

Parametrizace obvodových modelů lithiových akumulátorů pro elektromobilitu

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc., Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.,
Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra
elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Článek se věnuje experimentální parametrizaci dynamických obvodových modelů lithiových akumulátorových článků určených pro elektromobilitu. Je vytipován vhodný dynamický obvodový model lithiového článku a tento model je parametrizován na základě hodnot naměřených při nabíjení a vybíjení článku. Pozornost je věnována vlivu stavu vybití, proudu, teplotě a režimu nabíjení/vybíjení na hodnoty parametrů akumulátorových článků. Výsledky jsou prezentovány pro více typů akumulátorových článků. Parametrizace obvodových modelů akumulátorových článků je podkladem pro návrh akumulátorového systému vozidla a pro výpočty jízdních vlastností a dojezdu akumulátorových vozidel.

1. Úvod

Přestože při pohledu na všední dopravní ruch v České republice ještě nejsou patrné nějaké mimořádné kvalitativní změny, světové dění v oblasti dopravních technologií a mnoho aplikací objevujících se i u nás nenechává na pochybách, že stojíme na prahu nové éry dopravní techniky, která směřuje k elektřině. Efekty jsou zřejmé, kromě markantních ekologických přínosů jde o kvalitativně nové trakční vlastnosti vozidel, úspory energie, komfort jízdy a rovněž eliminaci závislosti na tak nejistém surovinovém zdroji, jakým je ropa.

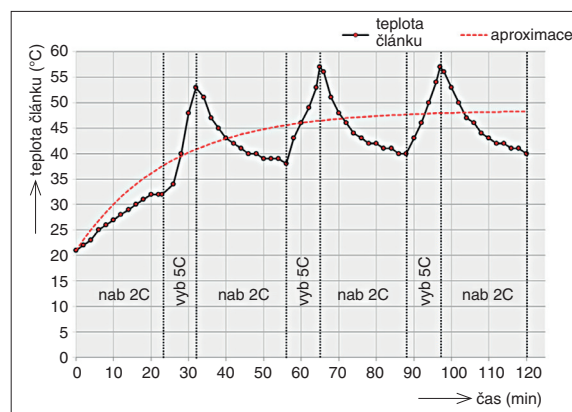
Základním impulzem je velmi rychlý rozvoj techniky lithiových akumulátorů, i když v této oblasti nebyla primárním motivem elektromobilita, ale spotřební komunikační a informační elektronika, především mobilní telefony, notebooky a tablety. V současnosti však již ve světovém měřítku převyšuje produkce akumulátorů pro elektromobilitu, měřená v kapacitě vyrobených akumulátorových článků, produkci článků právě pro spotřební elektroniku. Rozvoj techniky akumulátorů elektrické energie zaznamenává v posledních několika desetiletích rostoucí tempo. Zatímco v 90. letech 20. století byl univerzálně pro trakci k dispozici olověný akumulátor s hmotnostní hustotou energie do 30 W·h/kg, v roce 2010 byly již k dispozici Li-ion akumulátory s hmotnostní hustotou energie okolo 80 W·h/kg, v roce 2015 dosáhla hmotnostní hustota energie těchto akumulátorů 150 W·h/kg, v roce 2017 byly běžně k dispozici články s hmotnostní hustotou energie 200 W·h/kg, avšak v tomto roce byly nabízeny i špičkové články s hmotnostní hustotou energie 250 až 350 W·h/kg. Odhlédne-li se od číselných hodnot, intuitivní představu velikosti akumulované energie v moderních lithiových akumulátorech dává obr. 1, který znázorňuje spontánní uvolnění energie aku-

mulátoru 780 mA·h z mobilního telefonu při jeho nepřiměřeném přebíjení.

Energetická kapacita není jediným ukazatelem vlastností moderních lithiových akumulátorů. Orientační přehled významných para-



Obr. 1. Spontánní uvolnění energie lithiového článku z mobilního telefonu při jeho přebíjení



Obr. 2. Oteplovací křivka článku NMC při cyklickém nabíjení 2C a vybíjení 5C

metrů je uveden v tab. 1, [8] až [12]. V této tabulce jsou základní parametry akumulátorů, které mají úzkou vazbu na konstrukci akumulátorového systému i na užité vlastnosti vozidla. V tabulce jsou i parametry čtyř koncepcí

Li akumulátorových článků, které se v současnosti v nejvyšší míře v elektromobilitě využívají. Články LFP jsou založeny na využití sloučeniny LiFePO_4 (lithium železo fosfát). Jde o tradiční robustní a cenově příznivou technologii s menší hmotnostní hustotou energie a menší hmotnostní hustotou výkonu. U článků technologie NCA je konstrukce založena na využití sloučeniny LiNiCoAlO_2 (lithium nikl kobalt hliník oxid). Jde o články se špičkovou hodnotou hmotnostní hustoty energie, avšak s kratší životností. Články technologie LTO využívají sloučeninu $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (lithium titan oxid). Napětí článků je nižší, méně příznivá je i cena, ale LTO články se přednostně používají ve vozidlech s velkou četností rychlonabíjení a mohou pracovat s velkými hmotnostními hustotami výkonu při nabíjení i vybíjení. Jejich příznivou vlastností je i možnost provozu v nabíjecím režimu při mírných záporných teplotách, což ostatní technologie téměř neumožňují. Články NMC (nikl mangan kobalt) jsou členěny na skupinu HE (High Energy) a HP (High Power). V obou skupinách jde o technologii se špičkovými hodnotami hmotnostní hustoty energie a poměrně dobrou životností.

Jednotlivé typy článků se liší hodnotou jmenovitého napětí. Je zřejmé, že s klesajícím napětím článku bude narůstat počet sériově řazených článků nutných pro sestavení baterie o požadovaném napětí. To se promítá i do rostoucího počtu elektronických obvodů pro kontrolu a monitoring baterie (battery management) a následně do složitosti a měrné ceny celého bateriového kontejneru.

Hmotnostní a objemová hustota energie jsou parametry úzce související s konstrukcí vozidla, proud článku v násobcích C vychází z číselné hodnoty kapacity článku v ampérhodinách a poskytuje informaci o proudové zatížitelnosti (např. baterie 50 A·h má proud 1C 50 A).

Tab. 1. Orientační tabulka uživatelských parametrů lithiových článků pro elektromobilitu

Parametr	Jednotka	LFP	NCA	LTO	NMC HP	NMC HE
jmenovité napětí	V	3,2	3,6	2,3	3,7	3,7
hmotnostní hustota energie jen článků	kW·h/t	100	200 až 250	90	150	170 až 180
objemová hustota energie jen článků	kW·h/l	120 až 170	400 až 600	170	340	400
trvalý vybíjecí proud	C	2 až 3	1 až 2	6 až 8	4 až 5	2 až 3
cena pořízovací	Kč/kW·h	12 000	15 000	20 000	16 000	16 000
počet cyklů	-	3 000	1 000	6 000	3 000	3 000
cena opotřebení	Kč/kW·h	4	15	3,3	5,3	5,3
cena kontejneru (bez článků)	Kč/kW·h	6 300	5 600	8 800	5 500	5 500
hmotnost kontejneru (bez článků)	-	0,2 m ³ článků	0,45 m ³ článků	0,18 m ³ článků	0,3 m ³ článků	0,35 m ³ článků

