

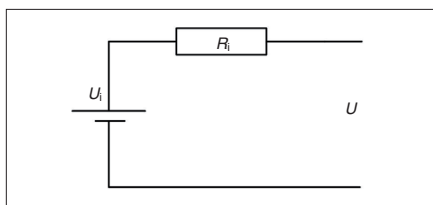
Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu

Jaroslav Novák, Ondřej Sadílek, Petr Sýkora
Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Článek podává přehled o nejvýznamnějších typech lithiových trakčních akumulátorů, o jejich hlavních vlastnostech, aplikačních možnostech a jejich srovnání z hlediska základních parametrů. V další části je pozornost věnována variantám obvodových modelů lithiových akumulátorů a jejich parametrizaci. V článku jsou rovněž popsány hlavní funkce tzv. battery managementu vícečlánkové lithiové akumulátorové baterie. V poslední části příspěvku jsou prezentovány některé výsledky měření na konkrétních typech článků.

1. Úvod

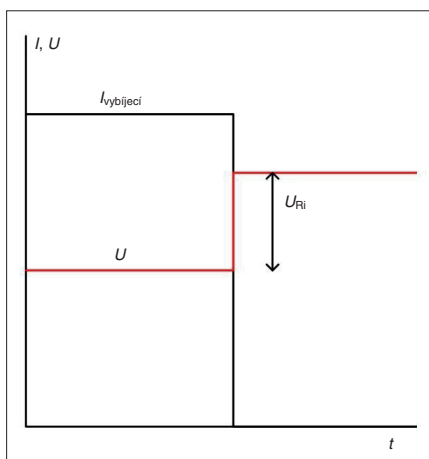
Za hlavní důvod, který brání většímu rozvoji elektromobility a akumulátorového napájení silničních i kolejových vozidel, je považována nedostatečná energetická kapacita, nebo přesněji měrná hmotnostní či objemová kapacita elektrochemických akumulátorů elektrické energie. Zatímco měrná hmotnostní energetická kapacita benzínu je přibližně 2 300 W·h/kg a nafty až 3 300 W·h/kg, je měrná kapacita elektrochemických akumulátorů elektrické energie 20krát až 30krát menší. Naproti tomu za poslední přibližně čtvrtstoletí prošla technika elektrochemických akumulátorů elektrické energie nebývalým rozvojem. Zatímco v závěru 20. století byl typickým zástupcem elektrochemických zdrojů olověný akumulátor vykazující měrnou hmotnostní energetickou kapacitu přibližně 40 W·h/kg, v současnosti jsou již komerčně



Obr. 1. Struktura R_i modelu článku

dostupné špičkové lithium-polymerové akumulátory s měrnou energetickou hmotnostní kapacitou v okolí hodnoty 200 W·h/kg, což je hodnota přibližně pětikrát větší oproti olověným akumulátorům. Výrazného zlepšení dosáhly i další parametry moderních lithiových akumulátorů, jak bude uvedeno dále. Připočte-li se u vozidel s akumulátorovým napájením možnost rekuperace a v souladu se Státní energetickou koncepcí ČR i Bílou knihou o dopravě EU možnost prostřednictvím akumulátorového napájení vozidel podpořit trendy preferující snižování závislosti evropských ekonomik na ropných produktech, ukazuje se, že v mnoha oblastech již nyní existují velmi nedoceněné možnosti využití elektrické energie pro pohon dopravních prostředků. Jde zejména o dopravní systémy, kde kapacita sou-

časných elektrických akumulátorů plně postačuje provozním nárokům a kde je možné díky známým trasám jízdy vozidla optimalizovat energetické řešení. Konkrétně jde např. o prostředky pro městskou a regionální hromadnou



Obr. 2. Vlastnosti respektované R_i modelem článku

dopravu, vozidla pro pravidelnou zásobovací službu nebo vozidla komunálních služeb. Velmi efektivní je nasazení akumulátorového napájení v kombinaci s napájením z existující trakční napájecí sítě, což je případ trolejbusů nebo kolejových vozidel, kde pomocné akumulátorové napájení umožňuje jízdu bez troleje, při jízdě pod trolejí je naopak bez časových ztrát odebírán i výkon pro dobíjení akumulátorů [4], [5]. Paradoxně nejméně vhodným vozidlem pro elektromobilitu je v současnosti stále osobní elektromobil, u něhož zpravidla nelze predikovat trasy jízdy, je vyžadován velký akční rádius, je stále nedostatečná síť dobíjecích stanic, navíc není-li elektromobil provozován pravidelně po významnou část dne, prodlužuje se návratnost zvýšené investice na jeho pořízení.

