

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Srovnání superkapacitorů a akumulátorů pro napájení
subsystémů pikosatelitů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej BECH**
Osobní číslo: **E12N0074P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**
Název tématu: **Srovnání superkapacitorů a akumulátorů pro napájení subsystémů pikosatelitů**
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 :

Realizujte srovnávací studii nasazení superkapacitorů a akumulátorů v napájecích systémech pikosatelitů CubeSat.

1. Popište energetické potřeby běžných pikosatelitů CubeSat a časové poměry uskladňování elektrické energie a jejího zpětného čerpání ze zásobníků.
2. Otestujte dlouhodobé vlastnosti vybraných superkapacitorů během nabíjecích a vybíjecích cyklů.
3. Otestujte dlouhodobé vlastnosti vybraných akumulátorů během nabíjecích a vybíjecích cyklů.
4. Vypracujte doporučení pro využívání superkapacitorů a akumulátorů v napájecích systémech pikosatelitů CubeSat na základě změřených vlastností.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

V současné době se používají pro uchovávání elektrické energie v malých zařízeních zejména akumulátory a nově i superkapacitory. Oba typy mají různé vlastnosti při nabíjení a vybíjení, ale také různě se měnící dlouhodobé parametry, které závisí hlavně na způsobu jejich používání. Akumulátory mají výrazně lepší poměr uskladněné energie k hmotnosti, superkapacitory výrazně delší životnost a nižší impedanci. U obou technologií existují postupy, jak prodloužit/zkrátit životnost na úkor snížení/zvýšení měrné energie.

Hlavním cílem této práce je porovnat superkapacitory a akumulátory z hlediska použití v pikosatelitu. U superkapacitorů je důležité sledovat vliv zvýšení měrné energie přebíjením na rychlost stárnutí základních vlastností, u akumulátorů pak prodloužení životnosti mělkým vybíjením, kdy se snižuje využitelná měrná energie.

Sledování parametrů superkapacitorů a akumulátorů pro použití v pikosatelitu, je založeno hlavně na dlouhodobých měřeních při simulovaných energetických poměrech v pikosatelitu. To znamená opakované vybíjení a nabíjení na požadovaná napětí požadovanými proudy, které byly voleny s ohledem na skutečné očekávané zatížení při činnosti pikosatelitu a s ohledem na zvolené časové měřítko testu. Na základě těchto měření pak lze predikovat dlouhodobé chování akumulátorů a superkapacitorů v průběhu celé mise pikosatelitu a porovnat výhodnost jednotlivých technologií a způsobů jejich využívání.

Tato práce v závěru přináší vyhodnocení optimálních možností použití superkapacitorů a akumulátorů pro celou misi pikosatelitu hlavně s ohledem na to, aby nedošlo po celou dobu k žádnému kritickému stavu z hlediska neschopnosti akumulčních prvků uskladnit potřebné množství energie pro napájení subsystémů pikosatelitu.

Klíčová slova

Akumulátor, superkapacitor, nabíjecí a vybíjecí charakteristiky, pikosatelit

Abstract

Commonly there are two types of technologies for accumulating energy in small devices, supercapacitors and accumulators. These two types have different properties in recharging, but also in long-time stability of parameters, which are based on observation type. Convention devices store energy – accumulators have better ratio between the stored energy and weight, but new devices – supercapacitors are better in long-time stability of parameters. In both technologies there are methods to prolong or reduce service life at the expense of increasing or decreasing energy density.

The main objectives of this thesis should be compared technologies of supercapacitors and accumulators which will be used in picosatellite power system. For supercapacitors is important to follow effect of increasing the energy density by overcharging depending on the speed of aging basic parameters, in accumulators it's to prolong life time by shallow discharging, when usable energy density decreased.

Observation of parameters of supercapacitors and accumulators are mainly about long-time measuring. It means repeated charging and discharging of required values by demanded currents, which were chosen by real energy load in picosatellite and by the time scale of tests. Based on these measurements we can predicate properties of power system for the picosatellite mission with various mediums for accumulating energy.

This work provides an assessment of optimum utilization of superkapacitors and accumulators for the mission of picosatellite considering from the point of view of the protection of function without any critical energetic states and allows to store sufficient energy for supplying picosatellite subsystems.

Keywords

Accumulator, supercapacitor, charge and discharge characteristics, picosatellite

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 7.5.2014

Ondřej Bech

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Ivo Veřtátovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Tato práce vznikla za podpory Grantové agentury České republiky projektu číslo 102/09/0455: Energeticky úsporná platforma pro experimentální výzkum na bázi pikosatelitů a dále za podpory studentské grantové soutěže SGS-2012-019.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	10
CÍLE PRÁCE.....	12
1 PODMÍNKY V PIKOSATELITECH TŘÍDY CUBESAT	13
1.1 MECHANICKÉ PARAMETRY	13
1.2 TEPLOTNÍ PODMÍNKY	13
1.3 ELEKTRICKÉ PARAMETRY	14
1.4 OČEKÁVANÉ PODMÍNKY PRO PIKOSATELIT PILSENCUBE	16
2 UCHOVÁVÁNÍ ENERGIE	17
2.1 AKUMULÁTORY NA BÁZI LITHIA	18
2.2 SUPERKAPACITORY	19
2.2.1 <i>Superkapacitory EDLC</i>	20
2.2.2 <i>Pseudokapacitory</i>	21
2.3 SROVNÁNÍ UDÁVANÝCH VLASTNOSTÍ.....	22
3 TESTY VYBRANÝCH AKUMULÁTORŮ A SUPERKAPACITORŮ.....	22
3.1 MĚŘÍCÍ PRACOVNÍSTĚ	23
3.1.1 <i>Testovací hardware</i>	23
3.1.2 <i>Testovací software</i>	24
3.2 MĚŘENÉ A POČÍTANÉ VELIČINY	24
3.2.1 <i>Energie</i>	24
3.2.2 <i>Účinnost uskladnění náboje</i>	25
3.2.3 <i>Kapacita superkapacitoru</i>	26
3.2.4 <i>Kapacita akumulátoru</i>	27
3.2.5 <i>Vnitřní impedance</i>	27
3.3 AKUMULÁTORY A SUPERKAPACITORY PRO TESTY	28
3.4 KONCEPCE TESTŮ A JEJICH PARAMETRY	30
3.5 VÝSLEDKY TESTŮ.....	34
3.6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	48
3.7 ODHAD BUDOUCÍHO VÝVOJE	51
4 ZÁVĚR.....	61
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratek

<i>NiCd</i>	nikl-kadmiový akumulátor
<i>NiMH</i>	nikl-metal hydridový akumulátor
<i>Li – ion</i>	lithium-iontový akumulátor
<i>Li – Metal</i>	lithium-metalový (fosfátový) akumulátor
<i>P</i>	dodávaný výkon [W]
η_n	účinnost solárního článku [%]
<i>S</i>	intenzita záření [W/m^2]
<i>A</i>	plocha solárního článku [m^2]
ϕ	úhel natočení stěny vůči slunečnímu záření [$^\circ$]
<i>W</i>	energie [Wh]
<i>Q</i>	náboj [C]
I_{nab}	nabíjecí proud [A]
<i>U</i>	napětí na článku v čase odebrání vzorku [V]
T_s	vzorkovací perioda [s]
<i>C</i>	kapacita superkapacitoru [F]
U_h	horní mez nabíjecího napětí [V]
U_d	dolní mez vybíjecího napětí [V]
C_{Ah}	kapacita akumulátoru [Ah]
I_{vyb}	vybíjecí proud [A]
<i>N</i>	počet vzorků odebraných během vybíjení [-]
t_{vyb}	čas vybíjení [s]
t_{nab}	čas nabíjení [s]
R_i	vnitřní impedance [Ω]
R_z	impedance zátěže [Ω]
R_s	známý odpor pro měření proudu [Ω]
η_w	účinnost přečerpávání energie [%]
η_Q	účinnost přečerpávání náboje [%]
W_{sam}	energie odčerpaná samovybíjením [μWh]
I_{sam}	průměrný samovybíjecí proud [μA]
$U_{\text{stř}}$	střední hodnota napětí článku [V]
<i>t</i>	doba trvání obletu země [h]

Úvod

Koncepce standardizovaných pikosatelitů cubesat vznikla v roce 1999 na dvou amerických univerzitách. Hlavními cíli koncepce bylo použití pro výuku a výchovu mladých techniků a pak také rychlá a levná realizace různých experimentů. Základní velikostí pikosatelitu je tzv. velikost 1U o vnitřním objemu jednoho litru (10x10x11,3 cm) a hmotnosti 1,33 kg. Od tohoto rozměru jsou pak odvozeny další velikosti a to jako násobky [1]. Velikosti pikosatelitů jsou tedy 0,5U, 1U, 1,5U, 2U, 3U, 6U a 12U. Do vesmíru jsou pak tyto pikosatelity vyneseny raketou, která nese hlavní družici a je vybavena několika kontejnery pro vypouštění pikosatelitů. Jedna raketa při svém letu může vynést kromě svého hlavního nákladu ještě například deset pikosatelitů [8].

Z velikosti pikosatelitu cubesat přímo vyplývá maximální možná plocha pokrytá solárními panely. Teoreticky by bylo možné pokrýt solárními panely všech 6 stěn pikosatelitu. Navíc je možné použít také tzv. rozvinuté panely, které mohou dále příkon satelitu značně zvýšit. Ve skutečnosti však solární panel nikdy nepokrývá celou stěnu, ale maximálně pouze přibližně 80 % a to například kvůli uchycení a také kvůli tomu, že se panely vyrábí jen v určitých standardních velikostech, na stěnu je třeba jednotlivé elementy skládat a tak nelze pokrýt celý její povrch. Dále pak na čelním panelu musí být místo pro kameru a různé senzory, a tedy plocha pro solární panely se opět zmenšuje. Dalším limitem je účinnost solárních panelů, pohybující se v současné době na hranici 30 % a také jejich teplotní a směrová závislost. Této hranice účinnosti dosahují také pouze moderní, velice drahé panely GaInP₂/GaAs/Ge. Dále pak také pikosatelit nikdy nemůže být natočen ke slunci všemi svými solárními články. Stěny satelitu mohou být natočeny ke slunci v jeden okamžik maximálně tři. Z toho pak lze říci, že maximální výkon dodávaný do pikosatelitu bez použití rozvinutých solárních panelů je přibližně 4 W, průměrně při obletu na slunci je to ale přibližně jen 3,25 W. Rozvinuté solární panely pak mohou celkový výkon značně zlepšit. Při použití čtyř výklopných solárních panelů se maximální dodávaný výkon zvýší na 7 W a průměrný výkon je asi 4,5 W. Do těchto hodnot však nejsou zahrnuty teplotní a některé směrové závislosti. Množství energie dodávané solárními panely tedy není nikterak velké a je nutné jej efektivně skladovat, aby při obletu ve stínu byl energie dostatek pro standardní funkci pikosatelitu [11],[12].

Pikosatelity Cubesat jsou vypouštěny na tzv. nízkých oběžných drahách (LEO drahách). Doba obletu Země na LEO dráze trvá přibližně 95 minut. Satelit z této doby stráví asi

60 minut na slunci, kdy je možné systémy napájet ze solárních panelů a také dobít akumulátory a 35 minut ve stínu, během kterých je veškerá spotřeba energie z akumulátorů hrazena. Z toho vyplývá počet cyklů (obletů) během jednoho roku. Za jeden den satelit obletí zemi asi 15 krát, za jeden rok pak asi 5532 krát. Veškerá elektronika i mechanické díly musí vydržet více než 5500 vybíjecích a nabíjecích, resp. teplotních cyklů ročně [8].

Pro úspěšnou misi pikosatelitu je tedy prakticky životně důležité, aby zásobníky energie byly schopny po velkém počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů uskladnit dostatečné množství energie pro nijak neomezený provoz. Potřeba množství kapacity zásobníků energie je samozřejmě dána spotřebou pikosatelitu, kterou musí být zásobníky schopny dodávat po dobu obletu ve stínu, ale také kompromisem mezi způsobem používání zásobníku a jeho životností. Způsobem používání se rozumí volba parametrů nabíjení a vybíjení, kterou lze velmi značně ovlivnit rychlost stárnutí použitého typu zásobníku energie. Pro uskladnění elektrické energie v pikosatelitu můžeme klasicky využívat akumulátory, případně superkapacitory, jak bylo navrženo v projektu PilsenCUBE.

Současné superkapacitory v přijatelných velikostech pro projekty pikosatelitů dosahují měrné energie 4,6 Wh/kg u technologie EDLC [15]. U technologie pseudokapacitorů, která ovšem není zatím úplně technicky propracovaná a zvládnutá, měrná energie dosahuje 8,73 Wh/kg [16]. Dalším důležitým parametrem u zásobníků energie je jejich vnitřní impedance. Ta má vliv na pokles napětí v důsledku odebrání vyšších proudů. Obecně lze říct, že je vnitřní impedance superkapacitorů velmi nízká a pohybuje se u pseudokapacitorů pod 12 mΩ, u EDLC dokonce pod 5 mΩ. Životnost superkapacitorů při správném používání je velmi značná. Superkapacitory vydrží přibližně 500 000 cyklů s poklesem kapacity o přibližně 20 %.

Současné akumulátory na bázi lithia ve velikostech použitelných pro pikosatelity (v pouzdře UR18650), s kapacitou 2200 mAh mají měrnou energii 191 Wh/kg [17]. Lithiové akumulátory mají ve srovnání se superkapacitory velmi nízkou životnost. Při úplném nabíjení a vybíjení vydrží přibližně 500 cyklů při poklesu kapacity o 20 %. Stárnutí lze ale také způsobem používání zpomalit. Dalším parametrem, který se u lithiových akumulátorů s časem mění, je jeho vnitřní impedance. Ta je i u nového článku řádově vyšší než u superkapacitoru a může v průběhu přibývajících cyklů značně narůstat. Velikost vnitřní impedance také závisí na objemu článku. Obecně lze říci, že čím větší článek, tím nižší impedance [5].

Rozdíly mezi akumulátory a superkapacitory v měrné energii a životnosti lze do značné míry upravovat způsobem používání. Superkapacitory lze přebíjet na mírně vyšší hodnotu

napětí, než je maximální uváděná výrobcem, ovšem musí to být na hodnotu napětí ještě jasně bezpečnou, aby nedošlo k průrazu. Tím však dochází k mnohem rychlejšímu stárnutí a snižování kapacity. Je tedy nutné zvolit vhodný kompromis mezi navýšením uskladněné energie a životností superkapacitoru. Přebíjením superkapacitorů však velmi značně stoupá jejich měrná energie a z dlouhodobého hlediska tak mohou superkapacitory být i výhodnější než akumulátory. Je potom také značný rozdíl mezi stárnutím při přebíjení u technologie EDLC a pseudokapacitorů. U akumulátorů lze vyšší životnosti dosáhnout mělkým vybíjením. Pokud se z akumulátoru odčerpává jen zlomek množství celkové energie, prodlužuje se tím jeho životnost, ovšem naopak se snižuje jeho hlavní výhoda, kterou je velká měrná energie. Je tedy velmi důležité vždy objektivně vážit všechny tyto aspekty.

