumentem przemawiającym za takim rozwiązaniem cena na poziomie 200 \$/kWh. Niestety jest ich ograniczona liczba cykli, jak podaje producent do około 500 przy 100 rozładowywaniu. Na szczęście odpowiednio dobierając pojemność i reżim pracy można ten parametr znacznie wydłużyć osiągając 5 letnie okresy eksploatacji pomiędzy wymianami.

Drugim bardzo popularnym typem akumulatorów są te oparte na ogniwach wykorzystujących związek LiFePO<sub>4</sub>. Znajdują się one w ofercie m.in. firmy A123. Akumulatory skła-

dające się z takich ogniw montowane są w polskich i zagranicznych autobusach elektrycznych. W tym przypadku energia właściwą jest na poziomie 131 Wh/kg, natomiast gęstość energii to 247 Wh/L. Jak można zauważyć pakiety wykonane z ogniw w tej technologii są przeszło dwukrotnie większe i cięższe przy tej samej pojemności w stosunku do prezentowanego wcześniej Panasonica. Jednak ich zastosowanie jest uzasadnione dopuszczalnym przez producenta wysokim prądem ładowania wynoszącym 4C oraz wielokrotnie większą wytrzymałością na zrealizowane cykle pracy. Cena akumulatorów LFP obecnie kształtuje się na poziomie około 450 \$/kWh.

Kolejnym typem akumulatorów stosowanych w transporcie są te oparte na ogniwach wykorzystujących związek LiNiMnCoO<sub>2</sub>. Zastosowanie związku niklu umożliwiło osiągnięcie wysokiej energii właściwej na poziomie 250 Wh/kg, kobalt natomiast ustabilizował ogniwo mechanicznie i zapewnił niską rezystancję wewnętrzną. Gęstość energii tego ogniwa wynosi 550 Wh/l. Jak widać jest to technologia, która swoimi parametrami energetycznymi doskonale nadaje się do zastosowania w transporcie. Dodatkowo jej żywotność liczona jest na od 4000 do 10000 cykli w zależności od głębokości rozładowania dla najnowocześniejszych przedstawicieli tego typu akumulatorów. Cena niestety jest na dość wysokim poziomie i wynosi około 800 \$/kWh.

Ostatni typ akumulatorów, który coraz częściej jest wykorzystywany w autobusach elektrycznych to LTO czyli zawierające związek Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. Właśnie autobusy są najlepiej pasującą aplikacją tej technologii ze względu na dużą ilość dostępnego w nich

miejsca. W przypadku baterii LTO jest ono niezbędne ponieważ ich energia właściwą jest na poziomie 80 Wh/kg, natomiast gęstość energii to 150 Wh/L. Jak widać przy takich parametrach dla zapewnienia wymaganej trakcyjnie pojemności akumulatora konieczne jest przygotowanie odpowiednio dużej przestrzeni na jego montaż. W tym przypadku największą zaletą w znacznym stopniu rekompensującą wady tej technologii jest liczba cykli w połączeniu z dużymi prądami pracy zarówno dla ładowania jak i rozładowania. Producent podaje, że istnieje możliwość ładowania ogniw prądem nawet 8C. Cena akumulatorów LTO obecnie kształtuje się na poziomie około 900 \$/kWh w zależności od producenta.

## Wpływ warunków klimatycznych na eksploatację autobusów z napędem elektrycznym

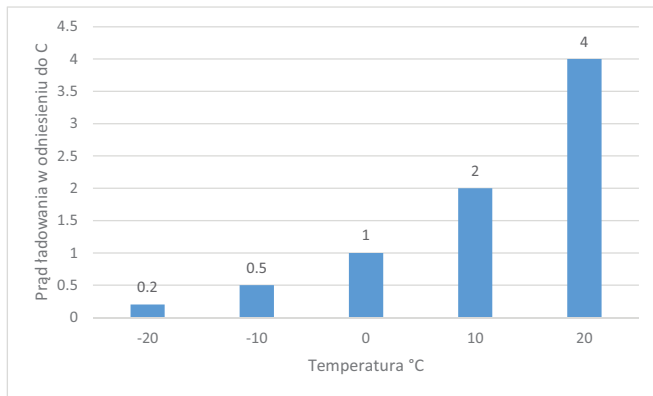
Wszyscy producenci akumulatorów litowo – jonowych uzależniają parametry pracy od ich temperatury. Ograniczenia te związane są zarówno z prądem ładowania jak i rozładowania. W tabeli 1 przedstawione są zakresy takie przykładowe zakresy/

Zazwyczaj istnieje również zależności między temperaturą baterii i dopuszczalnym prądem ładowania. Przykładowo dla akumulatorów LFP została ona zaprezentowana na rysunku nr 1.

