

Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu

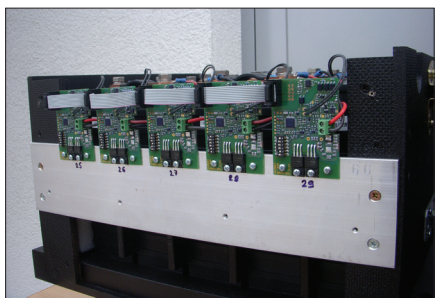
(2. část – dokončení)

Jaroslav Novák, Ondřej Sadílek, Petr Sýkora

Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

5. Lithiové akumulátorové baterie a jejich podpůrné technologie

Modul s olovenou akumulátorovou baterií je tvořen prakticky pouze dílčími olovenými články, vývody a vhodným pouzdem. V případě lithiových akumulátorových baterií je nutné bateriový modul vybavit dalšími technologiemi. Složitější konstrukce lithiového bateriového modulu je dána především dvěma důvody. V případě lithiových článků je nutné striktně udržovat napětí článku v pev-



Obr. 8. Balanční členy paralelně připojené k článkům akumulátorové baterie LFP 100 A-h na experimentálním kolejovém vozidle Dopravní fakulty Jana Pernera (zřejmé je i připojení čidel teploty a propojení balančních členů komunikační sběrnici)

ných tolerancích. Konkrétní tolerance napětí článku je dána technologií a typem článku. Při hlubokém vybíjení článku a poklesu jeho napětí pod kritickou mez se výrazně snižuje kapacita a zkracuje životnost článku, při přebíjení článku a překročení horní kritické meze napětí hrozí zničení článku, popř. i jeho exploze. Druhým důvodem je teplotní monitoring a udržování teploty článku v povolených tolerancích. Životnost lithiového akumulátoru velkou měrou závisí na pracovní teplotě. Maximální teplotní rozsah lithiových akumulátorů je v rozmezí -20 až $+80$ °C. Tento interval vystihuje vybíjecí režim, přičemž při teplotách pod 0 °C a nad zhruba 60 °C je nutností snížení odebíraného proudu. Při nabíjení dovolují lithiové akumulátory teplotní rozsah 0 až 80 °C. V případě nabíjení při teplotě pod 0 °C se ukládá aktivní lithium mezi elektrodami, akumulátor ztrácí kapacitu a jeho životnost končí v řádu jednotek dní.

Dodržení povoleného rozsahu napětí článků a jejich teplotní monitoring v bateriovém modulu zajišťuje soustava elektronických obvodů, která se označuje pojmem battery management. Po stránce fyzické realizace se

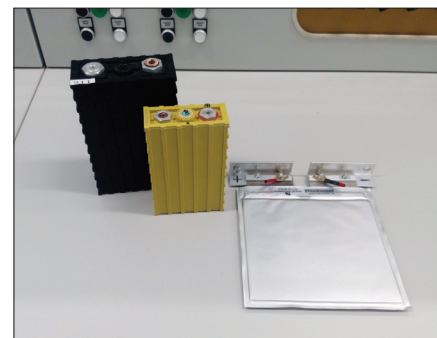
battery management skládá z centrální řídicí jednotky a balančních modulů. Ke každému článku baterie je paralelně připojen jeden balanční modul, na balanční modul je připojen i výstup čidla teploty článku, balanční moduly jsou vzájemně propojeny komuni-



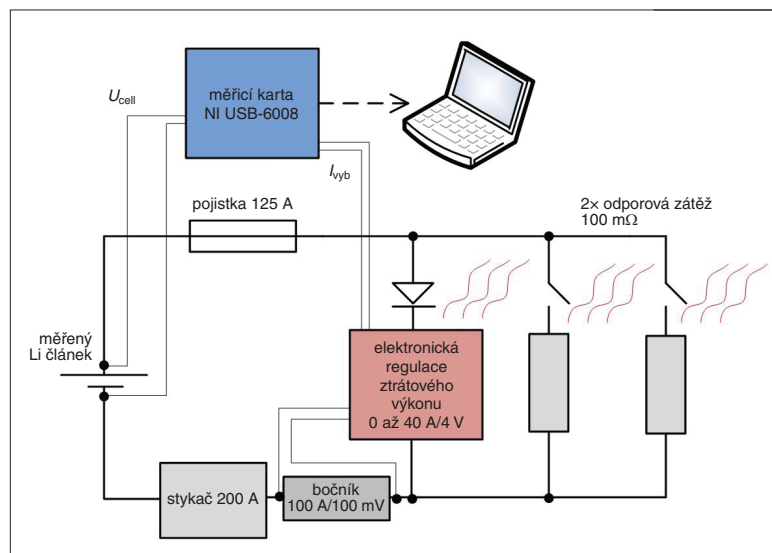
Obr. 9. Pohled na akumulátorový kontejner na střeše tramvaje 28T2 s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátorů z produkce Škoda Transportation, a. s. – na kontejneru jsou patrné výstupy ventilačních jednotek

