
Analýza a výber batériových systémov pre nezávislú elektrickú trakciu v železničnej doprave

Vladimír Samaš, Ing.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: vladimir.samas@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

Martin Bučko, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.bucko@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

Matúš Adamkovič, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: matus.adamkovic@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2257

Analysis and selection of battery systems for independent electric traction in railway transport

Abstract: The increasing emphasis on environmental sustainability in rail transport is leading to a search for alternatives to conventional diesel rolling stock, especially on non-electrified or partially non-electrified local lines. Battery traction electric systems represent one of the prospective options, with their efficiency largely dependent on the choice of appropriate battery technology. Range optimization in this context means achieving the maximum possible distance a vehicle can travel on a single charge, considering weight, power and operating conditions, which tend to be variable during operation. An important aspect is also the analysis of the production and operating costs depending on the lifetime of the different battery types. In this paper, four main types of batteries usable in rail transport are compared - *Li-ion* (conventional *lithium-ion*), *LiFePO₄* (*LFP*), *Li-Titanate* (*LTO*) and *Lithium Polymer* (*Li-po*). They are compared in terms of technical parameters (energy density, voltage, cycling life), cost effectiveness, safety and suitability for railway applications. The analysis also includes an assessment of the potential of *sodium-ion* (*Na-ion*) batteries as a future alternative.

Keywords: independent traction, batteries, regional lines, range optimization.

ÚVOD

Železničná doprava predstavuje jednu z kľúčových zložiek osobnej a nákladnej prepravy so značným dopadom na udržateľnosť dopravného systému ako celku. Hoci veľká časť železničnej infraštruktúry v rozvinutých krajinách prešla elektrifikáciou, značné úseky koľajových tratí - najmä v regionálnych alebo menej vyťažených oblastiach - zostávajú bez trakčného vedenia. V týchto prípadoch sa bežne nasadzujú vozidlá so spaľovacím motorom, predovšetkým dieselové jednotky, ktoré sú však environmentálne aj prevádzkovo menej výhodné. Okrem emisií skleníkových plynov a lokálnych znečisťujúcich látok sa tu prejavuje aj zvýšená hluková záťaž a závislosť od fosílnych palív. Z tohto

dôvodu rastie záujem o alternatívne formy pohonu, predovšetkým o plne elektrické riešenia založené na batériových systémoch [1, 2].

Batériová trakcia predstavuje perspektívne riešenie pre nezávislú prevádzku železničných vozidiel na neelektrifikovaných lokálnych tratiach. Jej hlavnými výhodami sú nulové lokálne emisie, vyššia energetická účinnosť, nižšie prevádzkové náklady a tichý chod. Z pohľadu energetického hospodárstva však ide o mimoriadne náročné aplikácie, ktoré si vyžadujú vysokú mieru optimalizácie - najmä pokiaľ ide o výber vhodného typu akumulátorovej technológie. Rôzne chemické varianty lítium-iónových batérií sa odlišujú v parametroch ako sú menovité napätie, energetická a výkonová hustota,

životnosť, bezpečnostné charakteristiky, tepelná stabilita či odolnosť voči cyklickému zaťaženiu. Klasické *Li-ion*, *LiFePO₄* (*LFP*), *Li-ion polymérové* (*Li-Po*), *lítium-titaničitanové* (*LTO*) či novšie *sodíkovo-iónové* (*Na-ion*) technológie predstavujú rôzne kompromisy medzi týmito faktormi.

Cieľom tejto publikácie je analyzovať jednotlivé akumulčné technológie z hľadiska ich použiteľnosti v koľajových vozidlách so zameraním na optimalizáciu dojazdu, spoľahlivosť, bezpečnosť a ekonomickú efektívnosť. Osobitná pozornosť sa venuje porovnaniu energetickej hustoty, cyklickej životnosti a vhodnosti pre aplikácie s vysokým výkonom. Súčasne sa skúmajú aj prevádzkové a investičné náklady, ako aj potenciál integrácie alternatívnych technológií (napr. *Na-ion*) v budúcich nízko-nákladových riešeniach.