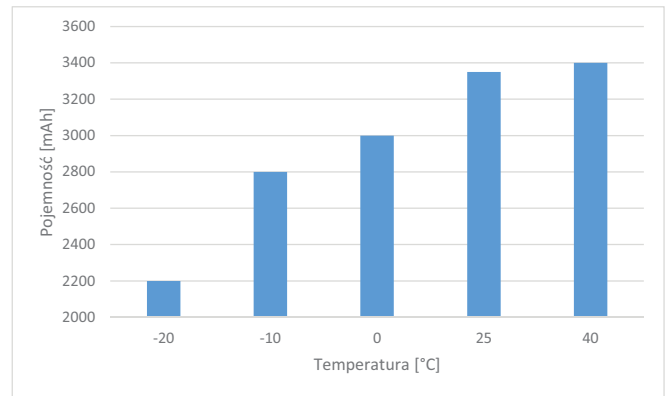
Jak można zauważyć w tabeli 1 zakresy temperatur dla prądów ładowania i rozładowania nie pokrywają się. Oznacza to, że proces ładowania jest bardziej wymagający elektrochemicznie i stąd wyższe parametry temperaturowe konieczne do jego realizacji. Dodatkowo na rysunku 1 przedstawiona jest zależność natężenia prądu ładowania w zakresie

Tab. 1. Przykładowe zakresy temperatur pracy akumulatorów dla rozładowania i ładowania

Typ ogniwa	Zakres temperatur pracy (rozładowanie)	Zakres temperatur dla ładowania
NCA	-20 ÷ +60 °C [3]	-0 ÷ +45 °C [3]
NMC	-20 ÷ +60 °C [3]	-0 ÷ +45 °C [3]
LFP	-30 ÷ +55 °C [2]	-20 ÷ +55 °C [2]
LTO	-30 ÷ +60 °C [2]	-20 ÷ +45 °C [3]



1. Przykładowa zależność prądu ładowania od temperatury ogniwa [2]



2. Zależność dostępnej pojemności od temperatury ogniwa [4]

akceptowalnych temperatur dla tego procesu. Można zauważyć, że dla niższych temperatur prądy te są również niższe. Przedkłada się to na dłuższe czasy ładowania. Konsekwencja tego może być przykładowo taka, że pomimo tego, że autobus posiada akumulatory umożliwiające szybkie ładowanie, to temperatura nie pozwoli tego parametru wykorzystać. To natomiast może wpłynąć na opóźnienia w realizacji cyklu przewozowego.

Tego typu sytuacja może również zaistnieć w przypadku, gdy temperatura pakietu jest zbyt wysoka, wówczas prąd ładowania jest odpowiednio obniżany. Ma to na celu ograniczenie dalszego podgrzewania akumulatora.

Kolejną zależnością, którą należy wziąć pod uwagę jest wpływ temperatury na dostępną pojemność akumulatora. Niestety nawet w dozwolonym przez producenta zakresie temperatur to zjawisko istnieje, a związane jest ze wzrostem rezystancji wewnętrznej ogniwa wraz z jego ochładzaniem. Na rysunku 2 została przedstawiona taka przykładowa zależność, jak widać ubytek dostępnej pojemności w funkcji temperatury ogniwa wyniósł ponad 35%. Istnieją technologie gdzie ten ubytek może przekroczyć nawet 50% w dopuszczonym przez producenta zakresie temperatur.

Praca akumulatorów w zbyt niskiej i zbyt wysokiej temperaturze przyczynia się do jego szybszego zużycia. Najbardziej polecana jest ich eksploatacja w temperaturze możliwie zbliżonej do 20-25 °C.

By przeciwdziałać opisanym powyżej sytuacjom możliwe jest zintegrowanie pakietów z pasywnymi lub aktywnymi układami kondycjonowania termicznego. W zależności od potrzeb może być to układ grzania, chłodzenia lub oba naraz. W zależności od charakterystyki takiego systemu wykorzystuje się w nim podgrzewane/chłodzone, wentylację zewnętrznym powietrzem lub grzanie i chłodzenie za pośrednictwem cieczy.

Poza dość oczywistą funkcjonalnością polegającą na ochronie pakietu przed przegrzaniem i nadmiernym wychłodzeniem, układy kondycjonowania termicznego mają za zadanie możliwie wyrównać temperaturę w jego wnętrzu. Jest to istotne o tyle, że ogniwa pracujące w różnych temperaturach różnią się charakterystykami eksploatacyjnymi, co było już poruszone w tej publikacji. Tego typu różnice w ramach jednego pakietu mogą wpływać na szybsze jego zużycie oraz ograniczać funkcjonalność eksploatacyjną.