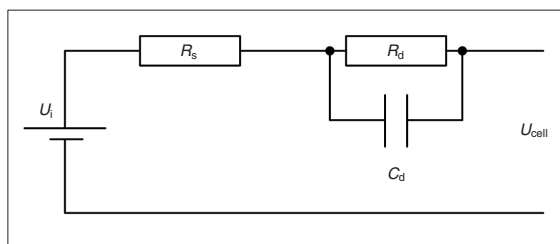
Předkládaný článek je orientován na technické otázky spojené s uplatněním moderních lithiových elektrochemických akumulátorů, které jsou v současné době v oblasti elektro-

mobility nejvíce využívány. Zde prezentované technické vlastnosti určují specifikaci komponent energetické technologie vozidla a tím i determinují oblast a režim použití vozidla.

2. Parametry a veličiny určující vlastnosti akumulátorů

Nejdůležitějším parametrem každého akumulátoru je jeho kapacita udaná v ampérhodinách (A·h) nebo kapacita ve wattodinách (W·h). Kromě těchto dvou veličin je však třeba pro jednoznačné určení akumulátoru nebo typu článku specifikovat několik dalších parametrů. Akumulátorová baterie je obecně tvořena sérioparalelním řazením elementárních článků. Parametry dílčích článků a struktura jejich zapojení určují parametry celé akumulátorové baterie. V následujícím výčtu jsou uvedeny nejdůležitější z těchto parametrů.

Napětí článku, popř. akumulátorové baterie (V) – Pracovní napětí většiny lithiových článků se pohybuje v rozmezí 2,8 až 4,2 V, přičemž okamžitá hodnota napětí závisí na stavu nabití (vybití) článku a odebíraném proudu. Závislost napětí článku na hloubce vybití (DOD, *Depth Of Discharge*) se nazývá vybíjecí charakteristika. Příklady vybíjecích charakteristik jsou uvedeny v poslední části tohoto článku. Ve střední, nejširší oblasti vybíjecí charakteristiky je napětí člán-



Obr. 3. Theveninův model lithiového článku

ku přibližně stálé, jeho hodnota se prudce zvyšuje v oblasti téměř plného nabití a prudce snižuje v oblasti hlubokého vybití. Téměř stálá hodnota napětí článku ve střední části vybíjecí charakteristiky se uvádí jako hodnota jmenovitá a u většiny lithiových článků se pohybuje v okolí 3,2 až 3,7 V. Napětí akumulátorové baterie je dáno počtem sériově řazených článků.

Kapacita článku (A·h) – Kapacita článku C v A·h udává součin proudu odebraného z článku a času v hodinách, po který je článek schopen tento proud dodávat ze stavu plného nabití za stanovených podmínek. U lithiových

Tab. 1. Srovnávací tabulka parametrů lithiových článků různých technologií

technologie	LFP	LFP	LFP	Li-pol	Li-pol	NCA	LTO
jmenovité napětí (V)	3,2	3,2	3,2	3,7	3,7	3,6	2,3
jmenovitá kapacita (A·h)	40	100	1000	25	40	41	20
vnitřní odpor (mΩ)	0,7	0,45	0,3	1,2	0,8	0,7	0,53
počet cyklů (-)	6 000	6 000	6 000	5 000	5 000	1 400	6 000
objem (dm ³)	1	2,4	26	0,3	0,5	1	0,3
hmotnost (kg)	1,6	3,6	41	0,6	1	1,07	0,51
trvalý proud (A)	120	300	3000	125	320	150	160
krátkodobý proud (A)	400	1 000	10 000	200	600	300	160
jmenovitá energie (W·h)	128	320	3 200	92	148	147	46
hmotnostní hustota energie (W·h/kg)	80	89	78	153	148	138	90
objemová hustota energie (W·h/dm ³)	128	133	123	306	296	147	153
maximální krátkodobý vyb. výkon (W)	1 280	3 200	32 000	740	2 220	1080	368
měrný krátkodobý výkon (W/kg)	800	889	780	1 233	2 220	1009	722
trvalý vybíjecí výkon (W)	384	960	9 600	462	1 184	540	368
měrný trvalý vybíjecí výkon (W/kg)	240	267	234	771	1 184	504	722

akumulátorů platí hodnota jmenovité kapacity za daných podmínek, zejména za daného vybíjecího proudu a teploty. Podle normy ČSN EN 62660-1 je stanoven referenční vybíjecí proud o hodnotě odpovídající jedné třetině číselné hodnoty kapacity v A·h, za konstantní teploty článku 25 °C, není-li výrobcem konkrétního článku udáno jinak.