Hodnota trvalého vybíjecího a nabíjecího proudu v násobcích C platná pro konkrétní aplikaci závisí ve velké míře na celkovém provedení akumulátorového systému a nemusí zcela úzce korespondovat s analogickou hodnotou udávanou výrobcem pro samostatný článek a jeden nabíjecí a vybíjecí cyklus; hodnoty trvalého vybíjecího proudu v tab. 1 odpovídají právě samostatnému článku a jednomu cyklu. V aplikacích s dlouhou dobou provozu a mnohonásobným opakováním nabíjecích a vybíjecích cyklů je nezbytné monitorování teploty článků baterie a popř. omezení vybíjecího a nabíjecího proudu v závislosti na této teplotě. Znamená to, že pro jeden nabíjecí a vybíjecí cyklus mohou platit vyšší hodnoty proudu než při průběžném opakování těchto cyklů, kdy je v režimu trvalého střídání nabíjení a vybíjení nutné proudy omezovat v závislosti na teplotě. Velikost proudového omezení při opakovaném nabíjení a vybíjení baterie je evidentně závislá na provedení chladičového systému akumulátorové baterie. Je potom záležitostí vhodného kompromisu dimenzování a příkonu chladičového systému v kontextu s přípustným proudovým zatěžením článků baterie při opakovaném cyklickém nabíjení a vybíjení. Na obr. 2 je uveden průběh oteplovací křivky článku NMC 25 A-h podle tab. 2 při cyklickém nabíjení a vybíjení. Byl měřen jeden samostatný článek volně položený na podložce. Je zřejmé, že při vybíjecím proudu 5C a nabíjecím proudu 2C je po jednom cyklu teplota stále neustálená, při opakování těchto cyklů teplota dále narůstá. Přestože je ustálená teplota stále ještě akceptovatelná pro provoz článku, trvalý provoz při této teplotě by přispíval ke zkrácení životnosti článku. Optimální teplotní podmínky a dostatečná proudová zatížitelnost mohou být při tomto provozu zajištěny jen odpovídajícím chladičovým systémem a teplotním monitoringem.

Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů článku vypovídá o životnosti článku a udává počet nabití a vybití při definovaných podmínkách, po kterém klesne kapacita článku na 80 % jeho původní hodnoty. Do celkové hmotnosti bateriové výzbroje je nutné kromě článků započítat i další komponenty bateriového kontejneru, jako je skříň, systém chlazení a temperování a battery management. Ceny uvedené v tab. 1 jsou velmi orientační. Kromě pořízovací ceny je sledovaným parametrem

cena za opotřebení, vycházející z potřeby obnovy bateriových článků s omezenou životností v průběhu provozu vozidla. Cena za opotřebení je vztažena k wattodině prošlé článkem. Při určování nákladů na obnovu článků je nutné tuto hodnotu zahrnout. Podrobnější informace o parametrech charakterizujících akumulátorové články lze nalézt např. v [5].

Při sledování rozvoje elektrických dopravních prostředků s akumulátorovým napájením, které nahrazují vozidla se spalovacími motory, je v České republice v současnosti nejrychleji se rozvíjející oblastí MHD, a to jak na úrovni výrobců, tak na úrovni do-



Obr. 3. Parciální elektrobus SOR TNB 12 v Prosecké ulici v Praze

praců. V ČR se výrobou elektrobusů a parciálních elektrobusů zabývají firmy ŠKODA ELECTRIC, SOR a EKOVA. Velmi výrazné je tempo nasazování těchto vozidel v MHD. Elektrobusy jsou provozovány nebo je připravován jejich provoz v MHD např. v Ostravě, Plzni, Hranicích na Moravě nebo v Třinci. Období let 2017 a 2018 však signalizuje výrazný nástup parciálních elektrobusů, tedy trolejbusů s pomocným akumulátorovým napájením. Tato vozidla se v uvedeném období rozjela nebo rozjedou v převážně většině měst v ČR s trolejbusovou dopravou (Zlín, Teplice, Plzeň, Brno, České Budějovice, Opava, Hradec Králové, Pardubice, Ostrava, Mariánské Lázně). V těchto městech budou parciální elektrobusy využívány převážně na kratších úsecích linek bez trolejového vedení. Velmi zajímavá je v tomto směru situace v Praze, kde byla v loňském roce, přesně 45 let od ukončení provozu trolejbusů, otevřena v Prosecké ulici trolejbusová trať určená pro dobíjení parciálních elektrobusů, které jsou však koncipovány pro provoz s akumulátorovým

napájením v převážné části trasy. V současnosti zde probíhá testovací provoz parciálního elektrobusu SOR TNB 12 na lince č. 140 (obr. 3).

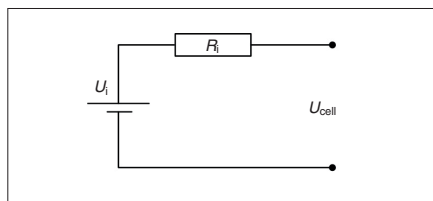
V oblasti osobních automobilů oznámila firma ŠKODA AUTO zahájení prodeje elektromobilů v roce 2020, v roce 2025 firma plánuje nabídku až pěti typů elektrických vozidel [7].

2. Obvodové modely lithiových akumulátorových článků

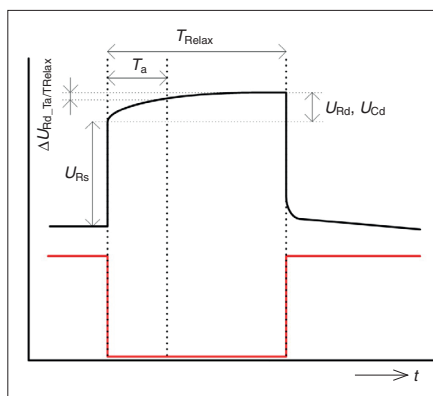
Při návrhu pohonného řetězce vozidla s akumulátorovým napájením a při konstruování jeho dílčích komponent je nutné respektovat energetické, elektrické i tepelné vlastnosti akumulátorové baterie. Tato potřeba se projevuje zejména při vypracování návrhu vlastního akumulátorového kontejneru, kdy je třeba provést tepelný výpočet a specifikaci chladičového systému. Dále také při analýze pohonného řetězce a jízdních vlastností vozidla, nejčastěji pomocí počítačových simulací jízdy vozidla, kdy je nutné určit účinnost nabíjení a vybíjení baterie, průběh hodnoty svorkového napětí baterie, provést výpočet ztrát baterie, výpočet výkonu, tažné síly a trajektorie pohybu vozidla a výpočet dojezdu vozidla v konkrétní trase. Při uvedených výpočtech je akumulátorová baterie, resp. sestava jejích článků, nahrazována náhradním elektrickým obvodem, který respektuje jednak produkci ztrátového tepelného výkonu a jednak průběh napětí na svorkách akumulátoru; tento průběh závislý zejména na stavu vybití, vybíjecím proudu a v určité míře i na předchozích stavech článku, popř. baterie.

Elektrochemický akumulátorový článek je složitá nelineární soustava a jeho náhradní schéma bude vždy představovat jen konečnou míru přiblížení se realitě. Existuje více typů obvodových modelů akumulátorových článků s různou strukturou a s různou mírou obtížnosti parametrizace. Složitější obvodové modely kladou větší požadavky na parametrizaci, přičemž obecně neplatí, že by jednodušší model znamenal vždy nutně menší přesnost. Proto je vždycky zapotřebí hledat kompromis mezi složitostí obvodového modelu a komplikovaností jeho parametrizace. Parametrizace přitom neznamená jen přiřazení konkrétních hodnot parametrům obvodových prvků, ale je zde nutné respektovat

i celkově nelineární povahu článku. Proto je třeba sledovat i závislosti hodnot parametrů na veličinách charakterizujících stav článku. Jde zejména o zohlednění závislosti odporů a kapacit v náhradním schématu na protékajícím proudu, režimu nabíjení/vybíjení článku, stavu vybití, teplotě a popř. stáří článku. I při kvalitním určení uvedených závislostí nelze počítat s extrémní přesností výpočtů založených na parametrizovaném obvodovém modelu, neboť, jak bylo při dále uvedených experimentech zjištěno, se mohou mírně lišit vlastnosti článků téhož typu, těže výrobní série a pracujících ve stejných podmínkách v téže baterii. Navíc bylo zjištěno, že nemu-



Obr. 4. R_i model článku



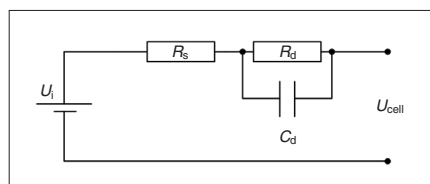
Obr. 5. Dynamická odezva napětí článku při změnách vybíjecího proudu

sí být zcela totožné průběhy veličin a parametrů sledovaných při po sobě následujících dynamických jevech u téhož článku. V každém případě je tedy při práci s modely akumulátorových článků nutné počítat s menší či větší chybou výsledků v hodnotách přibližně v jednotkách procent.