### Wpływ cykli pracy na eksploatację autobusów z napędem elektrycznym

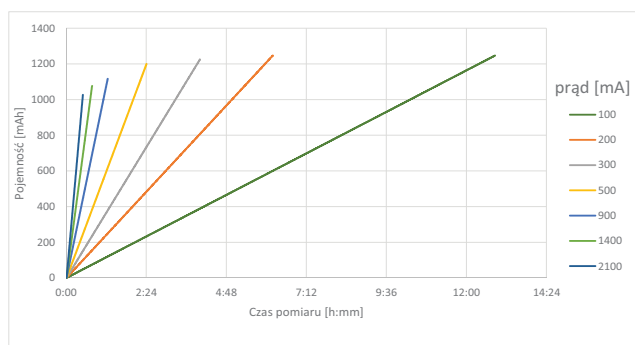
Kolejnym niezwykle istotnym zagadnieniem jest wpływ charakterystyki obciążenia akumulatora spowodowanego jego cyklem pracy na jego eksploatację. Dotyczy to zarówno czasu realizacji zadania transportowego jak i ładowania akumulatorów na krańcu czy zajezdni. Oba tryby pracy mają wpływ na czas życia akumulatora oraz jego dostępną pojemność.

Dla akumulatorów trakcyjnych oraz większy nacisk kładzie się na ich szybkość. Jest to związane z krótkimi czasami postoju na krańcach, maksymalizacją wykorzystania floty autobusów oraz ograniczeniem pojemności baterii, za czym idzie kosztu, na rzecz jej częstszego doładowywania. Należy jednak wziąć pod uwagę negatywne skutki, które mogą wystąpić w związku ze stosowaniem szybkiego ładowania, a są to:

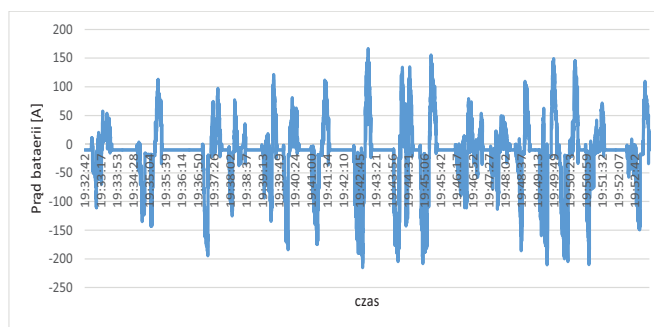
- ograniczenie poziomu naładowania,
- szybsze zużycie,
- wzrost temperatury pakietu.

Przykładowa zależność pomiędzy natężeniem prądu ładowania, a stopniem naładowania ogniwa o pojemności nominalnej 1200 mAh została przedstawiona na rysunku nr 3. Oczywiście poziomy te będą różnić się w zależności od typu akumulatora litowo-jonowego, jednak to zjawisko zawsze występuje. Jedynym sposobem by uzyskać pełną pojemność pracy jest przejście z ładowania stałoprądowego określanego jako CC (Continuous Current) na ładowanie stałym napięciem CV (Continuous Voltage) [5].

Producenci akumulatorów zazwyczaj w kartach katalogowych produktów podają jakie są osiągalne poziomy naładowania dla poszczególnych natężeń prądów ładowania. Parametr ten należy uwzględnić przy planowaniu eksploatacji autobusów elektrycznych na poszczególnych trasach. Należy wziąć pod uwagę zarówno zużycie energii spowodowane wykonywaniem zadania transportowego jak i możliwe na krańcu uzupełnienie tej energii związane z mocą ładowarki,



3. Zależność pomiędzy natężeniem prądu ładowania, a stopniem naładowania ogniwa o pojemności nominalnej 1200 mAh



4. Przykładowy przebieg prądu pracy akumulatora trakcyjnego, dodatnie wartości oznaczają hamowanie z odzyskiem energii

dopuszczalnymi prądami akumulatora oraz czasem postoju.

Również ważnym aspektem eksploatacji baterii jest przebieg prądu podczas pracy. Taka przykładowa charakterystyka uwzględniająca odzysk energii pochodzącej z hamowania pojazdu została zaprezentowana na rysunku nr 4. Mamy więc do czynienia z rozładowaniem i ładowaniem pojazdu w czasie jazdy. Takie niewielkie zmiany kierunku przepływu energii w

baterii zwane są mikrocyklami i mogą wpływać na jej czas życia. Niestety informacje na temat tego typu pracy nie są podawane przez producentów. W przypadku, gdy zachodzi konieczność analizy ich wpływu na czas życia akumulatora należy przeprowadzić dodatkowe badania laboratoryjne w celu pozyskania brakujących danych i zależności.

