

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Testování akumulátorů a superkapacitorů pro projekt
pikosatelitu PilsenCUBE**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr SVOBODA**
Osobní číslo: **E08B0411P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Testování akumulátorů a superkapacitorů pro projekt pikosatelitu PilsenCUBE**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte dlouhodobá měření nabíjení a vybíjení akumulátorů a superkapacitorů za různých podmínek.
2. Porovnejte výsledky akumulátorů a superkapacitorů ohledně výhodnosti využití v pikosatelitech.
3. Dle možností vylepšete hardware a software pro provádění měření a jejich vyhodnocení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivo Veřtát**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Ivo Veřtát**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na testování vlivu velkého počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů na energetickou kapacitu akumulátorů a superkapacitorů určených pro projekt pikosatelitu PilsenCUBE.

Klíčová slova

PilsenCUBE, CubeSat, akumulátor, superkapacitor, pikosatelit, energetická kapacita, EDLC

Abstract

The submitted thesis is focused on testing of energy capacity of accumulators and supercapacitors during the high number of charge and discharge cycles. These tests are performed for the project of PilsenCUBE picosatellite.

Key words

PilsenCUBE, CubeSat, accumulator, supercapacitor, picosatellite, energy capacity, EDLC

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 7.6.2012

Petr Svoboda

.....

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Grantové agentury České republiky projektu „Energeticky úsporná platforma pro experimentální výzkum na bázi pikosatelitů“, registrovaného pod číslem 102/09/0455.

Také bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ivo Veřtátovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, a zároveň své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů	9
1. Úvod a cíle	10
1.1. Historie a vznik pikosatelitů CubeSat	10
1.2. Technické parametry pikosatelitů	11
1.3. Typické dráhy pikosatelitů.....	12
1.4. Cíle	12
2. Napájecí systém pikosatelitu.....	13
2.1. Napájení pikosatelitu	13
2.2. Akumulátory a superkapacitory	14
2.2.1. Li-Ion akumulátory	15
2.2.2. LiFePO akumulátory.....	15
2.2.3. Superkapacitory	16
2.2.4. Přehled testovaných typů akumulátorů a superkapacitorů	17
3. Testování.....	18
3.1. Testovací systém a jeho součásti.....	18
3.1.1. PC a měřící karta.....	18
3.1.2. Napájecí zdroj	19
3.1.3. Zátěž pro vybíjení	20
3.1.4. Měřící deska.....	21
4. Testovací procedura.....	21
4.1. Nabíjecí napětí a proudy	21
4.2. Nastavení časů.....	22
4.3. Ostatní parametry testování	25
5. Sledované veličiny a výsledky	25
5.1. Matematický popis	25
5.2. Zhodnocení výsledků - akumulátory.....	26
5.3. Zhodnocení výsledků – superkapacitory	31
Závěr	34
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	35
Seznam obrázků	36
Přílohy.....	I

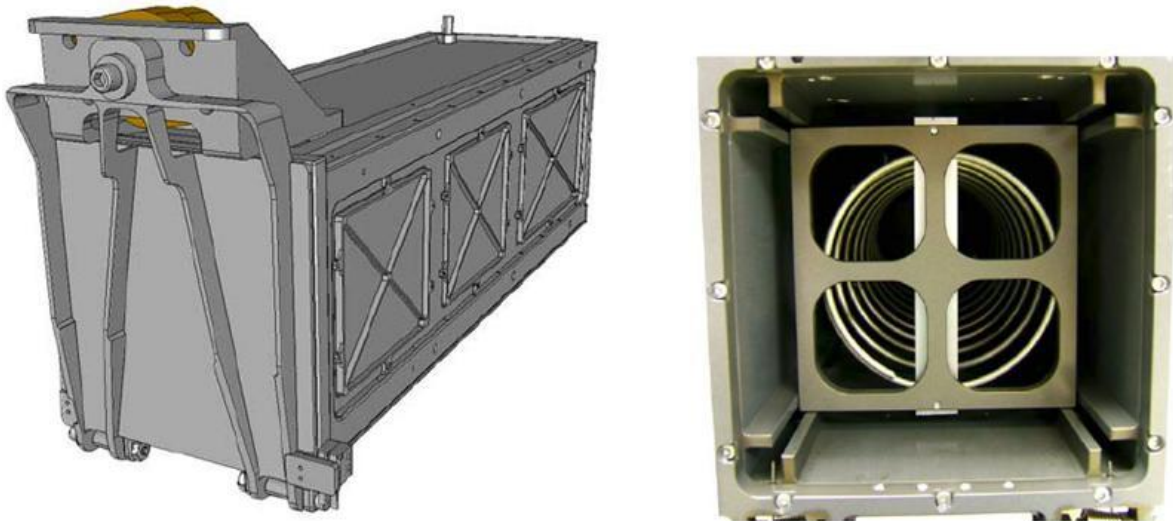
Seznam použitých zkratk a symbolů

η [%]	..... účinnost
W [J]	..... elektrická energie
Q [C]	..... elektrický náboj
U_{MAX} [V]	..... maximální napětí akumulátoru nebo superkapacitoru
U_{MIN} [V]	..... minimální napětí akumulátoru nebo superkapacitoru
I [A]	..... samovybíjecí proud
R_I [Ω]	..... vnitřní odpor akumulátoru nebo superkapacitoru
C [F]	..... kapacita superkapacitoru
t [s]	..... čas
MATLAB	..... Matrix laboratory
Li-Ion	..... Litium-iontový typ akumulátoru
LiFePO	..... Lithium-železo-fosfátový typ akumulátoru
EDLC	..... Kapacitor založený na elektrochemické dvojvrstvě

1. Úvod a cíle

1.1. Historie a vznik pikosatelitů CubeSat

Tento projekt vznikl v roce 1999 ve Spojených státech amerických za spolupráce dvou univerzit (California Polytechnic State University a Stanford University). Jeho cílem je zpřístupnit technologie satelitů na nízkých oběžných drahách zájmovým a vzdělávacím spolkům (například právě univerzitám). Tak vznikla standardizovaná třída CubeSat, která se vyznačuje přesně definovanými parametry pikosatelitů určených pro vložení do unifikovaných pouzder (tzv. P-PODů). Pikosatelity se pak následně spolu s velkým (hlavním) satelitem vypouští na oběžnou dráhu v raketovém nosiči. Takto je dosaženo nízkých nákladů na vypuštění pikosatelitu (cca 60-90 tisíc Euro) a také zkrácení doby jejich vývoje.

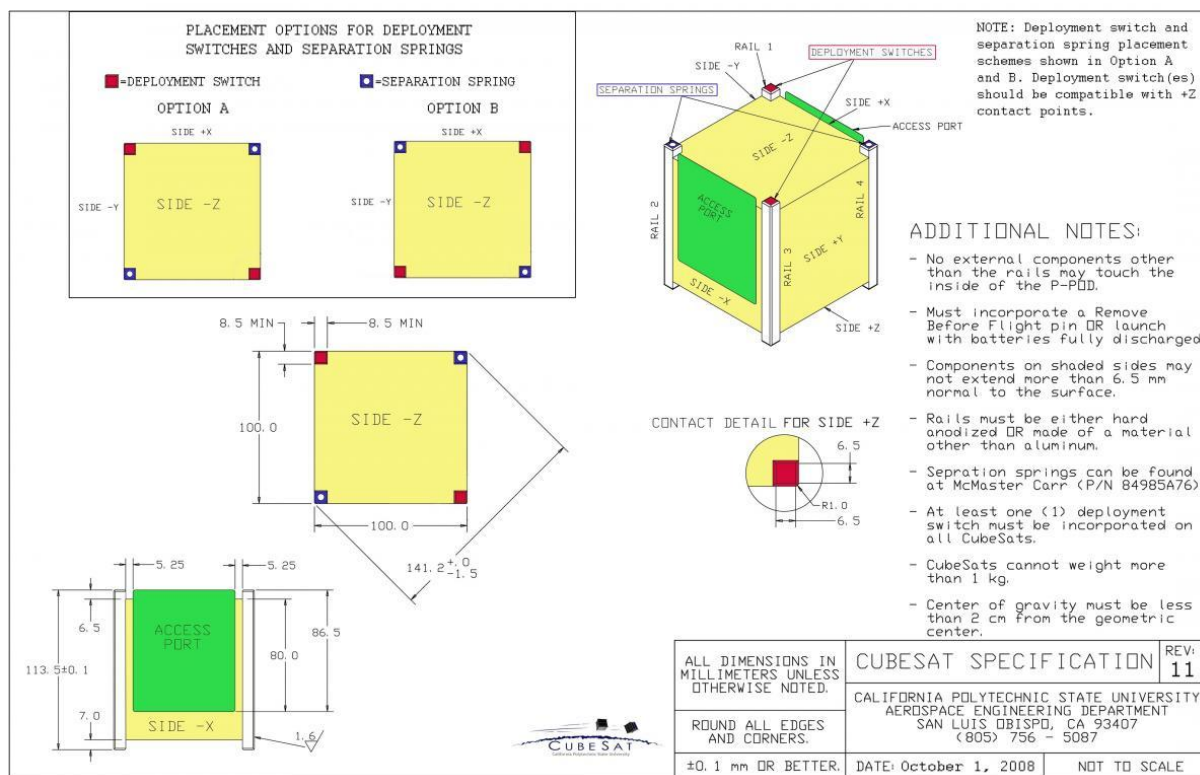


Obrázek 1 Vypouštěcí pouzdro P-POD

V České republice se jako první projektem CubeSat začalo zabývat sdružení czCube, a to v roce 2004. Od tohoto roku také vyvíjí vlastní pikosatelit. O čtyři roky později, tj. v roce 2008, se tímto projektem začala zabývat Západočeská univerzita v Plzni, konkrétně tedy Fakulta elektrotechnická, a to pod pracovním názvem PilsenCUBE.

1.2. Technické parametry pikosatelitů

Pikosatelit jako celek musí splňovat velké množství požadavků na vypuštění. V první řadě se jedná o standardizované rozměry, které jsou nastaveny tak, aby pikosatelit přesně zapadl do vypouštěcího pouzdra. Projekt PilsenCube je směřován ke standardu 1U (1 modul). Konkrétní hodnoty jsou dány takto: 100 x 100 x 113 mm (viz obrázek 2). Nejvyšší dovolená hmotnost je nyní stanovena na 1,33kg. Dále je nutné věnovat zvýšenou pozornost konstrukčním materiálům, použití chemicky bezpečných látek s ohledem na hlavní náklad nesený raketou (zejména jeho nepoškození nebo nevytvoření výbušných směsí) a v neposlední řadě také odolnosti vůči předpokládaným vnějším vlivům na oběžné dráze.



Obrázek 2 Technické parametry pikosatelitu CubeSat

V neposlední řadě je také zapotřebí zajistit satelitu stálé napájení na oběžné dráze (solární články, akumulátory), komunikaci s pracovištěm na zemi, stabilitu pikosatelitu na oběžné dráze (možnost natočení do správné prostorové orientace a podobně). [1]

1.3. Typické dráhy pikosatelitů

Oběžné dráhy pikosatelitů nejsou stacionární, jejich tvar je téměř kruhový. Inklinace čili úhel, který svírá předpokládaná oběžná dráha pikosatelitu s rovníkem se pohybuje okolo 98 stupňů. Časy, kdy bude zásobník energie dobíjen a kdy z něj bude naopak energie odčerpávána, nejsou shodné. V reálném provozu na předpokládané LEO oběžné dráze je uvažováno 60 zhruba minut nabíjení a 30 minut vybíjení. To tedy znamená, že celková doba oběhu činí cca 90 až 100 minut.

Pro dosažení co nejvyšší životnosti pikosatelitu na oběžné dráze je třeba, aby byl jeho zásobník energie co nejdéle schopen dodávat požadovanou energii. Důležitosti toto nabývá především z pohledu předpokládané doby obíhání satelitu kolem Země, kde je počítáno i s několika lety pobytu pikosatelitu na oběžné dráze. Z toho vyplývá velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, které bude soustava akumulátoru a superkapacitoru muset zvládnout bez ztráty kompletní funkčnosti. Jejich počet se bude pohybovat řádově v tisících.