kační sběrnici, touto sběrnici jsou propojeny i s centrální řídicí jednotkou. Centrální řídicí jednotka tak soustřeďuje, zpracovává a archivuje údaje všech článků. Jde o měřené hodnoty, tj. napětí článků, proud baterie a teploty článků. Dále řídicí jednotka vypočítává hodnotu aktuální kapacity baterie, hodnoty odporů jednotlivých článků, popř. další hodnoty. Výrobci battery managementu rovněž dodávají servisní a vizualizační programy pro PC, pomocí kterých je možné v číselné i grafické

formě zobrazovat data z bateriových článků. Zároveň tyto programy umožňují konfigurovat battery management, tj. nastavit jej pro podmínky konkrétní akumulátorové baterie s konkrétním počtem článků s charakteristickými parametry. Významnou funkcí balančních modulů je tzv. balancování. Při nabíjení vybité baterie probíhá nabíjení proudem maximálně dosahujícím hodnoty předepsané pro daný typ výrobce. Lithiové baterie se nabíjejí proudem několika jednotek C v závislosti na technologii a typu bateriových článků. Jde o režim analogický fázi proudového nabíjení olovených akumulátorů. Během tohoto nabíjení se monitorují rostoucí okamžité hodnoty napětí jednotlivých článků. Po dosažení horní limitní hodnoty napětí u některého z článků baterie se přechází do režimu tzv. balancování (obr. 8). Při balancování je výrazně zmenšen proud nabíjecího zdroje,



Obr. 10. Proměřované články – LFP 100 A-h černý, LFP 40 A-h žlutý, Li-pol 25 A-h deskový



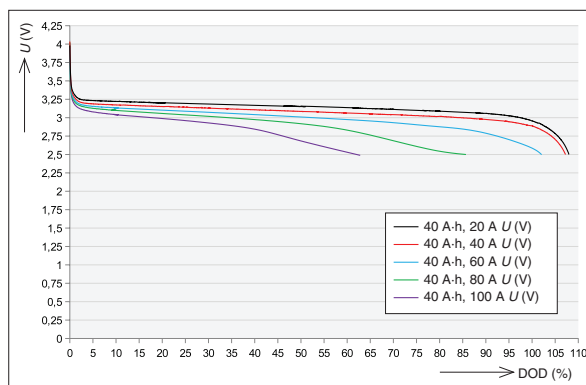
Obr. 11. Zapojení měřícího pracoviště pro měření Li článků

řádově na jednotky A. Článek, jehož napětí dosáhlo limitní hodnoty, je překlenut rezistorem na balančním členu, aby se tento článek již dále nepřehříval. Uvedený rezistor je tvořen výkonovým tranzistorem balančního členu, který pracuje v zesilovacím režimu, je zdrojem tepelných ztrát, a je proto nutné během balancování zajistit odvod tohoto ztrátového tepla. V současnosti výrobci systémů battery managementu pracují na vývoji balančních členů, u kterých by energie nebyla při balancování takto mařena, ale byla by účelně využita. V průběhu balancování se malým nabíjecím proudem nabíjejí na horní limitní hranici napětí postupně i další články baterie; vždy po dosažení limitního napětí je daný článek překlenut tranzistorem balančního členu. Po dobití posledního článku baterie na limitní hodnotu napětí je nabíjení a balancování baterie ukončeno. Pokročilejší bateriové systémy pracují i v režimu tzv. průběžného balancování, kdy hlavní jednotka battery managementu již od určitého stavu nabití

a bez ohledu na limitní napětí článku aktivuje balancování na nejslabších člencích. Použitím tohoto způsobu nabíjení se rapidně zkrátí doba potřebná na celkové vybalancování baterie, neboť články se balancují již během řádného nabíjení. Balancování, tj. dobití baterie na plnou kapacitu, se nemusí provádět při každém nabíjení, avšak s periodou maximálně jednotek dnů – při každodenním využití akumulátorového vozidla. Kdyby se u dané baterie balancování vůbec neprovádělo, klesala by kapacita článků baterie.