Z odborného hľadiska je kľúčové identifikovať takú batériovú technológiu, ktorá bude nielen technicky vyhovovať požiadavkám trakčných systémov, ale bude zároveň aj ekonomicky udržateľná a environmentálne prijateľná. V kontexte prebiehajúcej transformácie železničného sektora na bez emisný model tak výber optimálnej batérievej platformy predstavuje strategický rozhodovací faktor.

1 LÍTIUM-IÓNOVÉ AKUMULÁTORY

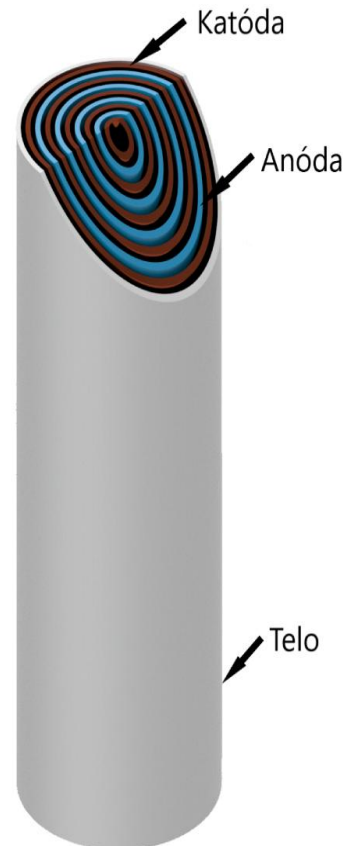
Lítium-iónové akumulátory (ďalej len *Li-ion*) na obr. 1 patria medzi najčastejšie využívané akumulčné systémy v rôznych oblastiach vrátane dopravy. Ich popularita spočíva najmä v priaznivom pomere medzi energeticou hustotou, hmotnosťou, životnosťou a dobíjacou efektívnosťou. *Li-ion* batérie sú dostupné v rôznych tvarových a konštrukčných vyhotoveniach. Tradične sa využívajú cylindrické články, najčastejšie typov 18650 a 21700, ktoré sa používajú napríklad v automobilovom priemysle. S cieľom znížiť počet jednotlivých článkov a zjednodušiť konštrukciu batériových modulov sa však čoraz častejšie nasadzujú články väčších rozmerov, ako sú 4680 alebo prizmatické s objemovou kapacitou až niekoľko desiatok Ah. Tento trend je výhodný pre železničné aplikácie, kde sa kladie dôraz na minimalizáciu spojov a jednoduchšiu údržbu. Pod pojmom „*Li-ion*“ sa definuje viacero chemických variácií, ktoré určujú elektrochemické vlastnosti batérie. Medzi najpoužívanejšie typy patria [3]:

- *NMC 811* (*nikel:mangán:kobalt* = 8:1:1),
- *NMC 622*,
- *NMC 532*,
- *NMC 111*,
- *NCA* (*nikel-kobalt-hliník*),
- *LMO* (*lítium-mangán-oxid*).

Menovité napätie týchto článkov sa najčastejšie pohybuje v rozsahu 3,6 V až 3,8 V, pričom

maximálne nabíjacie napätie dosahuje približne 4,2 V (v závislosti od konkrétneho chemického zloženia). Výber konkrétneho typu batérie je podmienený prevádzkovými požiadavkami, ako sú požadovaná energetická a výkonová hustota, životnosť, bezpečnostné aspekty a prevádzkové teploty.

V súčasnosti sa kladie dôraz na optimalizáciu pomeru *niklu, mangánu a kobaltu* - napríklad typ *NMC 811*, ktorý poskytuje vysokú energetickú hustotu, avšak je menej stabilný pri vysokých teplotách.



