**Závislost vnitřního odporu (Ri) aku LiPol na jeho napětí a zatěžovacím proudu**

Akumulátory LiPol z důvodů nízké hmotnosti, vysoké kapacity a nízkého vnitřního odporu používáme jako zdroje proudu pro pohon našich elektromodelů. O tom, jaký proud bude možné z aku odebírat, rozhoduje jeho vnitřní odpor a násobek C. Násobek C(min) (Céčko) určuje povolený trvalý proud, při kterém dojde k poklesu napětí o 10% oproti napětí nezatíženého aku (U naprázdno). Dále se uvádí Cmax, což značí možný, krátkodobý odběr proudu. To už všichni známe, ale s měřením vnitřního odporu, při kterém dostaneme "rozumné" výsledky je někdy problém.

Problém je i v tom, jakou metodu máme použít. Můžeme si vybrat ze dvou a těmi jsou měření střídavým a měření

stejnosměrným proudem. Výrobci LiIon aku určených např. pro notebooky, ale i pro elektromobily (typ 18650), použí- vají metodu střídavého proudu o frekvenci obvykle 1 kHz a tu uvádějí v katalogových listech. Při jiné frekvenci dostá- váme ale odlišné výsledky. Pro metodu měření střídavým proudem potřebujeme také specielní zařízení. Podstatně jednodušší a směrodatnější i pro naše modelářské použití je měření Ri stejnosměrným proudem.

**Poznámky k měření Ri**

Jak dále uvidíme, (viz odst. 4/ Zjištění vnitřního odporu a Céčka z hodnot odečtených z datallogeru), tak hodnoty vnitřního odporu aku a Céčka platí jen pro velmi krátký časový úsek zatížení a potom vnitřní odpor stoupá a Céčko klesá. Za hlavní příčinu tohoto jevu můžeme považovat samotné rovnice pro výpočty Ri a Céčka (od konstantní hodnoty *Unapr* odečítáme stále klesající *Uzat*), vliv vnitřní teploty akumulátoru a elektrochemické pochody v aku. Pro metodu měření Ri stejnosměrným proudem platí :

Ri = (Ubat naprázdno - Ubat v zatížení) / proud v zatížení [Ω; V, V, A], nebo také Ri = (Rzat \* (Unapr - Uzat)) / Uzat

[Ω; Ω, V,V,V].

Ke zjištění závislosti vnitřního odporu na velikosti napětí a zatěžovacím proudu byl použit aku LiPol GensAce 2600 mAh, C=25, který je používán od srpna 2013. Kapacitní zkouškou bylo zjištěno, že jeho kapacita je 2574 mAh a aku je schopný dalších testů.

**1/ Závislost Ri na napětí aku naprázdno**

**Z**kouška byla provedena ve dnech 16. až 20.10.2018, teplota okolí t = 22,1 až 23,2 °C. Použité měřicí přístroje: Datalogger UnILog2 (tř. 1%), teploměr laboratorní (±0,2 °C), zatěžovací odpor 0,9863 Ω.

Poznámky: Přesnost dataloggeru je daná ke konvenčně pravé hodnotě. V našem případě se však jedná o chybu

linearity napětí, která je podstatně menší, ale výrobcem neuváděná.

Nabíjení bylo prováděno proudem 300 mA od nejnižší hodnoty, aby se aku příliš nezahřál, a po dosažení potřeb-

ného napětí byl aku v klidu po dobu cca 30 minut.

Z naměřených hodnot byly hodnoty napětí do tabulky lineárně interpolovány tak, aby v grafu byly uvedeny po 0,2 V.