Cíle práce

Hlavním cílem práce bude porovnat akumulátory a superkapacitory při použití různých technik prodloužení životnosti akumulátorů a navýšení měrné energie superkapacitorů. Za tímto cílem budou realizována následující měření:

- Sledování kapacity a vnitřní impedance akumulátorů při mělkém vybíjení a zjednodušené strategii nabíjení
- Sledování kapacity a vnitřní impedance superkapacitorů při nominálním nabíjení/vybíjení
- Sledování kapacity a vnitřní impedance superkapacitorů při přebíjení nad nominální napětí
- Srovnání jednotlivých technologií pro tříletou misi pikosatelitu

1 Podmínky v pikosatelitech třídy Cubesat

Technická hlediska, podle kterých lze na pikosatelit nahlížet z hlediska uskladňování energie, lze rozdělit na tři základní. Prvním z nich je hledisko mechanické, tedy rozložení a vyvážení všech součástí, dodržení maximální povolené hmotnosti a podobně. Dále jsou důležité teplotní parametry a to jak na vnějším plášti satelitu, tak uvnitř. Třetím jsou pak parametry elektrické, které musí být navrženy tak, aby byl celý systém po celou dobu životnosti satelitu v rovnováze a nedocházelo k neočekávaným nedostatkům energie.

1.1 Mechanické parametry

Pikosatelity třídy Cubesat mají jasně stanovené rozměry a maximální hmotnost. Rozměry jsou 10x10x11,3 cm a maximální hmotnost je 1,33 Kg [1]. Do tohoto tělesa se tedy musí vejít veškeré systémy. Napájecí subsystém z pravidla zabírá přibližně 1/5 celkového objemu a 1/10 celkové hmotnosti a používají se z pravidla dva až čtyři akumulátory v pouzdře UR18650. Nicméně například miniaturizací, nebo redukcí počtu experimentů a pozorování lze prostor pro napájecí systém zvýšit. Tohoto bude využito právě v projektu PilsenCUBE, kde budou použity dva akumulátory LiFePO₄ v pouzdře UR18650 a dva superkapacitory BCAP.

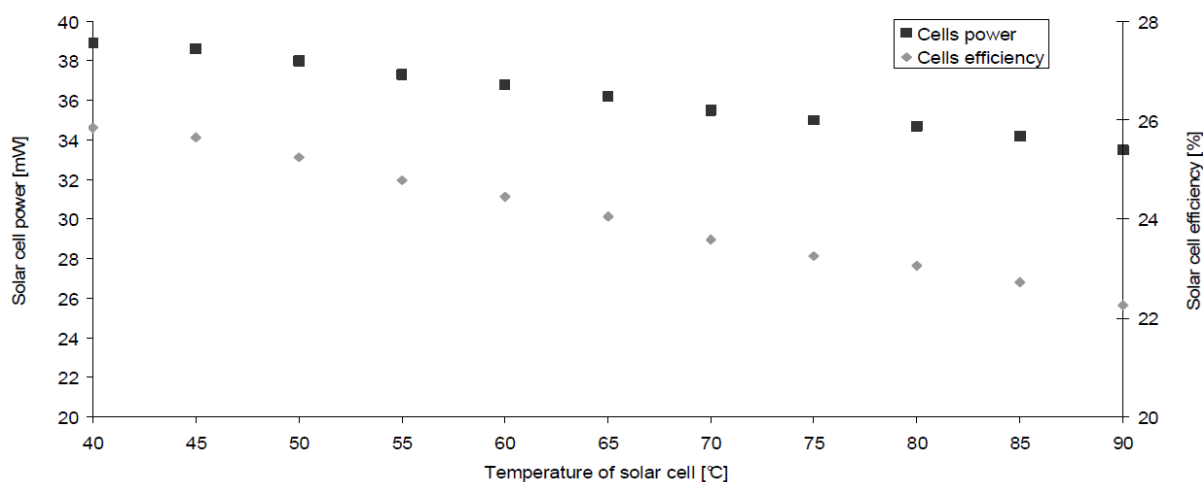
Hmotnost jednoho akumulátoru je přibližně 50 g a jeho objem činí 17,3 cm³. U superkapacitorů je hmotnost jednoho článku 63 g a objem 53 cm³. Superkapacitory tedy zaberou přibližně 3 krát více objemu než akumulátory. U hmotnosti je podíl prakticky srovnatelný [15],[17].

1.2 Teplotní podmínky

Teplota vnějších částí pikosatelitu se pohybuje od -70 °C ve stínu až po +100 °C na slunci. Vnější plášť satelitu je tedy vystaven značnému rozmezí teplot a musí na něj být dimenzován. Vnitřní části satelitu však takovému rozmezí teplot vystaveny nejsou. Díky vnitřní impedanci akumulátorů dochází jak při nabíjení, tak vybíjení k jejich zahřívání. V dřívějších projektech Cubesat byla provedena měření, která dokazují, že teplota uvnitř satelitu se pohybuje mezi přijatelnými +5 °C a +35 °C. Tedy nedochází k promrznání satelitu, což má vliv na efektivní nabíjení akumulátorů, které mají pouze omezený rozsah teplot. Nicméně je stejně velice důležité, aby zásobníky energie měly rozsah teplot co nejvyšší. Může se z nějakého důvodu stát, že během jednoho nebo více obletů země nedojde

k načerpání či odčerpání energie ze zásobníků. Je pak nezbytné, aby se satelit mohl vrátit do plné funkčnosti, kdyby došlo k nějakému podobnému neočekávanému kritickému stavu. Je tedy nutné mít zásobníky energie s co nejvyšším rozmezím pracovních teplot, aby mohlo začít efektivní nabíjení i po promrznutí pikosatelitu. Stejně kritérium platí i při vypouštění z kontejneru, kdy by se mohl pikosatelit například na nějakou dobu zaseknout, a mohlo by dojít k promrznutí. Druhou extrémní možností je potom naopak vysoké přehřátí akumulátorů. K tomu by mohlo dojít například při provádění nějakého krátkodobého energeticky náročného testu, nebo při poruše některého systému a následném odběru vysokého proudu až do jeho odpojení. Se všemi těmito možnými stavy je nutné počítat a brát tak teplotní možnosti všech subsystémů a napájecího systému zvláště v úvahu [12].

Dalším teplotně velice závislým prvkem z hlediska napájení satelitu jsou jeho solární články. Jejich účinnost se stoupající teplotou značně klesá a celkový dodávaný výkon tak bude po dráze obletu na slunci velmi kolísat [11].



Obr. 1.1 Závislost účinnosti solárního článku na teplotě – převzato z [11].

1.3 Elektrické parametry

Režim pikosatelitu se nechá z hlediska napájecího subsystému rozdělit do několika samostatných částí. První z nich je část, kdy se satelit pohybuje po části oběžné dráhy s přímou viditelností na slunce, a tedy předpokladem, že ze solárních panelů lze pokrýt všechny energetické nároky včetně nabíjení akumulátorů. V tomto stavu je satelit schopen vykonávat všechny potřebné operace i při případném problému s akumulátory, například v důsledku stárnutí a nízké kapacity. Druhá část je ta, kdy je satelit na části oběžné dráhy „ve stínu“ a všechny jeho funkce jsou napájeny z akumulátorů. Je tedy velmi důležité, aby akumulátory byly schopny po celou dobu mise uchovat po nabití tolik energie, která pokryje

plánovanou činnost satelitu při letu ve stínu s dostatečnou rezervou. Třetím možným stavem je ten, který je nežádoucí. V případě, že nedojde při obletu po části na slunci z nějakých důvodů k plnému nabití akumulátorů, je satelit při obletu kolem odvrácené strany nucen zůstat v úsporném režimu, připravený spustit všechny funkce při opakovaném návratu na slunce. Tento stav by samozřejmě neměl nastat. Ale i přesto je důležité, aby napájecí systém byl schopen obnovit svoji činnost a tak i činnost všech ostatních subsystémů i v případě, kdy jsou akumulátory zcela vybity.

Momentální příkon pikosatelitu, který dodávají solární články, je i na části oběžné dráhy na slunečním svitu závislý na několika faktorech. Prvním z nich je teplota článků, kdy závislost účinnosti na teplotě je zobrazena na obrázku 1.1, dalším pak natočení satelitu vůči slunci. Pokud budeme brát v úvahu pikosatelit bez tzv. rozvinutých solárních panelů, tedy pouze se všemi šesti stěnami pokrytými solárními články, nejnižší výkon bude dodáván, pokud bude právě jedna stěna natočena kolmo ke slunečnímu záření. Naopak nejvyšší výkon bude dodáván, když budou ozařovány tři stěny současně (pod úhlem 35°). Vztahy pro výpočet výkonu pak jsou:

$$P_{\min} = \eta_n \cdot S \cdot A \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

$$P_{\max} = 3 \cdot \eta_n \cdot S \cdot A \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

Kde:	η_n	účinnost solárního článku [%]
	S	intenzita záření [W/m^2]
	A	plocha solárního článku [m^2]
	φ	úhel natočení stěny vůči slunečnímu záření [$^\circ$]

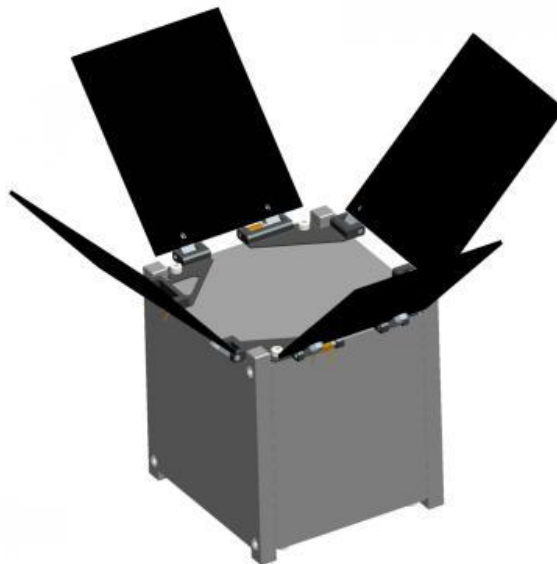
Prostým zprůměrováním těchto dvou hodnot pak lze dostat nejjednodušší odhad výkonu dodávaného solárními články během letu na slunci [11].

Složitější způsob výpočtu bere v potaz i směrovou závislost účinnosti (vlivem ztráta v ochranných vrstvách článků a efektu totálního odrazu) a teplotní závislost účinnosti [12]. Průměrný výkon dodávaný solárními články spočítaný podle vzorců 1 a 2 je 3,19 W. Při výpočtech složitějšími metodami se zohledněním totálního odrazu, ztrát a rovnoměrného zastoupení všech možných natočení vůči slunci je průměrný dodávaný výkon 3,25 W a po zohlednění teplotní závislosti vychází dodávaný průměrný výkon 2,77 W.

1.4 Očekávané podmínky pro pikosatelit PilsenCUBE

Jak již bylo dříve zmíněno, koncepce pikosatelitu konstruovaného na ZČU je ojedinělá v tom, že jako napájecí systém bude použita kombinace lithiových akumulátorů a superkapacitorů. Tato kombinace je v obdobné aplikaci doposud ojedinělá a přináší výhody. Pikosatelit bude obsahovat dvě sběrnice 5V/1A a dvě sběrnice 3,3V/1A [6]. Maximální možný odběr z napájecího systému se tak může teoreticky dostat na 16,6 W. K tomuto číslu je pak nutné připočítat ještě ztráty. Takového odběru lze dosáhnout spíše jen teoreticky a krátkodobě, ale napájecí systém na něj musí být dimenzován. Solární články budou v tomto pikosatelitu použity tak, že bude pokryto všech šest stěn pikosatelitu, kromě místa pro snímače, kameru a konektor a dále budou použity čtyři rozvinuté solární články. Model pikosatelitu PilsenCube je na obrázku 1.2.

Obr. 1.2 Topologie solárních článků pikosatelitu PilsenCube – převzato z [12]



Pro tuto topologii, maximální dodávaný výkon podle postupu výpočtu obdobného jako je uveden v kapitole 1,3, vychází přibližně 7 W. Průměrný výkon při obletu na slunci je pak přibližně asi 4,5 W. Průměrný dodávaný výkon při celém obletu země je 2,9 W, a při započítání ztrát pak celkový příkon všech subsystémů, včetně nabíjení akumulátorů, nepřesáhne 2,3 W [12].

Z těchto hodnot a znalosti časových poměrů obletu země vyplývá, že solární články dodají během jednoho obletu přibližně 4,5 Wh energie. Jak bude uvedeno v další části práce, akumulátory musejí mít ještě vyšší kapacitu kvůli hloubce vybíjení a jejímu vlivu na stárnutí.

Tab. 1.1 Příkon systémů pikosatelitu – převzato z[6]

Sběrnice:	3,3V	5V	celkem
Minimální odběr- nouzový režim	150mW	50mW	200mW
Minimální odběr - normální funkce	200mW	200mW	400mW
Průměrný odběr - normální funkce	1000mW	1250mW	2250mW

Dále jsou již také navrženy a vypočítány veškeré subsystémy a tedy je znám jejich příkon. V tabulce 1.1 je příkon jednotlivých systémů rozdělen podle funkčního stavu pikosatelitu a pak také podle odběru 3,3 a 5 voltové sběrnice. Celkový průměrný výkon, který bude pikosatelit odebírat potom činí přibližně 2,25 W.

Z veškerých těchto údajů je tedy možné vypočítat, jaké množství energie bude při obletu na slunci „přebytečné“ a bude jej nutné uložit do akumulátorů (superkapacitorů) a poté znovu čerpat. Jak bylo dříve uvedeno, průměrný výkon dodávaný solárními články během obletu na slunci je asi 4,5 W. Průměrný odběr pikosatelitu je 2,25 W. To znamená, že polovina výkonu solárních článků bude při každém obletu okamžitě spotřebována, druhá polovina (2,25 W) bude uložena v zásobnících. Doba obletu satelitu na slunci trvá 60 minut. Doba obletu v zemském stínu pak trvá pouze 35 minut. Z toho vyplývá, že celková energie, která může být během obletu na slunci a při standardních funkcích satelitu do zásobníků uložena, je 2,25 Wh. Za stejného odběru, tedy v průměru 2,25 W, bude při obletu v zemském stínu ze zásobníků odebráno jen asi 1,3 Wh energie. Standardní funkcí satelitu se rozumí běžná funkce bez poruchových stavů a také bez provádění energeticky náročných experimentů.