V testech realizovaných v rámci této práce bylo časové měřítko komprimováno cca čtyřnásobně (to přibližně odpovídá 14 minutám nabíjení a 7 minutám vybíjení), aby bylo možné v krátké době uskutečnit větší počet nabíjecích a vybíjecích cyklů. [1]

1.4. Cíle

Hlavní bod, ke kterému je směřována tato práce, je tedy posouzení vhodnosti několika typů akumulátorů a superkapacitorů jako zásobníku energie pro pikosatelit PilsenCUBE, a to na základě simulace velkého množství nabíjecích a vybíjecích cyklů, které budou testované objekty podstupovat. Nejdůležitějším parametrem, který bude sledován, je procentuální úbytek jejich kapacity v závislosti na počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů. Dále bude přihlédnuto k ostatním parametrům jednotlivých testovaných objektů, jako například hmotnost či rozměry. Výsledné porovnání a zhodnocení pak určí, který z akumulátorů či superkapacitorů bude pro napájení pikosatelitu nejvhodnější a který nejlépe splní dané požadavky.

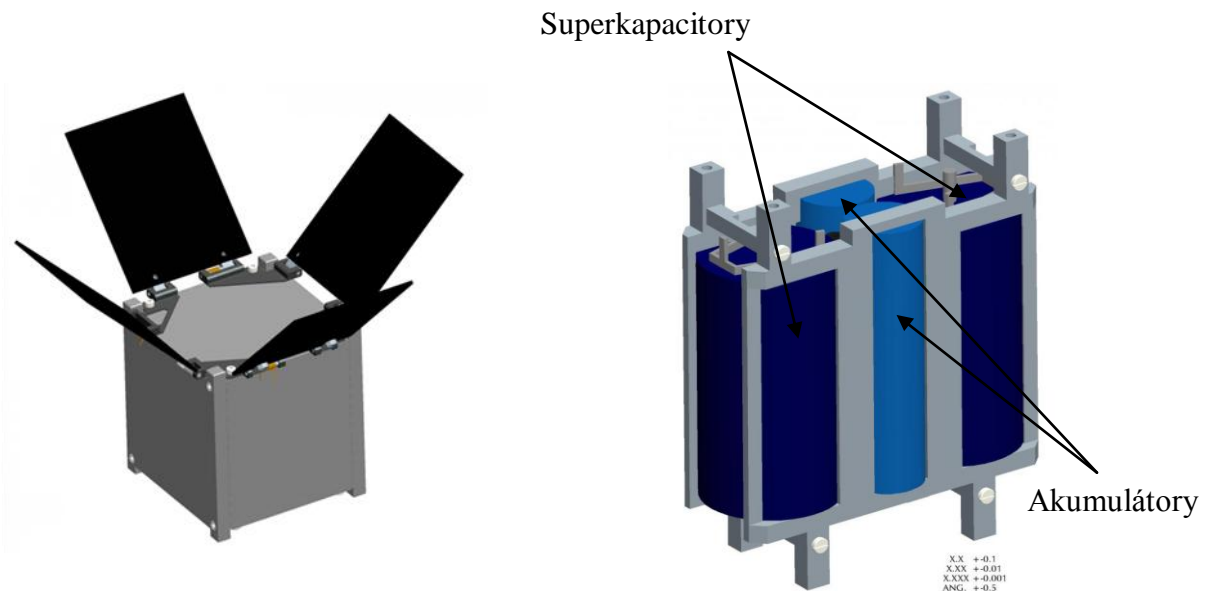
2. Napájecí systém pikosatelitu

2.1. Napájení pikosatelitu

Celý pikosatelit obsahuje několik subsystémů:

- komunikační
- měřicí
- stabilizační
- řídicí
- fotovoltaický
- napájecí

Základní požadavkem pro bezproblémový chod celého systému je spolehlivá napájecí soustava. U pikosatelitu je řešeno pomocí kombinace pevných a vyklápěcích solárních panelů a soustavy akumulátorů se superkapacitory (viz obrázek 3 a 4). Doplnění solárních článků umístěných na bocích pikosatelitu výklopnými články přináší zvětšení celkové plochy článků a z toho vyplývající nárůst poskytovaného výkonu.



Obrázek 3 Rozložení solárních článků

Obrázek 4 Soustava akumulátorů a superkapacitorů

Na oběžné dráze bude soustava solárních článků zajišťovat dobíjení akumulátorů a superkapacitorů v době, kdy pikosatelit bude osvětlen přímým slunečním světlem. A naopak, když bude ve stínu Země, energie se pro zajištění funkce systému bude odčerpávat. Střídání těchto režimů bude velmi časté a podmínky velmi rozdílné (velký teplotní skok apod.). Je tedy nutné zvolit pro tento nelehký úkol vhodné akumulátory a superkapacitory.

2.2. Akumulátory a superkapacitory

Volba vhodných typů akumulátorů a superkapacitorů je tedy velmi zásadní při realizaci napájecího systému. Hlavní parametry, na které je třeba se soustředit a na kterých bude do jisté míry záležet i životnost pikosatelitu, jsou především:

- životnost co do počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů
- schopnost pracovat v co nejširším teplotním rozsahu
- co nejmenší úbytek kapacity s narůstajícím počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů
- hmotnost akumulátoru a superkapacitoru

Vzhledem k obecně dlouhodobému využívání jako zdroje energie v přenosných zařízeních (notebooky, mobilní telefony atd.), zvládnutí technologie výroby, cenové dostupnosti a především velké hustotě energie vztážené na hmotnost akumulátoru byly jako jedna z možností úložiště energie pro pikosatelit zvoleny Li-Ion (Lithium-Iontové) akumulátory (zde zastoupené produkty od Sanyo Electric a BAT18650). [2]

Další volba při výběru vhodného zásobníku energie padla na LiFePO (Lithium-železo-fosfátové) akumulátory. Některé jejich vlastnosti jsou podobné nebo shodné s Li-Ion akumulátory; nabízejí proti nim však několik výhod, které mohou být ve výsledku testování velmi důležité, ne-li rozhodující. Pro testování byl k dispozici LiFePO akumulátor od A123 Systems.

Třetí a zároveň poslední zde testovaný typ energetického úložiště představují superkapacitor Boostcap D Cell od firmy Maxwell a tzv. pseudokapacitor Pseudocap, produkt firmy NessCap. Proti akumulátorům nabízejí několika set násobnou životnost a také menší závislost jejich vlastností na teplotě. K jejich prozatímním nevýhodám se řadí větší rozměry a menší hustota energie vztážená na hmotnost. Jelikož jsou superkapacitory technologií poměrně novou, lze skrze další technologický vývoj očekávat posun vlastností směrem

k lepšímu.

Všechny akumulátory i superkapacitory byly zvoleny ve válcové podobě. Od poměrně často používaných plochých provedení akumulátorů se upustilo z důvodu jejich deformace během umístění plochých akumulátorů do vakua (simulace okolního stavu na oběžné dráze), kde negativně zapůsobil vnitřní přetlak. Tento závěr byl stanoven po již dříve provedené zkoušce v rámci tohoto projektu.

Nasazení superkapacitorů jako část napájecí soustavy pikosatelitu vychází především z potřeby pokrývat po delší dobu krátkodobé proudové špičky a proudové impulzy, které se mohou během provozu v systému vyskytnout (např. při zapnutí rádiového vysílače nebo při zapnutí stabilizačních cívek). Akumulátory budou schopny tyto zvýšené odběry zvládat jen po určitou dobu, protože lze předpokládat jejich rychlejší stárnutí a ztrátu kapacity než u superkapacitorů. Zde by se měly naplno prokázat kvality a životnost superkapacitorů schopné pokrýt zvýšené odběrové proudy především v době, kdy již tohoto nebudou akumulátory schopné.

2.2.1. Li-Ion akumulátory

Akumulátory tohoto typu prošly poměrně dlouhým vývojem. První komerčně dostupné lithiové primární články se na trhu objevily v roce 1970, sekundární články (tedy akumulátory) začala firma SONY uvádět na trh až v roce 1991. Mezi jejich výhody se řadí především vysoká hustota energie vztažená na hmotnost článku, prakticky neexistující tzv. paměťový efekt, bezúdržbovost a také nízká úroveň samovybití. Snad jedinou nevýhodou je nutnost pomocného obvodu u akumulátoru, který zabraňuje zničení článku v případě jeho nesprávného zapojení či použití. Tento obvod hlídá maximální a minimální napětí článku a zabraňuje tak zrychlené degradaci vlastností nebo i zničení akumulátoru, která je přímým důsledkem nadměrného nabití (typicky nad 4,3V) nebo vybití (typicky pod 2,5V).

2.2.2. LiFePO akumulátory

Tyto sekundární články jsou poměrně novou záležitostí. Jejich první zkonstruování se datuje do roku 1996, kdy skupina vědců na Texaské univerzitě objevila možnost užití jiného materiálu pro katodu akumulátoru.

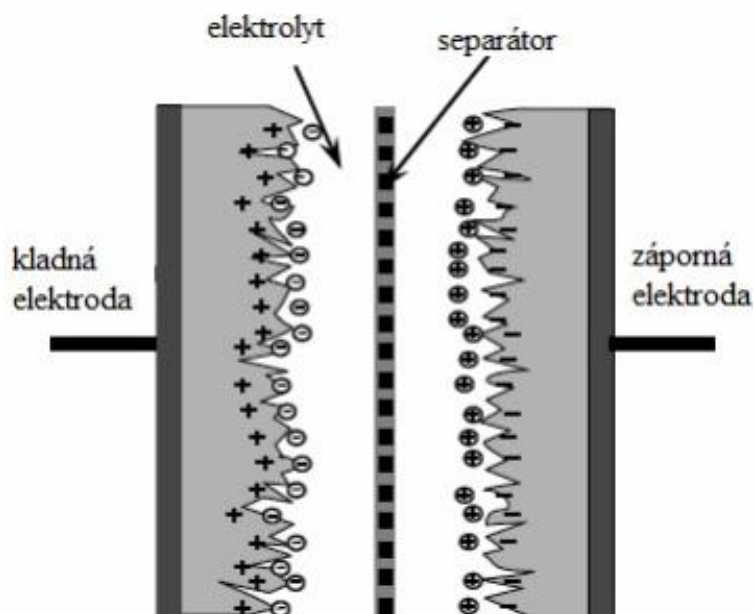
Nad Li-Ion vynikají LiFePO akumulátory především nízkou výrobní cenou (není nutné použití drahých kovů při výrobě), bezpečností a v neposlední řadě také vyšší energetickou kapacitou vztaženou na hmotnost akumulátoru (cca 170mAh/g). Disponují také

delší životností co do počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů. Stejně jako jejich předchůdci (NiMH, Li-Ion, Li-Pol atd.) vyžadují i LiFePO akumulátory speciální nabíječ.

Tento typ akumulátorů má tedy ty nejlepší předpoklady pro masové rozšíření do mobilních zařízení, jako jsou například mobilní telefony, tablety, notebooky a další. Při vzrůstajících požadavcích na ekologičnost pohonů u automobilů lze pro jejich vlastnosti do budoucna očekávat, že se rozšíří také jako zdroje elektrické energie pro elektromotory.

2.2.3. Superkapacitory

Tyto zdroje elektrické energie jsou tak trochu kategorie sama pro sebe. Jedná se v podstatě o elektrolytický kondenzátor o velké kapacitě (řádově stovky až tisíce Faradů). Často jsou označovány jako EDLC (electrochemic double layer capacitor), tzn. kapacitor založený na elektrochemické dvojvrstvě (viz obrázek 5). A protože je zde náboj vázán elektrostaticky, jsou procesy nabíjení a vybíjení o mnoho kratší než u akumulátorů a jejich počet může dosáhnout až stovek tisíc. [3] Zde byl testován superkapacitor firmy Maxwell, který by dle katalogového listu měl „vydržet“ minimálně 500 000 cyklů při poklesu jeho kapacity o 20%.



Obrázek 5 Vnitřní struktura EDLC [3]

Do jisté míry podobným typem superkapacitoru jsou tzv. pseudokapacitory. Při jejich výrobě se využívá stejné technologie jako pro výrobu EDLC, pouze využívají jiný materiál elektrod a tím mohou v budoucnu dosahovat mnohem vyšších kapacit. Jsou vývojově mladší

než EDLC, a tak je zatím jejich masovější komerční využití otázkou ještě několika let vývoje [3].

I tyto pseudokapacitory vynikají nad běžnými akumulátory především vysokou životností a menší závislostí parametrů na teplotě. Zde testovaný „Pseudocap“ by dle katalogového listu měl být schopen při 25°C a poklesu kapacity maximálně o 30% zvládnout až 100 000 cyklů.