Typ i pojemność baterii powinna być dobierana także ze względu na głębokość rozładowania. Jest to istotne ponieważ istnieje zależność pomiędzy głębokością ich rozładowywania, a utratą pojemności mierzoną liczbą cykli pracy. Przykładowo dla akumulatora LiFePo4 [6] jest to odpowiednio

- 80% DoD 2500 cykli,
- 70% DoD 3000 cykli,
- 50% DoD 5000 cykli.

Dlatego należy zwracać uwagę wybierając typ akumulatora dla jakiej głębokości rozładowania (ang. Deep of Discharge, skrót DoD) podawana jest żywotność baterii w odniesieniu do liczby jej cykli pracy.

## Podsumowanie

W powyższym artykule przedstawione zostały wybrane podstawowe warunki pracy litowo-jonowych pakietów trakcyjnych na ich eksploatację. Jak można zauważyć problematyka jest złożona. W przypadku doboru akumulatora do autobusu elektrycznego wymagana jest szczegółowa analiza wielu czynników takich jak: typ zastosowanych ogniw chemicznych, prądy ładowania, charakterystyka trasy (długość, obciążenie linii

rozemieszczenie krańców z punktami ładowania i czas postoju na takich), głębokość rozładowania, temperatura pracy wynikająca z pór roku na danym terenie i ewentualne dodanie układu klimatyzacji i ogrzewania. Prawidłowy dobór akumulatora i jego właściwa eksploatacja pozwalają wydłużyć jego czas pracy pomiędzy koniecznymi wymianami tym samym zmniejszając koszt eksploatacji autobusu elektrycznego.

Projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu ERA – NET TRANSPORT; ERA-NET-TRANSPORT-III/5/2014. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Projekt eBus Autobusy elektryczne przyszłości polskiego transportu publicznego, [http://www.mr.gov.pl/media/20967/eBus\\_MJE.pdf](http://www.mr.gov.pl/media/20967/eBus_MJE.pdf)
- [2] JA123 Systems ALM 12V7 User's Guide 406017-001 Rev 06 April 24, 2012
- [3] Lithium-ion Battery Overview (PDF). Lighting Global (May 2012, Issue 10).
- [4] Panasonic Datasheet for NCR18650b 3400 mAh wersja 13.11 R1
- [5] JA. Al-Haj Hussein and I. Batarseh, "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 3, pp. 830-838, March 2011.
- [6] Victron Energy Datasheet 12,8 Volt Lithium-Iron-Phosphate Batteries Victron Energy

## Nowy Moderus Gamma będzie woził poznaniaków

Kurier Kolejowy / Urząd Miasta Poznania, 23.11.2016

Innowacyjny, energooszczędny i w pełni niskopodłogowy. Taki jest Moderus Gamma - najnowszy tramwaj wyprodukowany przez Modertrans Poznań. Do tej pory, istniejący od 11 lat, Modertrans miał w swojej ofercie tramwaje jednoczłonowe i wysokopodłogowe Alfa oraz trójczłonowe i częściowo niskopodłogowe Beta. Pojazdy wyprodukowane przez spółkę, której głównym udziałowcem jest Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Poznaniu, można spotkać m.in. na torach Gdańska, Poznania, Elbląga, Szczecina, Wrocławia i aglomeracji śląskiej. Innowacyjny Moderus Gamma wykorzystuje wiedzę i doświadczenie zdobyte przez producenta podczas realizacji wcześniejszych projektów. Ma 32 metry długości i może pomieścić 244 pasażerów. Do ich dyspozycji są 63 stałe i 3 rozkładane miejsca siedzące. To tramwaj w pełni niskopodłogowy. Płaską podłogę w obszarze wózków osiągnięto dzięki rezygnacji z klasycznych osi. Zamontowano układ poziomujący, mający za zadanie utrzymanie stałej wysokości podłogi, niezależnie od obciążenia pojazdu. Tramwaj wyposażono także w kondensatory, magazynujące energię odzyskaną z sieci podczas hamowania. Szczególną uwagę zwrócono na elementy ułatwiające podróż pasażerom: ergonomiczne poręcze, intercomy do kontaktu z motorniczym, ładowarki USB oraz w pełni klimatyzowaną przestrzeń pasażerską. (...)