"Vyhlazený" průběh Ri a Céčka v závislosti na napětí aku je zobrazen čerchovanou čarou, (polynomem 3. řádu).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U [V] | Ri [mΩ] | Céčko [-] | U [V] | Ri [mΩ] | Céčko [-] | U [V] | Ri [mΩ] | Céčko [-] |
| 12,5 | 13,3 | 32,1 | 11,3 | 17,1 | 25,0 | 10,3 | 21,7 | 19,7 |
| 12,3 | 13,9 | 30,7 | 11,1 | 18,1 | 23,6 | 10,1 | 23,0 | 18,6 |
| 12,1 | 13,8 | 30,9 | 10,9 | 19,2 | 22,2 | 9,9 | 24,4 | 17,5 |
| 11,9 | 14,0 | 30,5 | 10,7 | 20,2 | 21,2 | 9,7 | 25,1 | 17,0 |
| 11,7 | 14,9 | 28,7 | 10,5 | 20,6 | 20,4 | 9,5 | 26,7 | 16,3 |
| 11,5 | 15,7 | 27,2 |  |  |  |  |  |  |

Protože křivky Ri a Céčka vynesené v grafu z měřených, resp. interpolovaných hodnot nevytvořily plynulý průběh, bylo rozhodnuto o zjištění chyby opakovatelnosti měření.

**2/ Statistické zjištění chyby opakovatelnosti, přibližně na stejné hodnotě napětí**

Hodnota napětí byla zvolena cca 3,8V/čl. (Uaku = 11,4 V), nabíječka ve funkci "storage" a nastavený proud I=0,3 A. Po každém dobití (cca 3 až 4 mAh) byl aku v klidu cca 30 minut.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Uaku [V] | Ri [mΩ] | Céčko [-] | tokolí [°C] | Uaku [V] | Ri [mΩ] | Céčko [-] | tokolí [°C] |
| 11,344 | 17,7 | 24,1 | 22,4 | 11,344 | 17,3 | 24,7 | 22,8 |
| 11,343 | 17,3 | 24,7 | 22,7 | 11,348 | 17,4 | 24,5 | 23,1 |
| 11,345 | 17,3 | 24,6 | 22,6 | 11,355 | 17,6 | 24,3 | 23,1 |
| 11,345 | 17,2 | 24,9 | 22,8 | 11,345 | 17,1 | 25,0 | 23,0 |
| 11,343 | 17,1 | 25,0 | 22,6 | 11,350 | 17,6 | 24,3 | 23,1 |

Zjištěná chyba opakovatelnosti Ri a Céčka: Ri = (17,4 ± 0,6) mΩ

Céčko = (24,6 ± 0,9)

V tomto měření bylo zjištěno, že s 95% jistotou je vnitřní odpor Ri v rozmezí 16,8 až 18,0 mΩ a Céčko 23,7 až 25,5.

**3/ Zjištění vnitřního odporu a Céčka z hodnot odečtených z datallogeru**

Následující tabulka a graf ukazuje pokles napětí po zatížení proudem. Časová prodleva, která postačí k ustálení napětí a proudu je minimálně 0,1 sekundy - může být samozřejmě ovlivněna dobou převodu v A/D převodníku datallogeru, ale to já neovlivním. Musíme si uvědomit, že se jedná o elektrochemický zdroj proudu a "nastartování" elektrochemického procesu trvá nějaký čas.

Na grafu je znázorněno, proč barevně označená data byla vyjmuta z výpočtu Ri a Céčka a označena jako přechodový stav. Důvodem je neustálené napětí aku po zatížení, které způsobuje extrémní hodnoty Ri a Céčka.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Zeit [s] | Zelle1 [V] | Zelle2 [V] | Zelle3 [V] | Ubat [V] | Izat [A] | Ri [mΩ] | Céčko [-] | tokolí [°C] |
| 0,849 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 | 22,5 |
| 0,899 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 |  |
| 0,949 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 |  |
| 0,999 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 |  |
| 1,049 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 |  |
| 1,099 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 |  |
| 1,149 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 |  |
| 1,199 | 3,774 | 3,780 | 3,785 | 11,339 | 0 | 0 | 0 |  |
| 1,249 | 3,772 | 3,779 | 3,784 | 11,335 | 11,492 | 0,0003 | 1226,6 | přechodový  stav |
| 1,299 | 3,722 | 3,734 | 3,735 | 11,191 | 11,346 | 0,0130 | 32,7 |
| 1,349 | 3,704 | 3,717 | 3,718 | 11,169 | 11,294 | 0,0177 | 24,1 |  |
| 1,399 | 3,700 | 3,714 | 3,718 | 11,132 | 11,287 | 0,0183 | 23,3 |  |
| 1,449 | 3,700 | 3,712 | 3,717 | 11,129 | 11,284 | 0,0186 | 22,9 |  |
| 1,499 | 3,700 | 3,712 | 3,714 | 11,126 | 11,281 | 0,0189 | 22,6 |  |
| 1,549 | 3,699 | 3,711 | 3,712 | 11,122 | 11,276 | 0,0192 | 21,2 |  |
| 1,599 | 3,698 | 3,709 | 3,712 | 11,119 | 11,273 | 0,0195 | 21,9 |  |
| 1,649 | 3,697 | 3,709 | 3,712 | 11,118 | 11,272 | 0,0196 | 21,8 |  |