Celková energetická bilance je tedy navržena tak, že během nabíjení je možné dodat o 0,9 Wh energie více, než bude běžně spotřebováno během letu ve stínu. Tato energie poslouží jako rezerva například pro experimenty, které budou vyžadovat větší množství energie a pro postupné klesání účinnosti uskladnění elektrické energie.

2 Uchovávání energie

S uchováváním elektrické energie je obecně vždy problém. V různých komerčně vyráběných přenosných zařízeních je v současné době problematika akumulátorů do značné míry zvládnuta, ovšem je u těchto zařízení počítáno s provozem za standardních klimatických podmínek a není nijak zvláště kladen důraz na životnost a spolehlivost. Veškeré součásti se dají vyměnit a pro výrobce je tato politika velmi výhodná. V napájecím systému pikosatelitu

je nutné brát v úvahu hlavně spolehlivost, životnost a celkovou odolnost proti krizovým energetickým stavům. V principu je pro pikosatelit vhodné a možné použít dva typy zásobníků energie. Prvním jsou akumulátory na bázi lithia a druhým způsobem je použití superkapacitorů.

2.1 Akumulátory na bázi lithia

Nejběžněji používaným zásobníkem energie pro podobné projekty jsou akumulátory na bázi lithia. Konkrétně se používají dva typy, a to akumulátory Li-ion a LiFePO₄. V úvahu by mohly připadat také akumulátory Li-pol, ale jejich hlavní nevýhodou pro obdobné aplikace je jejich nízký teplotní rozsah [2].

Tab. 2.1 Porovnání parametrů běžných typů akumulátorů - převzato z[2]

	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Metal
Jmenovité napětí(V)	1,2	1,25	3,6	3,0
Hmotnostní energetická hustota (Wh/Kg)	45	55	100+	140+
Objemová energetická hustota (Wh/l)	150	180	225+	300+
Rychlost samovybití (%) / měsíc	25	20 až 25	8	1 až 2
Teplotní rozsah (°C)	0 až +50	-10 až +50	-10 až +50	-30 až +55

Dle tabulky by měl být pro použití v pikosatelitu nejvýhodnější článek Li-Metal (LiFePO₄). Pro použití v pikosatelitu, kde jsou striktně omezeny rozměry a hmotnost celého zařízení, je také velmi důležitý údaj hustoty energie vztažené k jednotce hmotnosti nebo objemu. U lithiových akumulátorů tyto parametry dosahují vysokých hodnot. Prakticky se dnes vyrábí články Li-Ion i Li-Metal se srovnatelnými energetickými hustotami, ve stejných pouzdrech a se stejnými kapacitami. Pro pikosatelit PilsenCUBE je uvažováno použití dvou LiFePO₄ článků v pouzdře UR18650. Při kapacitě článku 2200 mAh je jeho měrná energie přibližně 191 Wh/Kg [17].

Dalším problémem týkajícím se lithiových článků je stabilita parametrů v závislosti na nabíjecích a vybíjecích proudech, hloubce vybíjení a také horní a dolní mezi vybíjecího, resp. nabíjecího napětí. V tabulce 2.2 jsou některé možnosti závislosti životnosti na hloubce vybíjení. Měření byla prováděna za teploty 30 °C a nabíjení na napětí 4,1 V. Pod pojmem hloubka vybíjení se rozumí procentuální podíl odčerpané a nominální energie uložené v akumulátoru. Pojmem životnost se rozumí pokles kapacity na 80% nominální hodnoty [2].

Tab. 2.2 Životnost Li-Ion akumulátorů v závislosti na hloubce vybíjení – převzato z [3]

Hloubka vybíjení	Počet cyklů
100%	300-500
50%	1200-1500
25%	2000-2500
10%	3750-4700

Tab. 2.3 Životnost Li-Ion akumulátorů v závislosti na koncovém napětí – převzato z [3]

Nabíjecí napětí [V]	Počet cyklů	Kapacita při plném nabití
4,3	150-250	110%
4,2	300-500	100%
4,1	600-1000	90%
4	1200-2000	70%
3,92	2400-4000	50%

V tabulce 2.3 jsou uvedeny některé hodnoty napětí, na které jsou články nabíjeny a jejich životnost. Je zřejmé, že pokud jsou články nabíjeny na napětí o 0,1 V nižší, vzroste jejich životnost na dvojnásobek. Samozřejmě pak ale nelze využívat celou kapacitu akumulátorů. Měření byla prováděna při stejných podmínkách jako vliv hloubky vybíjení. V neposlední řadě má na životnost akumulátoru vliv také teplota, při které je provozován. Nízká teplota značně zpomaluje proces nabíjení a také zrychluje stárnutí, naopak velmi vysoké teploty způsobují ztrátu celkové kapacity a mohou vést až k explozi článku [4].

Každý lithiový akumulátor má také specifikované rozmezí proudů, kterými je možné jej nabíjet. Obecně se k nabíjení používá metoda, kdy se akumulátor nabíjí konstantním proudem a po dosažení určité úrovně napětí se přepne na dlouhodobější nabíjení konstantním napětím. Tak se nejsnadněji a nejbezpečněji dosáhne maximálního nabití. V satelitu na nízké oběžné dráze však není možné využít dlouhodobé dobití akumulátoru konstantním napětím a akumulátory tak z pravidla nejsou nabíjeny na jejich plnou nominální kapacitu [4].

2.2 Superkapacitory

Druhým možným způsobem uchovávání elektrické energie je využití principu kondenzátoru, tedy ve formě statického náboje mezi dvěma elektrodami oddělenými dielektrikem. Kondenzátory se mohou rozdělit do třech skupin. A to na elektrostatické (kapacita od pF až do jednotek μF), elektrolytické (kapacita μF až mF) a superkapacitory, které mohou mít kapacitu až stovek Faradů. Princip výroby elektrolytických kondenzátorů a

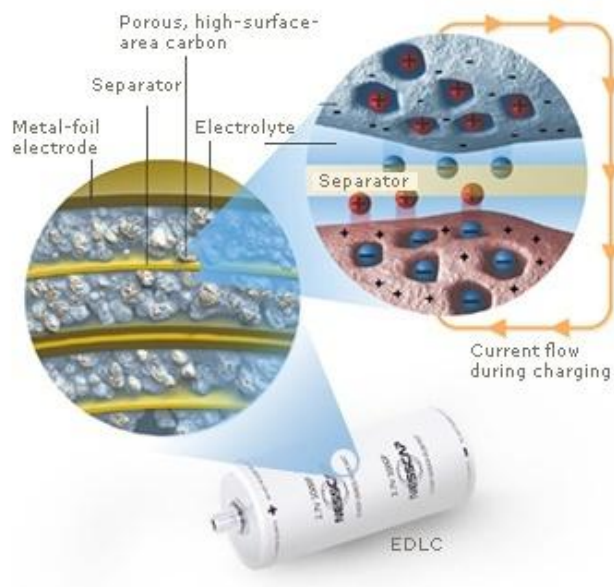
superkapacitorů je obdobný, jen při výrobě superkapacitorů se využívá mnohem slabších vrstev jak vodivých desek, tak dielektrik. Nejrozšířenější je technologie výroby s použitím organických dielektrik na bázi uhlíku. Nízká tloušťka dielektrika je příčinou toho, že superkapacity v praxi lze používat pouze pro nízká napětí. Jmenovitá napětí se pohybují od 2,3 do 2,8 voltu [5].

Stejně jako u akumulátorů, pro použití ve vesmírných aplikacích, je důležitá hlavně časová stálost parametrů a také schopnost akumulovat množství energie v závislosti na objemu a hmotnosti. Časová stálost parametrů superkapacitorů je teoreticky velmi vysoká. Pokud se dodržuje horní mez nabíjecího napětí a alespoň lehce je omezen nabíjecí proud, parametry se v závislosti na vybíjecích cyklech prakticky nemění. Spíše se pak tedy uplatní stárnutí materiálů, zejména dielektrika. Hustota energie na jednotku hmotnosti se u superkapacitorů pohybuje od jednotek Wh/kg až do hodnoty přibližně 15 Wh/kg. Hustota energie na jednotku objemu je pak maximálně do 20 Wh/l [4],[5].

Pro projekt PilsenCUBE je uvažováno použití dvou superkapacitorů EDLC, které mají kapacitu 350F a jejich měrná energie při této kapacitě je 4,6 Wh/kg [15]. V praxi lze efektivněji využívat superkapacity jejich přebíjením. To ale zkracuje jejich životnost. Pro aplikaci v pikosatelitu s očekávanou dobou mise 3 roky je ovšem možné zbytečně dlouhou životnost superkapacitoru zkrátit při navýšení měrné energie bezpečným přebíjením. Je tedy nutné zvolit vhodný poměr mezi potřebnou životností a nutností uskladnění co největšího množství energie.

2.2.1 Superkapacity EDLC

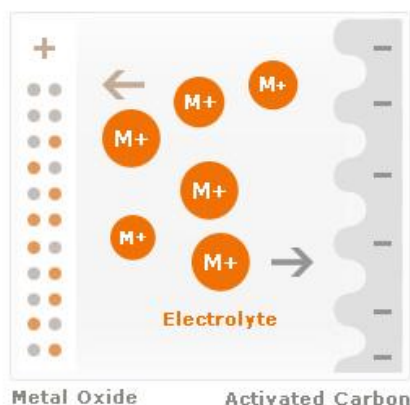
Superkapacity lze rozdělit do dvou skupin. První z nich jsou superkapacity označované jako „klasické“ neboli EDLC (Electric double layer capacitor). Skládají se ze dvou uhlíkových elektrod ponořených v elektrolytu. V důsledku nabíjení kladná elektroda přitahuje záporné ionty a naopak. Separátor brání ve zkratu obou elektrod. I když jsou EDLC superkapacity považovány za elektrochemická zařízení, k žádné chemické reakci v nich nedochází. Tím je dána možnost velice rychlého nabíjení a vybíjení, které není „brzděno“ žádnou chemickou reakcí. Princip a vnitřní složení je naznačeno na obrázku 2.1 [10].



Obr. 2.1 Princip superkapacitoru EDLC – převzato z [10]

2.2.2 Pseudokapacity

Druhou koncepcí superkapacitorů jsou tzv. Pseudokapacity. Pseudokapacitor je ve skutečnosti kombinace EDLC a akumulátoru s vysokou hustotou energie. Rozdíl mezi EDLC a pseudokapacitorem je ten, že jedna z porézních uhlíkových elektrod je nahrazena kovovou elektrodou, dotovanou atomy uhlíku, vodivých polymerů nebo oxidů kovů. Na každé elektrodě je pak tedy jiný princip nabíjení. Na uhlíkové elektrodě probíhá klasický proces přitahování iontů, na druhé elektrodě pak probíhá kombinace faradaických a povrchových reakcí. Tato kombinace reakcí vytváří přenos náboje, který je lineárně závislý na přiloženém napětí a ve výsledku se pseudokapacitor chová stejně jako kondenzátor. Vzhledem k probíhající reakci na kladné elektrodě je nabíjení pseudokapacitorů pomalejší než u EDLC, mají však vyšší měrnou energii [10].



Obr. 2.2 Princip pseudokapacitoru – převzato z [10]

2.3 Srovnání udávaných vlastností

Vzhledem k tomu, že akumulátory a superkapacitory pracují každý na jiném principu, mají poměrně značně odlišné některé vlastnosti a parametry. Je proto velmi důležité brát v úvahu všechny klady a zápory hrající roli v dané aplikaci.

Tab. 2.4 Porovnání parametrů superkapacitorů a Li-ion akumulátorů [5]

	Superkapacitor	Li-ion
Nabíjecí čas	1–10 s	600-3600 s
Životnost v cyklech	500000	500 a více
Napětí článku	2,3 až 2,8 V	3,6 až 3,7V
Hustota energie (Wh/kg)	5 (typicky)	100–200
Teplota nabíjení	–40 až 65°C (–40 až 149°F)	0 až 45°C (32° až 113°F)
Teplota vybíjení	–40 až 65°C (–40 až 149°F)	–20 až 60°C (–4 až 140°F)

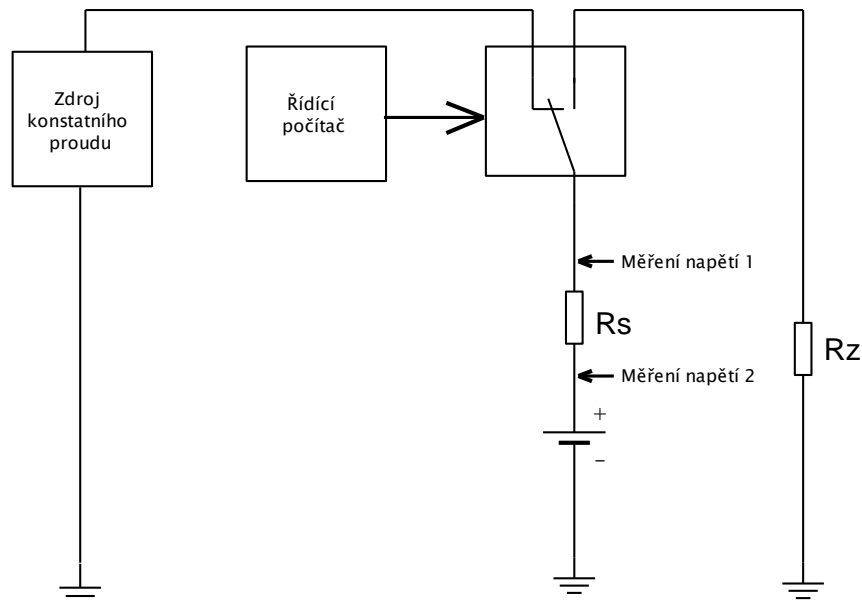
Pro danou aplikaci, tedy napájení subsystémů pikosatelitů, jsou nejdůležitějšími vlastnostmi stálost parametrů, životnost, měrná energie a rozmezí teplot, za kterých lze článek provozovat. Z hlediska měrné energie jsou lepší akumulátory, ovšem pro prodloužení jejich životnosti dosahujeme menší měrné energie mělkým vybíjením. Navíc není možné v satelitech na nízké oběžné dráze z praktických důvodů dodržet předepsaný způsob dobíjení s dlouhodobým doběhem na konstantní napětí a akumulátorům tak klesá měrná energie jejich nedokonalým dobitím. Z dlouhodobého hlediska pak měrná energie akumulátorů velmi rychle klesá s jejich klesající kapacitou. Z hlediska životnosti jsou zase výhodnější superkapacitory, kdy jejich nízkou měrnou energii můžeme navýšit přebíjením na ještě bezpečnou mez koncového napětí, za cenu zrychleného stárnutí.