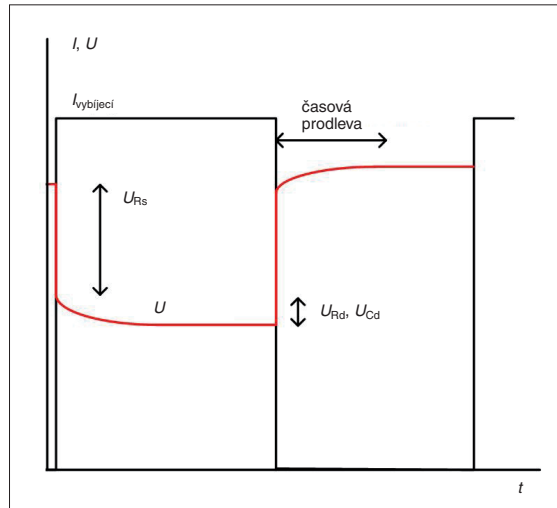
Energetická kapacita článku, popř. akumulátorové baterie (W·h) – Energetická kapacita ve W·h udává velikost energie, kterou je možné z plně nabitého článku odebrat na svorkách při stanovených podmínkách, zejména při daném vybíjecím proudu, tedy výkonu a teplotě. Energetická kapacita akumulátorové baterie je dána součtem energetických kapacit článků v akumulátorové baterii. Energetickou kapacitu W lze určit výpočtem z kapacity C v A·h a jmenovitého napětí článku U podle vztahu:

$$W = CU \quad (1)$$

Vnitřní odpor článku (Ω) – Vnitřní odpor článku udávaný v katalogových listech výrobců zpravidla předpokládá obvodovou strukturu článku tvořenou sériovou kombinací ideálního zdroje napětí a předmětného vnitřního odporu R_i . Na velikosti vnitřního odporu se podílí odpor pólových svorek článku, spoje mezi pólovými svorkami a elektrodami a odpor samotných elektrod. Vnitřní odpor způsobuje pokles svorkového napětí článku se zvětšujícím se odebíraným proudem, zároveň se na něm při nabíjení i vybíjení článku vyvíjí ztrátové teplo a jeho velikost ovlivňuje účinnost nabíjení a vybíjení článku. Vnitřní odpor článku není konstantní, jeho velikost závisí na teplotě a na stavu nabití článku. Vnitřní odpory lithiových článků nabývají hodnot řádově jednotek nebo desetin mΩ. Obecně s větší hodnotou jmenovité kapacity se zmenšuje velikost vnitřního odporu. Parametry složitějších obvodových mo-

delů článku výrobci běžně neuvádějí a je nutné je určit měřením (viz dále).

Trvalý vybíjecí proud (A) – Jde o proud, který je článek schopen dodávat trvale až do vybití. Proud článku se zpravidla udává v násobcích číselné hodnoty kapacity článku v A·h, např. u článku s kapacitou 10 A·h je proud 20 A označován jako proud 2C.



Obr. 4. Odezvy napětí při změně proudu článků

Krátkodobý vybíjecí proud (A) – Jde o proud, který je článek schopen dodávat krátkodobě bez poškození. Dobu, po kterou je článek schopen poskytovat krátkodobý proud, udává výrobce. Obecně platí, že se zvětšujícím se proudem kvadraticky roste i ztráty na vnitřním odporu akumulátoru a s tím se zmenšuje velikost energie, kterou je článek schopen dodat na svorkách.

Nabíjecí proud (A) – Jde o proud, u kterého výrobce rovněž zpravidla udává trvalou a krátkodobou hodnotu v násobcích C . Nabíjecí proudy bývají menší než vybíjecí.

Pracovní teplota článku (°C) – U většiny typů lithiových článků je určen rozsah pracovních teplot od 0 do 50 °C, optimální pracovní teplota bývá 20 °C. Provoz lithiových článků v oblasti záporných teplot je dosti specifický. Většinu článků lze při teplotě pod bodem mrazu provozovat v režimu vybíjení. Naproti tomu nabíjení se výhradně nedoporučuje, neboť při nabíjení pod bodem mrazu nevratně klesá kapacita. K poklesu kapacity dochází i při uskladnění vybitého článku v prostředí pod bodem mrazu. U vozidel je proto třeba počítat s nutností prostor akumulátorů temperovat a klimatizovat.