Obr. 1. *Lítium-iónové* akumulátory

2 LÍTIUM- IÓN POLYMÉROVÉ AKUMULÁTORY

Lítium-polymérové akumulátory (ďalej len *Li-po*) predstavujú jednu z typov *lítium-iónovej* technológie, pričom ich hlavnou odlišnosťou je forma *elektrolytu*, kde namiesto klasického kvapalného *elektrolytu* používajú gélovitý alebo polymérový *elektrolyt*, ktorý môže byť v niektorých prípadoch čiastočne pevného skupenstva. Tento elektrolyt je zabudovaný medzi elektródami v tzv. *pouch* fólii, ktorá tvorí flexibilný a veľmi ľahký obal článku. *Li-po* články sa vyznačujú nižšou vnútornou impedanciou, čo im umožňuje dosahovať vyšší špičkový výkon a rýchlejšie nabíjanie aj vybíjanie v porovnaní s klasickými *Li-ion* článkami. Z tohto dôvodu sú obľúbené v aplikáciách vyžadujúcich vysoký výkon v krátkom čase - ako napríklad v dronoch.

Významnou výhodou *Li-po* batérií je tiež nižšia hmotnosť pri porovnateľnej kapacite, ako aj možnosť

výroby v rôznych tvaroch a rozmeroch - čo je výhodné v priestorovo náročných aplikáciách. Avšak práve ich flexibilná kapsova konštrukcia si vyžaduje externú mechanickú oporu alebo prítlačnú silu, aby sa zabránilo deformáciám článku počas prevádzky. Medzi hlavné nevýhody patria nižšia životnosť, ktorá je spôsobená najmä oddelením anódy a katódy počas cyklického namáhania. Okrem toho majú *Li-po* články výrazne vyššie riziko nafukovania, výbuch či vznik požiaru, čo ich radí medzi najmenej bezpečné typy *lítiových* batérií. Tieto riziká súvisia s degradáciou *polymérového elektrolytu*, stratou jeho stability a možným skratom medzi elektródami.

Menovité napätie jednotlivých článkov je porovnateľné s *Li-ion* technológiou, zvyčajne 3,7 až 3,8 V, s maximálnym nabíjajúcim napätím do 4,40 V, prípade HV (*High voltage*) batérií [4].

Vzhľadom na nižšiu tepelnú stabilitu a zložitejšiu manipuláciu nie sú *Li-po* batérie v železničnej doprave bežnou voľbou. Ich využitie je vhodnejšie tam, kde je kritická požiadavka na nízku hmotnosť, vysoký výkon a flexibilitu rozmerov, avšak pri dodržaní prísnych bezpečnostných opatrení.

3 LÍTIUM- ŽELEZO- FOSFÁTOVÉ AKUMULÁTORY

Lítium-železo-fosfátové akumulátory, známe pod skratkou *LFP* ($LiFePO_4$), predstavujú jednu z najstabilnejších a zároveň najbezpečnejších *lítium-iónových* technológií dostupných na trhu. V porovnaní s inými *lítiovými* chemickými zloženiami sa vyznačujú nižším menovitým napätím okolo 3,2 V, avšak ponúkajú výnimočnú tepelnú a chemickú stabilitu, čo ich predurčuje na použitie v náročných prevádzkových podmienkach. *LFP* články sa štandardne vyrábajú vo forme *pouch* (vreckových), valcovitých alebo prizmatických článkov, pričom sa bežne vyskytujú vo veľkých rozmeroch s kapacitou od desiatok až po stovky ampérhodín (Ah) na článok. Táto konštrukcia je ideálna pre aplikácie s vyššími energetickými nárokmi, kde je zároveň požiadavka na dlhú životnosť a vysokú bezpečnosť.

Medzi hlavné výhody patrí:

- vysoká cyklická životnosť - často presahujúca 3000 až 5000 nabíjajúcich cyklov bez výraznej degradácie,
- odolnosť voči prehrievaniu, preťaženiu aj mechanickému poškodeniu,
- nižšia výrobná cena, vzhľadom na absenciu drahých a toxických materiálov ako kobalt a nikel.

Hoci majú nižšiu energetickú hustotu v porovnaní s *NMC* alebo *NCA* článkami, ich bezpečnosť, robustnosť a spoľahlivosť ich robia ideálnou voľbou pre mobilné aj stacionárne aplikácie, najmä tam, kde nie je kritická požiadavka na hmotnosť alebo objem.