3 Testy vybraných akumulátorů a superkapacitorů

Podle povahy celé dané aplikace je zřejmé, že je nutné provádět na všech typech zásobníků energie hlavně dlouhodobá měření. Jak již bylo dříve zmíněno, pikosatelit obletí zemi během jednoho roku přibližně 5500 krát, tedy proběhne během jednoho roku stejný počet nabíjecích a vybíjecích cyklů. Je tedy nutné, aby měřicí pracoviště bylo schopno pracovat dlouhodobě spolehlivě bez nutnosti zásahů obsluhy, aby mohla dlouhodobá měření probíhat kontinuálně a co nejrychleji. Měřicí hardware i software je tedy použit takový, aby tyto podmínky byly splněny.

3.1 Měřicí pracoviště

Na obrázku 3.1 je uvedeno zjednodušené blokové schéma testeru včetně vyznačených bodů měření. Základem testeru je laboratorní zdroj s nastavitelným proudovým i napěťovým omezením. Díky tomu je možno nabíjet konstantním proudem, nebo například nabíjet konstantním proudem do určité hodnoty napětí a poté začít proud snižovat. Zkoušené zásobníky energie jsou pak vybíjeny do odporové zátěže umístěné na chladiči.



Obr. 3.1 Zjednodušené schéma testeru – převzato z [13]

Připojení testovaného objektu ke zdroji nebo k zátěži je realizováno tranzistorovými přepínači. Celé měření je pak řízeno aplikací v programu Simulink a přes měřicí kartu od firmy National Instruments. Měřicí karta přes své analogové vstupy snímá napětí na měřeném objektu, napětí na pevně daném známém odporu R_s , které je pak vyjádřeno jako nabíjecí a vybíjecí proud. Aplikace v Simulinku pak podle těchto změřených napětí rozhoduje o tom, zda má docházet k nabíjení nebo k vybíjení a mezi těmito stavy po dosažení stanovených podmínek přepínat.

3.1.1 Testovací hardware

Základem celého testovacího hardware je zdroj konstantního proudu. Je použit zdroj PSM 3/5A, který má dva plynule regulovatelné výstupy, proudově v rozmezí 0-5 A, a napěťově v rozmezí 0-30 V. Dále má tento zdroj jeden pevný výstup 5V, 0-1 A. Regulovatelnými výstupy v režimu proudového omezení je pak energie ze zdroje dodávána

přes spínací tranzistor přímo do měřeného akumulátoru (superkapacitoru). Pokud je na zdroji nastaveno znatelně vyšší napětí než na maximální nabíjecí napětí měřené součástky, je po celou dobu nabíjena konstantním proudem, rovnajícím se proudovému omezení. Pokud nastavíme napětí zdroje jen nepatrně vyšší než požadované nabíjecí, je nabíjení dokončeno konstantním napětím. Po přepnutí do režimu vybíjení se začne článek vybíjet do odporové zátěže umístěné na chladiči. Zátěž je složena vždy ze sérioparalelního řazení odporů 1Ω , s výkonovou zatížitelností 10 W. Měřené veličiny jsou snímány měřicí kartou National Instruments USB 6009. Karta má 8 analogových vstupů (14 bitů, 48 KS/s), dva analogové výstupy (12 bitů, 150 S/s) a 12 digitálních I/O portů. Z digitálních výstupů jsou pak přes optočleny spínány tranzistory přepínající mezi nabíjením a vybíjením [13].

3.1.2 Testovací software

Jak již bylo dříve uvedeno, aplikace pro řízení celého testování je vytvořena v Matlabu/Simulinku. Hlavním úkolem této aplikace je komunikovat s měřicí kartou, zapisovat naměřené hodnoty a na jejich základě rozhodovat o provedených akcích. Celý měřicí skript je uveden v příloze. Veličiny jsou měřeny 5x za 1 s. Je možné sledovat v reálném čase na monitoru průběhy všech měřených veličin. Záznamy jsou ukládány do datových souborů a pro jejich zpracování a další výpočty parametrů zásobníků energie je napsán další skript v Matlabu. Veškeré výpočty parametrů jsou ve skriptu napsány podle rovnic uvedených v další kapitole.

3.2 Měřené a počítané veličiny

Měřicí kartou jsou snímána dvě napětí, viz obrázek 3.1. Z těchto napětí a znalosti přesných časů, kdy byly tyto vzorky napětí odebrány, pak lze dopočítat všechny potřebné veličiny. Samozřejmě, že základními veličinami jsou napětí na akumulátoru (superkapacitoru), které se měří přímo a proud dodávaný nebo odebíraný akumulátorem (superkapacitorem). Proud se vypočítává z jednoduchého úbytku napětí na známém odporu R_s .

3.2.1 Energie

Množství energie, kterou je akumulátor (superkapacitor) schopen dodat do zátěže, je základním parametrem pro následná porovnávání. Výpočet probíhá stejně u akumulátorů i superkapacitorů. Množství odebrané energie je počítáno ze vztahu:

$$W_{out} = T_S \cdot \sum_{k=t_2}^{t_3} U(k) \cdot I_{vyb}(k) \quad (3)$$

A množství dodané energie je počítáno podle vztahu:

$$W_{in} = T_S \cdot \sum_{k=t_1}^{t_2} U(k) \cdot I_{nab}(k) \quad (4)$$

Kde:	$I_{nab/vyb}$	nabíjecí/vybíjecí proud [A]
	U	napětí na článku v čase odebrání vzorku [V]
	T_s	vzorkovací perioda [s]
	t_1 až t_2	časový interval nabíjení [s]
	t_2 až t_3	časový interval vybíjení [s]

Z těchto hodnot energie můžeme zjistit, jaká je účinnost přečerpávání energie podle vztahu:

$$\eta_w = \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (5)$$

Účinnost přečerpávání energie do jisté míry udává kvalitu článku, protože závisí hlavně na jeho vnitřní impedanci a také na velikosti samovybíjení.

Pro lepší srovnání akumulátorů a superkapacitorů je v práci použito také normování hmotností pro získání měrné energie.

$$W_{norm} = \frac{W_{out}}{m} \quad (6)$$

Kde: m je hmotnost akumulátoru (superkapacitoru) [kg]

3.2.2 Účinnost uskladnění náboje

Dalším ukazatelem kvality článku je účinnost uskladnění náboje a s ní související samovybíjení. Účinnost uskladnění náboje se vypočítá jako poměr odčerpaného a uskladněného náboje během jednoho nabíjecího cyklu.

Množství odčerpaného náboje se vypočítá dle vztahu:

$$Q_{out} = T_S \cdot \sum_{k=t_2}^{t_3} I_{vyb}(k) \quad (7)$$

A množství uskladněného náboje dle vztahu:

$$Q_{in} = T_s \cdot \sum_{k=t_1}^{t_2} I_{nab}(k) \quad (8)$$

Kde:	$I_{nab/vyb}$	nabíjecí/vybíjecí proud [A]
	T_s	vzorkovací perioda [s]
	t_1 až t_2	časový interval nabíjení [s]
	t_2 až t_3	časový interval vybíjení [s]

Účinnost přečerpávání náboje se pak vypočítá dle vztahu:

$$\eta_Q = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (9)$$

Z množství uskladněného a odčerpaného náboje lze pak také snadno spočítat průměrný samovybíjecí proud během jednoho cyklu:

$$I_{sam} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{T} \quad (10)$$

Kde:	$Q_{in/out}$	uskladněný/odčerpaný náboj [A]
	T	doba trvání jednoho nabíjecího cyklu [s]

3.2.3 Kapacita superkapacitoru

Kapacita je u superkapacitorů hlavní udávanou, a nejvíce zdůrazňovanou vlastností. Její výpočet vychází ze vztahů pro klasické kondenzátory. Pokud by se superkapacitor vybíjel do nulového napětí, vztah by se zjednodušil. To by ale neodpovídalo reálným podmínkám, kdy k úplnému vybití nedochází vlivem reálných vlastností spínaných měničů. Výpočet kapacity vychází z vypočítané výstupní energie.

$$W_{out} = \frac{1}{2} C \cdot U_h^2 - \frac{1}{2} C \cdot U_d^2 \quad (11)$$

Kde:	W_{out}	výstupní energie [Wh]
	C	kapacita superkapacitoru [F]
	U_h	horní mez nabíjecího napětí [V]
	U_d	dolní mez vybíjecího napětí [V]

Úpravou lze tedy vyjádřit kapacitu:

$$C = \frac{2W_{out}}{U_h^2 - U_d^2} \quad (12)$$

Zajímavým jevem je u superkapacitorů fakt, že jejich kapacita je závislá na napětí. To znamená, že pokud je superkapacitor nabíjen konstantním proudem, dochází k nelineárnímu nárůstu napětí [5].

3.2.4 Kapacita akumulátoru

Kapacita akumulátoru má fyzikálně jinou podstatu, než kapacita kondenzátoru. Udává, jaký náboj je zdroj schopen dlouhodobě dodávat, rozměrově bývá udáván v Ah. Její výpočet se provádí ze známého proudu a známého času vybíjení.

$$C_{Ah} = \frac{\sum_{k=0}^N I_{vyb}(k)}{N} \cdot t \quad (13)$$

Kde	C_{Ah}	kapacita akumulátoru [Ah]
	I_{vyb}	výstupní proud [A]
	N	počet vzorků odebraných během vybíjení [-]
	t	čas vybíjení [s]

Při vybíjení do konstantní zátěže s klesajícím napětím samozřejmě klesá proud. Je tedy pro výpočet nutné vypočítat střední hodnotu proudu. Naměřená kapacita slouží jako veličina pro pozorování její změny v průběhu přibývajících cyklů, ale také pro ověření, zda se kapacita akumulátoru shoduje s hodnotou udávanou výrobcem.

3.2.5 Vnitřní impedance

Vnitřní impedance je svázána se zatěžovací charakteristikou. Závisí na ní pokles napětí při zvýšení odběru proudu. U nových akumulátorů i superkapacitorů je tato veličina poměrně nízká. Časem a stárnutím parametrů nebo nějakým pro článek šokovým stavem však nabývá na hodnotě. Vnitřní impedanci superkapacitoru je možné vyjádřit z napětíového skoku na jeho svorkách při okamžitém přepnutí z nabíjení do vybíjení. Napětíový skok je dán úbytkem napětí právě na vnitřní impedanci při změně směru proudu, kterým je superkapacitor nabíjen nebo vybíjen [13].

Vnitřní odpor se vypočítá podle vztahu:


$$R_i = \frac{U_h - U_d}{I_{nab} - I_{vyb}} \quad (14)$$

Kde:	R_i	vnitřní impedance [Ω]
	U_h	napětí při ukončení nabíjení [V]
	U_d	napětí při zahájení vybíjení [V]
	$I_{nab/vyb}$	nabíjecí / vybíjecí proud [A]


3.3 Akumulátory a superkapacitory pro testy

Pro testování bylo vybráno několik vzorků, které velikostně připadají v úvahu pro použití v 1U pikosatelitu Cubesat. Ze superkapacitorů to byli zástupci obou technologií, tedy EDLC superkapacitory Maxwell a pseudokapacitory Nesscap. Z akumulátorů to pak bylo několik vzorků od různých výrobců. Lithium-iontové akumulátory byly testovány od firem Sanyo, Samsung, A123, Maxell, Sony a Molicel. Dále byly pro testy použity dva akumulátory Lithium-fosfátové od firmy A123.


Tab. 3.1 Základní udávané vlastnosti Nesscap PseudoCap

Kapacita	300 F	
Uložená energie	0,22 Wh	
Měrná energie	8,73 Wh/kg	
Objem	17,1 cm ³	
Hmotnost	25,2 g	
Maximální napětí	2,3 V	


Tab. 3.2 Základní udávané vlastnosti Maxwell BCAP0350

Kapacita	350 F	
Uložená energie	0,35 Wh	
Měrná energie	4,6 Wh/kg	
Objem	53,2 cm ³	
Hmotnost	76,1 g	
Maximální napětí	2,7 V	


Tab. 3.3 Základní udávané vlastnosti Sanyo 2300 mAh UR 18650 Li-ion

Kapacita	2300 mAh	
Uložená energie	8,4 Wh	
Měrná energie	191 Wh/kg	
Objem	16,5 cm ³	
Hmotnost	44 g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2,5 V	


Tab. 3.4 Základní udávané vlastnosti A123 2300 mAh ANR26650 Li-ion

Kapacita	2300 mAh	
Uložená energie	7,5 Wh (dopočítáno)	
Měrná energie	107 Wh/kg (dopočítáno)	
Objem	35,3 cm ³	
Hmotnost	70 g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2 V	


Tab. 3.5 Základní udávané vlastnosti Samsung 2600 mAh ICR18650 Li-ion

Kapacita	2600 mAh	
Uložená energie	9,3 Wh	
Měrná energie	215 Wh/kg	
Objem	16,5 cm ³	
Hmotnost	43,5 g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2,75 V	


Tab. 3.6 Základní udávané vlastnosti Samsung 2200 mAh ICR18650 Li-ion

Kapacita	2200 mAh	
Uložená energie	8,4 Wh	
Měrná energie	191 Wh/kg	
Objem	16,5 cm ³	
Hmotnost	44,5 g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2,75 V	


Tab. 3.7 Základní udávané vlastnosti Maxell 1500 mAh UR18650W Li-ion

Kapacita	1500 mAh	
Uložená energie	5,5 Wh (dopočítáno)	
Měrná energie	123 Wh/kg (dopočítáno)	
Objem	16,5 cm ³	
Hmotnost	44,5 g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2,75 V	


Tab. 3.8 Základní udávané vlastnosti A123 1500 mAh ANR26650 LiFePo₄

Kapacita	1500 mAh	
Uložená energie	4,95 Wh (dopočítáno)	
Měrná energie	60 Wh/kg (dopočítáno)	
Objem	35,3 cm ³	
Hmotnost	85 g	
Maximální napětí	3,8 V	
Minimální napětí	2,0 V	


Tab. 3.9 Základní udávané vlastnosti Molicel IBR26700A 2.8Ah-EV Li-ion

Kapacita	2800 mAh	
Uložená energie	10Wh	
Měrná energie	100Wh/kg	
Objem	37,1 cm ³	
Hmotnost	100g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2,5 V	


Tab. 3.10 Základní udávané vlastnosti A123 2.5Ah ANR26650LiFePo₄

Kapacita	2500 mAh	
Uložená energie	8,25 Wh (dopočítáno)	
Měrná energie	109 Wh/kg (dopočítáno)	
Objem	35,3 cm ³	
Hmotnost	76g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	1,6 V	

Tab. 3.11 Základní udávané vlastnosti Sony 1.1Ah UR18650 Li-ion

Kapacita	1100 mAh	
Uložená energie	3,8 Wh	
Měrná energie	95 Wh/kg	
Objem	16,5 cm ³	
Hmotnost	40g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2,5 V	

Tab. 3.12 Základní udávané vlastnosti Sanyo 1.1Ah UR18650 Li-ion

Kapacita	1100 mAh	
Uložená energie	3,9 Wh (dopočítáno)	
Měrná energie	79 Wh/kg(dopočítáno)	
Objem	16,5 cm ³	
Hmotnost	50g	
Maximální napětí	4,2 V	
Minimální napětí	2,5 V	

Údaje v tabulkách byly převzaty z technických zpráv jednotlivých akumulátorů (superkapacitorů).