Stav nabití (SOC, State Of Charge) (%) – Při vybíjení článku tato veličina udává, kolik procent energie ještě v článku zbývá, přičemž SOC = 100 % odpovídá plně nabitému článku.

Hloubka vybití (DOD, Depth Of Discharge) (%) – Při vybíjení článku tato veličina udává, kolik procent energie již bylo z článku odčerpáno, přičemž DOD = 100 % odpovídá plně vybitému článku.

Životnost článku (počet cyklů) – Životnost článku se udává v počtu nabíjecích cyklů při stanovených podmínkách, zejména při daném nabíjecím a vybíjecím proudu. Neuvádí-li výrobce jinak, předpokládá se v každém cyklu vybíjení a nabíjení veškeré kapacity akumulátoru. S rostoucím počtem cyklů degradují akumulací schopnosti článku. Po

absolvování počtu cyklů udaného výrobcem není článek nepoužitelný, ale norma uvádí, že po tomto počtu cyklů za stanovených podmínek klesne kapacita na 80 % hodnoty, kterou měl nový článek. Článek lze tedy i nadále využívat, je ale třeba počítat s jeho klesající kapacitou. Strmost poklesu kapacity po uplynutí smluvní životnosti článku již není výrobcem garantována. Životnost článku je silně závislá na hloubce vybíjení článku v jednom cyklu, tedy na hodnotě DOD. S čím nižší DOD článek ve vybíjecích cyklech pracuje, tím delší je jeho životnost, a to až několikanásobně. Výrobci u daného článku uvádějí závislost životnosti na DOD v jednom cyklu. Životnost

článku silně závisí rovněž na velikostech nabíjecích a vybíjecích proudů. S rostoucí hodnotou nabíjecích a vybíjecích proudů článku se jeho životnost razantně zkracuje. Z uvedeného je zřejmé, že je třeba věnovat velkou pozornost dimenzování článků pro danou aplikaci. S rostoucí jmenovitou hodnotou kapacity článků na jednu stranu roste jejich objem, hmotnost a cena, na druhou stranu jsou články relativně méně zatěžovány, což přispívá k vyšším hodnotám účinnosti při jejich nabíjení a vybíjení a k nezanedbatelnému prodloužení životnosti. U lithiových článků se

jejich životnost pohybuje v řádech tisíců cyklů, popř. i přesahuje 10 000 cyklů v závislosti na dosahovaném SOC a prouděch. Tyto hodnoty životnosti lithiových článků jsou až desítkrát větší oproti olověným článkům. U vozidel pro regionální nebo městskou dopravu je třeba počítat s výměnou článků akumulátorové baterie řádově po jednotkách let provozu, např. u některých městských elektrobusech výrobci deklarují životnost akumulátorových baterií rovnou životnosti vozidla. U lithiových článků je rovněž zapotřebí zohlednit skutečnost, že jejich kapacita klesá vlivem stárnutí i s časem, a to i tehdy, není-li článek vůbec využíván.

Trvalý vybíjecí výkon (W) – Jde o hodnotu výkonu P , který je možné trvale odebrat na svorkách článku. Tato hodnota vychází z hodnoty trvalého vybíjecího proudu I a ze jmenovitého napětí článku U a lze ji určit podle vztahu:

$$P = IU \quad (2)$$

Hodnoty trvalých vybíjecích výkonů lithiových článků dosahují až téměř desetinásobků oproti olověným článkům.

Krátkodobý vybíjecí výkon (W) – Jde o hodnotu výkonu P_{MAX} , který je možné krátkodobě odebrat na svorkách článku. Doba, po kterou lze tento výkon odebrat, je určena výrobcem. Hodnota P_{MAX} vychází z hodnoty krátkodobého vybíjecího proudu I_{MAX} a ze jmenovitého napětí článku U a lze ji určit podle vztahu:

$$P_{MAX} = I_{MAX}U \quad (3)$$

Měrná energetická hmotnostní kapacita – hmotnostní hustota energie (W·h/kg) – Jde o velikost energetické kapacity článku W , která je vztažena na hmotnost článku m . Pro tuto měrnou kapacitu W_m platí vztah:

$$W_m = \frac{W}{m} \quad (4)$$

Lithiové články běžně dosahují hodnot měrné energetické hmotnostní kapacity do 120 W·h/kg, což jsou hodnoty až čtyřnásobné oproti hodnotám u olověných akumulátorů. Špičkové lithiové články dosahují hodnot i přes 200 W·h/kg.