2.2.4. Přehled testovaných typů akumulátorů a superkapacitorů

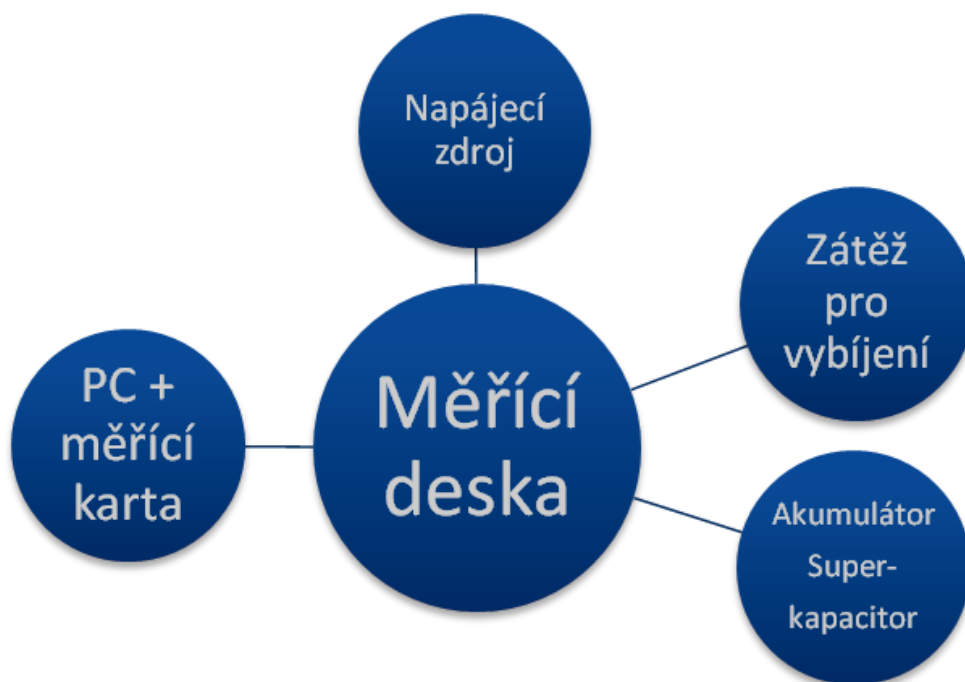
<i>Výrobce</i>	<i>Označení</i>	<i>Technologie</i>	<i>Obrázek</i>
A123	ANR26650	LiFePO	
<neznámý>	BAT18650	Li-Ion	
Sanyo	UR18650F	Li-Ion	
Maxwell	Boostcap D Cell	EDLC	
NessCap	Pseudocap	Pseudokapacitor	

Tabulka 1 Typy akumulátorů a superkapacitorů

3. Testování

3.1. Testovací systém a jeho součásti

Pro jejich testování byla již dříve navržena testovací deska, která s pomocí počítačové periferie a napájecího zdroje zajistila odzkoušení dlouhodobých parametrů akumulátorů a superkapacitorů. Zapojení celého testovacího obvodu vypadá zjednodušeně podle obr. 6.



Obrázek 6 Obecné schéma testovacího obvodu

Měřicí deska je tedy „základním spojovacím bodem“, ke které jsou připojeny ostatní části systému. Je přes ni přivedeno napájení ze zdroje konstantního proudu, odporová zátěž pro vybíjení akumulátorů a superkapacitorů, samotný testovaný prvek a také ovládání spínání tranzistorů, které řídí nabíjení (připojení zdroje) a vybíjení (odpojení zdroje a připojení zátěže) testovaného objektu.

3.1.1. PC a měřicí karta

Řízení nabíjení a vybíjení testovaného prvku je řízeno pomocí testovacího programu. Zdrojový kód pro měřicí program je napsán v prostředí Matlab/Simulink. Řídící signály pro nabíjení a vybíjení se poté posílají do měřicí karty NI USB-6008 od National Instruments.

Tato disponuje osmi analogovými vstupy, dvěma analogovými výstupy a dvanácti digitálními I/O porty. Karta potom pomocí svých digitálních výstupů přes optočleny spíná ovládací tranzistory na měřicí desce. Karta zároveň přes své analogové vstupy přijímá informace o napětí na měřeném objektu, nabíjecích a vybíjecích proudech. Hodnoty dodaných a odčerpaných energií jsou potom přes speciální skript v Matlabu dopočítávány a vyhodnocovány.



Obrázek 7 Měřicí karta NI USB-6008

3.1.2. Napájecí zdroj

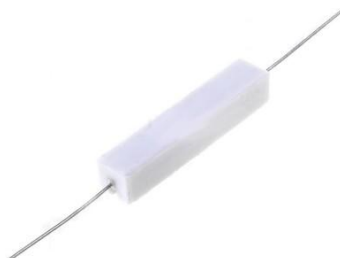
Jako zdroj pro nabíjení zde byl použit laboratorní zdroj PSM 3/5A. Tento disponuje dvěma regulovatelnými výstupy 0-30V/0-5A a jedním pevným výstupem 5V/0-1A. Regulovatelné výstupy přímo (v režimu proudového omezení) dodávají energii akumulátoru (superkapacitoru), který dobíjejí konstantním proudem s možností doběhu nabíjení v režimu konstantního napětí. Při vybíjení je měřícím programem přes měřicí desku zdroj odpojen a energie se naopak z měřeného objektu odčerpává do odporové zátěže.



Obrázek 8 Laboratorní zdroj PSM 3/5A

3.1.3. Zátěž pro vybíjení

Jelikož jsou vybíjecí proudy poměrně velké (řádově desetiny až jednotky A), je potřeba jejich energii spotřebovávat ve výkonových rezistorech, které tvoří jakousi kaskádu (viz obrázek 9 a 10). Ze dvou stran je na ně připevněn hliníkový chladič („U“ profil), který slouží jak pro upevnění rezistorů vedle sebe do jednoho celku, tak i pro odvod tepelné energie z těchto rezistorů. Jejich dimenzování z hlediska výkonového zatížení bylo zvoleno tak, aby maximální výkon dodávaný při vybíjení rezistor (případně kaskáda) vydržel a aby se vznikající tepelná energie stačila přes chladič odvádět; počítalo se také s mírnou rezervou. Maximální výkonová ztráta na 1 rezistoru činí 10W.



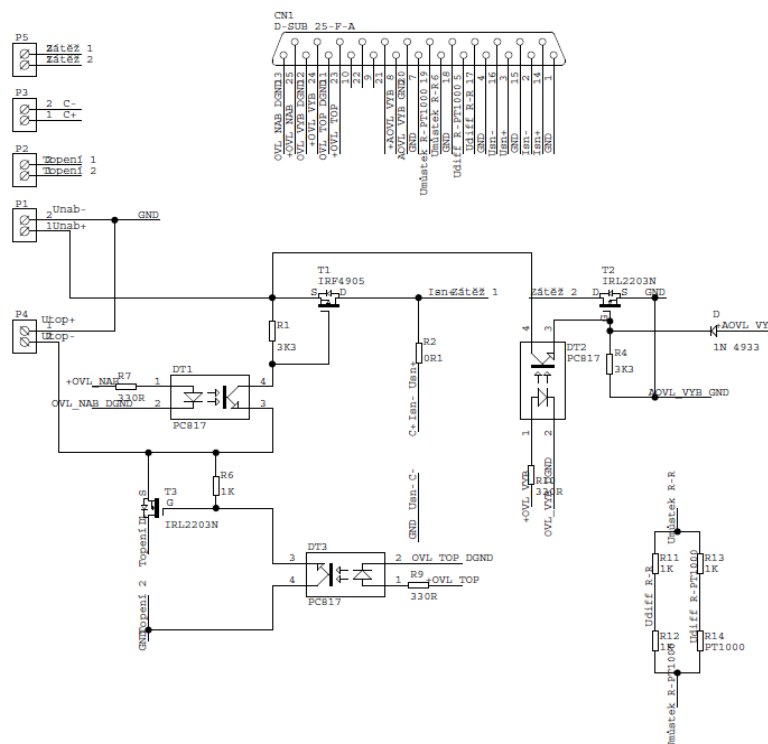
Obrázek 9 Výkonový rezistor
AX10W



Obrázek 10 Kaskáda výkonových rezistorů

3.1.4. Měřicí deska

Jak již bylo popsáno výše, deska tvoří jakési rozhraní mezi měřicí kartou a ostatními součástmi měřícího obvodu. Tranzistor T1 v sepnutém stavu umožní nabíjení testovaného objektu. Po jeho nabití na požadovanou úroveň se T1 vypne a zároveň T2 sepne, čímž se začne naakumulovaná energie odčerpávat do zátěže, tedy do výkonových odporů s chladičem. Spínání tranzistorů zajišťují optočleny DT1 a DT2, které jsou ovládány digitálními výstupy měřicí karty. Na svorkovnici P1 se připojil nabíjecí zdroj, P2 zůstala v tomto testování nezapojena (odpory pro plánovaný výhřev měřící komory), na P3 byl připojen testovaný objekt, P4 (napájení pro výhřev plánované měřící komory) a k P5 umožnila zapojení zátěže do obvodu.



Obrázek 11 Schéma zapojení měřicí desky

4. Testovací procedura

4.1. Nabíjecí napětí a proudy

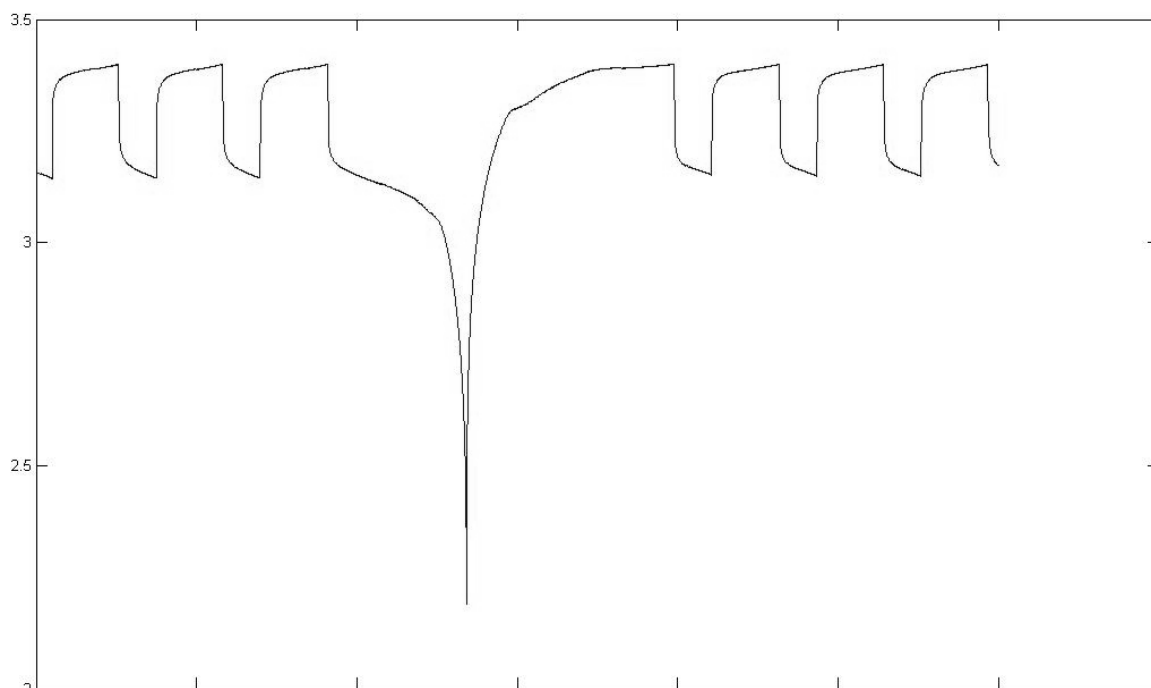
Celý měřicí a testovací cyklus probíhal v tomto nastavení: Napájecí zdroj byl nastaven na potřebné koncové nabíjecí napětí. Toto napětí bylo nutné volit vždy o několik desetin V

vyšší, jelikož bylo nutné počítat s úbytky napětí na snímacím rezistoru (U/I převod). Také se zde projevil odpor kanálu otevřeného tranzistoru. Nabíjecí a vybíjecí proudy (tzn. také ohmické velikost rezistorů pro „spalování“ energie při vybíjení) byly voleny mimo jiné s ohledem na maximální přípustné katalogové hodnoty jednotlivých akumulátorů. Tou hlavní podmínkou bylo, aby byl měřený objekt po celou dobu vybíjení schopen dodávat v průměru výkon 2W, který bude třeba dodávat pikosatelitu v době, kdy bude ve stínu Země. Na tomto základě bylo následně určeno, jak velké množství energie odčerpáné z akumulátoru tomu odpovídá při časové komprimaci testů. Z těchto hodnot pak byly zvoleny odpovídající nabíjecí a vybíjecí proudy.