3.4 Koncepce testů a jejich parametry

Hlavním cílem veškerých testů bylo zjistit, jakým způsobem a jakou rychlostí stárnou všechny důležité parametry akumulátorů a superkapacitorů v závislosti na přibývajících nabíjecích a vybíjecích cyklech, ale také na způsobu jejich používání.

Testy pro akumulátory a superkapacitory budou koncipovány odlišně. U superkapacitorů, které mají malou měrnou energii, půjde o cyklování s odčerpáním maxima uložené energie (s uvažováním minimálního prahového napětí), protože samostatně nestačí k pokrytí veškerých energetických nároků pikosatelitu a také na orbitě bude docházet k jejich téměř úplnému vybití. Cílem testu je stanovit, který superkapacitor a s jakou úrovní přebíjení bude poskytovat největší využitelnou zásobu energie po počtu cyklů odpovídajícím tříletému provozu na orbitě. U akumulátorů s vysokou měrnou energií, které jsou schopny plně pokrýt energetické nároky během letu ve stínu, bude při cyklování u všech vzorků odebrána stejná energie s dostatečnou rezervou odpovídající spotřebě systémů během letu ve stínu. Jednotlivé akumulátory tak budou cyklovány s různě hlubokým vybitím podle jejich nominální kapacity. Cílem testu je vybrat takový akumulátor, který bude mít předpokládané parametry (vnitřní odpor, zbývající kapacitu) po dosažení počtu cyklů odpovídající třem letům provozu na orbitě nejlepší, při zvážení jejich hmotnosti a rozměrů.

Jako první byly testovány superkapacitory Nesscap. Vzhledem k tomu, že o testování těchto superkapacitorů nejsou dostupné žádné údaje, bylo nejprve nutné zjistit, jaký vliv na stárnutí vlastností má volba zrychlení časového měřítka testů oproti reálnému stavu na orbitě. Pro co nejrychlejší otestování vzorků je ideální, nemá-li zrychlení testů na degradaci parametrů žádný vliv. Pokud by bylo nutné vzorky cyklovat stejnou rychlostí, jako budou v pikosatelitu používány, byla by měření značně pomalá a nebylo by možné v rozumném časovém horizontu otestovat větší množství vzorků. Nejprve byla tedy otestována závislost rychlosti cyklování na stárnutí parametrů při nabíjení na jmenovité nabíjecí napětí a vybíjení na jeho polovinu. Rychlosti nabíjení a vybíjení jsou samozřejmě úměrné nabíjecím a vybíjecím proudům.

Nabíjecí a vybíjecí proudy lze vypočítat podle vzorce:

$$I_{nab/vyb} = \frac{C \cdot (U_h - U_d)}{t_{nab/vyb}} \quad (10)$$

Kde:	C	kapacita superkapacitoru [F]
	U_h/d_d	horní mez nabíjecího/dolní mez vybíjecího napětí [V]
	$I_{nab/vyb}$	nabíjecí, vybíjecí proud [A]
	$t_{nab/vyb}$	nabíjecí, vybíjecí čas [s]

Vybíjecí proud je závislý na zátěži, do které se superkapacitor vybíjí. Je jasné, že proud není po celou dobu vybíjení konstantní a je úměrný poklesu napětí. Přibližný odpor

zátěže se poté vypočítá:

$$R_{vyb} = \frac{U_h + U_d}{2 I_{vyb}} \quad (11)$$

Kde: R_{vyb} vybíjecí odpor [Ω]
 $U_{h/d}$ horní mez nabíjecího/dolní mez vybíjecího napětí [V]
 I_{vyb} průměrný vybíjecí proud [A]

Pro otestování rychlostí nabíjení byly použity dva superkapacitory a zrychlení nabíjení i vybíjení zvoleno 5 krát a 20 krát oproti skutečným časovým poměrům na orbitě, kde trvá 60 minut nabíjení, 35 minut vybíjení.

Tab. 3.13 Parametry cyklování při různých rychlostech, Nesscap

	t_{nab} [s]	t_{vyb} [s]	I_{nab} [A]	I_{vyb} [A]	R_{vyb} [Ω]	U_h [V]	U_d [V]
5 krát zrychl.	720	360	0,53	1,5	1,64	2,3	1,15
20 krát zrych.	180	90	2,11	4,22	0,41	2,3	1,15

Na základě těchto měření bylo rozhodnuto, že se musí pseudokapacitory Nesscap měřit bez zrychlení testů, protože velikost proudů má značný vliv na dlouhodobé parametry. U superkapacitorů Maxwell rychlost cyklování nemá vliv, je tedy možné použít časovou kompresi testů. Jak již bylo dříve uvedeno, u superkapacitorů je možné zvýšit jejich měrnou energii mírným přebíjením. Byl tedy testován vliv různých hodnot přebíjení na dlouhodobé parametry. Přebíjení bylo zvoleno na 110 %, 115 % a 120 % nominálního napětí. Parametry cyklování pak byly následující:

Tab. 3.14 Parametry cyklování při různých úrovních přebíjení Nesscap

	t_{nab} [s]	t_{vyb} [s]	I_{nab} [A]	I_{vyb} [A]	R_{vyb} [Ω]	U_h [V]	U_d [V]
100% U_{max}	3600	1800	0,10	0,19	9,00	2,30	1,15
110% U_{max}	3600	1800	0,12	0,23	8,00	2,53	1,15
115% U_{max}	3600	1800	0,12	0,25	7,62	2,65	1,15
120% U_{max}	3600	1800	0,13	0,27	7,29	2,76	1,15

Tab. 3.15 Parametry cyklování při různých úrovních přebíjení Maxwell

	t_{nab} [s]	t_{vyb} [s]	I_{nab} [A]	I_{vyb} [A]	R_{vyb} [Ω]	U_h [V]	U_d [V]
100% U_{max}	180	90	2,63	5,25	0,39	2,70	1,35
110% U_{max}	180	90	3,15	6,30	0,34	2,97	1,35
115% U_{max}	180	90	3,41	6,83	0,33	3,11	1,35
120% U_{max}	180	90	3,68	7,35	0,31	3,24	1,35

U akumulátorů je problematika testování odlišná. Bylo stanoveno, že pro účely testování se bude z akumulátoru odčerpávat energie 1 Wh. To vychází z doby obletu země ve stínu – 35 minut a průměrného odběru pikosatelitu – 2,25 W. Během obletu ve stínu je tedy ze zásobníků odebráno přibližně 1,3 Wh energie a vzhledem k plánovanému použití dvou akumulátorů musí každý dodat z tohoto množství polovinu. Měření byla tedy prováděna pro horší energetické podmínky, než jsou v pikosatelitu plánované. Aby bylo možné zjistit aktuální stav akumulátoru, je nutné jej také úplně vybit. Úplné vybití znamená v tomto případě do minimálního bezpečného napětí stanoveného výrobcem. Pro testování tedy bylo zvoleno měřítko 20:1, tedy 20 mělkých cyklů (odčerpání 1 Wh energie) a jeden cyklus hlubokého vybití, kdy je odčerpána všechna energie a zjištěna aktuální kapacita akumulátoru.

Tab. 3.16 Parametry cyklování jednotlivých akumulátorů

	t_{nab} [s]	t_{vyb} [s]	I_{nab} [A]	I_{vyb} [A]	R_{vyb} [Ω]	U_h [V]	Hloubka vybití [%]
Sanyo 2300 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	4,18	11,9
A123 2300 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	3,70	13,2
Samsung 2600 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	4,18	10,5
Samsung 2200 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	4,18	12,4
Maxell 1500 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	4,18	18,2
A123 1500 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	3,70	20,2
Sony 1100 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	4,18	24,8
A123 2500 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	3,70	12,1
Sanyo 1100 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	4,18	24,8
Molicell 2800 mAh	720	360	1,35	2,70	1,37	4,18	9,8

Stejně jako u superkapacitorů, je u těchto testů také nutné vypočítat nabíjecí a vybíjecí proud a také odpor zátěže. U akumulátorů, pokud je dodržena tolerance daná výrobcem, nezáleží životnost na rychlosti nabíjení. Ovšem je nutné používat proudy nižší, než jsou uvedeny v katalogových hodnotách. Aby se tedy proudy držely v přijatelných mezích, zrychlení při testech bylo zvoleno 5x. Během sedmiminutového vybíjení se odebere energie 1 Wh, tedy průměrný výkon odebíraný při jednom cyklu je asi 8,5 W. Vybíjecí proud se potom vypočítá:

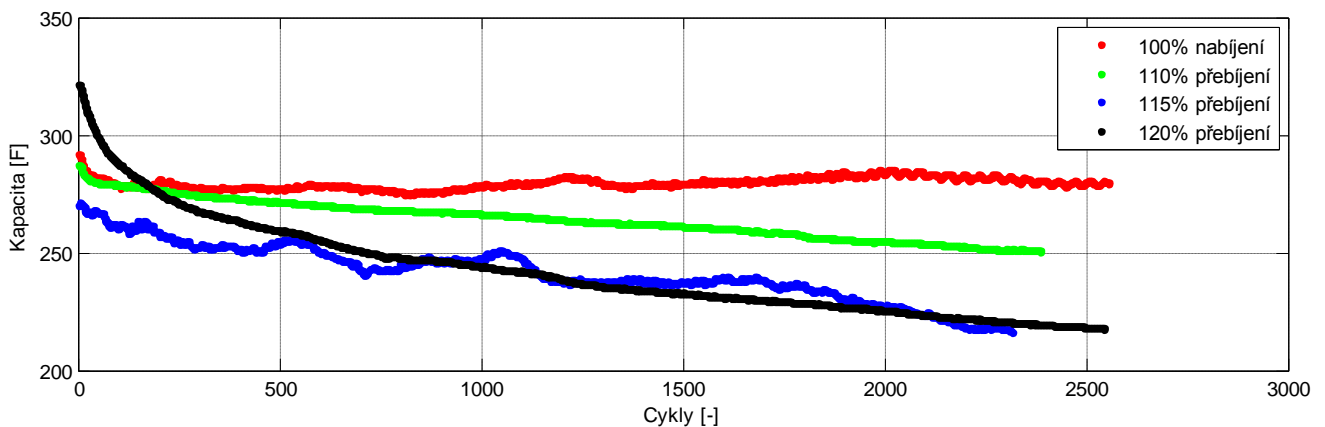
$$I_{vyb} = \frac{P_{vyb}}{U} \quad (12)$$

kde I_{vyb} průměrný vybíjecí proud [A]
 P_{vyb} průměrný odebíraný výkon po dobu vybíjení [W]
 U jmenovité napětí akumulátoru [V]

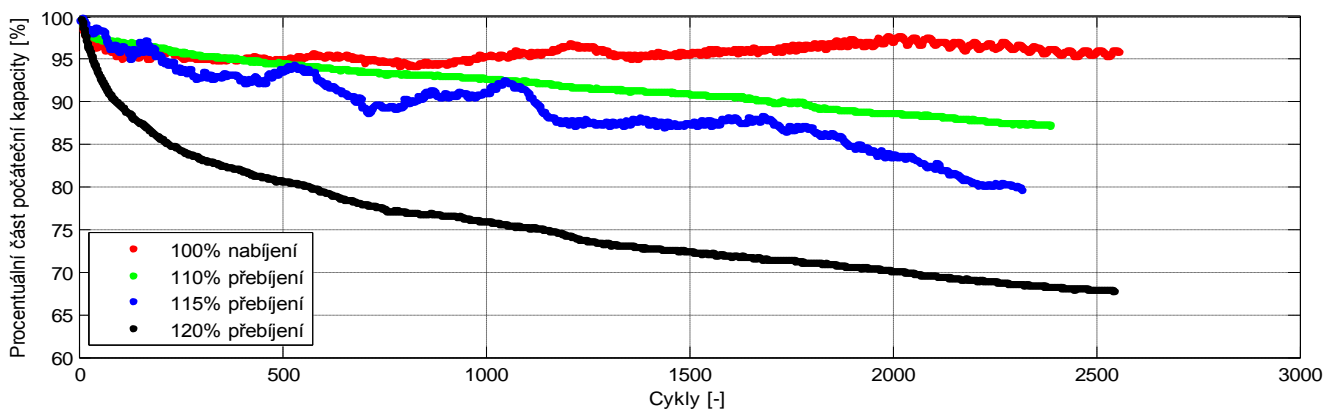
Nabíjecí proud pak lze brát jako polovinu vybíjecího, pokud chceme zachovat poměr času vybíjení a nabíjení, jako je na nízkých oběžných drahách. Podle Ohmova zákona lze snadno spočítat odpor zátěže. Parametry testů akumulátorů jsou uvedeny v tabulce 3.16. Důležitý údaj je hloubka vybíjení, který udává kolik procent celkové energie uložené v článku se při každém cyklu odčerpá.