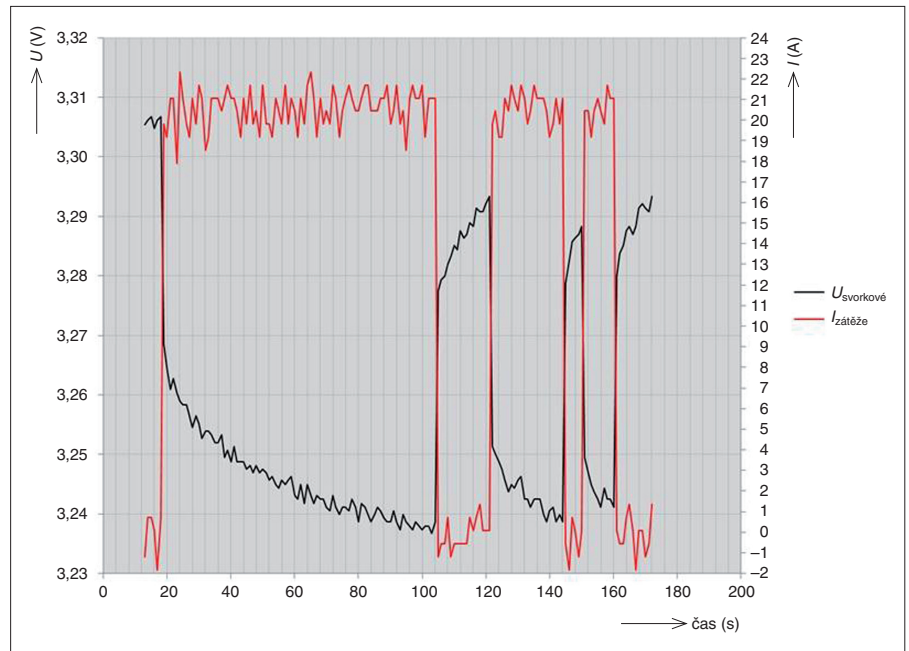
Měrná energetická objemová kapacita – objemová hustota energie (W·h/dm³) – Jde o velikost energetické kapacity článku W , která je vztažena na objem článku V v dm³. Pro tuto měrnou kapacitu W_v platí vztah:

$$W_v = \frac{W}{V} \quad (5)$$

Lithiové články dosahují hodnot v rozmezí 100 až 300 W·h/dm³.

Měrný trvalý vybíjecí výkon (W/kg) – Jde o hodnotu trvalého vybíjecího výkonu článku P vztaženou na hmotnost m článku. Pro měrný trvalý vybíjecí výkon P_m platí vztah:

$$P_m = \frac{P}{m} \quad (6)$$



Obr. 5. Naměřené dynamické odezvy při změnách proudu odebraného z článku

Měrný krátkodobý vybíjecí výkon (W/kg) – Jde o hodnotu krátkodobého vybíjecího výkonu článku P_{MAX} vztaženou na hmotnost m článku. Pro měrný krátkodobý vybíjecí výkon P_{mMAX} platí vztah:

$$P_{mMAX} = \frac{P_{MAX}}{m} \quad (7)$$

Cena článku (Kč) – Ceny lithiových článků jsou oproti ceně olověných akumulátorů vyšší a jsou citelnou položkou při výrobě akumulátorově napájeného vozidla. Cena lithiových článků je rovněž velmi závislá na konkrétní lithiové technologii a závisí na kapacitě článku. Velmi orientačně lze konstatovat, že cena běžných lithiových článků s kapacitami v řádu desítek A·h se pohybuje v řádech jednotek tisíc korun za kus. Vzhledem ke skutečnosti, že provoz akumulátorově napájených vozidel je oproti vozidlům se spalovacím motorem výrazně levnější, a to jak po stránce nákladů na energii, tak po stránce nákladů na údržbu, jejich efekt se projeví tím více, čím více je vozidlo provozováno – optimálně tedy MHD, regionální hromadná doprava a pravidelná zásobovací doprava.