LFP články sa dnes široko uplatňujú v elektrických automobiloch a autobusoch, koľajových a priemyselných vozidlách či v stacionárnych batériových úložiskách. Ich výhodou je aj rovnomerný priebeh napätia počas vybíjacieho cyklu. Vzhľadom na ich odolnosť voči vysokým teplotám sú vhodné aj pre regióny s extrémnymi klimatickými podmienkami [5].

4 LÍTIUM-TITÁNIČITANOVÉ AKUMULÁTORY

Lítium-titáničitanové akumulátory, označované ako *LTO* ($Li_4Ti_5O_{12}$), predstavujú špecifickú vetvu *lítium-iónových* batérií, ktorá sa vyznačuje extrémnou dlhou životnosťou, vysokou bezpečnosťou a výnimočnou rýchlosťou nabíjania a vybíjania. Hlavným rozdielom oproti bežným *Li-ion* technológiám je použitie *titáničitanovej* anódy namiesto *grafitovej*, čo zásadne mení elektrochemické vlastnosti článku. Menovité napätie *LTO* článkov je nižšie - približne 2,3 V, čo je ich najväčšou nevýhodou z hľadiska energetickej hustoty. Na druhej strane, poskytujú veľmi nízku vnútornú impedanciu, čo im umožňuje veľmi vysoké prúdové zaťaženie a sú schopné zvládnuť extrémne rýchle nabíjanie (často v rozsahu niekoľkých minút). Zároveň vykazujú výnimočnú cyklickú životnosť - viac ako 10000 cyklov, v niektorých prípadoch až 40000 cyklov, bez výrazného poklesu kapacity.

Medzi kľúčové vlastnosti patria:

- vysoká tepelná a chemická stabilita,
- schopnosť pracovať v extrémnych teplotách (od $-30^{\circ}C$ do $+60^{\circ}C$ a viac),
- vysoká odolnosť voči mechanickému poškodeniu a tepelnému *runaway efektu*,
- rýchla odozva na zmenu cyklickej záťaže, čo ich predurčuje na aplikácie s vysokými nárokmi na rýchlosť nabíjania.

LTO články sa zvyčajne vyrábajú v prizmatickej forme a často sa využívajú v špecifických oblastiach, kde je rozhodujúcim parametrom dlhá životnosť, vysoká spoľahlivosť a bezpečnosť - napríklad v železničných aplikáciách, autobusoch, trolejbusoch, vojenskej technike, priemyselných *UPS* systémoch, alebo ako záložné batérie v kritickej infraštruktúre.

LTO akumulátory našli využitie aj v batériovej elektrickej jednotke *BEMU*, vyrobenej spoločnosťou *Škoda Transportation a.s.* Jednotka je určená na čiastočne neelektrifikované regionálne trate. Vďaka osadeniu palubných batérií je jednotka schopná prejsť 80 km bez pripojenia na trakčné vedenie, čo umožnilo elimináciu nutnosti nasadiť dieselové jednotky, alebo motorové vozne a tým výrazne zmenšiť negatívny dopad na životné prostredie. Maximálna rýchlosť v batériovom režime $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ plne postačuje na bezpečnú prevádzku na regionálnych tratiach (obr. 2) [6].



Obr. 2. Elektrická jednotka BEMU

Nevýhodou týchto akumulátorov je nižšia energetická hustota (30 až 80 Wh·kg⁻¹), čo znamená väčšie rozmery a vyššia hmotnosť pre rovnakú kapacitu v porovnaní s inými typmi batérií. Z tohto dôvodu sa používajú predovšetkým tam, kde sú iné parametre (bezpečnosť, životnosť, rýchlosť) nadradené kapacite a veľkosti. [7].