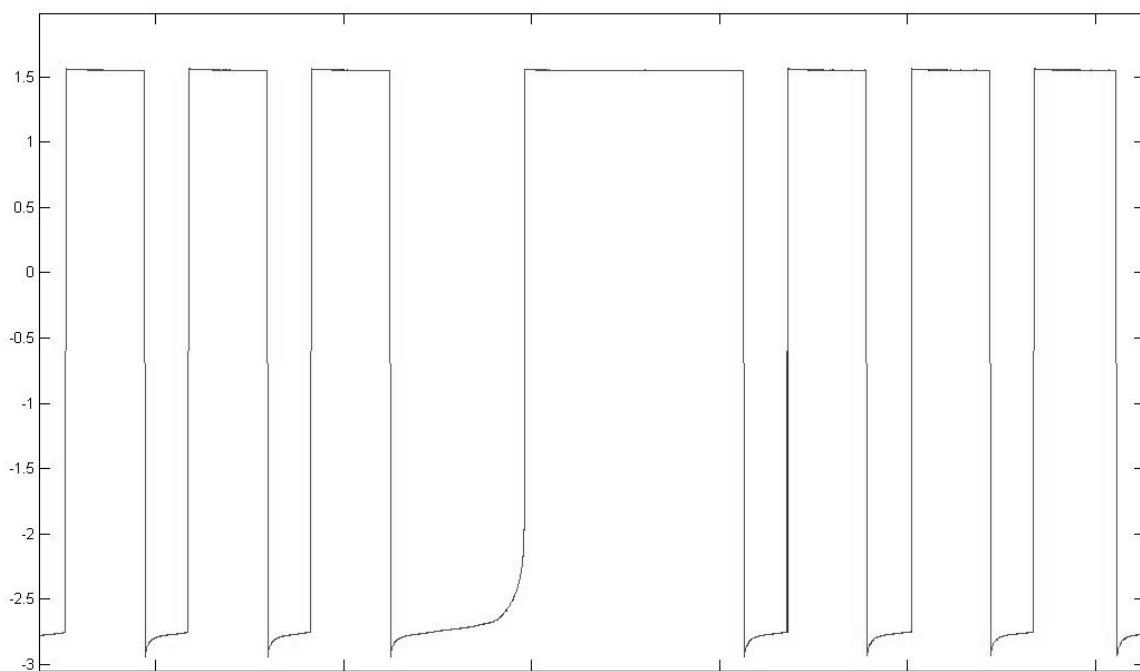
4.2. Nastavení časů

Testování probíhalo ve zkráceném režimu tak, aby byl dodržen poměr časů nabíjení a vybíjení 2:1. Konkrétně trvalo nabíjení 14 minut a vybíjení a 7 minut. Celé testování probíhalo zhruba čtyři týdny. Tato doba odpovídá počtu přibližně 1800 nabíjecích a vybíjecích cyklů. Každý cyklus se opakoval celkem 25krát, kdy se dodávala či odebírala potřebná energie, poté se měřený objekt nechal vybit až na hodnotu tzv. cut-off napětí (určené z katalogového listu pro konkrétní akumulátor), které určuje mez, na jaké napětí se může akumulátor nechat vybit, aby nedocházelo k zrychlené degradaci jeho vlastností, tzn. například k úbytku kapacity nebo i k jeho zničení. Stejným způsobem se ošetřilo jeho maximální napětí (například Li-Ion akumulátory jsou citlivé na napětí jen o několik desetin voltu vyšší, než je jeho maximální přípustné napětí uváděné v katalogovém listu).

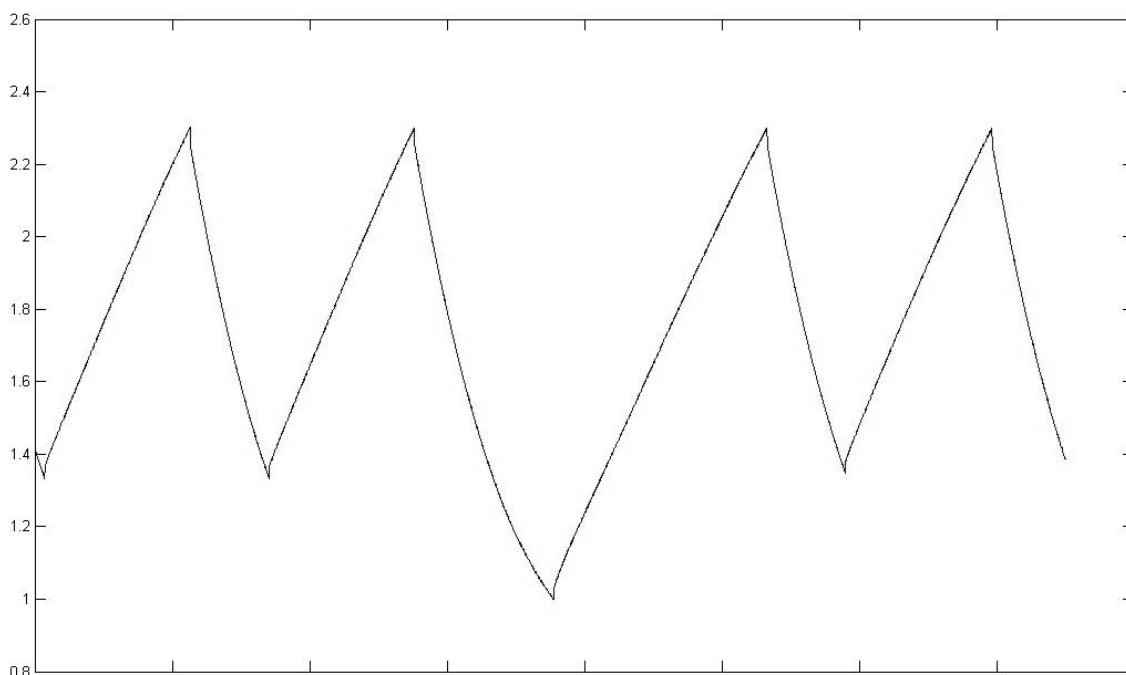
V těchto „hlubokých“ cyklech se do akumulátoru dodá i z něj odčerpá větší množství energie. Z těchto naměřených hodnot pak lze určit, jak se na daném akumulátoru či superkapacitoru projevil větší počet „mělkých“ nabíjecích a vybíjecích cyklů a kolik (procentuálně) kapacity během testování ztratil. Ilustrační průběhy napětí a proudů jsou ukázány na obrázcích 12 – 15.



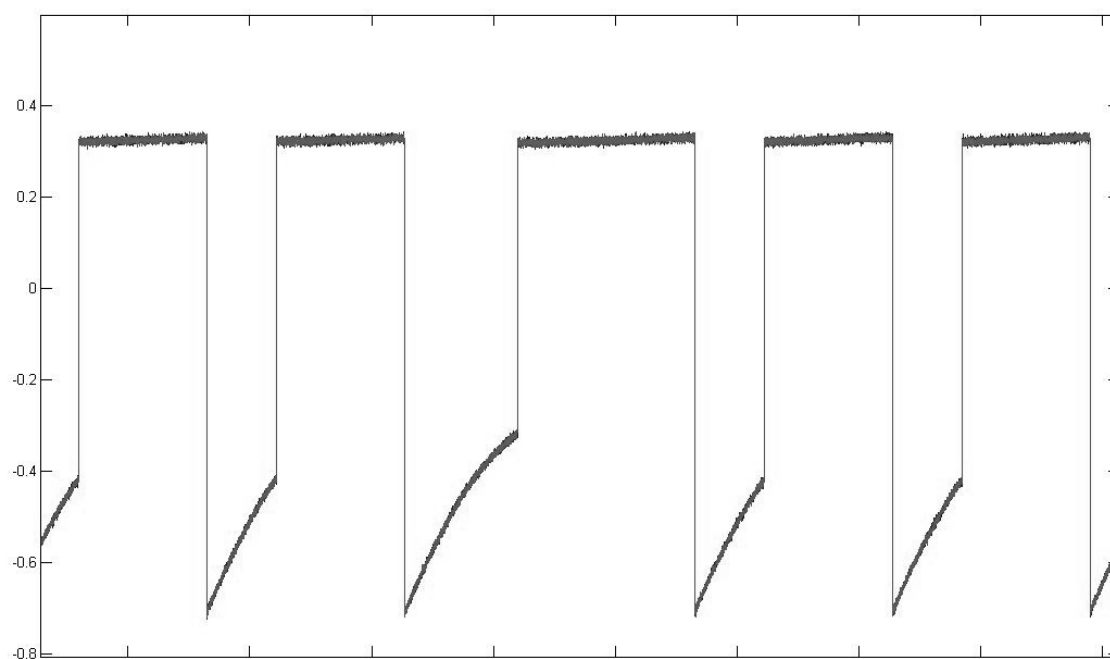
Obrázek 12 Průběh napětí při nabíjení a vybíjení – A123 ANR26650



Obrázek 13 Průběh proudu při nabíjení a vybíjení – A123 ANR26650



Obrázek 14 Průběh napětí při nabíjení a vybíjení – NESSCAP Pseudocap



Obrázek 15 Průběh proudu při nabíjení a vybíjení – NESSCAP Pseudocap

Jednotlivá nabíjecí napětí, cut-off napětí a veškeré proudy jsou uvedeny v tabulce dále.

<i>Výrobce</i>	<i>Typ</i>	U_{NAB} [V]	$U_{CUT-OFF}$ [V]	I_{NAB} [A]	I_{VYB} [A]
A123	ANR26650	3,5	2	1,55	3,1
BAT	18650	4,2	2,5	1,6	3,2
Sanyo	LI-18650	4,1	2,5	1,45	2,9
Maxwell	Boostcap D Cell	2,8	1	0,3	0,6
NessCap	Pseudocap	2,4	1	0,4	0,8

Tabulka 2 Napětí a proudy jednotlivých akumulátorů a superkapacitorů

4.3. Ostatní parametry testování

Všechna měření probíhala za nestabilizované pokojové teploty, nicméně podmínky pro všechny akumulátory i superkapacitory byly shodné. Pro důkladnější otestování akumulátorů a superkapacitorů by bylo třeba měřit v chladící a následně i ve vyhřívané komoře. S tím je počítáno do budoucna; měřicí deska s kartou zvládne pomocí platinového čidla i snímat teplotu.

5. Sledované veličiny a výsledky

5.1. Matematický popis

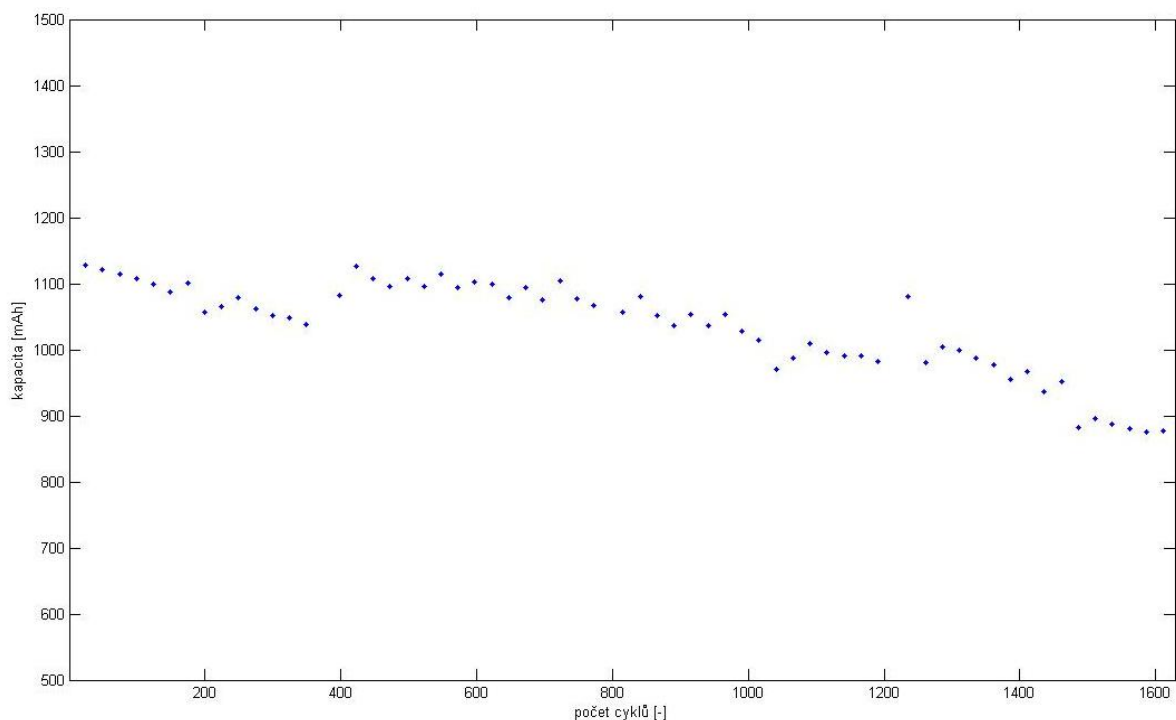
Veličin sledovaných a rozhodujících pro výsledek testování je několik:

- energie $W = U \cdot I \cdot t$ [J]
- náboj $Q = I \cdot t$ [C]
- vnitřní impedance $R_I = \frac{\Delta U}{\Delta I}$
- účinnost čerpání energie $\eta_W = \frac{W_{OUT}}{W_{IN}} \cdot 100$ [%]
- energetická kapacita $C = \frac{2W_{OUT}}{(U_{MAX}^2 - U_{MIN}^2)}$ [F]
- samovybíjecí proud $I = \frac{\Delta Q}{t}$ [A]

5.2. Zhodnocení výsledků - akumulátory

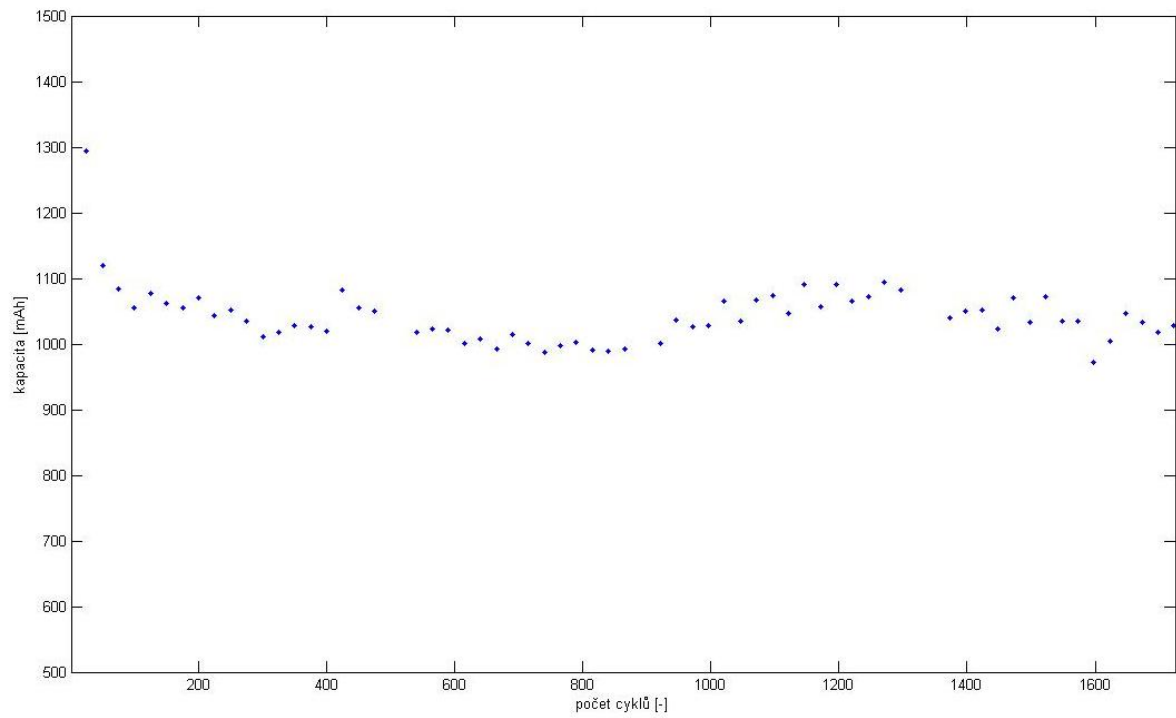
Při hodnocení kvalit jednotlivých akumulátorů a superkapacitorů se zkoumaly celkem 3 rozhodující parametry. Testované objekty podstoupily průměrně 1800 cyklů, které měly za cíl prověřit jejich vlastnosti během několikátýdenního nepřetržitého provozu.

Velmi důležitým požadavkem na kvalitu při dlouhodobém provozu je samozřejmě úbytek kapacity s narůstajícím počtem cyklů. V tomto ohledu dopadl nejhůře akumulátor BAT18650, který již po cca 1400 cyklech ztratil více než 20% své kapacity proti této hodnotě na začátku testování (viz obrázek 17).

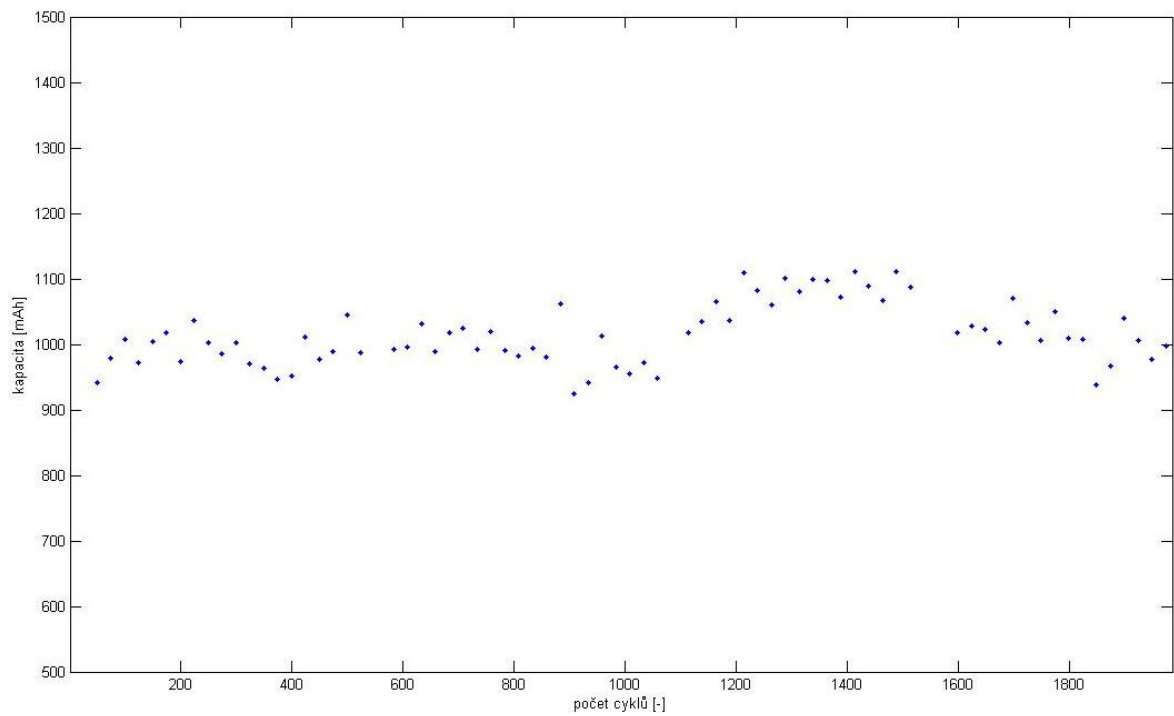


Obrázek 16 Kapacita – BAT18650

Naproti tomu si zbylé dva akumulátory vedly lépe, výsledky jsou u nich téměř totožné. Jejich kapacita se na konci testování příliš nelišila od hodnot z počátku testovací procedury (viz obrázek 18 a 19).