3. Technologie lithiových článků vhodné pro elektromobilitu

Největší tlak na technický rozvoj v oblasti akumulátorů elektrické energie má rychlý vývoj informační a komunikační techniky – notebooky, tablety a mobilní telefony. Pro elektromobilitu jsou však nejvhodnější technologie lithiových akumulátorů, které nejsou s Li akumulátory pro informační a komunikační techniku zcela totožné. V následujících odstavcích budou stručně představeny technologie Li akumulátorů, které jsou v akumulátorovém napájení vozidel nejrozšířenější.

Technologie LFP

Jde o standardní technologii lithiových akumulátorů pro trakční účely. Články LFP jsou založeny na využití sloučeniny LiFePO₄ (lithium železo fosfát) pro kladnou elektrodu. Převládající výhodou této technologie pro využití ve vozidlech je jejich bezpečnost. Články lze zatěžovat většími proudy bez rizika jejich možné exploze. To je dáno silnou chemickou vazbou železa, fosforu a kyslíku.

Hlavní výhody technologie LFP:

- bezpečný provoz,
- velký sortiment,
- dlouhá životnost,
- příznivá cena.

Hlavní nevýhody technologie LFP:

- menší měrná energetická a objemová kapacita.

Technologie NCA

Konstrukce kladné elektrody článků NCA je založena na využití sloučeniny LiNiCoAlO₂ (lithium nikl kobalt hliník oxid). Tato technologie nachází uplatnění jak v člancích určených pro spotřební elektroniku, tak v člancích určených pro elektromobilitu.

Hlavní výhody technologie NCA:

- dobrá měrná energetická hmotnostní a objemová kapacita,
 - velký měrný nabíjecí a vybíjecí výkon.
- Hlavní nevýhody technologie NCA:
- menší bezpečnost,
 - vyšší cena.

Technologie LTO

Články technologie LTO se neřadí k článkům označovaným Li-ion, neboť je u nich modifikováno složení záporné elektrody. Mís-

to uhlíku je použita sloučenina $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (lithium titan oxid). Vzhledem k modifikaci záporné elektrody je pracovní napětí článku LTO pouze 2,3 až 2,4 V. Články LTO vynikají vysokými hodnotami trvalých nabíjecích a vybíjecích proudů a výkonů. Proto je lze výhodně použít ve vozidlech s častým rychlonabíjením. Uvedené články lze provozovat i při záporných teplotách – řádově při jednotkách stupňů Celsia pod nulou.

Hlavní výhody technologie LTO:

- velký měrný nabíjecí a vybíjecí výkon,
- možnost provozu při nízkých teplotách,
- dlouhá životnost.

Hlavní nevýhody technologie LTO:

- nižší hodnota jmenovitého napětí článku,
- menší měrná energetická hmotnostní a objemová kapacita,
- vyšší cena.

Technologie Li-pol

Články Li-pol (někdy označované také jako SLPB (*Superior Lithium Polymer Battery*)) jsou Li články špičkových parametrů. Na rozdíl od ostatních článků Li-ion mají články Li-pol tuhý elektrolyt tvořený lithnými soli. Existence tuhého elektrolytu výrazně zjednodušuje konstrukci pouzdra článku a zároveň umožňuje jeho výrobu v neobvyklých tvarech (ploché desky, konkrétní tvary podle požadavků zákazníka apod.).

Hlavní výhody technologie Li-pol:

- velký měrný vybíjecí výkon,
- velká měrná energetická hmotnostní a objemová kapacita,
- dlouhá životnost.

Hlavní nevýhody technologie Li-pol:

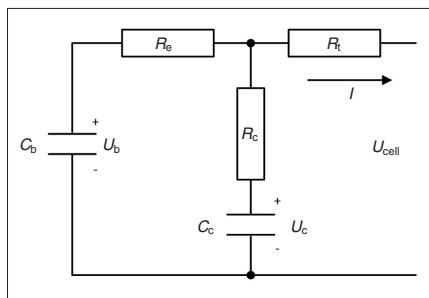
- vyšší cena.

Kvantitativní představu o katalogových parametrech konkrétních článků různých technologií a různé kapacity udává tab. 1, podle [6], [7], [8], [9]. Z tabulky je zřejmé, že zásadní vliv na měrné parametry článků má technologie článku, ale vliv velikosti kapacity článku na měrné parametry není velký. V tabulce jsou modře podbarvené katalogové parametry článků, které autoři článku proměřovali. Některé výsledky těchto měření jsou uvedeny v závěru článku.