Při konstrukci bateriového systému pro akumulátorové vozidlo se zpravidla akumulátorová baterie umísťuje do akumulátorového kontejneru (obr. 9). V akumulátorovém kontejneru jsou umístěny buď přímo jednotlivé články, nebo moduly skládající se z menšího počtu článků, pouzdra s daným krytím, tepelnou izolací a mechanickou odolností, chladicího systému včetně vstupu a výstupu chladicího média (vzduch nebo voda) a dalších potřebných prvků, zejména komponent battery managementu. V modulu battery managementu jsou potřebné ochranné funkce, zejména ochrana proti přepětí a podpětí článků, ochrana před vysokou a nízkou teplotou a ochrana před nadproudem. Bateriové moduly mají vyvedenou komunikační sběrnici, zpravidla ve více variantách, např. CAN nebo RS-485. Elektronika modulu battery managementu je napájena buď externě, nebo přímo z článků. Pro možnost operativní diagnostiky bývají moduly vybaveny i indikačními LED. Jmenovité hodnoty napětí modulů jsou obvykle desítky, v některých případech až stovky voltů. Tyto moduly dodávají výrobci bateriové techniky a jsou dobře připravené k sestavování větších celků

a vzájemnému elektrickému a datovému propojování. Vzhledem k uvedeným skutečnostem je z provozního hlediska nutné vzít v potaz zvýšené samovybití článků vlivem trvalého napojení balančních jednotek, přestože se v době nečinnosti systému nacházejí v režimu standby (standby odběr řídicích IC, parazitní závěrné proudy výkonových tranzistorů, svody dalších součástek apod.). Typickým příkladem znehodnocení článku je kombinace jeho hlubokého vybití s dalším kontinuálním parazitním vybitím balančními obvody.

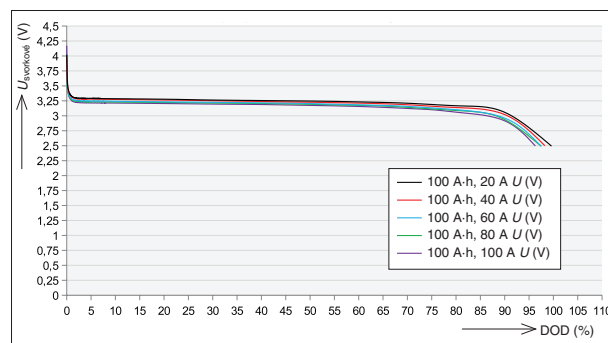


Obr. 12. Vybíjecí charakteristiky článku LFP 40 A-h

Akumulátorové kontejnery vozidel obsahují topné a klimatizační systémy, mnohdy i spínací a jisticí přístroje či přízpusobovací energeticky dvojsměrný stejnosměrný měnič. Měrná energetická hmotnostní a objemová kapacita je potom u akumulátorového kontejneru o desítky procent nižší oproti měrné kapacitě samotných lithiových článků.

6. Příklady výsledků měření charakteristik lithiových akumulátorů

Na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice je v rámci projektu *Centrum kompetence drážních vozidel*, podporované



Obr. 13. Vybíjecí charakteristiky článku LFP 100 A-h

ho agenturou TAČR, prováděn výzkum možností akumulátorového a smíšeného napájení železničních vozidel. Pozornost je zaměřena na modelování a simulační výpočty, v experimentální oblasti probíhají měření a parametrizace různých typů lithiových akumulátorů, a to jednak v laboratorních podmínkách a rovněž na experimentálním akumulátoro-

vém kolejovém vozidle, kterým tato fakulta disponuje. V následující části budou prezentovány některé výsledky základních měření, které vycházejí z R_i modelu článku. Dále představené výsledky měření tedy postihují statické parametry a cílem je na experimentálních výstupech prezentovat některé charakteristické vlastnosti lithiových článků a zároveň porovnat dvě Li technologie.

Měření byla prováděna na dvou typech Li článků LFP – 40 A-h a 100 A-h a na jednom článku Li-pol 25 A-h (obr. 10). Katalogové údaje pro měřovaných článků jsou uvedeny v tab. 1 v modře podbarvených polích.