3.5 Výsledky testů

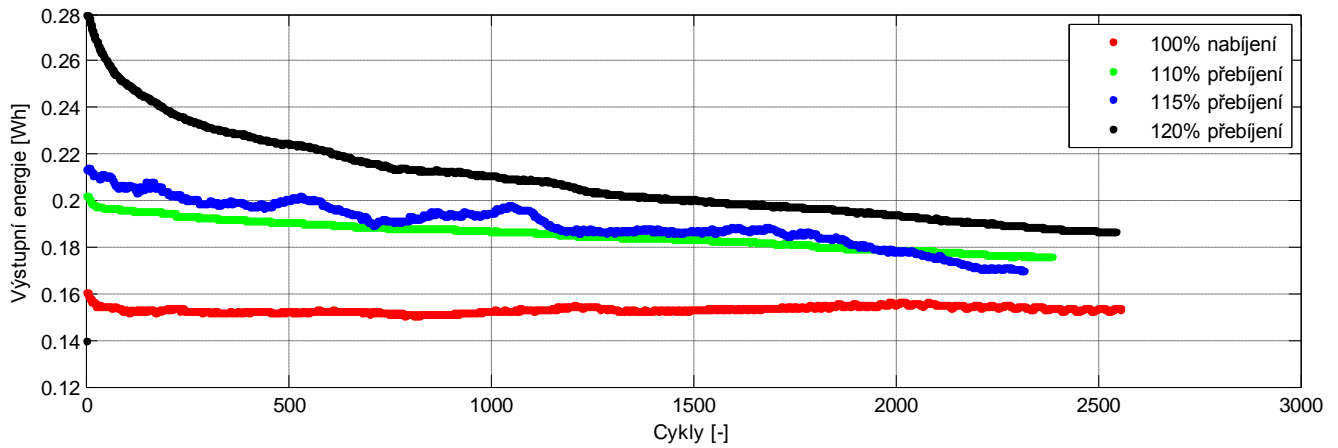
Jako první byly testovány pseudokapacitory Nesscap. U těchto superkapacitorů nebylo možné použít žádnou časovou kompresi testů.



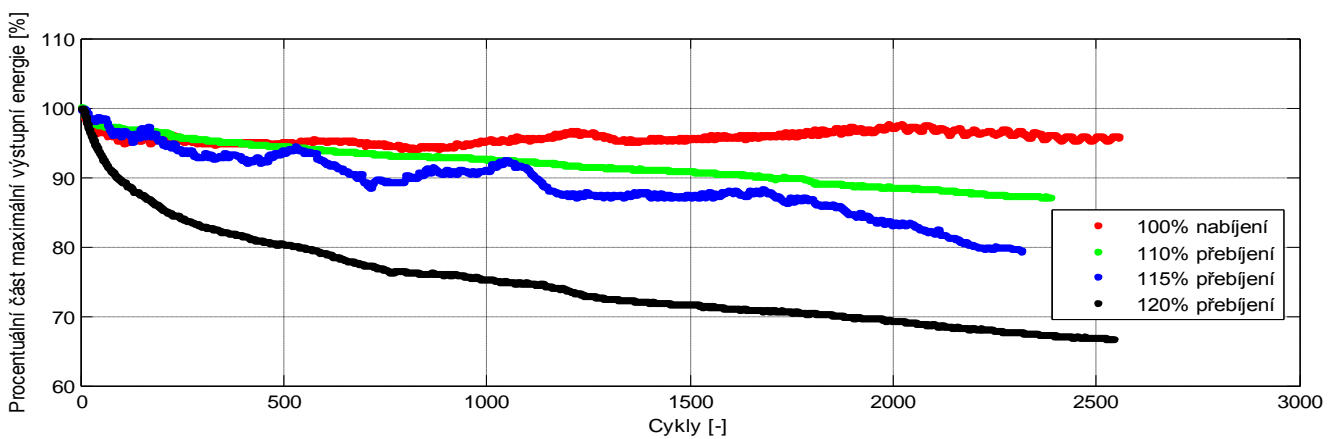
Obr. 3.2 Závislost kapacity na přebíjení pseudokapacitorů Nesscap.



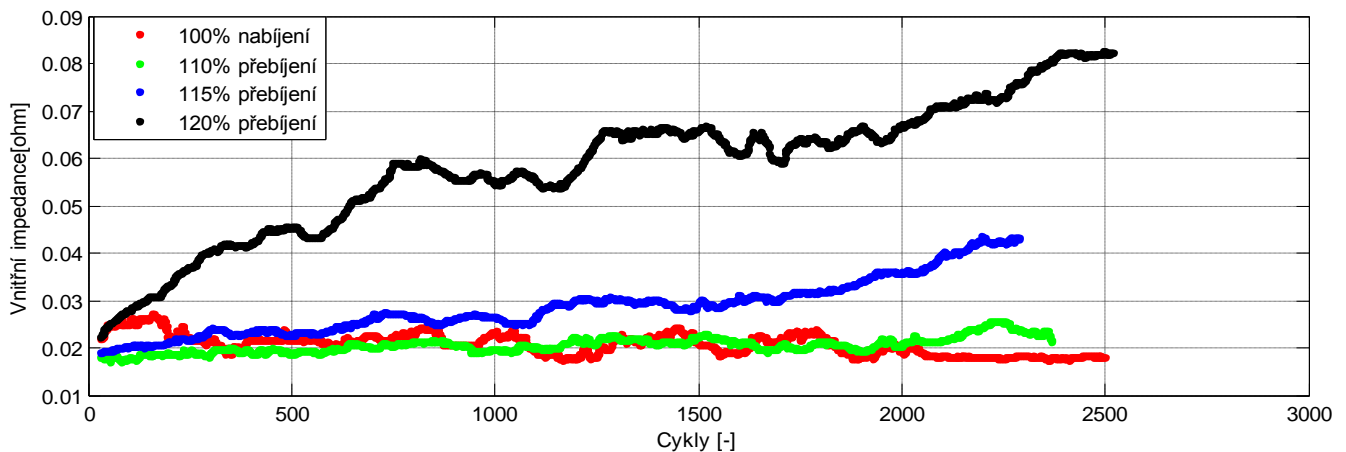
Obr. 3.3 Procentuální závislost kapacity na přebíjení pseudokapacitorů Nesscap.



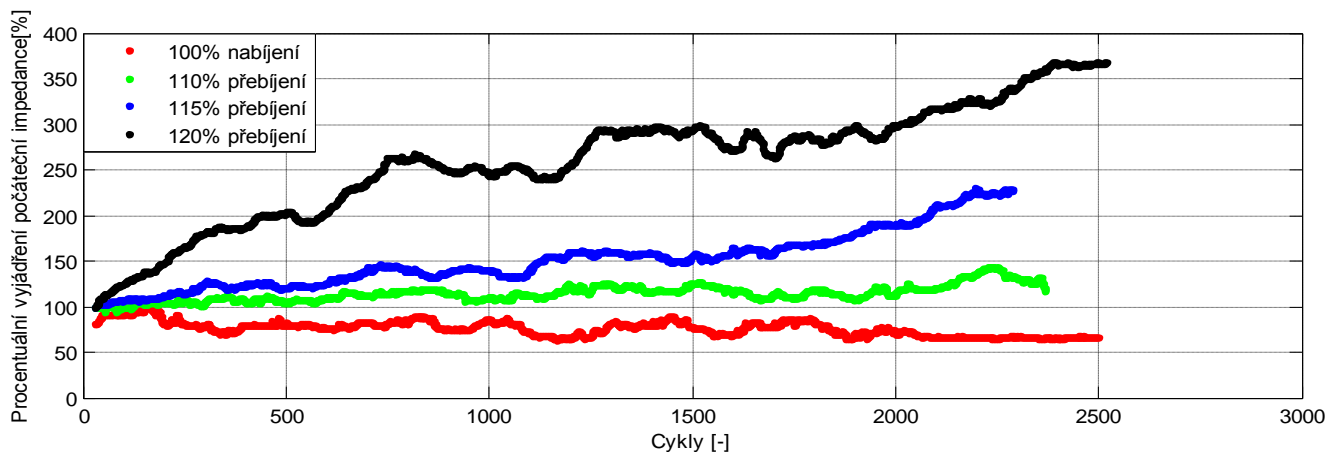
Obr. 3.4 Závislost výstupní energie na přebíjení pseudokapacitorů Nesscap.



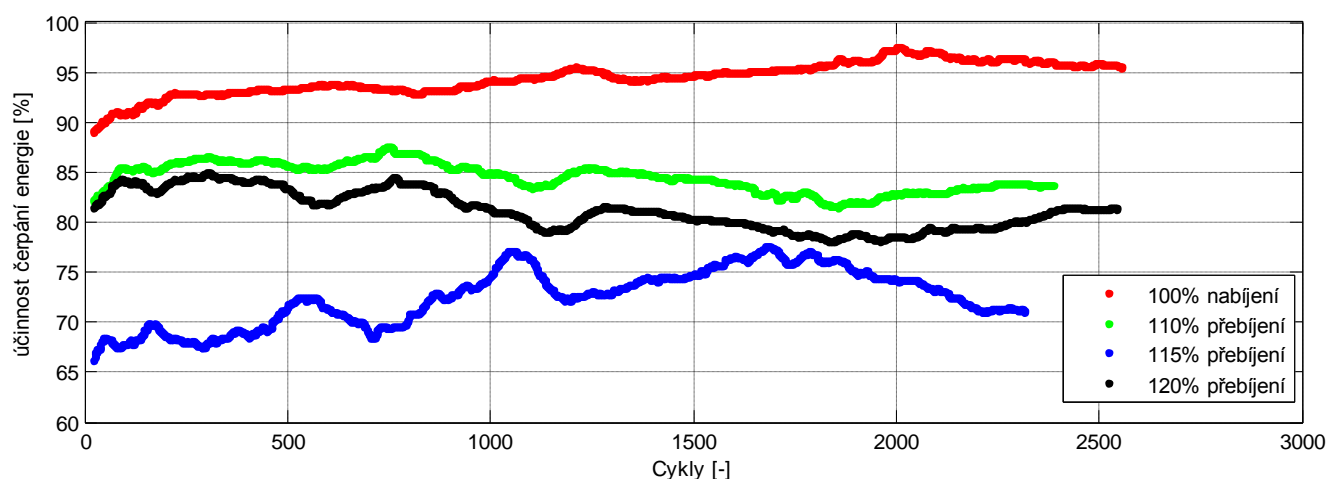
Obr. 3.5 Procentuální závislost výstupní energie na přebíjení pseudokapacitorů Nesscap



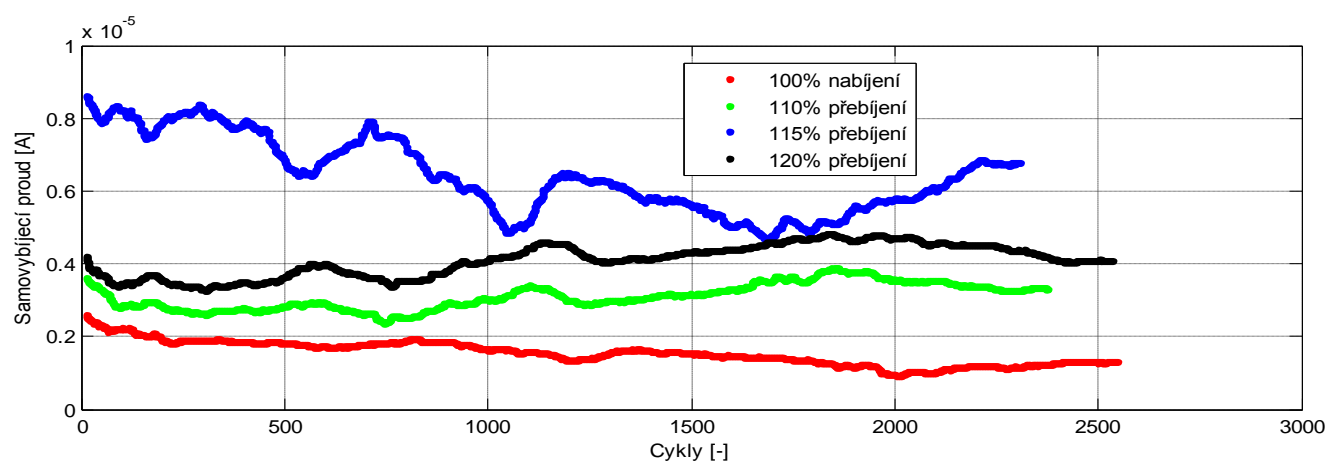
Obr. 3.6 Závislost vnitřní impedance na přebíjení pseudokapacitorů Nesscap



Obr. 3.7 Procentuální závislost vnitřní impedance na přebíjení superkapacitorů Nesscap



Obr. 3.8 Závislost samovybíjení na přebíjení pseudokapacitorů Nesscap

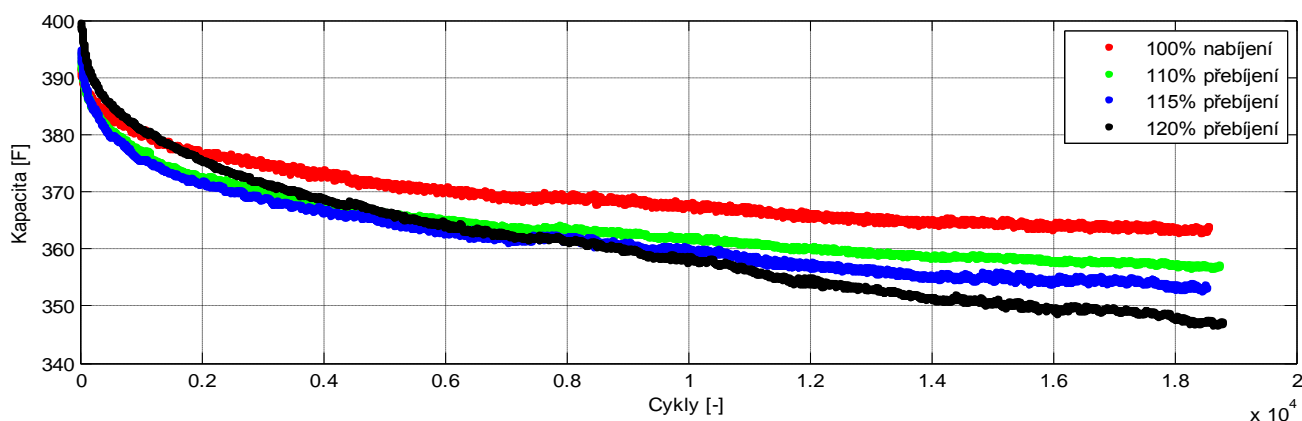


Obr. 3.9 Závislost účinnosti čerpání energie na přebíjení pseudokapacitorů Nesscap

