

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

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 Lilon aku určených např. pro notebooky, ale i pro elektromobily (typ 18650), používají metodu střídavého proudu o frekvenci obvykle 1 kHz a tu uvádějí v katalogových listech. Při jiné frekvenci dostáváme ale odlišné výsledky. Pro metodu měření střídavým proudem potřebujeme také speciální 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 dataloggeru), 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 :

$$Ri = (U_{bat} \text{ naprázdno} - U_{bat} \text{ v zatížení}) / \text{proud v zatížení } [\Omega; V, V, A], \text{ nebo také } Ri = (R_{zat} * (U_{npr} - U_{zat})) / U_{zat} [\Omega; \Omega, V, V, V].$$

Ke zjištění závislosti vnitřního odporu na velikosti napětí a zatěžovacím proudem 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

Zkouška 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 ($\pm 0,2$ °C), zatěžovací odpor 0,9863 Ω .

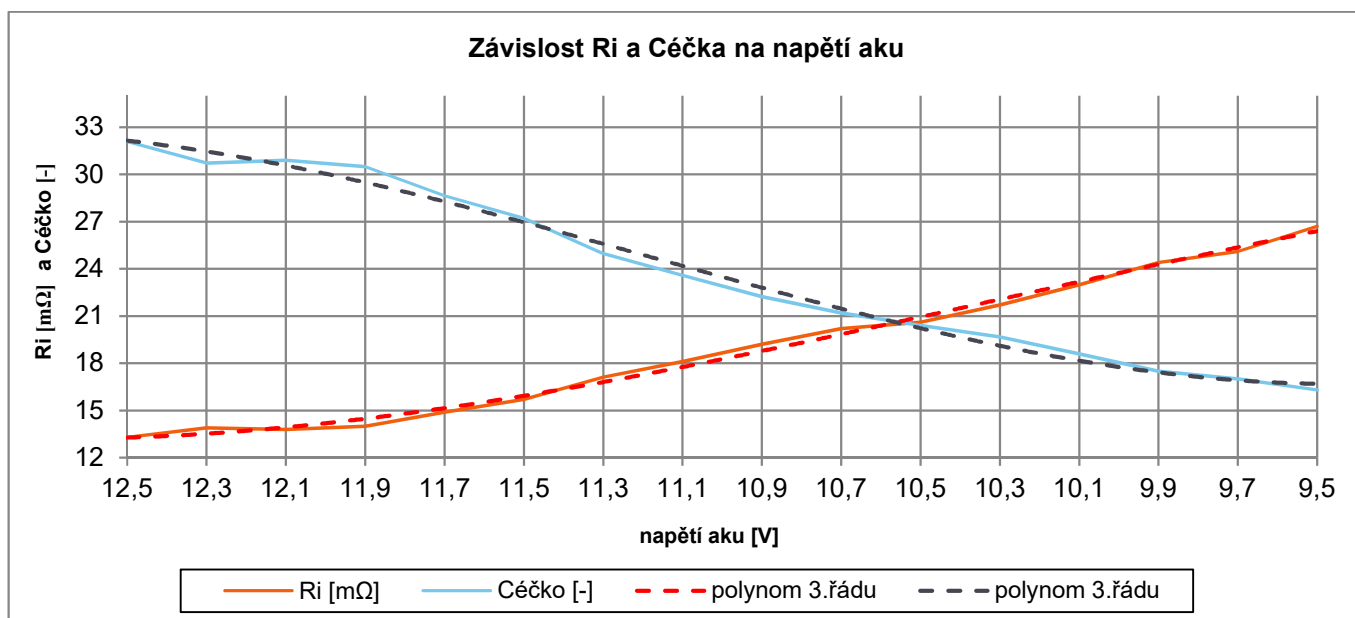
Poznámky: Přesnost dataloggeru je daná ke konvenčně pravé hodnotě. V našem případě se však jedná o chybu linearity napětí, která je podstatně menší, ale výrobcem neuváděná.