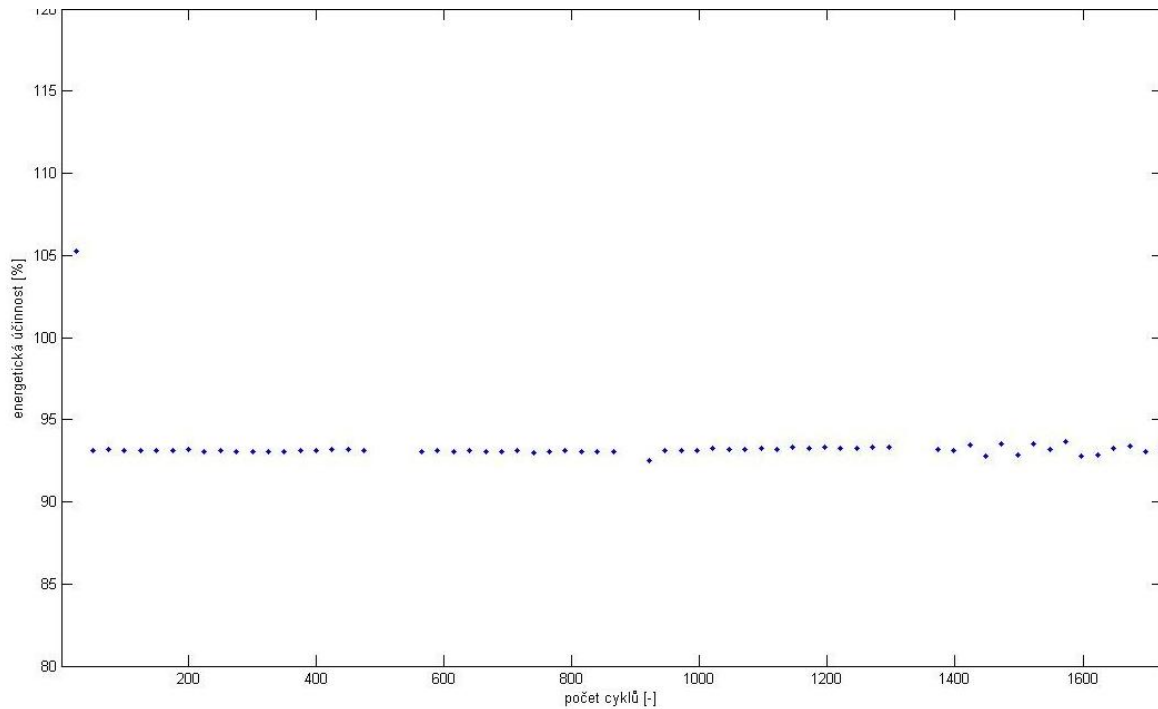


Obrázek 17 Kapacita – A123

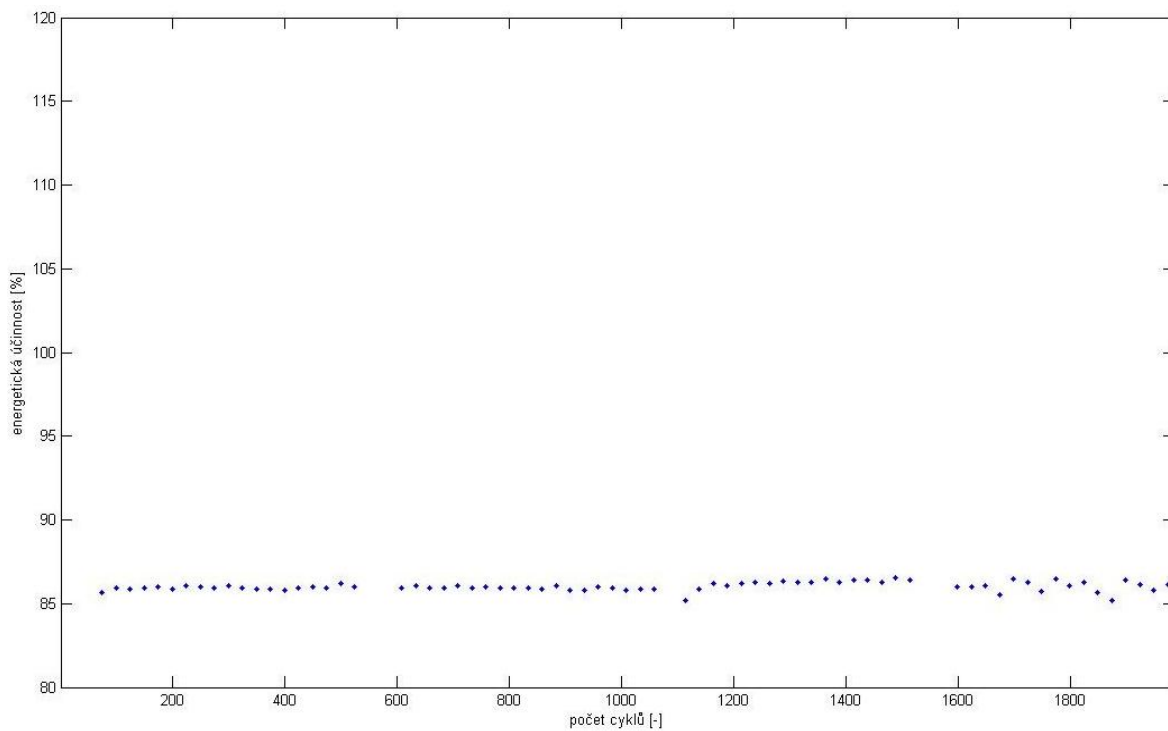


Obrázek 18 Kapacita - Sanyo

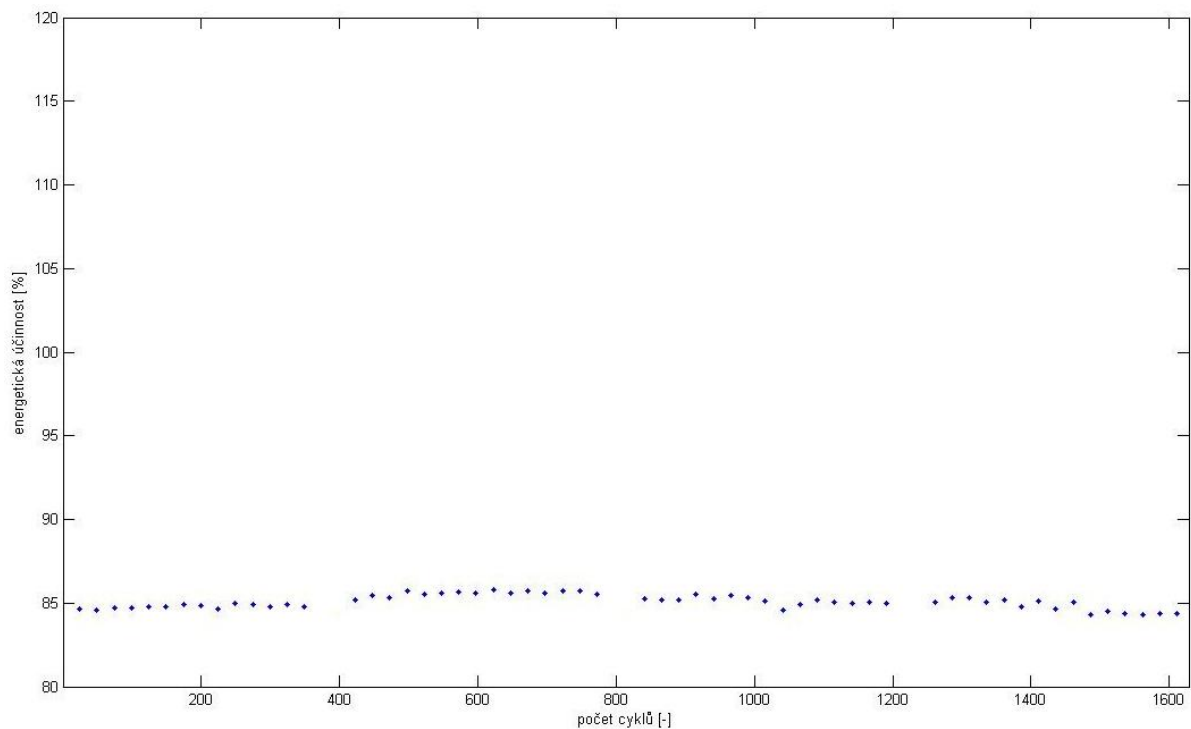
Dalším kritériem pro srovnání je účinnost uskladnění elektrické energie v akumulátoru. V tomto ohledu se jeví jako nejlepší akumulátor ANR26650M1-B od A123 Systems, který dosahuje po celou dobu testování účinnost až 93%. Další dva zkoumané objekty jsou hodnotou účinnosti srovnatelné (srovnání viz obrázek 19, 20 a 21).



Obrázek 19 Energetická účinnost – A123

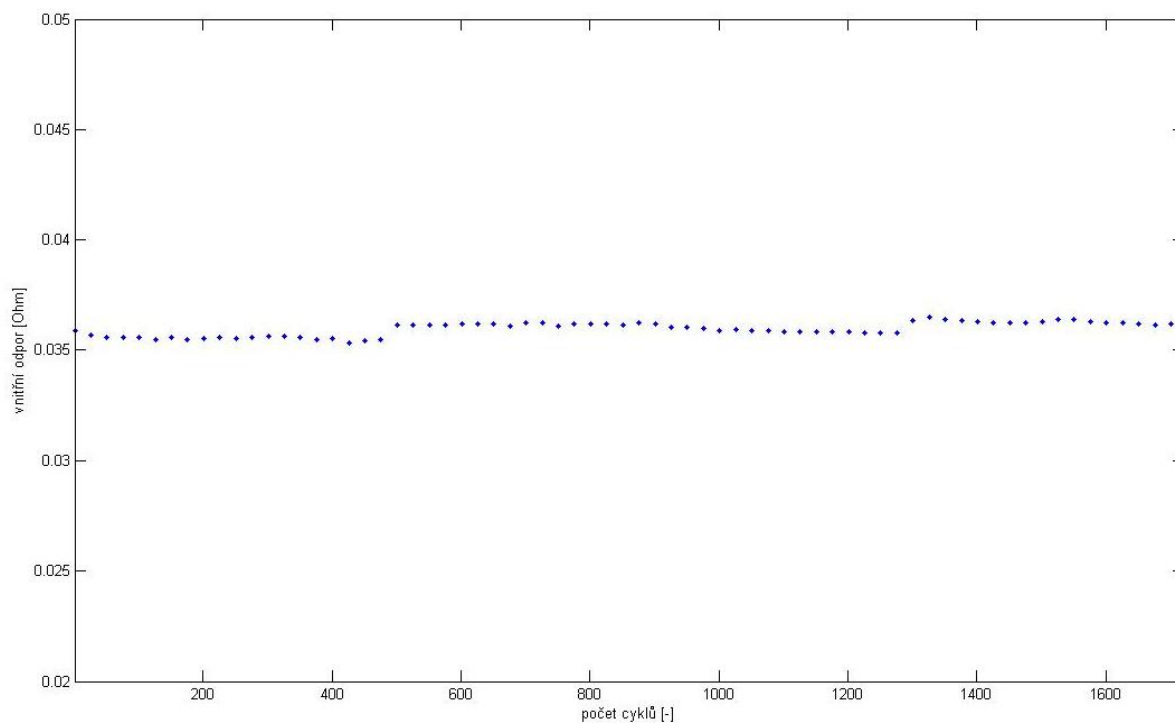


Obrázek 20 Energetická účinnost - Sanyo

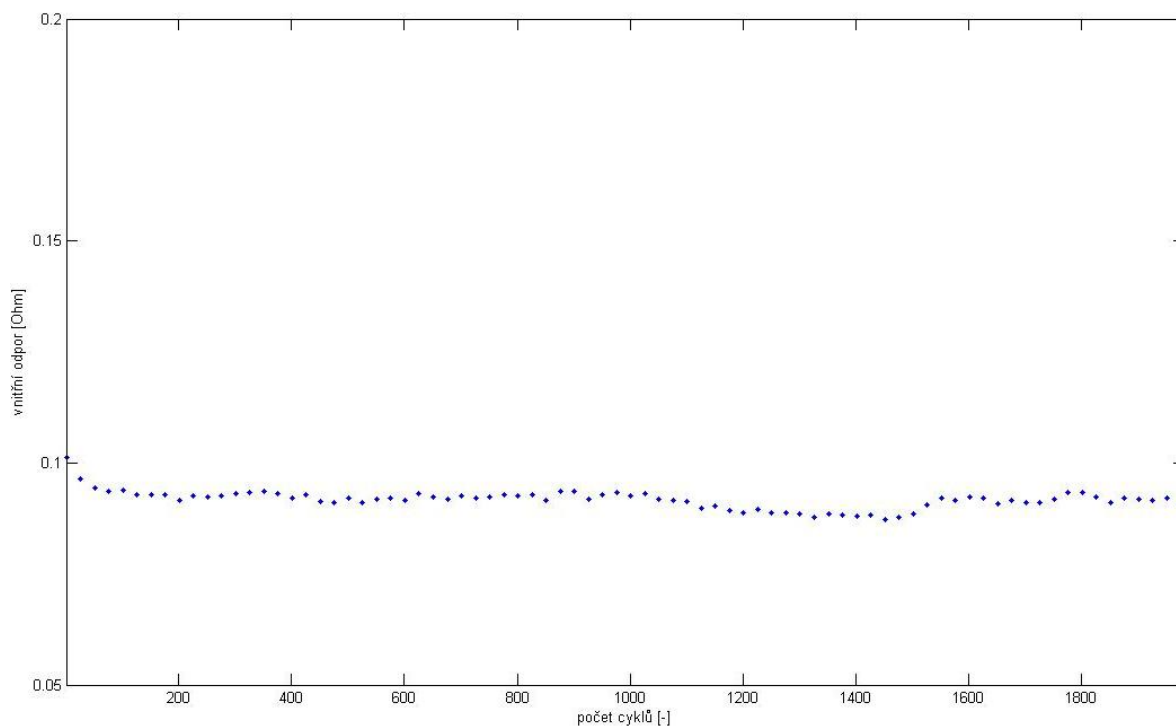


Obrázek 21 Energetická účinnost – BAT18650

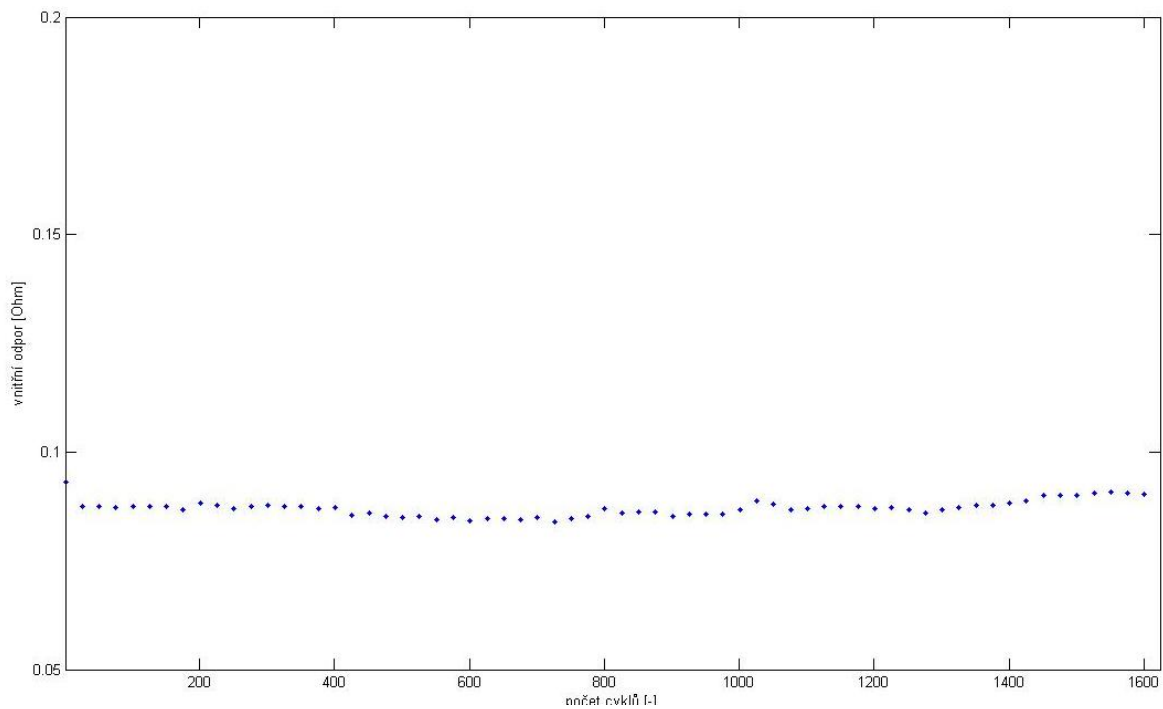
Poslední hodnocenou veličinou je změna vnitřního odporu. Jeho hodnoty jsou důležité z hlediska velkých odběrových proudů. V těchto testech opět dosáhl nejlepšího výsledku akumulátor ANR26650M1-B, který se svými průměrnými hodnotami pohybujícími se kolem hranice $0,036 \Omega$ překonal další dva akumulátory téměř trojnásobně (na obrázku 22). Jejich hodnoty vnitřního odporu se pohybovaly v okolo hodnoty $0,09 \Omega$ (viz obrázek 23 a 24)