Nejjednodušším typem obvodového modelu článku je tzv. R_i model – obr. 4. Jde o strukturu reálného zdroje stejnosměrného napětí, který je tvořen kombinací vnitřního zdroje napětí a sériově řazeného vnitřního odporu. Tuto strukturu lze zpravidla parametrizovat i na základě katalogových údajů od výrobce článku. Struktura katalogových údajů výrobců článků není zcela jednotná, ale většinou obsahuje jak hodnotu napětí, tak i hodnotu vnitřního odporu článku. Vnitřní napětí článku se mění v závislosti na stavu vybití, resp. hloubce vybití DOD (*Depth of Discharge*), přičemž 100 % odpovídá 100 % odebraného náboje v relaci ke jmenovité kapacitě. Tuto závislost výrobce obvykle rovněž poskytuje. Použití R_i modelu parametri-

zovaného podle katalogových údajů je jednoduché, ale jen přibližné, neboť R_i model nezohledňuje zejména proměnnost vnitřního odporu v závislosti na režimu nabíjení/vybíjení, na DOD a na teplotě, ale ani nezohledňuje charakter článku jako dynamické soustavy.

Významné dynamické vlastnosti článku jsou zřejmé z průběhů na obr. 5. Na tomto

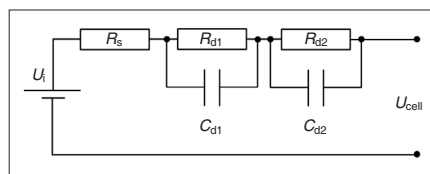


Obr. 6. Dynamický model článku s jednou náhradní kapacitou řazenou sériově k napěťovému zdroji

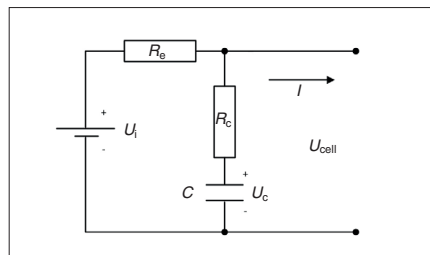
obrázku je červenou čarou znázorněn průběh proudu a černou čarou průběh napětí. Je zřejmé, že při poklesu vybíjecího proudu okamžitě nevzroste napětí na plnou hodnotu, ale po určité skokové změně narůstá postupně. Podobný je průběh napětí při nárůstu velikosti vybíjecího proudu a analogické vlastnosti má článek i při nabíjení. Popsanou vlastnost není možné modelovat pomocí R_i modelu, ale do obvodového modelu je nutné přidat kapacitu. Existuje více typů dynamických modelů článků, jak je popsáno např. v [1], [2], [3], [5].

U akumulátorů pro elektromobilitu se lze nejčastěji setkat se strukturami obvodových modelů článků podle obr. 6 a obr. 7.

Dynamický obvodový model akumulátorového článku na obr. 7 dává širší možnosti proložení napěťových průběhů při přechodných jevech. Komplikovanější je však detailní parametrizace tohoto modelu i s ohledem na to, že akumulátorové články nevykazují vždy dostatečnou opakovatelnost průběhů veličin při přechodných jevech a přesná parametrizace jednoho kusu článku nezajišťuje obecně stejnou přesnost v případě jiného kusu článku



Obr. 7. Dynamický model článku se dvěma kapacitami



Obr. 8. Dynamický model článku s jednou náhradní kapacitou řazenou paralelně k napěťovému zdroji

téhož typu. Jako kompromis mezi jednoduchostí parametrizace a její přijatelnou přesností autoři na svém pracovišti zvolili analýzu parametrů článku podle obr. 6. Jde tedy o identifikaci hodnot R_s , R_d , C_d a U_i a jejich závislostí na hloubce vybití, proudu, teplotě a režimu vybíjení nebo nabíjení.

Reprezentace akumulátorového článku obvodem podle obr. 6 je jeho modelová náhrada dynamickou soustavou se zpožděním 1. řádu. V literatuře, kde je modelován článek pomocí soustavy 1. řádu, se lze nejčastěji setkat právě s náhradním obvodem podle obr. 6. Obecně je však možné identických vlastností obvodového modelu článku jako soustavy 1. řádu dosáhnout buď strukturou na obr. 6 se sériovým řazením kondenzátoru vzhledem k napěťovému zdroji, nebo strukturou podle obr. 8 s paralelním řazením kondenzátoru vzhledem k napěťovému zdroji. Oba obvody jsou při správném nastavení parametrů po stránce matematické ekvivalentní, obvod podle obr. 8 však koresponduje podstatně lépe s reálnou fyzikální strukturou akumulátorového článku. Kapacita paralelně řazená k napěťovému zdroji v obvodu na obr. 8 představuje kapacitu elektrické dvojvrstvy. Před dosažením disociačního napětí se zde těsně přibližují nosiče kladného a záporného náboje, což vytváří velkou paralelní kapacitu C . Pro dosažení identických dynamických vlastností obou obvodových reprezentací článku podle obr. 6 a obr. 8 se hodnoty jednotlivých parametrů R a C liší. Oba obvody lze parametrovat z průběhu napěťové odezvy článku při skokové změně zatěžovacího proudu – obr. 5.

Popsaná vlastnost obou typů náhradních obvodů byla ověřena výpočetními modely v programu Spice. Pro získání identických vlastností obou typů obvodových modelů jako soustav 1. řádu vycházejí jednotlivé parametry takto:

sériově řazení kondenzátoru a napěťového zdroje: $R_s = 0,000\ 7\ \Omega$, $R_d = 0,000\ 47\ \Omega$, $C_d = 204\ 255\ \text{F}$,

paralelní řazení kondenzátoru a napěťového zdroje: $R_c = 0,001\ 17\ \Omega$, $R_d = 0,001\ 74\ \Omega$, $C = 32\ 960\ \text{F}$.

Parametry se vztahují k článku NMC 25 A·h podle tab. 2.

Na obr. 9 jsou znázorněny vypočtené napěťové odezvy obvodových modelů článků se sériově řazeným kondenzátorem (zeleně) a paralelně řazeným kondenzátorem (červeně) při skokových změnách proudu (fialově). Je zřejmé, že dynamické chování obou variant obvodového modelu je identické.

3. Metodika parametrizace obvodového modelu se sériově řazenou kapacitou

V dalším textu bude věnována pozornost parametrizaci obvodového modelu článku podle obr. 6. Při statické identifikaci obvodového modelu článku se sériově řazeným kondenzátorem podle obr. 6 lze spojit měření odporu R_s s měřením vybíjecí charakteris-

tiky, tedy závislosti svorkového napětí článku na hloubce vybití DOD. Při vybíjení se postupuje tak, že článek je vybíjen konstantním proudem z plně nabitého stavu a je vzorkováno svorkové napětí. Stabilizace vybíjecího proudu je zajištěna pomocí elektronické zátěže s výkonovými zesilovacími tranzistory s řízením ve zpětné vazbě. Po nastavených časových intervalech je stykačem odpojován zatěžovací proud článku a v dostatečně krátké době je z rozdílu svorkového napětí článku bez zatížení a se zatížením ΔU a ze změny proudu ΔI určen odpor R_s podle Ohmova zákona:

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1)$$

Na obr. 10 je znázorněn průběh napětí a proudu při již popsaném měření. Je zde zřejmé vkládání krátkých intervalů pro vyhodnocení úbytku napětí na odporu R_s a zároveň je patrné, že s rostoucím DOD se zvětšuje i velikost tohoto úbytku, odpovídajícím způsobem roste tedy i hodnota R_s .