5 SODÍKOVO- IÓNOVÉ AKUMULÁTORY

Sodíkovo-iónové akumulátory (*Na-ion*) predstavujú perspektívnu alternatívu k tradičným *lítium-iónovým* systémom, predovšetkým v súvislosti s

- energetická hustota je nižšia ako pri *Li-ion* článkoch (typicky okolo 100 až 160 Wh·kg⁻¹),
- dobrá teplotná stabilita a možnosť bezpečnej prevádzky v širšom rozsahu teplôt,
- nižšia cena a jednoduchšia výroba, keďže *sodík* a *hliník* môžu nahradiť drahšie kovy ako *kobalt* alebo *meď*.

Na-ion smeruje najmä k nasadeniu v oblastiach, kde je prioritou nízka cena a dlhá cyklická životnosť, napríklad v stacionárnych energetických úložiskách, doprave s nižšími nárokmi na dojazd, alebo ako doplnková technológia pre nízkoenergetické systémy. Ich cyklická životnosť je porovnateľná s *LFP* akumulátormi (zvyčajne 2000 až 4000 cyklov), pričom niektoré verzie vykazujú vysokú rýchlosť nabíjania a dobrú odolnosť voči teplotným výkyvom. Obmedzením zostáva nižšia energetická hustota, čo znižuje ich využiteľnosť v aplikáciách s obmedzeným priestorom a požiadavkou na vysoký dojazd. Výrobcovia ako *CATL*, *Faradion* alebo *HiNa Battery* už predstavili prvé komerčne dostupné riešenia a očakáva sa, že *Na-ion* batérie sa stanú doplnkom alebo alternatívou k *Li-ion* technológii najmä v nízkonákladových aplikáciách [8].

Tab. 1. Porovnanie technológií batérií

Typ	<i>Li-ion</i>	<i>Li-po</i>	<i>LFP</i>	<i>LTO</i>	<i>Na-ion</i>
Napätie [V]	2,5 ÷ 4,2	3,0 ÷ 4,4	2,0 ÷ 3,6	1,8 ÷ 2,85	1,5 ÷ 4,3
Wh·l ⁻¹	250 ÷ 730	200 ÷ 600	220 ÷ 350	60 ÷ 160	100 ÷ 250
Wh·kg ⁻¹	150 ÷ 250	100 ÷ 200	90 ÷ 160	50 ÷ 80	100 ÷ 160
Cena za 1 kWh	100 ÷ 250	250 ÷ 500	90 ÷ 200	800 ÷ 1200	80 ÷ 120
Cyklická životnosť [-]	500 ÷ 2000	250 ÷ 1000	2000 ÷ 7000	5000 ÷ 20000	2000 ÷ 4000
Koeficient životnosti akumulátoru [-]	1,000	0,375	2,813	4,063	1,950
Koeficient nákladu na jednotku vzdialenosti [-]	1,000	5,714	0,315	1,407	0,293

udržateľnosťou, dostupnosťou surovín a cenovou efektívnosťou.

Využívajú *sodík* (*Na*⁺) ako nosič elektrického náboja namiesto *lítiových iónov*, pričom ich princíp činnosti je elektrochemicky veľmi podobný ako pri *Li-ion* technológii. Najväčšou výhodou *Na-ion* batérií je, že *sodík* je podstatne lacnejší a geograficky dostupnejší ako *lítium*, čím odpadá závislosť na ťažko dostupných a geopoliticky nestabilných surovinách. Ďalšou výhodou je ich vyššia environmentálna šetrnosť a nižšia toxicita použitých materiálov, z čoho vyplýva, že majú nižší negatívny dopad na životné prostredie.

Medzi hlavné charakteristiky patria:

- menovité napätie článku sa pohybuje okolo 3,0 V v závislosti od použitej *katódovej* a *anódovej* chémie,

6 POROVNANIE TECHNOLÓGIÍ

Koeficient životnosti akumulátoru je vyjadrený pomocou pomeru počtu nabíjacích cyklov kde ako etalón s hodnotou 1 je zvolený *Li-ion* akumulátor. Z tab.1 teda vyplýva že najpriaznivejší akumulátor z hľadiska počtu nabíjacích cyklov je typ *LTO*. Tento typ predstavuje až 4,06 násobne lepšiu životnosť ako *Li-ion* akumulátor a naopak medzi najhoršie akumulátory sa v takomto prípade radia *Li-po*, ktoré sa vyznačujú len s 37,5 % životnosťou voči *Li-ion*.