Základní úlohou bylo měření vybíjecích charakteristik, tedy závislosti svorkového napětí článku na hloubce vybití DOD. Stav úplného nabití a úplného vybití článku byl odvozen z velikosti svorkového napětí článku. V průběhu těchto měření byl průběžně vyhodnocován vnitřní odpor článku R_i podle vztahu:

$$R_i = \frac{U_i - U}{I} \quad (12)$$

Jde tedy o běžný způsob vyhodnocování vnitřního odporu reálného napěťového zdroje. Dalším zjišťovaným průběhem byla závislost energie, kterou je možné z plně nabitého akumulátoru získat, na velikosti vybíjecího proudu. Energie odebraná z akumulátoru nebo DOD byla zjišťována časovou integrací okamžitého elektrického výkonu na svorkách článku.

Měření byla prováděna s automatickým svorkovým měřicí kartou a záznamem hodnot svorkového napětí U a proudu I . Velikost vnitřního napětí U_i byla zjišťována v deseti bodech během měření jedné vybíjecí charakteristiky, kdy byla vždy na několik sekund odpojována zátěž a změřilo se napětí článku naprázdno. Při měření byl automaticky ve zpětné vazbě stabilizován vybíjecí proud článku. Elektrická zátěž byla při měřeních realizována

na odporem dvou paralelně řazených dlouhých vodičů, k nimž byla paralelně připojena elektronická zátěž tvořená spojitě řízeným výkonovým tranzistorem. Proud této elektronické zátěže byl regulován ve zpětné vazbě tak, aby měl celkový vybíjecí proud článku požadovanou hodnotu (obr. 11).

Na obr. 12 jsou znázorněny vybíjecí charakteristiky článku LFP 40 A-h pro

různé hodnoty vybíjecího proudu. Měření bylo ukončeno při dosažení dolní limitní hranice svorkového napětí článku 2,5 V. Z průběhů jsou zřejmé typické vlastnosti článků LFP. Při vybíjení z plně nabitého stavu napětí nejprve strmě klesá. Ve střední, nejširší části kapacity článku, tedy v pracovní oblasti, se napětí mění velmi málo. Až při dosažení

velké hloubky vybití DOD, nad 90 %, kde by již článek neměl být běžně provozován, napětí začne strmě klesat. Díky charakteru závislosti v okolí DOD 0 % a při velké hloubce vybití lze z hodnoty napětí článku snadno indikovat blízkost stavu plného nabití a blízkost stavu plného vybití.

Na obr. 13 lze sledovat totožné vlastnosti změřené na článku LFP 100 A·h. Na tomto obrázku se charakteristiky pro jednotlivé proudy neliší tak výrazně jako v předchozím případě. To je dáno skutečností, že článek 100 A·h nebyl vybitý tak velkými proudy vzhledem k číselné hodnotě jeho kapacity.

Na obr. 14 je znázorněna změřená závislost vnitřního odporu článku LFP 40 A·h změřená při proudu 40 A. Ze změřené závislosti je zřejmý nárůst odporu R_i s rostoucím DOD. Charakter této závislosti koresponduje s průběhy vybíjecích charakteristik na obr. 12. Se zvětšujícím se vybíjecím proudem se výrazněji projevuje pokles svorkového napětí vlivem růstu hodnoty vnitřního odporu.

Na obr. 15 je uveden průběh závislosti velikosti energie, kterou je možné z plně nabitého článku vyčerpat před dosažením limitní hodnoty svorkového napětí 2,5 V. Velikost disponibilní svorkové energie je podle této charakteristiky silně závislá na velikosti vybíjecího proudu. Je zřejmé, že pokles svorkového napětí na limitní hodnotu je ovlivněn i proudově závislým úbytkem napětí na vnitřním odporu článku a při poklesu napětí na limitní mez při velkém vybíjecím proudu je jistě článek schopen ještě dodat energii. V reálném provozu je však v systému battery managementu monitorovaná hodnota svorkového napětí komparována s konstantní limitní hodnotou nezohledňující okamžitou hodnotu proudu. Proto by bylo možné v závěru vybití odebírat veškerou energii z hluboce vybitého článku pouze za předpokladu postupně se zmenšujícího vybíjecího proudu.