Při zjišťování parametrů R_d a C_d bylo nutné analyzovat časové průběhy svorkových napětí článků ve vhodných dynamických stavech. Pro možnost jednoduché identifikace uvedených parametrů charakterizujících články jako soustavu 1. řádu podle obr. 6 jsou nejvhodnější skokové změny vybíjecího proudu, při nichž se svorkové napětí změní zčásti skokově o hodnotu úbytku napětí na odporu R_s . V další části se napětí mění přibližně exponenciálně a postupně se blíží ustálené hodnotě podle obr. 5.


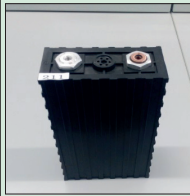
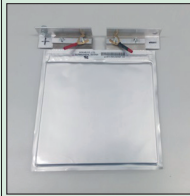
Při zjišťování parametrů R_d a C_d byla jejich hodnota určována v rámci vybíjení vždy pro pět hodnot hloubky vybití DOD. Po zavedení skokové změny proudu následovalo vložení prodlevy, během které se ustalovalo napětí a vzorkoval se jeho průběh. V některých případech byla doba ustalování nastavena na 15 min, v některých případech na 5 min. Změřená odezva napětí byla poté pomocí prostředí Matlab proložena exponenciálou, z jejichž parametrů byly určeny hodnoty R_d a C_d . Tento postup je zřejmý z obr. 11, který naznačuje proložení exponenciály naměřenými hodnotami napětí při proudovém odlehčení článku a ve spodní části určení odchylky mezi naměřenými body a proloženou exponenciálou. Průběhy byly získány pro dobu ustalování napětí 5 min. Pro tyto operace a pro určení časové konstanty výsledné exponenciály byl použit toolbox Curve fitting tool. Hodnota odporu R_d se určí z rozdílu hodnot napětí na začátku a konci přechodného jevu U_d a z hodnoty vybíjecího proudu:

$$R_d = \frac{U_d}{I_{\text{vybijecí}}} \quad (2)$$

Kapacita C_d je určena z hodnoty časové konstanty:

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} \quad (3)$$

Tab. 2. Přehled měřených článků

Technologie	LFP	LFP	NMC
Výrobce	Winston Battery	Sinopoly	Kokam
Typové označení	WB-LYP40AHA	SP-LFP100AHA	SLPB 60216216
Poznámka	využití ve studentském experimentálním elektromobilu	využití v experimentálním kolejovém vozidle	pro plánovanou modifikaci zdrojové soustavy experimentálního kolejového vozidla
Jmenovité napětí (V)	3,2	3,2	3,7
Jmenovitá kapacita (A·h)	40	100	25
Vnitřní odpor (mΩ)	0,7	0,45	1,2
Počet cyklů	>3 000 (80 % DOD)	>3 000 (80 % DOD)	>800 (80 % DOD)
Objem (dm ³)	1	2,4	0,3
Hmotnost (kg)	1,6	3,6	0,6
Trvalý vybíjecí proud (A)	120	300	125
Krátkodobý vybíjecí proud (A)	400	1 000	200
Jmenovitá energie (W·h)	128	320	92
Hmotnostní hustota energie (W·h/kg)	80	89	153
Objemová hustota energie (W·h/dm ³)	128	133	306
Maximální krátkodobý vybíjecí výkon (W)	1 280	3 200	740
Hmotnostní hustota výkonu (krátkodobé vybíjení) (W/kg)	800	889	1 233
Trvalý vybíjecí výkon (W)	384	960	462
Hmotnostní hustota výkonu (trvalé vybíjení) (W/kg)	240	267	771
Ilustrační fotografie			

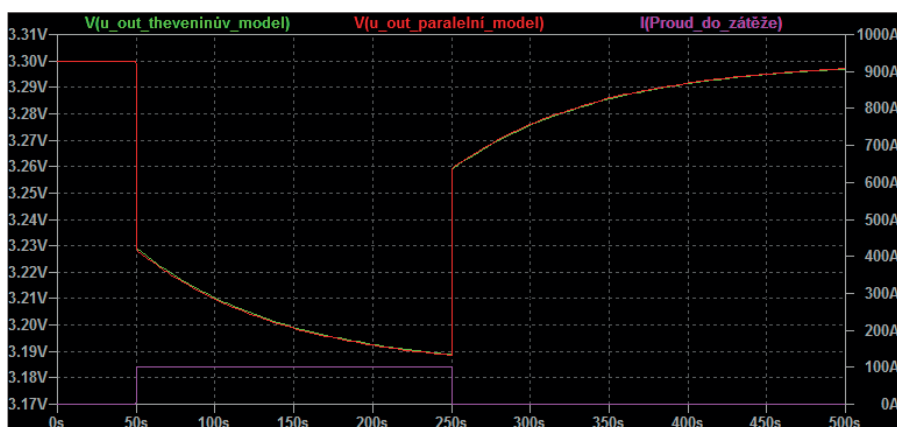
Pro vzorkování naměřených hodnot a jejich archivaci byla využita měřicí karta NI USB 6008 a software vyvinutý v prostředí LabView.

Měření byla vykonávána pro tři typy akumulátorových článků, jejichž charakteristiku obsahuje tab. 2.

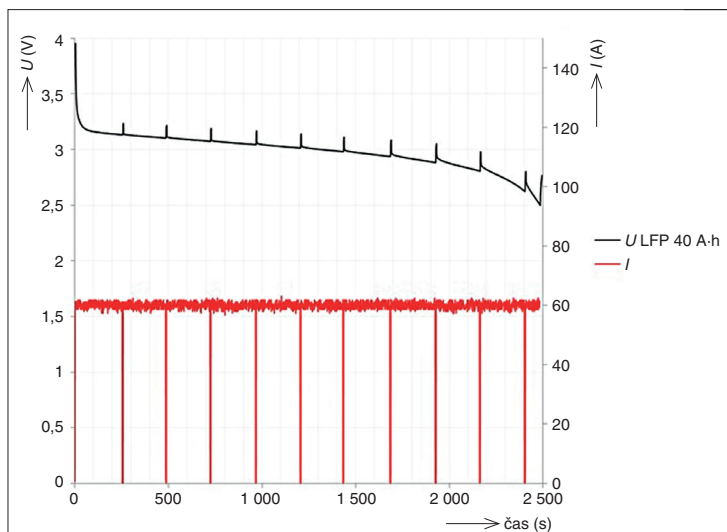
Měření byla prováděna pro několik hodnot vybíjecího proudu v rozmezí od 0,2C do 4C, pro tři hodnoty teploty: 0 °C, 25 °C,

40 °C. Na obr. 12 je pro ilustraci uveden snímek pece, ve které byly články proměřovány při teplotě 40 °C.

Po proměření článků při vybíjení byly měřeny parametry článků při nabíjení analogickou metodikou. Při nabíjení ze stabilizovaného zdroje byly články proměřovány při teplotách 25 °C a 3 °C v rozmezí nabíjecích proudů přibližně 0,5C až 2C.