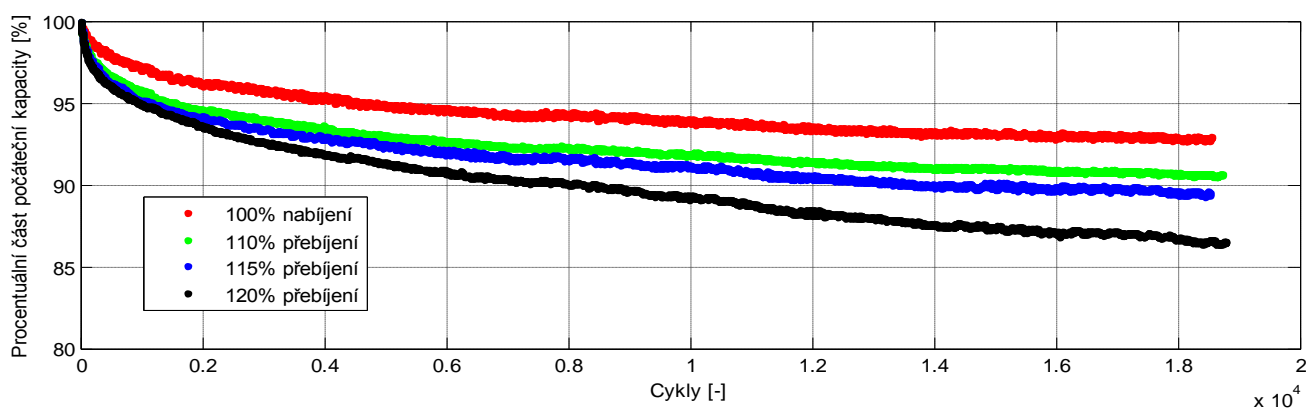
Z obrázku 3.2 je patrné, že technologie výroby pseudokapacitorů není ještě zcela zvládnuta. I přesto, že všechny testované vzorky byly ze stejné výrobní série, měly již na začátku každý jinou kapacitu. Je zřejmé, že nelze u těchto superkapacitorů používat vysoké přebíjení nominálního napětí, protože pak životnost velmi rychle klesá. To je patrné hlavně na

obrázku 3.3. Při 120% přebíjení nominální hodnoty napětí je pseudokapacitor na hranici životnosti (80 % nominální hodnoty kapacity) po přibližně 500 cyklech. Při přebíjení na 115 % nominální hodnoty napětí je životnost asi 2200 cyklů. Naopak při nabíjení na nominální hodnotu napětí kapacita neklesá. Na vnitřní impedanci podle obrázku 3.6 přebíjení má také značný vliv. Při nabíjení na nominální hodnotu napětí se vnitřní impedance drží kolem 20 mΩ, ovšem při 120% přebíjení vzroste během 2500 cyklů přibližně 4 krát. Celková energie uskladněná v pseudokapacitoru při 120% přebíjení nominální hodnoty napětí je přibližně 1,7 krát vyšší oproti nabíjení na katalogovou hodnotu. Měrnou energii lze tedy pro aplikace, kde není potřebná dlouhá životnost, až 1,7 krát zvýšit. Z obrázku 3.7 je patrné, že samovybíjení roste s přebíjením pseudokapacitorů. Zvláštní je pak samovybíjecí proud pseudokapacitoru přebíjeného 115 % nominální hodnoty napětí, který má zřejmě nějakou výrobní vadu a proto je jeho cyklování méně efektivní.

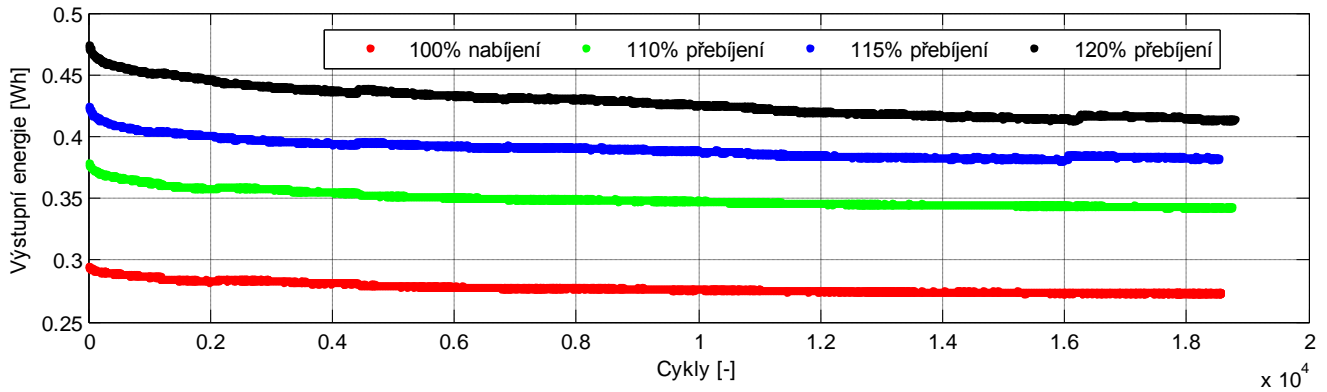
Druhým testovaným zásobníkem energie byly superkapacitory technologie EDLC od firmy Maxwell. U těchto superkapacitorů lze použít časovou kompresi testů a bylo tedy možné změřit vývoj parametrů během velkého množství cyklů.



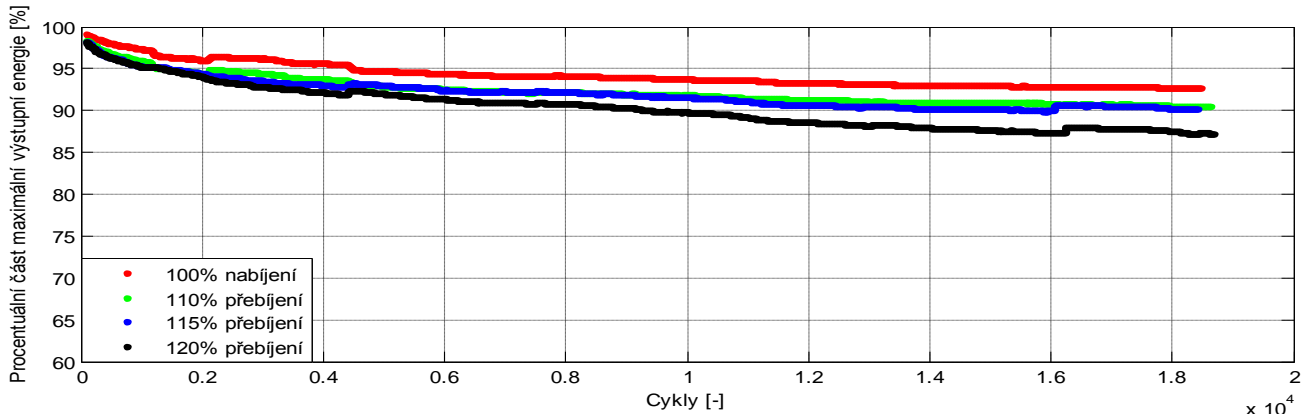
Obr. 3.10 Závislost kapacity na přebíjení superkapacitorů Maxwell.



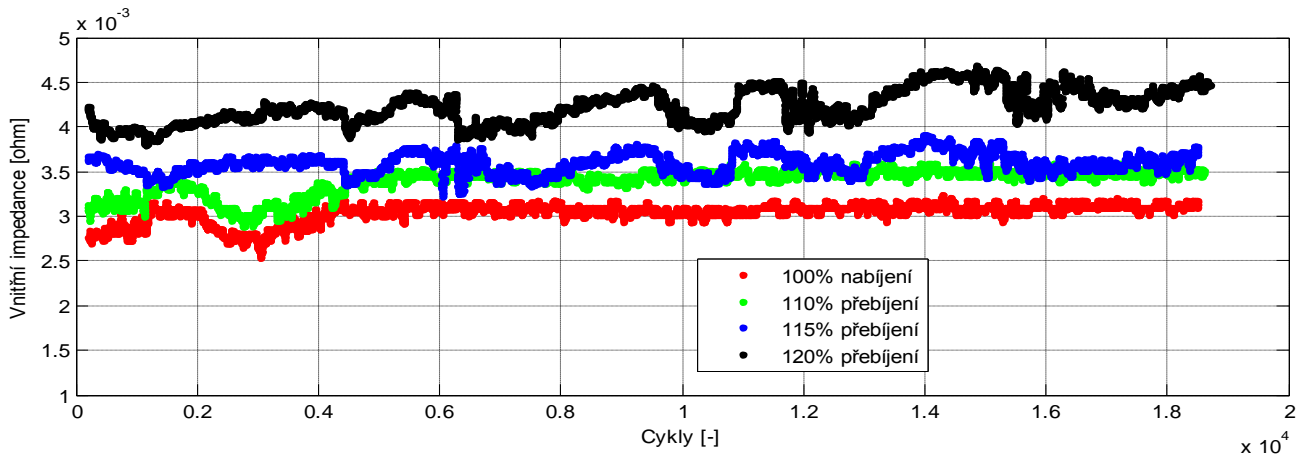
Obr. 3.11 Procentuální závislost kapacity na přebíjení superkapacitorů Maxwell



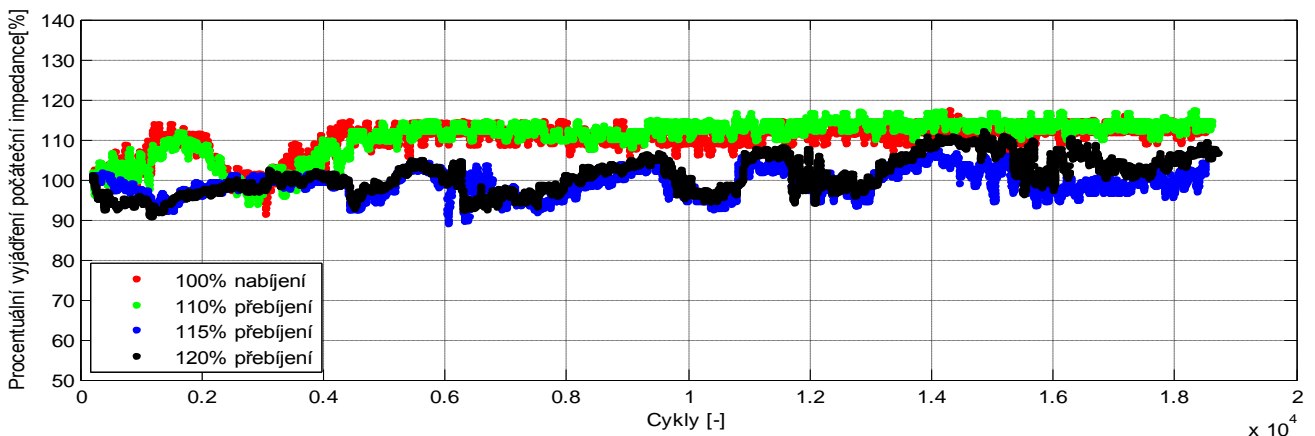
Obr.3.12 Závislost výstupní energie na přebíjení superkapacitorů Maxwell



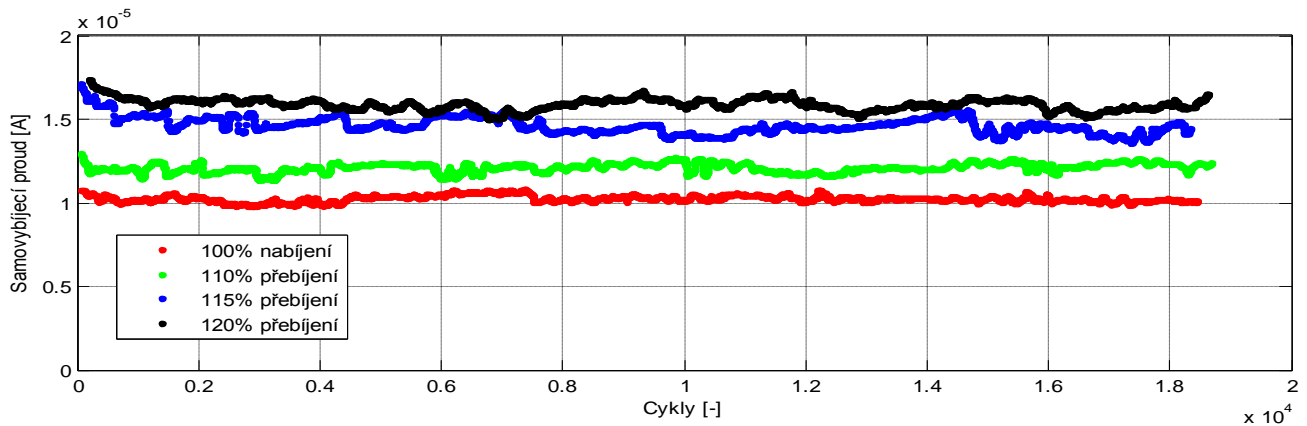
Obr. 3.13 Procentuální závislost výstupní energie na přebíjení superkapacitorů Maxwell



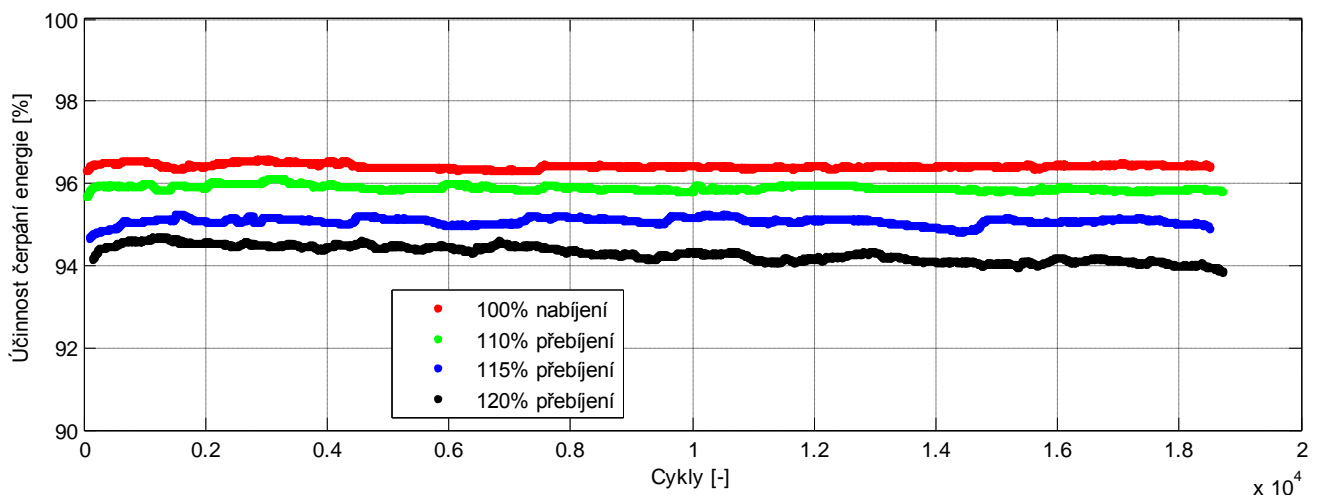
Obr. 3.14 Závislost vnitřní impedance na přebíjení superkapacitorů Maxwell.