Na obr. 16 jsou znázorněny vybíjecí charakteristiky článku Li-pol 25 A·h při různých vybíjecích proudech. Kromě skutečnosti, že se zvětšujícím se vybíjecím proudem klesá svorkové napětí, je dále zřejmé, že se u článku Li-pol, na rozdíl od článku LFP, neprojevuje tak strmý průběh napětí v blízkosti plného nabití.

Z průběhu vybíjecích charakteristik článku Li-pol je dále patrný menší rozptyl těchto charakteristik při různých hodnotách vy-

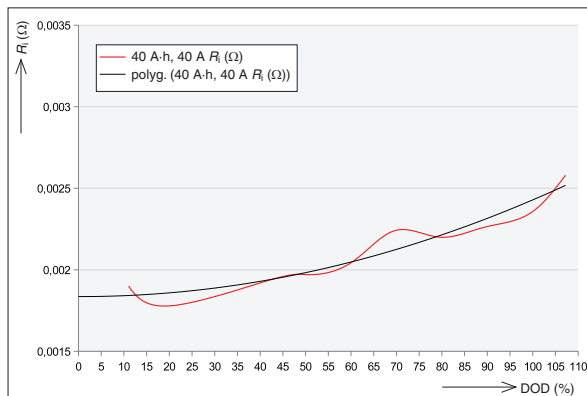
bíjecího proudu oproti článku LFP. Tato skutečnost koresponduje s průběhem závislosti vnitřního odporu R_i na DOD (obr. 17). Závislost není monotónně rostoucí jako u článku LFP, ale vykazuje minimum a celkové zvýšení vnitřního odporu článku Li-pol mezi zcela

ní článku Li-pol vzhledem k jeho číselné hodnotě kapacity v ampérhodinách.

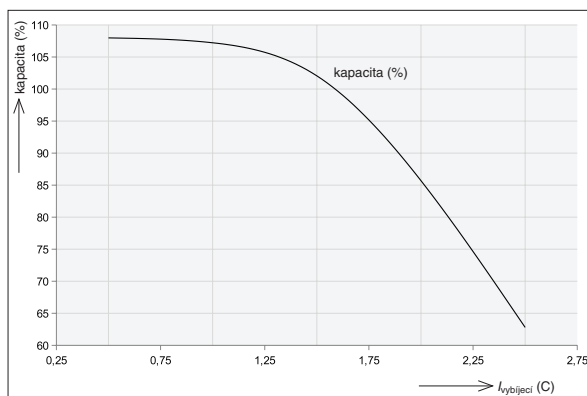
Z výsledků měření je tedy zřejmé, že článek Li-pol má vlastnosti tvrdšího zdroje oproti článku LFP, kromě toho je velikost energie, kterou je možné čerpat z plně nabitého článku Li-pol, velmi málo závislá na velikosti vybíjecího proudu.

7. Závěr

Elektrochemické akumulátory elektrické energie, včetně lithiových, jsou komplikované nelineární soustavy, jejichž vlastnosti, zejména kapacita, napětí a impedance, jsou ovlivněny mnoha faktory. Hlavními faktory ovlivňujícími jejich parametry jsou hloubka vybití, teplota, stáří, vybíjecí výkon, ale i historie podmínek, ve kterých byl akumulátor provozován, rozdíly mezi vlastnostmi lze nalézt i u jednotlivých kusů téhož typu. V této situaci je každý model akumulátoru vždy jen lepším či horším přiblížením se fyzikální realitě. Vhodnost konkrétního modelu je proto úzce svázána s účelem jeho použití. Z hlediska uživatele však může být tato situace komplikací zejména při specifikaci typu akumulátoru pro danou aplikaci, neboť výrobci akumulátorových článků udávají zpravidla jen několik málo parametrů, popř. charakteristik platných při přesně určených podmínkách. Obecně je při specifikaci akumulátorového systému pro vozidlo vhodné spíše předimenzování z hlediska kapacity i výkonu, což přispívá k energetické bezpečnosti např. při provozních mimořádnostech vozidla nebo v případě kolísání účinnosti nabíjení a vybití při změnách parametrů akumulátoru, a dále předimenzování z hlediska energie a výkonu, což velmi pozitivně ovlivňuje životnost akumulátoru a účinnost jeho nabíjení a vybití. Míra předimenzování akumulátoru však naráží jednak na limity objemu a hmotnosti, a jednak na limity ekonomické. Při specifikaci akumulátorového systému bez dostatečné energetické a výkonové rezervy je vhodné, ověřili-li uživatel hodnoty parametrů základním měřením, např. tak, jak bylo prezentováno v tomto článku. I při měřeních uvedených v tomto článku byla např. zjištěna poměrně velká odchylka hodnoty vnitřního odporu R_i od ka-