Obr. 9. Napěťové odezvy obvodových modelů článků se sériově řazeným kondenzátorem podle obr. 6 (zeleně) a paralelně řazeným kondenzátorem podle obr. 8 (červeně) při skokových změnách proudu (fialově)



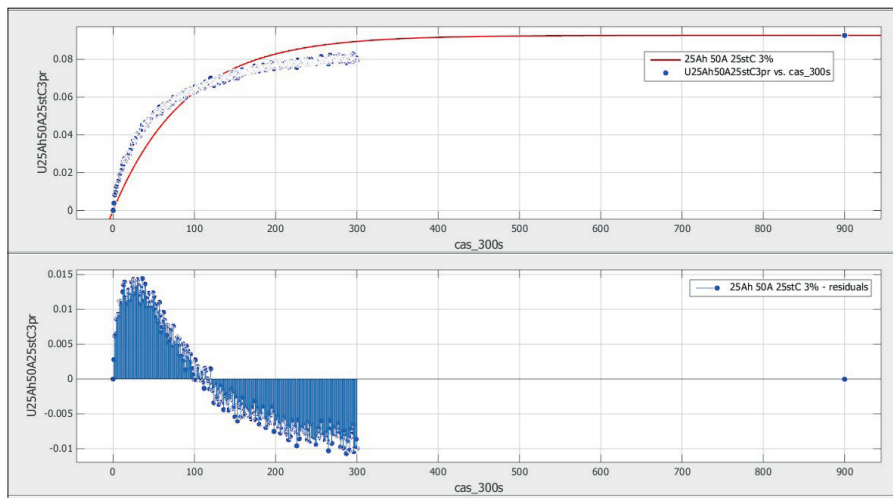
Obr. 10. Průběh napětí (černě) a proudu (červeně) při měření vybíjecí charakteristiky a hodnot R_s – měření článku LFP 40 A-h

Uvažují-li se rozdílné hodnoty odporů R_s a R_d v obvodovém modelu článku pro režim vybíjení a režim nabíjení, lze schéma z obr. 6 modifikovat do struktury na obr. 13. Diody na tomto obrázku je třeba chápat jako ideální.

4. Některé výsledky měření

Na obr. 14 a obr. 15 jsou znázorněny vybíjecí charakteristiky jako statické závislosti svorkových napětí na hloubce vybití pro různé vybíjecí proudy pro případ článku LFP 40 A-h. Charakteristiky na obr. 14 již byly publikovány i v [5] a představují případ pro teplotu okolí 25 °C, charakteristiky na obr. 15 byly změřeny pro teplotu okolí 0 °C.

hloubka vybití DOD může v pracovním nabíjecím intervalu nabývat hodnot i více než 100 %, což nutně nemusí znamenat výraznou kladnou výrobní toleranci, ale specifické podmínky provozu. Reálná kapacita článku odpovídající energii, kterou je možné na svorkách odebrat, je závislá na více veličinách, především na vybíjecím proudu a pracovní teplotě. Při rostoucích hodnotách vybíjecího proudu narůstá výkonová a energetická ztráta na vnitřních odporech, zmenšuje se tudíž velikost energie, kterou lze odebrat na svorkách. Při malých hodnotách vybíjecích proudů je tudíž možné z článku čerpat i více energie, než je nominální hodnota platná pro konkrétní vybíjecí proud, lze tedy dosáhnout DOD > 100 %. Naopak při vysokých hodnotách

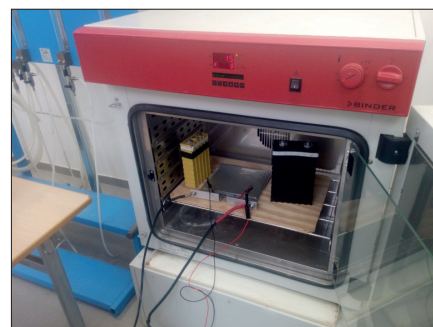


Obr. 11. Proložení naměřených hodnot napětí po proudovém odlehčení článku exponenciálou

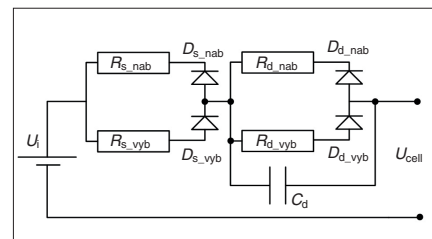
Charakteristiky na obr. 14 vykazují typické průběhy pro Li-ion články, kdy při vybíjení z plně nabitého stavu rychle klesá napětí až do dosažení stavu DOD přibližně 5 až 10 %. Poté se strmost poklesu s rostoucím DOD výrazně zmenší. Při vybíjení menšími proudy do 1C opětovně roste strmost poklesu napětí při dosažení hloubky vybití DOD v rozmezí 90 až 100 %. Z grafů je zřejmé, že

tých vybíjecího proudu klesá energie článku, kterou lze odebrat na svorkách, pod nominální hodnotu, a je proto možné dosáhnout hodnoty DOD i pod 100 %. Z charakteristik na obr. 14 jsou patrné další typické skutečnosti. S rostoucím vybíjecím proudem klesá svorkové napětí článku, což je dáno vnitřními odpory článku a odpovídá vlastnostem reálného zdroje napětí. Při větších hodnotách vybíje-

cích proudů klesá energie, kterou je možné z článku čerpat nejen vzhledem k rostoucím ztrátám na vnitřních odporech, ale i díky ochranným funkcím, které zajišťuje systém battery managementu. Tento systém z důvodu ochrany před nepřiměřeným vybitím, které může vést až ke zničení článku, monitoruje okamžitou hodnotu svorkového napětí a při jejím poklesu pod nastavenou mez (zpravidla v rozmezí 2 až 2,8 V v závislosti na typu článku) vydá povel ke striktnímu ukončení vybíjení. Pokles napětí pod nastavenou mez však může být vyvolán nejen nepřiměřeným vybitím článku, ale i vlivem úbytku napětí



Obr. 12. Pracoviště pro proměřování článků při zvýšené teplotě



Obr. 13. Modifikace obvodového modelu článku pro rozdílné hodnoty odporů při nabíjení a vybíjení

na vnitřních odporech u částečně vybitého článku při jeho vybíjení velkým proudem. Tato skutečnost je z obr. 14 rovněž zřejmá. V tomto případě je možné článek dále vybit, avšak již jen s nižšími hodnotami proudu a tak, aby svorkové napětí nekleslo pod nastavenou mez.

Z obr. 14 a obr. 15 je patrná relace mezi vlastnostmi článku při vybíjení při standardní (25 °C) a snížené teplotě 0 °C. Z obr. 15 je zřejmá obecná vlastnost lithiových článků – vzrůst vnitřního odporu s klesající teplotou s dopady na snížení účinnosti vybíjení, zvýšení ztrát při vybíjení a vlivem těchto okolností a vlivem zvýšeného úbytku napětí při průchodu proudu vnitřním odporem i pokles disponibilní kapacity, a to nezanedbatelný, jak vyplývá z obr. 15. V případě nízkých teplot se však projevuje určitá kompenzace vlivů na zvýšení odporu tím, že v tomto stavu dochází k vývinu větších tepelných ztrát, které zpětně přispívají ke zvýšení teploty článku a ke snížení jeho vnitřního odporu.

Průběhy vybíjecích charakteristik na obr. 14 a obr. 15 při minimálních proudech posky-

Tab. 3. Přehled dominantních změn parametrů článků v závislosti na proudu a DOD – režim vybíjení, teplota 25 °C a 0 °C