Koeficient nákladu na jednotku vzdialenosti je vyjadrený bezrozmernou hodnotou predstavujúcou pomery medzi obstarávacou cenou a schopnosťou prejsť určitú vzdialenosť za svoju životnosť. Pri porovnaní s etalónom, a teda *Li-ion* akumulátorom je možné určiť najdrahší akumulátor a zároveň finančne

najvýhodnejší. Za najdrahší sa považuje *Li-po* avšak medzi finančne optimálne sa radia *LFP* a *Na-ion*, ktoré predstavujú približne tretinu obstarávacej ceny.

ZÁVER

Aj keď sa *LTO* akumulátory v súčasnosti často využívajú v železničnej doprave pre ich extrémne dlhú životnosť, rýchle nabíjanie a vysokú bezpečnosť, ich nízka energetická hustota a vysoká cena predstavujú výrazné obmedzenia. Na druhej strane, *LFP* technológia ponúka dobrý kompromis medzi nákladmi, životnosťou a bezpečnosťou, čím sa javí ako vhodná alternatíva najmä pre prevádzku na regionálnych tratiach s čiastočnou, alebo žiadnou elektrifikáciou. Klasické *Li-ion* batérie poskytujú vyššiu energetickú hustotu, no ich obmedzená životnosť a vyššia závislosť od drahých surovín ako kobalt či nikel znižujú ich atraktivitu. *Li-po* batérie, napriek svojim výkonom, sú pre železničné aplikácie kvôli nízkej bezpečnosti a kratšej životnosti nevhodné. Perspektívnym riešením do budúcnosti sa javia sodíkovno-iónové batérie, ktoré kombinujú nízku cenu, dostupnosť materiálov a ekologickosť, a môžu sa stať rozumnou alternatívou pre menej výkonné, ale nákladovo efektívne aplikácie v železničnej doprave.

Pod'akovanie

„Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“

LITERATÚRA

[1] STRÁŽOVEC, P. - SUCHÁNEK, A. - ŠT'ASTNIAK, P. - HARUŠINEC, J. (2019): *Detection of residual stress in a railway wheel*. In: 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, TRANSCOM.

[2] LOVSKA, A. - ISHCHUK, V. - DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. (2025): *Analysis of running properties of a rail multiple-unit with a diesel and a hydrogen powertrain*. In: Prentkovskis, O., Yatskiv (Jackiva), I., Skačkauskas, P., Karpenko, M., Stosiak, M. (eds) *TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology*. TRANSBALTICA.

[3] DENG, D. (2015): *Li-ion batteries: basics, progress, and challenges*. In: *Energy Science and Engineering*.

[4] KANGLONG G., SHIHAN Q., HUAPING W., JUNDA H., MINGGUANG W., YULU Y., XIU LI, YURONG R., JIANMIN M. (2022). *High-voltage electrolyte chemistry for lithium batteries*. In: *Small Science*, Vol. 2022, No. 2, 2100107, pp. 1-18.

[5] BABOO, P. J. - YATOO, A. - M., DENT, M. - NAJAFABADI, H. E. - LEKAKOU, C. - SLADE, R. - HINDER, J. S. - WATTS, F. J. (2022): *Exploring Different Binders for a LiFePO4 Battery. Battery Testing, Modeling and Simulations*. In: *Energy*, Vol. 15, No. 7, 2332.

[6] ŠKODA TRANSPORTATION a.s. (2024): Dostupné na: <https://www.skodagroup.com/reference/regiopanter-battery-unit>

[7] JULIEN, CH. M. - MAUGER, A. (2024): *Fabrication of Li4Ti5O12 (LTO) as Anode Material for Li-Ion Batteries*. In: *Micromachines*, Vol. 15, No. 3, 310.

[8] CHENG, D. L. - YANG, L. C. - ZHU, M. (2018): *High-performance anode materials for Na-ion batteries*. In: *Rare Materials*, Vol. 37, pp. 167-180.