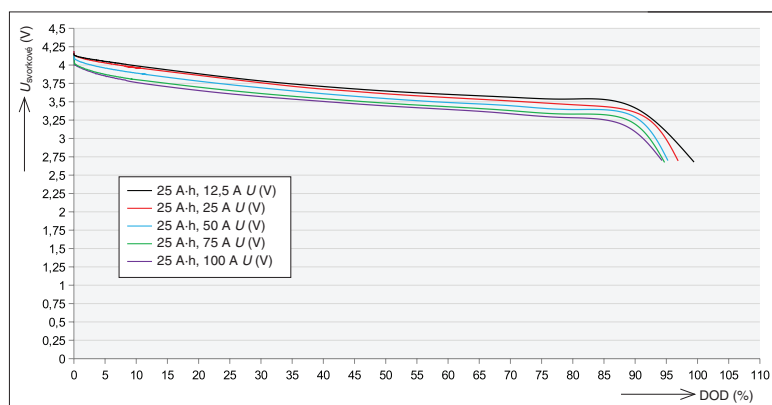


Obr. 14. Závislost vnitřního odporu R_i na DOD u článku LFP 40 A·h



Obr. 15. Závislost disponibilní energie článku LFP 40 A·h na velikosti vybíjecího proudu

nabitým a zcela vybitým stavem je výrazně menší než u článku LFP. Tato skutečnost se pozitivně projevuje i na průběhu závislosti disponibilní energie článku na vybíjecím proudu (obr. 18), kde se při konstantní nastavené dolní limitní hodnotě napětí článku 2,7 V projevuje nárůst vybíjecího proudu na poklesu disponibilní energie velmi nevýrazně, na rozdíl od článku LFP. Články LFP a Li-pol jsou navíc srovnávány při relativně větším zatěžová-



Obr. 16. Vybíjecí charakteristiky článku Li-pol 25 A·h

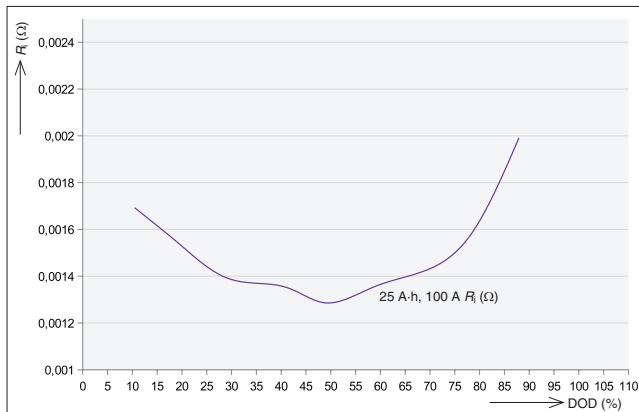
The article presents the informations about the significant types of lithium traction accumulators, about accumulators properties, about the application possibilities and gives comparison of the accumulators parameters. The next article part gives overview about the lithium accumulators circuit models structures and about models parameters determination. The article presents batterymangement functions too. In the last article part the measuring results on lithium accumulators are present.

talogového údaje (potenciálně vliv např. stáří článku). Se zdokonalováním technologií článků lze očekávat zlepšování vlastností článků, a to nejen po stránce velikosti měrné energetické objemové a hmotnostní kapacity a měrného výkonu, ale i po stránce stálosti struktury náhradního obvodu a parametrů. Větší stálost struktury a parametrů špičkových článků vytvářejí podmínky pro snadnou a kvalitní specifikaci akumulátorového systému. Posun v tomto směru je zřejmý i z porovnání výsledků měření na článcích LFP a Li-pol, které byly prezentovány dříve.