Obrázek 22 Vnitřní odpor – A123



Obrázek 23 Vnitřní odpor - Sanyo



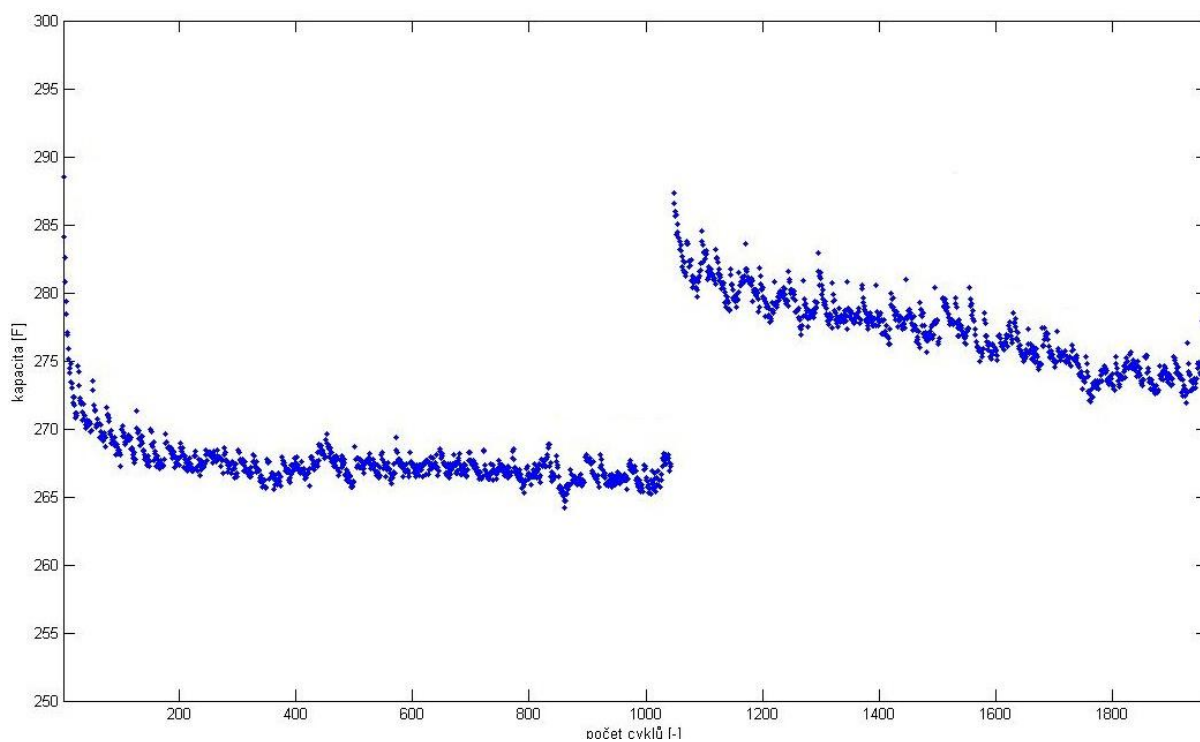
Obrázek 24 Vnitřní odpor – BAT18650

5.3. Zhodnocení výsledků – superkapacitory

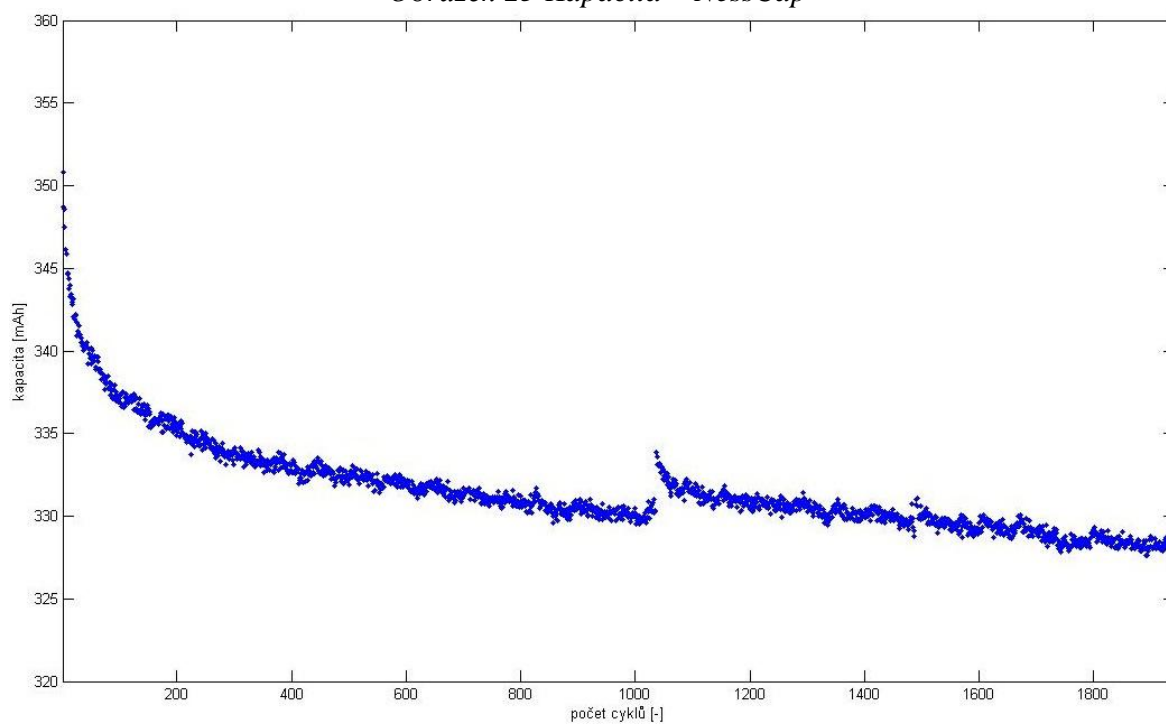
Zde postačí se zaměřit pouze na 2 faktory ovlivňující hodnocení (zde dvou) superkapacitorů, a to změna kapacity a změna vnitřního odporu.

Oba superkapacitory vykazují typickou vlastnost regenerace kapacity při i krátkodobém přerušení odběru elektrické energie (jev cca kolem hranice 1000 cyklů). U Nesscapu se tato skutečnost vyskytuje ve větším měřítku (viz obrázek 25 a 26). Maxwell naopak vykazuje menší ztrátu kapacity se vzrůstajícím počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů (cca 6% proti 12% u NessCapu).

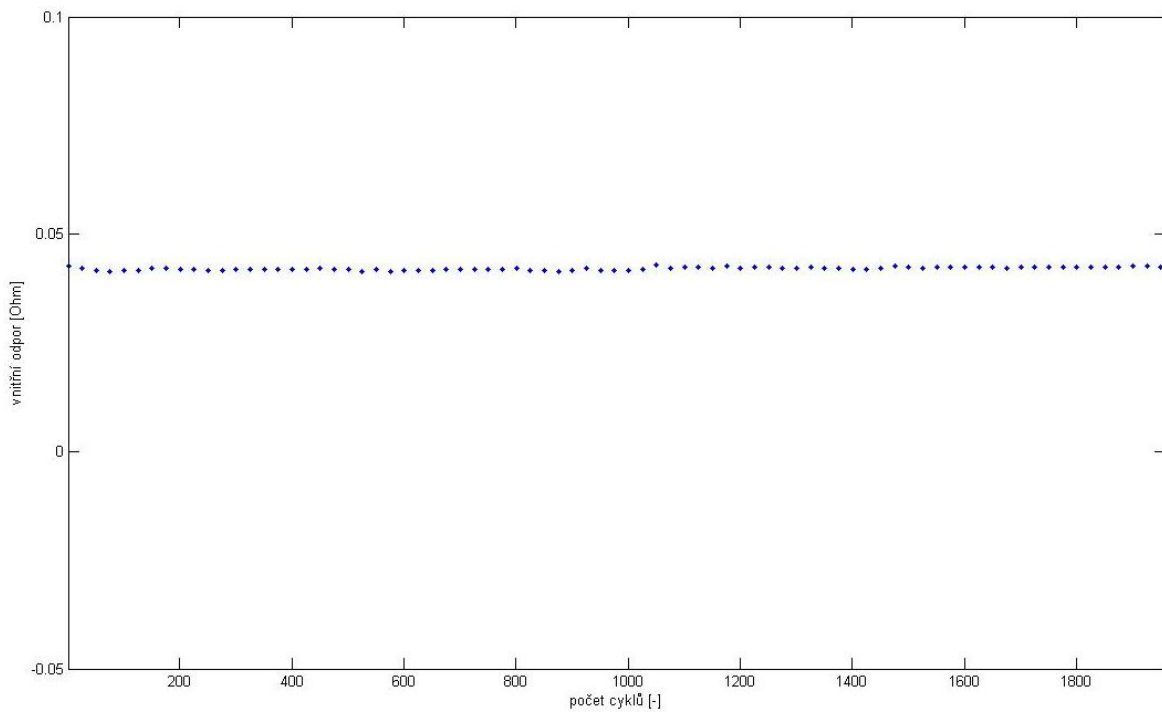
Co se týče změny vnitřního odporu, nejsou rozdíly příliš velké. Maxwell vykazuje hodnotu kolem 0.03Ω , NessCap okolo 0.04Ω (viz obrázek 27 a 28).



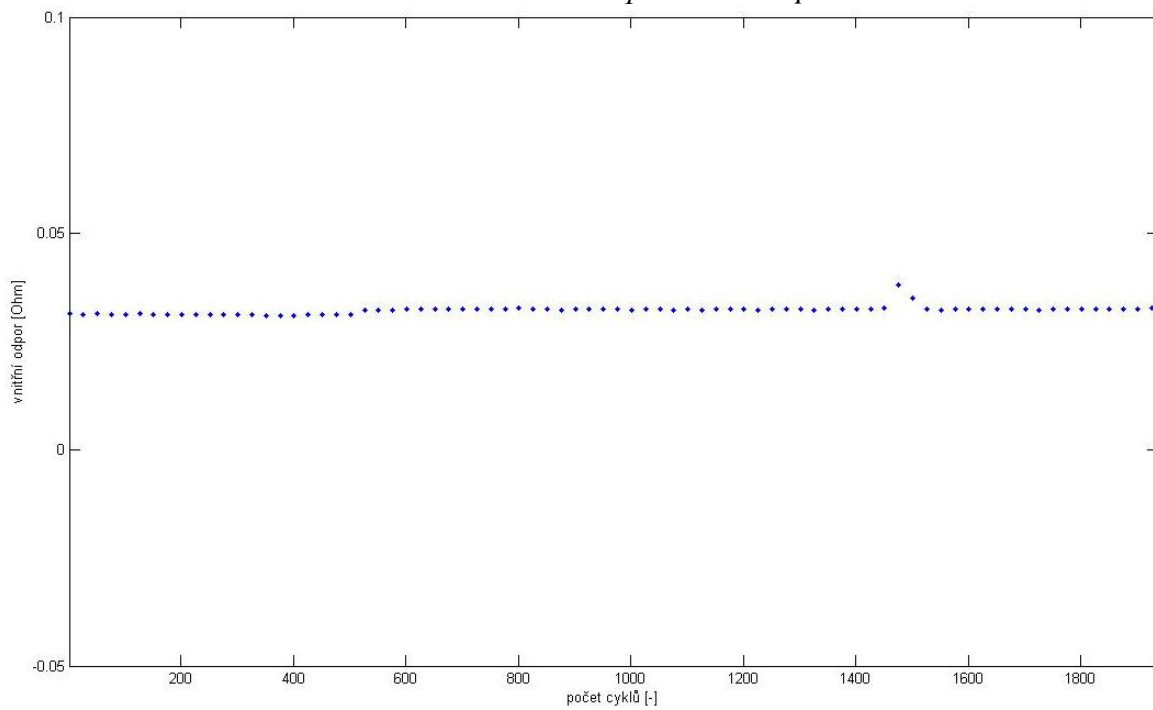
Obrázek 25 Kapacita – NessCap



Obrázek 26 Kapacita - Maxwell



Obrázek 27 Vnitřní odpor - NessCap



Obrázek 28 Vnitřní odpor - Maxwell

Závěr

Po porovnání výsledků testování je zřejmé, že pomyslným vítězem testu mezi akumulátory se stal LiFePO akumulátor ANR26650M1-B firmy A123 Systems, který v žádném z testů nezaostal za žádným z dalších dvou akumulátorů a ve 2 z 3 testovaných kritérií dosáhl lepších výsledků. Obecně si podle výsledků testování akumulátory s větší nominální kapacitou lépe udrží své parametry, když jsou vybíjeny „mělčeji“ než akumulátory s menší udávanou kapacitou, které je nutné pro odběr stejného množství energie vybíjet hlouběji. Akumulátory Sanyo a A123 měly nominální kapacitu 2,5Ah, resp. 2,3Ah, ale BAT18650 pouze 1,8Ah.