4. Obvodové modely lithiových článků

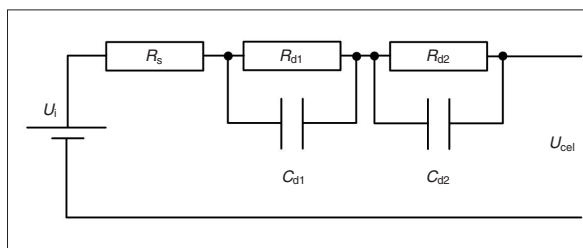
Každý elektrochemický akumulátor elektrické energie je složitou dynamickou soustavou a jakýkoliv jeho model vždy představuje zjednodušení fyzikální reality. Principiálně lze modely článků akumulátorové baterie rozdělit do tří skupin: modely vycházející z matematického popisu elektrochemických jevů v článku, modely vycházející z moderních metod popisu dynamických soustav, které jsou laděny soubory učicích dat (typicky modely založené na využití neuronových sítí) a modely založené na využití náhradních schémat, tedy elektrických obvodů. Výběr konkrétní skupiny modelů je svázán zejména

s účelem, pro který má být daný model využíván. V případě potřeby popisu akumulátorových článků ve vazbě na výpočty pohonných řetězců vozidel, jejich simulace nebo při specifikaci energetické a akumulátorové výzbroje pro konkrétní vozidlo jsou pro elektrotechnika nejnázornější obvodové modely akumulátorových článků. V literatuře lze nalézt velké množství obvodových struktur modelů článků,



Obr. 6. Struktura RC modelu článku

které se třídí podle různých kritérií, např. literatura [1], [2], [3]. Obvodové modely je možné členit na statické a dynamické, lineární a nelineární, v případě nelineárních modelů lze dále rozlišovat více způsobů, jak je nelinearita v modelu implementována. Obecně platí, že čím složitější model je použit se snahou o co nejvěrnější postihnoutí reálných vlastností článku, tím náročnější je jeho parametrizace. Při volbě modelu je tedy vždy třeba si na začátku stanovit požadavky na přesnost modelu pro daný účel a poté stanovit konkrétní strukturu modelu. Zároveň je nutné mít na zřeteli, že parametrizace modelu může být časově velmi náročný proces vzhledem k závislosti velikosti jednotlivých parametrů nejen na stupni nabití SOC, ale i na stáří a opotřebení akumulátoru. Další komplikací parametrizace modelů je skutečnost, že hod-



Obr. 7. Theveninův DP model článku

noty parametrů se mohou výrazně odlišovat nejen v závislosti na technologii a typu článku, ale i v závislosti na konkrétním kusu článku jednoho typu. To jsou důvody ke hledání cest k využívání spíše jednodušších modelů s menším počtem parametrů.

V tomto článku bude stručně představeno několik jednodušších obvodových modelů vhodných i pro lithiové články. Představované modely jsou dostačující pro začlenění do simulačních modelů větších pohonných celků vozidel nebo pro účely specifikace akumulátorového systému vozidla.

R_i model článku je statický model, jehož struktura je totožná se strukturou zdroje stejnosměrného napětí s vnitřním odporem R_i – obr. 1. Tento model článku je tvořen sériovou kombinací ideálního zdroje napětí U_i a vnitřního odporu R_i . Svorkové napětí U je zmenšeno o úbytek napětí na vnitřním odporu R_i . Z takovéto struktury modelu zpravidla vycházejí i katalogové údaje výrobců článků, kde je udávána konstantní hodnota vnitřního odporu článku R_i . Tento model respektuje skutečnost, že svorkové napětí článku U klesá se zvětšujícím se proudem I odebíraným z článku – obr. 2.

U reálných lithiových článků nejsou hodnoty U_i a R_i konstantní, ale závisí na hloubce vybití DOD, hodnotě R_i i na teplotě. V literatuře lze nalézt různé možnosti adaptace hodnot U_i a R_i např. podle DOD [3]:

$$U_i = U_{i0} - A \cdot \text{DOD} \quad (8)$$

$$R_i = R_{i0} - B \cdot \text{DOD} \quad (9)$$

Ve vztazích (8) a (9) mají symboly tento význam:

U_{i0} – napětí článku naprázdno při plném stavu nabití,

R_{i0} – vnitřní odpor článku R_i ve stavu plného nabití,

A, B – parametry, které je na každém článku třeba určit experimentálně.