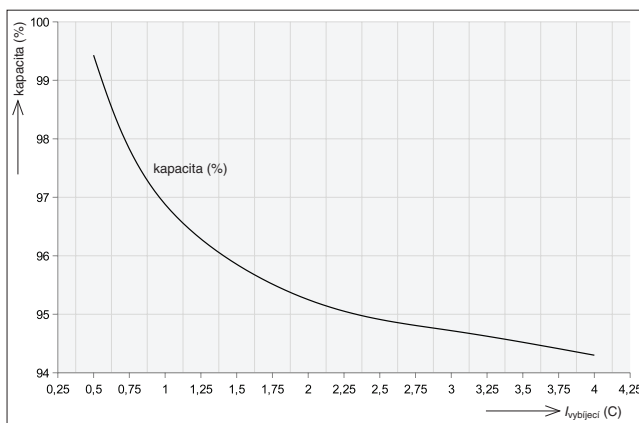
Je zřejmé, že v mnoha dopravních aplikacích již nyní nejsou technické možnosti akumulátorových systémů žádným omezením, zejména když jde o dopravní prostředky s definovanou trasou jízdy a danými podmínkami energetické infrastruktury. Zde je i dostatečně rychlá návratnost zvýšených investic do akumulátorového napájení. I v oblasti individuální silniční dopravy mají v mnoha případech akumulátorové systémy dostatečné parametry (např. cesty po městě nebo obecně cesty do vzdálenosti přibližně 100 km). Je zároveň pravděpodobné, že míra zvýšení investice do akumulátorového vozidla se bude zmenšovat tím více, čím více budou taková vozidla využívána. Přesto je na cestě k elektrifikované dopravě nutné počítat se spoustou dalších úkolů, jako je např. řešení dostatečně dimenzované nabíjecí infrastruktury nebo otázky spojené s kapacitní likvidací či recyklací opotřebovaných akumulátorů. Možnosti akumulátorového napájení dopravních prostředků jsou však již nyní velké a je škoda každé příležitosti, která zůstává nevyužita.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu TA ČR č. 50680/56/TE520038 – Centrum kompetenec drážních vozidel.



Obr. 17. Závislost vnitřního odporu R_i na DOD u článku Li-pol 25 A-h



Obr. 18. Závislost disponibilní energie článku Li-pol 25 A-h na velikosti vybíjecího proudu

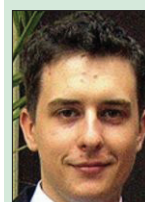
Recenze: prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.

Literatura:

- [1] EINHORN, M. – CONTE, F. V. – KRAL, CH. – FLEIG, J.: *Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications*. IEEE Transactions on Power Electronics, sv. 28, č. 3, IEEE Power Electronics Society, 2013.
- [2] HONGWEN HE – RUI XIONG – JINXIN FAN: *Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach*. Energies, roč. 2011, č. 4. Dostupné též z: www.mdpi.com
- [3] MOUSAVI, S. M. – NIKDEL, M.: *Various battery models for various simulation studies and applications*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, roč. 2014, sv. 32. Dostupné též z: www.elsevier.com/locate/rser
- [4] SADILEK, O.: *Metodika výpočtu akumulátorů pro dvouzdrojové kolejové vozidlo*. In: Sborník z konference Elektrotechnická zařízení v dopravě 2014. Pardubice, Univerzita Pardubice, 2014.
- [5] NOVÁK, J. – MLYNÁŘÍK, L. – LELEK, T.: *Možnosti využití kolejových vozidel s kombinovaným napájením v regionální osobní dopravě*. ELEKTRO, 2015, roč. 25, č. 6.



Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoprůdové elektrotechnika v roce 1989. V roce 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na téže fakultě na Katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oboru vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 2011 pracuje jako profesor na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, elektrické trakce a mikroprocesorového řízení.



Ing. Ondřej Sadílek úspěšně dokončil magisterské studium v oboru Elektrotechnická zařízení v dopravě na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice v roce 2013. Od téhož roku je studentem doktorského studijního programu v oboru Dopravní prostředky a infrastruktura na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě téže univerzity, od roku 2015 je na této katedře asistentem. V rámci doktorského studia absolvoval dvouměsíční odbornou pracovní stáž v Irsku. Odborně se zaměřuje na oblasti akumulátorů elektrické energie a jejich batterymangementu, elektronických napájecích zdrojů a elektronických obvodů.



Ing. Petr Sýkora úspěšně ukončil vysokoškolské studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony v roce 2009. V současné době je asistentem na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, kde se od roku 2012 věnuje i doktorskému studiu. Dlouhodobě se zabývá trakčními pohony kolejových vozidel a napájením vozidel elektrické trakce.

- [6] Firemní materiály Winston Battery.
- [7] Firemní materiály Saft.
- [8] Firemní materiály Kokam.
- [9] Firemní materiály Toshiba.

HODNOCENÍ ČLÁNKU
hlasuj v elektronické verzi