Další důležitá (kladná) vlastnost LiFePO akumulátorů obecně je schopnost pracovat v širším teplotním rozsahu než Li-Ion akumulátory, což je velmi důležité vzhledem v předpokládaným pracovním podmínkám a umocňuje to vhodnost jeho použití.

Mezi superkapacitory se zdá být lepším produkt od firmy Maxwell, který vykazuje lepší parametry, zejména téměř 2x menší ztrátu kapacity než NessCap. Jeho nevýhodou mohou být větší rozměry při nárůstu jmenovité kapacity o 50F proti NessCapu. Zde by záleželo na prostorových možnostech pikosatelitu.

Výsledné doporučení tedy vypadá takto: V zásobníku energie kombinovaném z akumulátoru a superkapacitoru je pravděpodobně nejvhodnější použít LiFePO akumulátor od A123 Systems a EDLC superkapacitor firmy Maxwell.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA, Fakulta elektrotechnická. *PilsenCube* [online]. 2008-2012 [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: <http://pilsencube.zcu.cz/>
- [2] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5.
- [3] KUBÁT, Miroslav. *Možnosti využití superkapacitorů*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Ing. Petr Polcar.
- [4] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI USB-6008: Datasheet*. Austin, 2012. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-218/lang/en>
- [5] A123 SYSTEMS, Inc. *Nanophosphate® High Power Lithium Ion Cell ANR26650M1-B: Datasheet*. Waltham, 2011. Dostupné z: <http://info.a123systems.com/Portals/133376/docs/a123%20systems%20anr26650%20data%20sheet.pdf>
- [6] MAXWELL TECHNOLOGIES, Inc. *BC Series Ultracapacitors: Datasheet*. San Diego, 2010. Dostupné z: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/datasheet_bc_series_1017105.pdf
- [7] SANYO ELECTRIC CO., Ltd. *Cell Type UR18650F Specifications*. Osaka, 2004. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/150088/SANYO/UR18650F.htm>
- [8] NESSCAP ULTRACAPACITORS. *NESSCAP® Ultracapacitor Products: Pseudocapacitor*. Gyeonggi-do, Korea, 2008. Dostupné z: <http://www.nesscap.com/product/pseudo.jsp>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Vypouštěcí pouzdro P-POD</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 2 Technické parametry pikosatelitu CubeSat</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 3 Rozložení solárních článků</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 4 Soustava akumulátorů a superkapacitorů</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 5 Vnitřní struktura EDLC [3]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 6 Obecné schéma testovacího obvodu</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 7 Měřicí karta NI USB-6008.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 8 Laboratorní zdroj PSM 3/5A.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 9 Výkonový rezistor AX10W.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 10 Kaskáda výkonových rezistorů</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 11 Schéma zapojení měřicí desky.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 12 Průběh napětí při nabíjení a vybíjení – A123 ANR26650</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 13 Průběh proudu při nabíjení a vybíjení – A123 ANR26650.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 14 Průběh napětí při nabíjení a vybíjení – NESSCAP Pseudocap</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 15 Průběh proudu při nabíjení a vybíjení – NESSCAP Pseudocap</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 16 Kapacita – BAT18650.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 17 Kapacita – A123</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 18 Kapacita - Sanyo</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 19 Energetická účinnost – A123.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 20 Energetická účinnost - Sanyo.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 21 Energetická účinnost – BAT18650</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 22 Vnitřní odpor – A123</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 23 Vnitřní odpor - Sanyo</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 24 Vnitřní odpor – BAT18650.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 25 Kapacita – NessCap</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 26 Kapacita - Maxwell.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 27 Vnitřní odpor - NessCap</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 28 Vnitřní odpor - Maxwell.....</i>	<i>33</i>

Přílohy

Příloha A – zdrojový kód měřicího programu

```
function [yzdroj, ahout1, ah, ahfull, whout1, wh, whfull, yzatez] =  
fcn(count, u1, i1, s1, ahin1, whin1, s2)  
  
%*****%  
% A123 LiFe 2300mAh  
ukon=2.3;  
uzac=1.0;  
ahlimit=-40;  
%*****%  
  
%*****%  
pocet=25;  
%*****%  
ah=0;  
ahfull=0;  
wh=0;  
whfull=0;  
%*****%  
  
if rem(count, pocet)~=0  
  
    if (u1(1,1)>ukon)  
        yzdroj=0;  
        yzatez=1;  
        ah=ahin1+i1(1,1)*0.2*(1/3600)*1000+i1(2,1)*0.2*(1/3600)*1000;  
        wh=whin1+u1(1,1)*i1(1,1)*0.2*(1/3600)+u1(2,1)*i1(2,1)*0.2*(1/3600);  
        ahout1=0;  
        whout1=0;  
        return;  
    elseif ((u1(1,1)<uzac)&&(s1==0)) || ((ahin1<ahlimit)&&(s1==0))  
        yzdroj=1;  
        yzatez=0;  
        ah=ahin1+i1(1,1)*0.2*(1/3600)*1000+i1(2,1)*0.2*(1/3600)*1000;  
        wh=whin1+u1(1,1)*i1(1,1)*0.2*(1/3600)+u1(2,1)*i1(2,1)*0.2*(1/3600);  
        ahout1=0;  
        whout1=0;  
        return;  
    else  
        yzdroj=s1;  
        yzatez=s2;  
    end;  
  
elseif rem(count, pocet)==0  
  
    if (u1(1,1)>ukon)  
        yzdroj=0;  
        yzatez=1;  
        ah=ahin1+i1(1,1)*0.2*(1/3600)*1000+i1(2,1)*0.2*(1/3600)*1000;  
        ahout1=0;  
        ahfull=ah;  
        wh=whin1+u1(1,1)*i1(1,1)*0.2*(1/3600)+u1(2,1)*i1(2,1)*0.2*(1/3600);  
        whout1=0;
```

```
        whfull=wh;
        return;
elseif (u1(1,1)<uzac&&(s1==0))
    yzdroj=1;
    yzatez=0;
    ah=ahin1+i1(1,1)*0.2*(1/3600)*1000+i1(2,1)*0.2*(1/3600)*1000;
    ahout1=0;
    ahfull=ah;
    wh=whin1+u1(1,1)*i1(1,1)*0.2*(1/3600)+u1(2,1)*i1(2,1)*0.2*(1/3600);
    whout1=0;
    whfull=wh;
    return;
else
    yzdroj=s1;
    yzatez=s2;
end;
else
    yzdroj=0;
    yzatez=1;
end;

ahout1=ahin1+i1(1,1)*0.2*(1/3600)*1000+i1(2,1)*0.2*(1/3600)*1000;
whout1=whin1+u1(1,1)*i1(1,1)*0.2*(1/3600)+u1(2,1)*i1(2,1)*0.2*(1/3600);
```

Příloha B – skript pro vyhodnocení naměřených hodnot

```
clear all;close all;
load('mAhfull12_1.mat'
load('mAh2_1.mat');
load('napeti2_1.mat');
load('proud2_1.mat');
load('spinac2_1.mat');
load('t_out_2.mat');
load('wh2_1.mat');
load('whfull12_1.mat');

napeti01=zeros(1,2*length(napeti2));
napeti01(1:2:2*length(napeti2))=napeti2(1:end,1)';
napeti01(2:2:2*length(napeti2))=napeti2(1:end,2)';

proud01=zeros(1,2*length(proud2));
proud01(1:2:2*length(proud2))=proud2(1:end,1)';
proud01(2:2:2*length(proud2))=proud2(1:end,2)';

pol=(sign(proud01)+1)/2;
a=[pol 0]~=[0 pol];
[x,y]=find(a==1);
on=y(1:2:end);
off=y(2:2:end);

R1=(napeti01(off(1:end-1)-1)-napeti01(off(1:end-1)))/(proud01(off(1:end-1)-1)-proud01(off(1:end-1)));
delta=napeti01(off(1:end-1)-1)-napeti01(off(1:end-1));

for i=1:length(on)-1
Win1(i)=0.2*sum(napeti01(on(i):off(i)-1).*proud01(on(i):off(i)-1));
Wout1(i)=0.2*sum(napeti01(off(i):on(i+1)-1).*proud01(off(i):on(i+1)-1));
Qin1(i)=0.2*sum(proud01(on(i):off(i)-1));
Qout1(i)=0.2*sum(proud01(off(i):on(i+1)-1));
t1(i)=0.2*(on(i+1)-on(i));
end;

for i=1:round(length(on)/25)-1
Qin(i)=sum(Qin1((i-1)*25+1:i*25));
Qout(i)=sum(Qout1((i-1)*25+1:i*25));
Q(i)=-1*Qout(i)/Qin(i);
Win(i)=sum(Win1((i-1)*25+1:i*25));
Wout(i)=sum(Wout1((i-1)*25+1:i*25));
U(i)=-1*Wout(i)/Win(i);
Cap(i)=(-1*min(Qout1((i-1)*25+1:i*25))/3600)*1000; % kapacita v mAh
t(i)=sum(t1((i-1)*25+1:i*25));
end;
Idis=1000*(Qin(1:end)+Qout(1:end))./t(1:end); % samovybijeci proud v mA

cycles=1:length(on);
charge_effic(1:length(on))=NaN;
charge_effic(25:25:length(on))=Q;
energy_effic(1:length(on))=NaN;
energy_effic(25:25:length(on))=U;
selfdisch_current(1:length(on))=NaN;
selfdisch_current(25:25:length(on))=Idis;
capacity(1:length(on))=NaN;
```

```
capacity(25:25:length(on))=Cap;  
rezistance(1:length(on))=NaN;  
  
figure(1);  
plot(cycles,charge_effic,'.')  
figure(2);  
plot(cycles,energy_effic,'.')  
figure(3);  
plot(cycles,capacity,'.')  
figure(4);  
rezistance=smooth(R1,25);  
plot(cycles(1:25:end-1),rezistance(1:25:end),'.');  
figure(5);  
plot(cycles,selfdisch_current,'.')  
  
save 'vysledky1.mat' charge_effic energy_effic capacity rezistance  
selfdisch_current;
```


Příloha C – skript pro vykreslení požadovaných průběhů

```
clear all;close all;
Q=[];
U=[];
R=[];
C=[];
I=[];

load 'vysledky1.mat';
Q=(Q charge_effic);
U=(U energy_effic);
R=(R rezistance');
C=(C capacity);
I=(I selfdisch_current);

clear charge_effic energy_effic capacity rezistance selfdisch_current;
load 'vysledky2.mat';
Q=(Q charge_effic);
U=(U energy_effic);
R=(R rezistance');
C=(C capacity);
I=(I selfdisch_current);

clear charge_effic energy_effic capacity rezistance selfdisch_current;
load 'vysledky3.mat';
Q=(Q charge_effic);
U=(U energy_effic);
R=(R rezistance');
C=(C capacity);
I=(I selfdisch_current);

clear charge_effic energy_effic capacity rezistance selfdisch_current;
load 'vysledky4.mat';
Q=(Q charge_effic);
U=(U energy_effic);
R=(R rezistance');
C=(C capacity);
I=(I selfdisch_current);

figure(1);
plot(1:length(Q),100.*Q,'.')
axis([1 length(Q) 80 120])
xlabel('počet cyklů [-]');
ylabel('nábojová účinnost [%]');

figure(2);
plot(1:length(U),100.*U,'.')
axis([1 length(U) 80 120])
xlabel('počet cyklů [-]');
ylabel('energetická účinnost [%]');

figure(3);
plot(1:length(C),C,'.')
axis([1 length(C) 500 1500])
xlabel('počet cyklů [-]');
ylabel('kapacita [mAh]');
```

```
figure(4);  
rezistance=smooth(R,25);  
plot(1:25:length(rezistance), rezistance(1:25:end), '.');  
axis([1 length(R) 0.05 0.2])  
xlabel('počet cyklů [-]');  
ylabel('vnitřní odpor [Ohm]');
```

```
figure(5);  
plot(1:length(I), I, '.');  
axis([1 length(R) 0 20])  
xlabel('počet cyklů [-]');  
ylabel('samovybíjecí proud [mA]');
```

Příloha D – Fotografie měřicí desky