Nabíjení bylo prováděno proudem 300 mA od nejnižší hodnoty, aby se aku příliš nezahřál, a po dosažení potřebného 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 [m Ω]	Céčko [-]	U [V]	Ri [m Ω]	Céčko [-]	U [V]	Ri [m Ω]	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						

Závislost Ri a Céčka na napětí aku



Protože křivky Ri a Céčka vynesené v grafu z měření, 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. ($U_{aku} = 11,4 \text{ V}$), nabíječka ve funkci "storage" a nastavený proud $I = 0,3 \text{ A}$. Po každém dobití (cca 3 až 4 mAh) byl aku v klidu cca 30 minut.

$U_{aku} \text{ [V]}$	$R_i \text{ [m}\Omega\text{]}$	Céčka [-]	tokolí [$^{\circ}\text{C}$]	$U_{aku} \text{ [V]}$	$R_i \text{ [m}\Omega\text{]}$	Céčka [-]	tokolí [$^{\circ}\text{C}$]
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: $R_i = (17,4 \pm 0,6) \text{ m}\Omega$
 $Céčka = (24,6 \pm 0,9)$

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

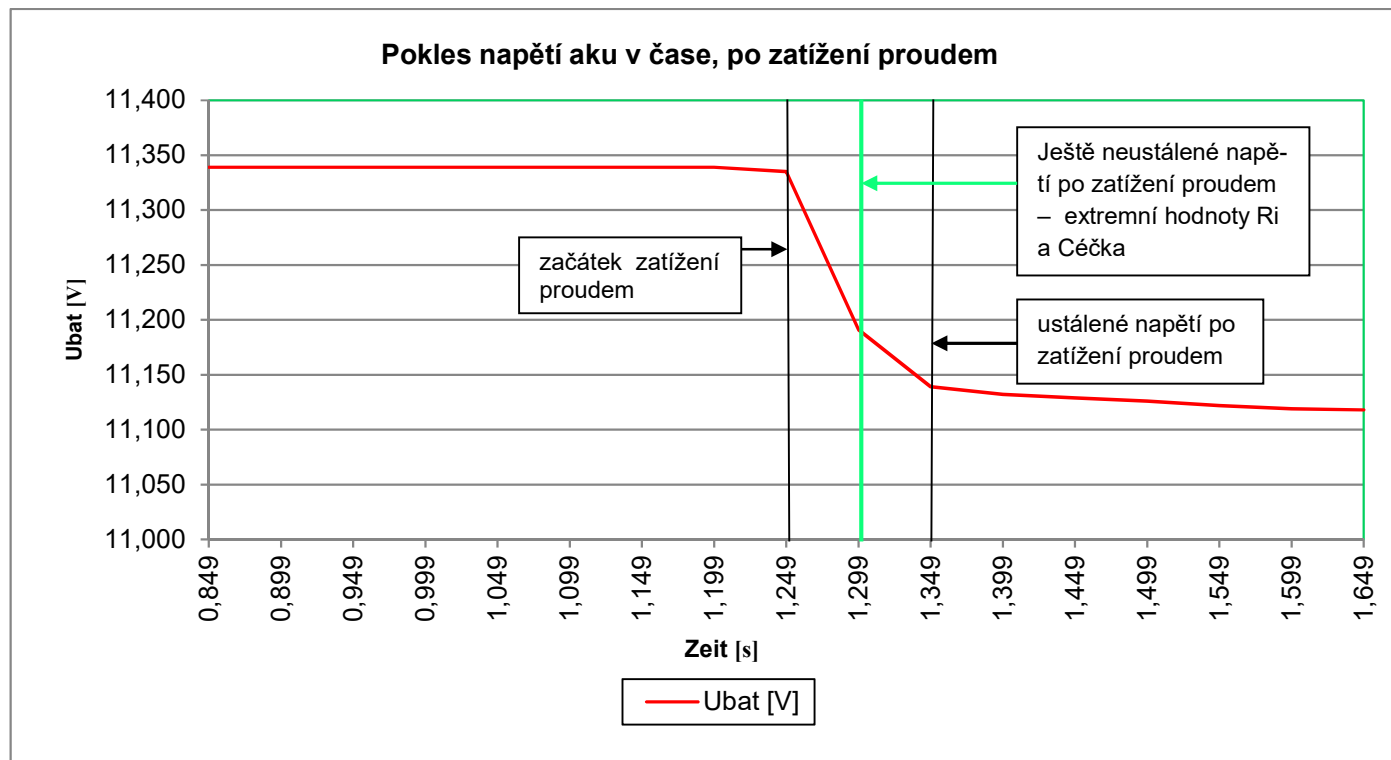
3/ Zjištění vnitřního odporu a Céčka z hodnot odečtených z datalogeru