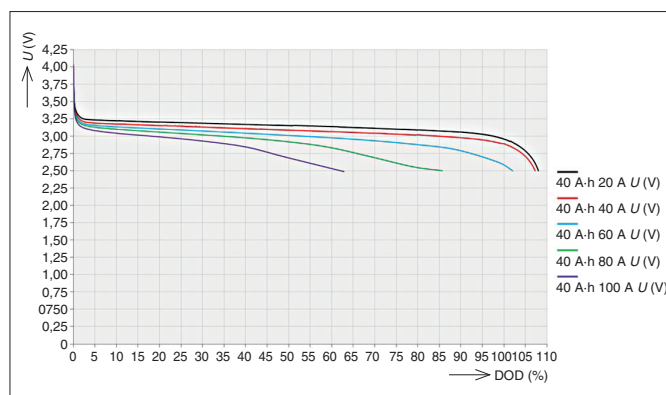
Článek	LFP 100 Ah	LFP 40 Ah	NMC 25 Ah
Celkový rozsah vnitřního napětí/DOD (V)	4,2 až 2,5	4,1 až 2,5	4,1 až 2,7
Rozsah napětí v pracovní části/DOD (V)	3,3 až 3,1	3,2 až 3,0	4,0 až 3,5
R_s (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,001 1	0,002 6	0,002 9
R_s (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,000 65	0,001 8	0,001 8
R_d (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,000 7	0,004 0	0,003 0
R_d (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,000 5	0,001 8	0,001 8
C_d (F) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 25 °C	250 000	50 000	42 000
C_d (F) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 25 °C	60 000	22 000	35 000
Závislost R_s na DOD, 25 °C	rostoucí	rostoucí	rostoucí/konvexní
Závislost R_d na DOD, 25 °C	rostoucí	rostoucí	rostoucí
Závislost C_d na DOD, 25 °C	klesající	klesající	přibližně konstantní
Přibližná změna R_s se změnou proudu, 25 °C	-0,8C/+30 %	+1,5C/+10 %	+2C/-25 %
Přibližná změna R_d se změnou proudu, 25 °C	-0,8C/+100 %	+1,5C/-5 %	+2C/-20 %
Přibližná změna C_d se změnou proudu, 25 °C	-0,8C/-50%	+1,5C/-20 %	nevýrazná
Článek	LFP 100 Ah	LFP 40 Ah	NMC 25 Ah
Celkový rozsah vnitřního napětí/DOD (V)	4,2 až 2,5	4,1 až 2,5	4,1 až 2,7
Rozsah napětí v pracovní části/DOD (V)	3,3 až 3,1	3,2 až 3,0	4,0 až 3,5
R_s (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 0 °C	0,001 6	0,003 7	0,005 5
R_s (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 0 °C	0,001 4	0,003 2	0,004
R_d (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 0 °C	0,003	0,009	0,01
R_d (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 0 °C	0,000 8	0,003	0,004
C_d (F) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 0 °C	130 000	40 000	30 000
C_d (F) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 0 °C	15 000	5 000	3 000
Závislost R_s na DOD, 0 °C	klesající/konvexní	konvexní	rostoucí/konvexní
Závislost R_d na DOD, 0 °C	rostoucí	rostoucí	rostoucí
Závislost C_d na DOD, 0 °C	klesající	klesající	klesající

tují i závislosti vnitřního napětí článku na hloubce vybití.

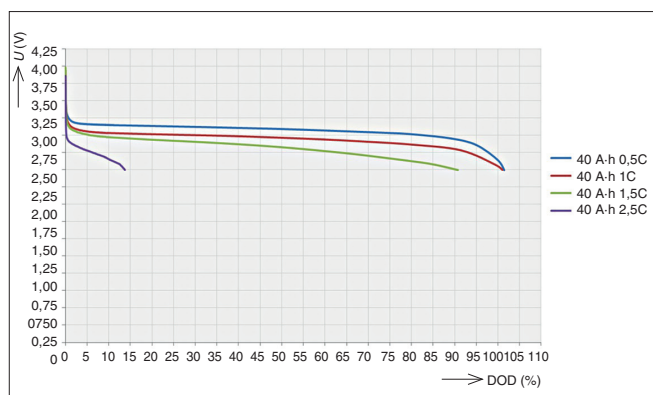
Změny hodnoty odporu R_s článku podle obvodu na obr. 6, popř. na obr. 13 ilustrují

charakteristiky na obr. 16, poskytující závislosti tohoto odporu na velikosti hloubky vybití DOD a vybíjecím proudu, které byly naměřeny na článku LFP 100 A-h.

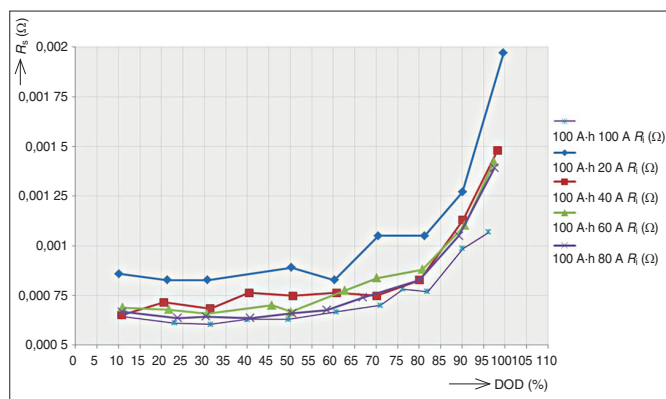
Z obr. 16 je zřejmý obecný charakter těchto závislostí, kdy křivky vykazují určité minimum, avšak zejména při růstu DOD hodnota odporu strmě roste. Nárůst hodno-



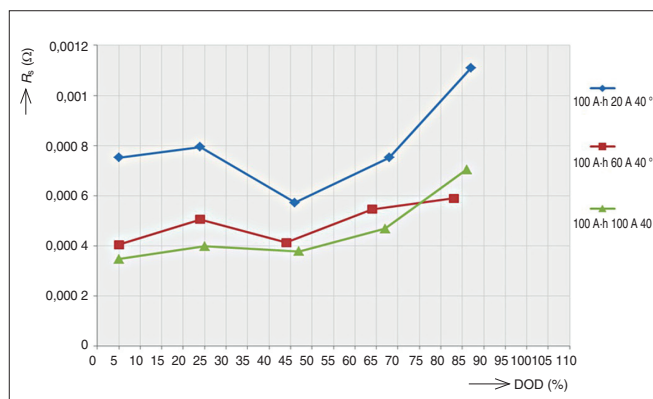
Obr. 14. Vybíjecí charakteristiky článku LFP 40 A-h pro 25 °C



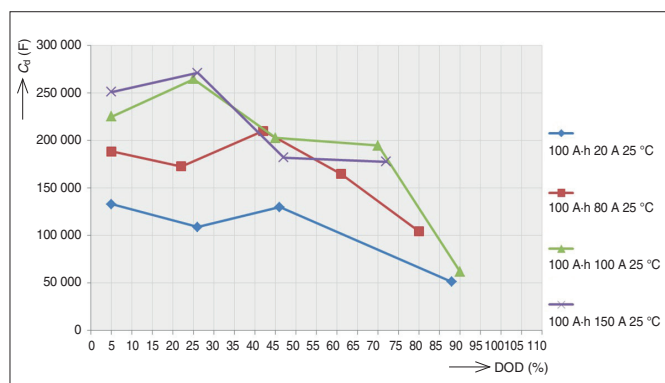
Obr. 15. Vybíjecí charakteristiky článku LFP 40 A-h pro 0 °C



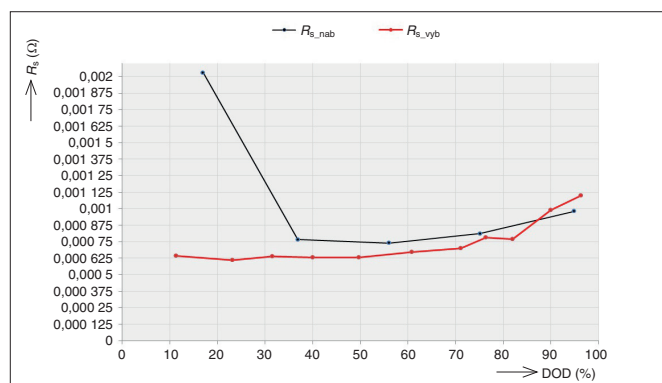
Obr. 16. Závislosti odporu R_s na DOD a velikosti vybíjecího proudu u článku LFP 100 A-h, teplota 25 °C



Obr. 17. Závislosti odporu R_d na DOD a vybíjecím proudu u článku LFP 100 A-h, teplota 40 °C



Obr. 18. Závislosti kapacity C_d na DOD a vybíjecím proudem u článku LFP 100 A-h, teplota 25 °C



Obr. 19. Závislosti odporu R_s na DOD při vybíjení a nabíjení u článku LFP 100 A-h při teplotě 25 °C a proudu 100 A

ty odporu R_s s rostoucím DOD lze vysvětlit složením článku z dílčích paralelních elementárních článků, jejichž vybíjení není zcela rovnoměrné. S rostoucím DOD narůstá počet zcela vybitých elementárních článků, které se již neuplatňují, výsledný odpor zmenšujícího se počtu nevybitých elementárních článků roste. Zároveň je evidentní, že s rostoucím vybíjecím proudem se velikost odporu zmenšuje.