ustálené napětí po zatížení proudem

Ještě neustálené napětí po zatížení proudem – extremní hodnoty Ri a Céčka

začátek zatížení

proudem

Vypočtená hodnota vnitřního odporu a Céčka je velmi závislá na době, kdy dojde k odečtu napětí po připojení zátěže. Např. naměřená hodnota napětí v čase 1,349 s je 11,169 V a tomu odpovídá Ri = 17,7 mΩ a Céčko 24,1. O pouhých 0,05 sekundy je už Ri = 18,3 mΩ a Céčko 23,3. Rozdíl je **3,4 % !**

**4/ Závislost vnitřního odporu aku na zatěžovacím proudu**

Na modelářském trhu je několik typů měřidel vnitřního odporu, ale u žádného, který jsem poznal, jsem nezjistil jak velký je zatěžovací proud aku. Dne 13. května 2019 bylo rozhodnuto, že zjistím, jaký vliv na měřený Ri má velikost zatěžovacího proudu. Určitě bychom to někde v literatuře našli, ale nechtělo se mi hledat. Vlastní zkušenost se také lépe pamatuje.

Postupoval jsem podobně jako u statistického zjištění opakovatelnosti měření v odst. 2, tedy při napětí aku cca 3,8 V/čl. Na jednotlivých hodnotách zatěžovacího proudu byl vypočten Ri aku, Ri jednotlivých článků, Céčka a maximální

zatěžovací proud (pro pokles napětí o 10 %). Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v grafu.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| zatěžovací proud [A] | 0,935 | 2,613 | 5,107 | 6,076 | 9,941 | 11,212 | 12,826 | 14,493 | 17,299 |
| Ri [mΩ] | 19,3 | 19,1 | 18,6 | 18,4 | 19,1 | 18,8 | 18,9 | 18,5 | 18,8 |
| Ri 1.čl. [mΩ] | 7,5 | 6,9 | 6,1 | 6,3 | 6,3 | 6,4 | 6,5 | 6,3 | 6,0 |
| Ri 2.čl. [mΩ] | 5,4 | 6,1 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 5,9 | 6,1 | 6,1 | 6,0 |
| Ri 3.čl. [mΩ] | 6,4 | 6,1 | 6,3 | 5,9 | 6,2 | 6,5 | 6,3 | 6,1 | 6,5 |
| Céčko [-] | 22,1 | 22,3 | 22,9 | 23,2 | 22,3 | 22,7 | 22,6 | 23,1 | 22,7 |
| Imax. [A] | 57,5 | 58,0 | 59,6 | 60,2 | 58,1 | 59,0 | 58,8 | 60,0 | 58,9 |

Z naměřených a vypočtených hodnot vyplývá, že velikost zatěžovacího proudu (při stejné hodnotě napětí aku naprázdno) na zjištění Ri aku nemá žádný vliv.

V grafu jsou měřené a vypočtené hodnoty „vyhlazeny“ (linearizovány).

**Výsledek měření**

Potvrdilo se očekávané – **s** **klesajícím napětím aku stoupá Ri a naopak klesá Céčko**. Z měření opakovatelnosti (odst.3) je zřejmé, že každé měření i za stejných podmínek bude vykazovat odlišné výsledky Ri a Céčka. Je to vlastnost elektrochemického zdroje?

Vnitřní odpor aku (při shodném napětí naprázdno) **není závislý na zatěžovacím proudu**.

Zbývá podotknout, že naměřené hodnoty platí ve dnech měření, na místě a za uvedených podmínek.

V Náchodě 25.10 2018 a doplněno 13.5.2019

Bobr