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 datalogeru, 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]	$R_i \text{ [m}\Omega\text{]}$	Céčka [-]	tokolí [$^{\circ}\text{C}$]
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	stav

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	



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 $R_i = 17,7 \text{ m}\Omega$ a Céčko 24,1. O pouhých 0,05 sekundy je už $R_i = 18,3 \text{ m}\Omega$ a Céčko 23,3. Rozdíl je **3,4 %** !

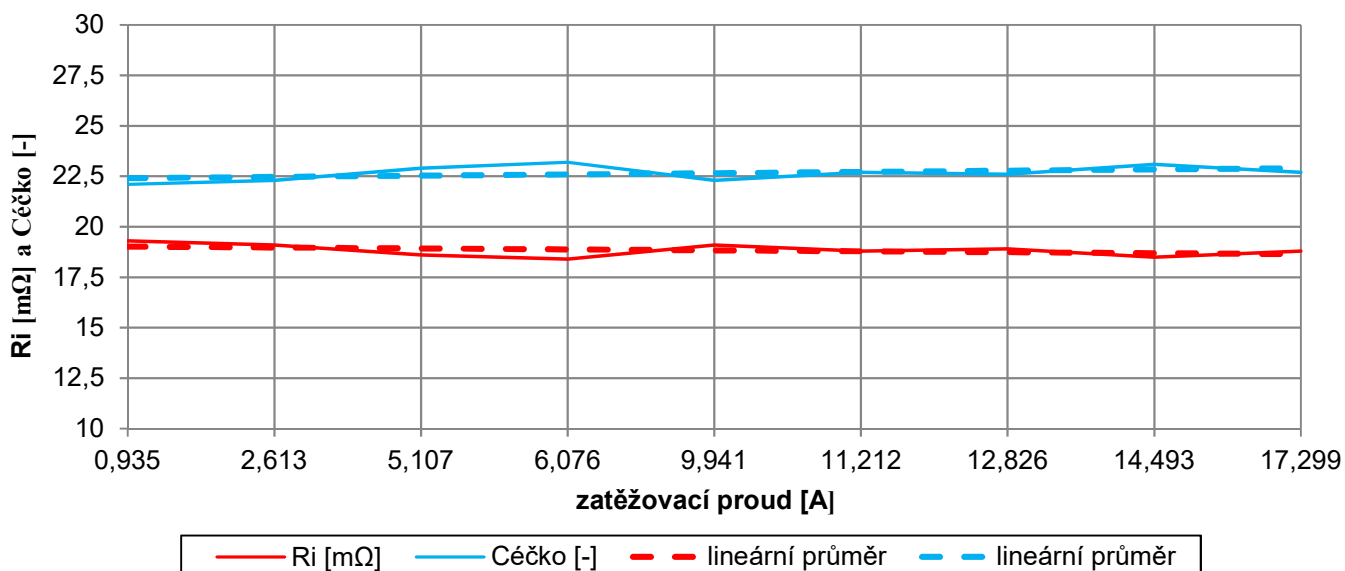
4/ Závislost vnitřního odporu aku na zatěžovacím proudu

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 R_i má velikost zatěžovacího proudu. Určitě bychom to někde v literatuře našli, ale nechťelo 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 R_i aku, R_i 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
R_i [m Ω]	19,3	19,1	18,6	18,4	19,1	18,8	18,9	18,5	18,8
R_i 1.čl. [m Ω]	7,5	6,9	6,1	6,3	6,3	6,4	6,5	6,3	6,0
R_i 2.čl. [m Ω]	5,4	6,1	6,3	6,3	6,3	5,9	6,1	6,1	6,0
R_i 3.čl. [m Ω]	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
I_{max} . [A]	57,5	58,0	59,6	60,2	58,1	59,0	58,8	60,0	58,9

Závislost Ri a Céčka na velikosti zatěžovacího proudu



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