Z aktuálních hodnot napětí U_i a R_i a z hodnoty proudu I , který je článkem odebírán, lze určit aktuální svorkové napětí článku U podle vztahu:

$$U = U_i - R_i I \quad (10)$$

R_i model článku je třeba vnímat jako model statický, který nezohledňuje dynamické jevy spojené zejména se změnami okamžité hodnoty odebíraného proudu I .

Theveninův model článku (obr. 3), jak je označován podle [2], je model zohledňující dynamické jevy na článku spojené s průběhy okamžité hodnoty svorkového napětí v návaznosti na změny odebíraného proudu. Dynamické vlastnosti zohledňují i další modely článků, které zde budou prezentovány.

Typickou vlastností lithiových článků je zpožděná odezva svorkového napětí po změně proudu, ať již jde o zvýšení, či snížení proudu.

Toto zpoždění je dáno polarizací článku. Odezvy svorkového napětí článku po změně proudu jsou principiálně znázorněny na obr. 4.

Na obr. 5 je popsán jev zřejmý z průběhů naměřených na reálném článku. Na tomto obrázku je patrné, že doba trvání dynamických jevů v článku po změně odebíraného proudu není zanedbatelná a činí až desítky sekund.

Theveninův model článku podle obr. 3 respektuje jevy znázorněné na obr. 4. a obr. 5 řazením paralelní kombinace odporu R_d a kapacity C_d do série s odporem R_s . Vnitřní napětí článku U_i jsou u R_i modelu a Theveni-

nova modelu totožná. Vztahy mezi R_i modelem a Theveninovým modelem jsou zřejmé: v ustáleném stavu přechází Theveninův model do podoby R_i modelu a mezi odpory obou modelů platí vztah:

$$R_i = R_s + R_d \quad (11)$$

V dynamických stavech způsobuje pozvolnou změnu napětí na svorkách článku náhradní kapacita C_d . Značení úbytků napětí na obr. 4 koresponduje se značením obvodových prvků na obr. 3. V Theveninově modelu jsou mnohdy uvažovány konstantní hodnoty parametrů obvodu, popř. se hodnota U_i adaptuje podle DOD. Reálně se ale hodnoty R a C také mění s DOD i s teplotou. Některé modifikované Theveninovy modely respektují rozdílnou hodnotu odporu R_s při nabíjení a vybíjení.

Struktura RC modelu článku je znázorněna na obr. 6.

Tato struktura modelu byla navržena ve vazbě na články technologie NCA. Náhradní kondenzátor C_C respektuje malou kapacitu vnějších vrstev elektrod, kondenzátor C_b modeluje vlastní elektrochemickou kapacitu článku, odpor R_t modeluje odpor pólových svorek a vnitřních spojů v článku, odpor R_e modeluje především vnitřní odpor elektrod a odpor R_C je sériovým odporem kapacity C_C .

Theveninův DP model článku je na obr. 7.

Tento model vychází ze základní struktury Theveninova modelu a zdvojuje v sérii paralelní kombinaci R a C , čímž je přesněji modelován dvojitý charakter polarizace v článku – polarizace vnější – koncentrační a polarizace elektrochemická [2]. V literatuře [3] je prezentován postup parametrizace tohoto modelu na základě elektrochemické spektrální analýzy článku, kdy jsou experimentálně určeny impedance prvků obvodu pro určené frekvence.

Literatura [2] uvádí zajímavé srovnání výpočetní přesnosti průběhu svorkového napětí akumulátorové baterie Li-pol při zatěžovacím cyklu při použití modelů R_i , RC, Theveninova a Theveninova DP. Ukazuje se, že v případě této baterie je dosahováno nejmenší výpočetní chyby při použití Theveninova DP modelu – pod 0,5 %, při použití Theveninova modelu je dosaženo chyby přibližně 0,5 % a při použití R_i a RC modelu přesahuje chyba výpočtu svorkového napětí 2 %. Je tedy zřejmé, že použití složitějšího modelu s větším počtem parametrů nemusí nutně vést k přesnějším výsledkům. Z hlediska kompromisu mezi výpočetní přesností modelu a jeho složitostí vychází nejvýhodnější použití Theveninova modelu. Na pracovišti autorů se proto zaměřují především na parametrizaci a širší využití v simulačních modelech vozidel právě Theveninova modelu.

(pokračování)