Charakteristiky na obr. 17 ilustrují závislosti odporu R_d na hloubce vybití DOD a vybíjecím proudem u článku LFP 100 A-h. Opět je zřejmý výrazný růst odporu s rostoucím DOD a pokles odporu s rostoucím vybíjecím proudem.

V obr. 18 je ukázána závislost kapacity C_d na hloubce vybití DOD a vybíjecím proudem u článku LFP 100 A-h. Je zjevné, že s rostoucím DOD kapacita klesá, s rostoucím vybíjecím proudem kapacita C_d vzrůstá. Pokles kapacity C_d s rostoucím DOD lze vysvětlit obdobně jako zvyšování odporu R_s pomocí představy paralelních elementárních článků.

Ve snižující se kapacitě se uplatňují jen zcela nevybité elementární články.

Obvodové modely článků se strukturou podle obr. 6 lze uvažovat pro režim nabíjení i vybíjení článku, avšak s rozdílnou hodnotou parametrů. V dalších obrázcích jsou uvedeny závislosti, které vyjadřují srovnání parametrů R_s , R_d a C_d v režimu nabíjení a vybíjení u článku LFP 100 A-h při teplotě 25 °C. Ze srovnání průběhů na obr. 19 je zřejmý podobný charakter závislostí odporu R_s na DOD při vybíjení (červený průběh) a při nabíjení (černý průběh), tj. znatelný vzrůst tohoto odporu s rostoucí hloubkou vybití DOD. Velikost odporu R_s je však při nabíjení větší. Tato skutečnost má obecnější charakter a přispívá ke stanovení mezních hodnot nabíjecích proudů článku nižších než proudů vybíjecích. Výrazný nárůst odporu R_s při ukončování nabíjení lze opět vysvětlit paralelním řazením elementárních článků. Při jejich ne zcela rovnoměrném nabíjení se úplně nabitě články přestávají uplatňovat, uplatňuje se pouze

odpor a kapacita klesajícího počtu ne zcela nabitých článků.

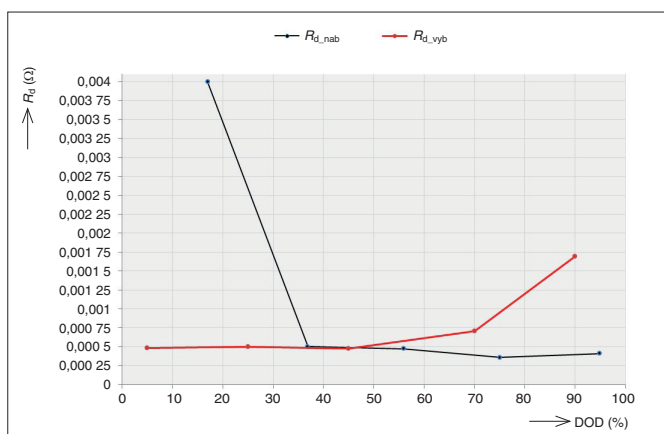
Na obr. 20 jsou vyneseny naměřené závislosti odporu R_d na hloubce vybití DOD u článku LFP 100 A-h při teplotě 25 °C při vybíjení (červený průběh) a nabíjení (černý průběh). Z uvedených průběhů je zřejmá nejen poměrně značná rozdílnost hodnot odporu pro nabíjení a vybíjení v různých oblastech DOD, ale i rozdílnost trendů obou závislostí. Zatímco při nabíjení odpor R_d vzrůstá, při vybíjení je patrný pokles hodnoty tohoto odporu.

Na obr. 21 jsou znázorněny průběhy kapacity C_d článku v závislosti na hloubce vybití DOD při vybíjení (červený průběh) a nabíjení (černý průběh). Jde o průběhy opět změřené na článku LFP 100 A-h při teplotě 25 °C. Z grafů je opět patrná značná, až řádová rozdílnost kapacit při vybíjení a nabíjení včetně rozdílu v trendech závislostí.

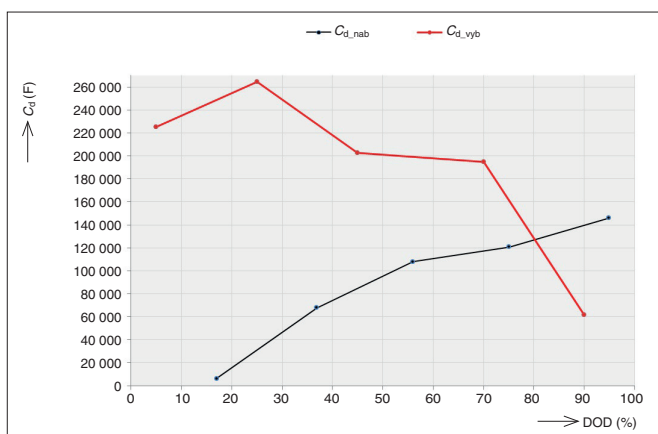
Publikování všech grafů z vykonaných měření by vyžadovalo rozsáhlý prostor a bylo by nepřehledné. Proto jsou výsledky provedených

Tab. 4. Přehled dominantních změn parametrů článků v závislosti na proudu a DOD – režim nabíjení, teplota 25 °C a 3 °C

Článek	LFP 100 Ah	LFP 40 Ah	NMC 25 Ah
Celkový rozsah vnitřního napětí/DOD (V)	4,2 až 2,5	4,1 až 2,5	4,1 až 2,7
Rozsah napětí v pracovní části/DOD (V)	3,3 až 3,1	3,2 až 3,0	4,0 až 3,5
R_s (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,001 25	0,004 58	0,003 5
R_s (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,000 74	0,001 96	0,002 8
R_d (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,001 5	0,003 8	0,003 1
R_d (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 25 °C	0,000 36	0,007	0,002 5
C_d (F) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 25 °C	146 000	36 000	35 000
C_d (F) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 25 °C	7 000	4 000	24 000
Závislost R_s na DOD, 25 °C	konvexní	klesající	rostoucí
Závislost R_d na DOD, 25 °C	klesající	klesající	klesající
Závislost c_d na DOD, 25 °C	rostoucí	rostoucí	konkávní
Článek	LFP 100 Ah	LFP 40 Ah	NMC 25 Ah
Celkový rozsah vnitřního napětí/DOD (V)	4,2 až 2,5	4,1 až 2,5	4,1 až 2,7
Rozsah napětí v pracovní části/DOD (V)	3,3 až 3,1	3,2 až 3,0	4,0 až 3,5
R_s (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 3 °C	0,002 5	0,004 5	0,007
R_s (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 3 °C	0,001 4	0,003	0,004
R_d (Ω) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 3 °C	0,002 5	0,008	0,005
R_d (Ω) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 3 °C	0,000 8	0,004	0,004 5
C_d (F) – nejvyšší hodnota při proudu 1C, 3 °C	120 000	31 000	38 000
C_d (F) – nejnižší hodnota při proudu 1C, 3 °C	9 000	15 000	20 000
Závislost R_s na DOD, 3 °C	konvexní	konvexní	rostoucí
Závislost R_d na DOD, 3 °C	klesající	klesající	nevýrazná
Závislost c_d na DOD, 3 °C	rostoucí	konvexní	konvexní



Obr. 20. Závislosti odporu R_d na DOD při vybíjení a nabíjení u článku LFP 100 A-h při teplotě 25 °C a proudu 100 A



Obr. 21. Závislosti kapacity C_d na DOD při vybíjení a nabíjení u článku LFP 100 A-h při teplotě 25 °C a proudu 100 A

měření soustředěny do tab. 3 pro vybíjení a do tab. 4 pro nabíjení. Tyto tabulky stručně shrnují přibližnou míru změn parametrů článků v závislosti na působících podmínkách.

5. Závěr

Z uvedených tabulek a obrázků je zřejmé, že rozptýl parametrů obvodových modelů lithiových článků je výrazný, změny parametrů činí běžně desítky procent. Dále byly zjištěny ne vždy jednoznačné trendy změn parametrů.

Hlavní výsledky provedených měření lze na zobecněné úrovni formulovat v těchto bodech:

- Obvodové modely článků jsou pomůckou pro operativní výpočty, neposkytují však hlubší vhled do elektrochemických procesů ani do výraznějších nelinearit.
- Parametry obvodových modelů jsou závislé na mnoha faktorech, zejména na hloubce vybití DOD, proudu, teplotě, stáří a opotřebenosti článku, změna parametrů se běžně pohybuje v desítkách procent.
- Vlastnosti článků se mohou mírně lišit i u jednotlivých kusů téhož typu v identických podmínkách.
- Projevuje se nestálost parametrů v čase u jednoho kusu článku, a to jak v delších časových obdobích, tak i v jednotlivých vybíjecích cyklech.
- Články s nižší kapacitou vykazují větší odpory a menší dynamickou kapacitu.
- S rostoucí teplotou klesají vnitřní odpory, naopak výrazný nárůst o desítky až stovky procent se projevuje při teplotách okolo 0 °C, kdy je vhodné baterii temperovat – platí pro vybíjení i nabíjení, s klesající teplotou se podstatně snižuje disponibilní ka-

pacita článku. Velikost snížení kapacity je závislá na použité technologii článku. Technologie LFP vykazuje výrazně větší pokles kapacity v závislosti na teplotě a vybíjecím proudu v porovnání s technologií NMC (např. při proudu 2,5C a teplotě 0 °C poklesne kapacita článku LFP 40 A-h o 85 % a u technologie NMC 25 A-h o 20 %).

- S rostoucí teplotou vzrůstá o desítky procent dynamická kapacita.
- S růstem teploty nad asi 30 °C sice stále klesají vnitřní odpory, avšak zkracuje se životnost baterie – v případě vyšších teplot je vhodné baterii chladit.
- Vlastnosti článků určuje především vnitřní teplota, vnější teplota nemusí být, zejména v tepelných přechodných jevech, rozhodující, bez extrémních požadavků na čas při měřeních je téměř nemožné zajistit vnitřní tepelnou stabilizaci. Komerčně dostupné články navíc nedisponují interními snímači teploty.
- Výrazně se odlišují parametry při vybíjení a nabíjení, a to včetně trendů závislosti těchto parametrů, při nabíjení se uplatňují větší odpory.
- Principiální rozdíly charakterů závislosti parametrů různých technologií článků jsou nevýrazné.
- V případě vybíjecích proudů pod hodnotou 1C lze při teplotě 25 °C z některých článků využít energii větší než jmenovitou (např. u článku LFP 40 A-h je možné při vybíjecím proudu 0,2C získat kapacitu až 110 % jmenovité hodnoty).

Je evidentní, že přesný a zároveň dostatečně operativní výpočet poměrů akumulátorové baterie (např. svorkové napětí, účinnost nabíjení a vybíjení nebo aktuální kapacita) je

v podstatě nemožný. Vzhledem k neurčitostem parametrizace modelu článku je vhodné vnímat i přibližnost výsledků výpočtů mode-



Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru Silnoproudá 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 spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 2011 pracuje jako profesor na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice a nadále úzce spolupracuje s Fakultou strojní ČVUT v Praze. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, elektrické trakce, mikroprocesorového řízení a elektromobility.



Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D., úspěšně dokončil magisterské studium v oboru Elektrotechnická zařízení v dopravě na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice v roce 2013. V roce 2017 úspěšně ukončil doktorské studium v oboru Dopravní prostředky a infrastruktura na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě téže univerzity. Od roku 2015 je na této katedře odborným asistentem. V rámci doktorského studia absolvoval dvouměsíční odbornou pracovní stáž v Irsku. Odborně se zaměřuje na oblast akumulátorů elektrické energie a jejich battery managementu, elektronických napájecích zdrojů a elektronických obvodů.

The article deals with Li accumulator cells dynamic circuit models parameters provide for electromobility. The suitable dynamic circuit model is selected. This model is parametrized by experiments with cells charge and discharge. The parameters values dependencies are researched by charging and discharging, by variable temperature, current and depth of discharge (DOD). The results are presented on more types of accumulator cells. Accumulator cells circuit models parameters provides resource data for vehicle accumulator systems design and for traction properties and range calculations of accumulator vehicles.

lů akumulátorů v rámci rozsáhlejších výpočetních modelů pohonných a energetických technologií. Pro spolehlivou specifikaci akumulátorové výzbroje je vhodnější volba konzervativní strategie návrhu, neboť s časem se navíc veškeré ukazatele jednoznačně zhoršují. Nevhodný návrh akumulátorové technologie bez jakýchkoli rezerv v hodnotách rozhodujících parametrů zpravidla vede k nesplnění očekávaných vlastností a ke špatným referencím, vrhajícím nezasloužený stín na techniku akumulátorového napájení obecně.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory projektu TAČR č. 50680/56/TE520038 – Centrum kompetence drážních vozidel.

Recenze: Ing. Jiří Pohl

Literatura:

- [1] EINHORN, M., F. V. CONTE, Ch. KRAL a J. FLEIG. Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. IEEE Power Electronics Society, 2013, **28**(3).
- [2] HONGWEN, HE, Rui XIONG a Fan JINXIN. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*. **2011**(4).
- [3] MOUSAVI, S. M., M. NIKDEL. Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2014, **32**.

- [4] WEICKER, P. *Lithium – Ion Battery Management*. London: Artech House, 2014.
- [5] NOVÁK, J. O. SADÍLEK, P. SÝKORA. Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu, část 2. *ELEKTRO*. Praha: FCC Public, 2016, **26**(11 a 12).
- [6] HINČICA, L. Nenápadný návrat trolejbusů do Prahy. *Československý dopravák*. Ostrava: MH Development s. r. o., 2017, **XIV**(5).
- [7] www.skoda-auto.cz
- [8] WINSTON BATTERY. Firemní materiály.
- [9] SAFT. Firemní materiály.
- [10] KOKAM. Firemní materiály.
- [11] TOSHIBA. Firemní materiály.
- [12] PANASONIC. Firemní materiály.

O Dopravní fakultě Jana Pernera v Pardubicích

Dopravní fakulta Jana Pernera (DFJP) poskytuje komplexní vzdělání v oblasti dopravy s cílem připravit odborníky pro soukromé i státní dopravní společnosti. Díky kombinaci teorie s praxí DFJP dosahuje téměř stoprocentního okamžitého uplatnění všech svých absolventů na trhu práce.

Od akademického roku 2002/2003 se na základě souhlasu Akreditační komise České republiky začalo na DFJP realizovat tzv. strukturované studium, které má tři stupně:

- Bakalářský studijní program 3709 R *Dopravní technologie a spoje* (Bc.),
- Magisterský studijní program 3708T *Dopravní inženýrství a spoje* (Ing.),
- Doktorský studijní program 3710V *Technika a technologie v dopravě a spojích* (Ph.D.).

DFJP se tak začlenila do soustavy celoevropského vysokého školství, umožňující vzájemnou, oboustrannou mobilitu studentů i pedagogů. Toto systémové řešení zvyšuje uplatnění a kariérní možnosti absolventů v globálním, silném konkurenčním prostředí.

DFJP má nyní všechny atributy univerzitního pracoviště:

- doktorské studium,
- habilitační právo,
- právo profesorského řízení.

DFJP se také výraznou měrou zapojuje do projektů základního, aplikovaného a institu-

cionálního výzkumu, a to jak na poli domácím, tak v rámci mezinárodní spolupráce.

Další informace na:
<https://dfjp.upce.cz>



ELEKTROTECHNICKÁ VÝSTAVA

26. ročník

5. - 6. 9. 2018

Zimní stadion Hradec Králové



www.sonepar.cz/vystava