Obr. 3.15 Procentuální závislost vnitřní impedance na přebíjení superkapacitorů Maxwell



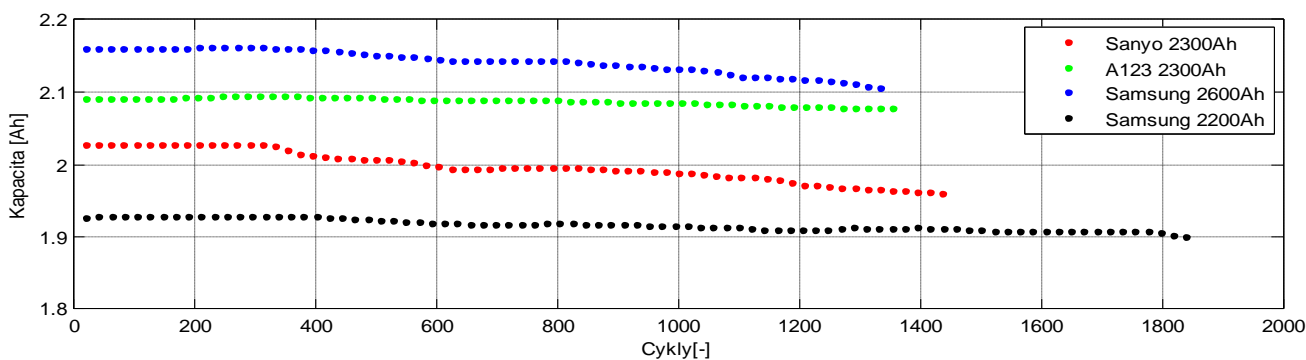
Obr. 3.16 Závislost samovybíjení na přebíjení superkapacitorů Maxwell



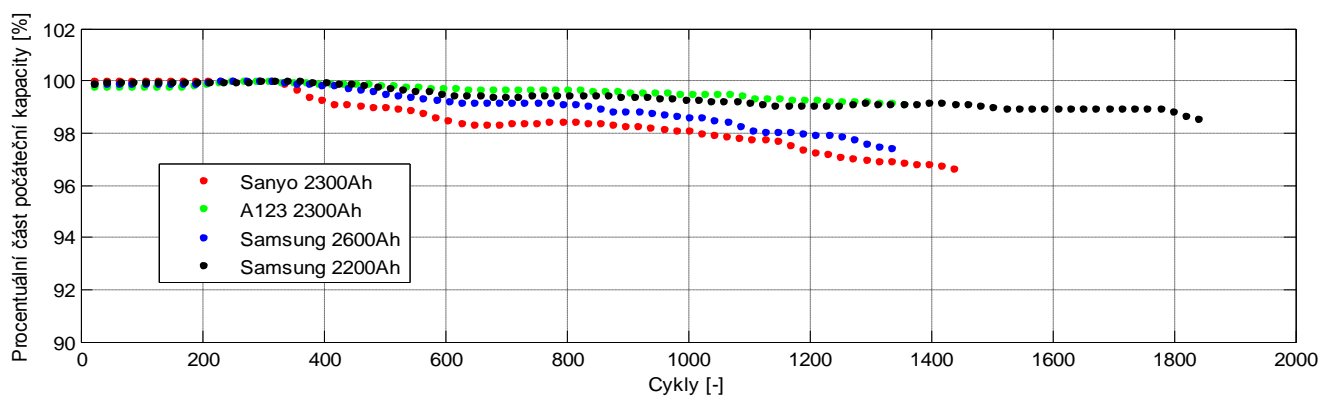
Obr. 3.17 Závislost účinnosti čerpání energie na přebíjení superkapacitorů Maxwell

Podle obrázku 3.10 je zřejmé, že na rozdíl od technologie pseudokapacitorů měly na začátku testů všechny vzorky stejné parametry (hlavně velikost kapacity), která je dokonce vyšší než katalogově udávaných 350 F. Ubývání kapacity se zvyšováním úrovně přebíjení nominálního napětí je velmi nepatrné. To je nejlépe vidět na obrázku 3.11, kde po 18 tisících nabíjecích cyklech je rozdíl kapacity při nabíjení na nominální hodnotu a 120% přebíjení jen asi 5 %. Pro tříletou misi pikosatelitu tedy lze říci, že 120% přebíjení bude velice výhodné. Jak je totiž vidět na obrázku 3.12, při 120% přebíjení se v superkapacitoru uskladní přibližně 0,4 Wh energie, oproti nabíjení na nominální hodnotu napětí, kdy se v superkapacitoru uskladní jen přibližně 0,25 Wh energie. Využití přebíjení nominální hodnoty napětí tedy zvýší efektivitu ukládání energie přibližně 1,6 krát. Vnitřní impedance superkapacitoru se při 100% nabíjení pohybuje kolem 3 m Ω a při 120% přebíjení pak přes 4 m Ω a s přibývajícím počtem nabíjecích cyklů roste pouze nepatrně. Účinnost čerpání energie je vždy přes 94 % a s nižším přebíjením roste, a tedy roste s přebíjením samovybíjecí proud, který se pohybuje přes 10 μ A.

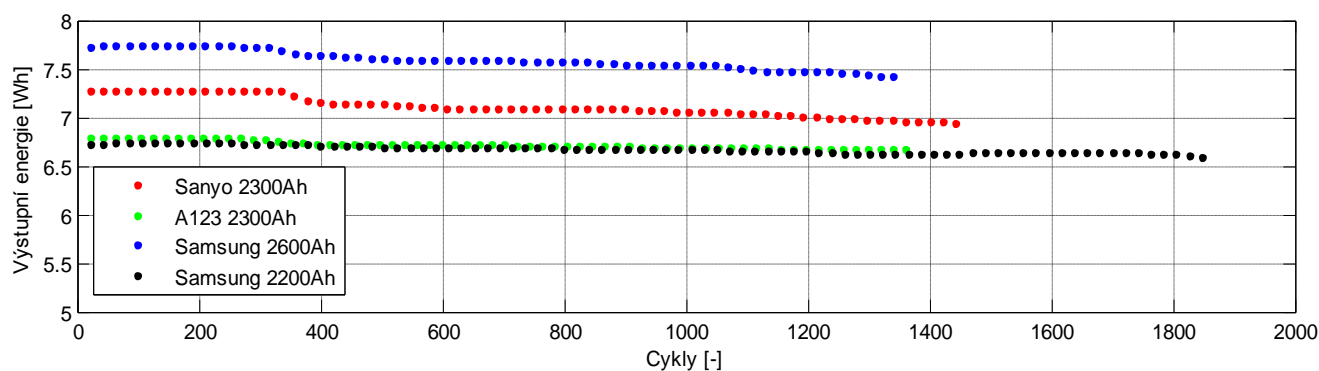
Druhou skupinou testovaných zásobníků energie byly akumulátory. Prvními čtyřmi vzorky testovaných akumulátorů byly: Sanyo 2300 mAh v pouzdře UR18650, A123 2300 mAh v pouzdře ANR26650, Samsung 2600 mAh v pouzdře UR18650 a Samsung 2200 mAh v pouzdře UR18650.



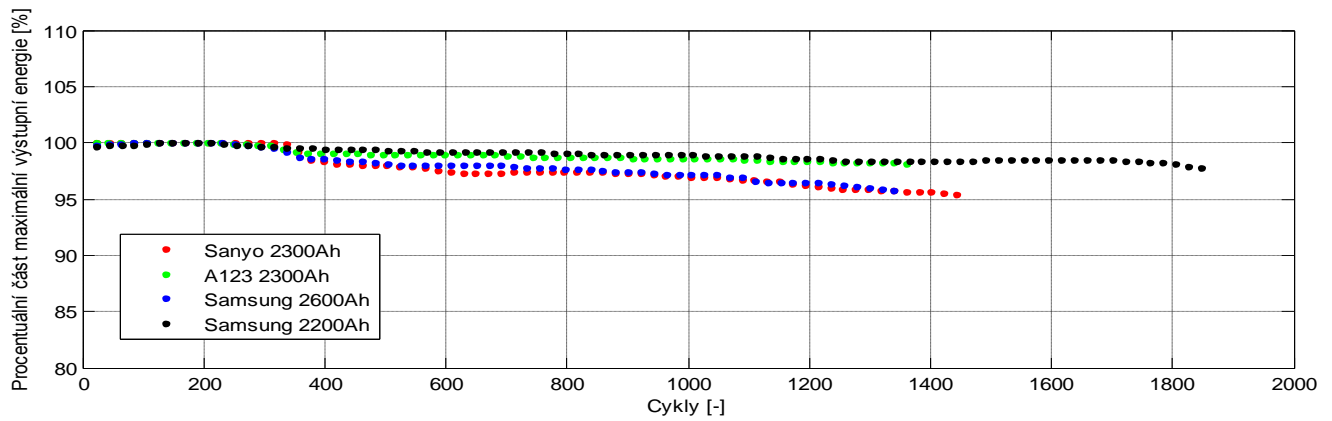
Obr. 3.18 Kapacita akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



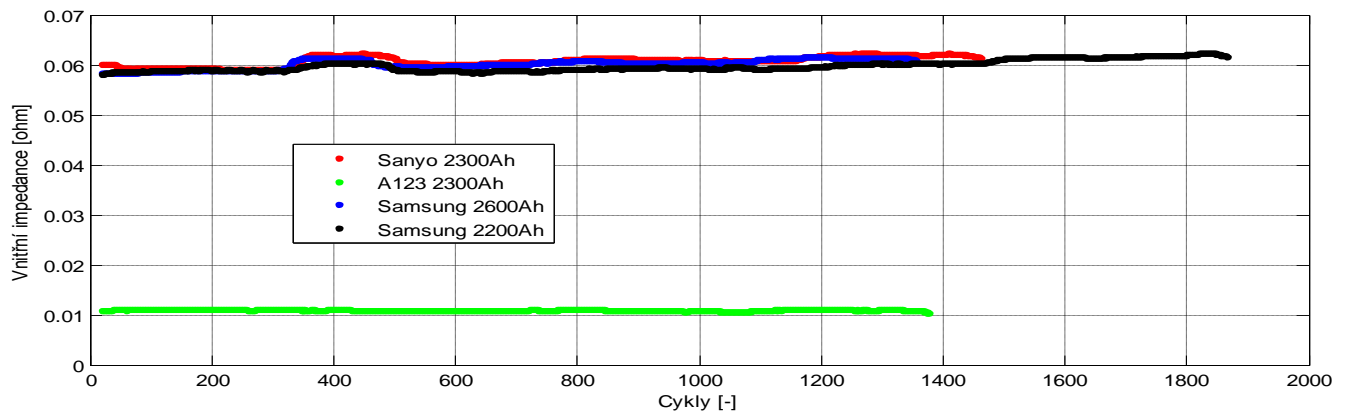
Obr. 3.19 Procentuální závislost kapacity akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



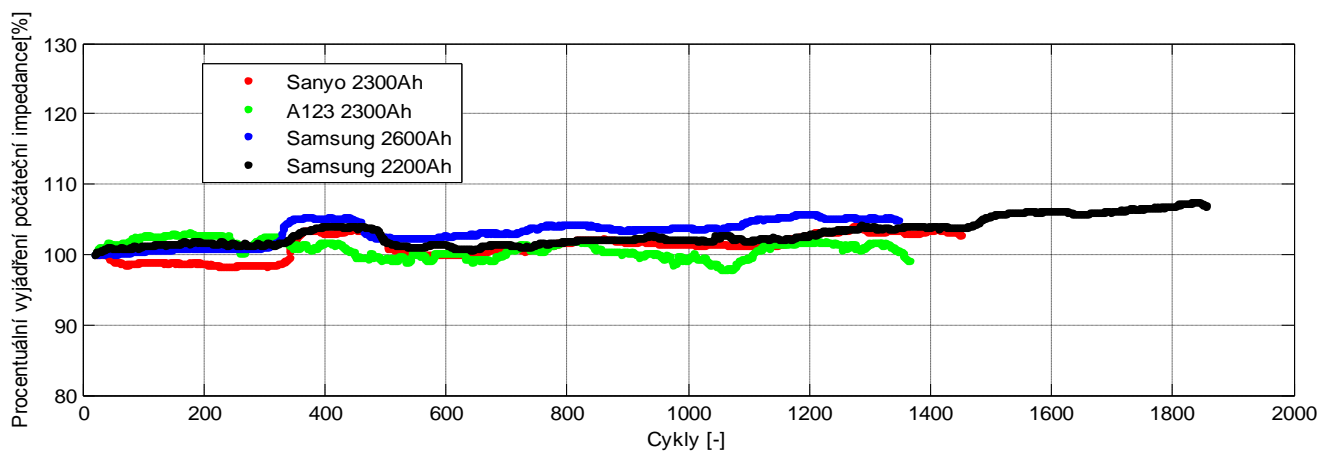
Obr. 3.20 Závislost výstupní energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



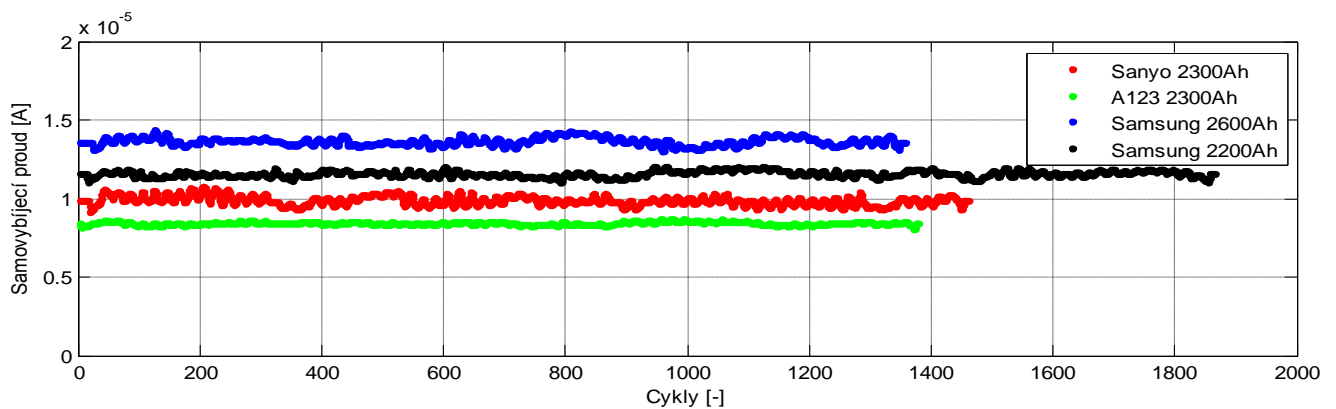
Obr. 3.21 Procentuální závislost výstupní energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



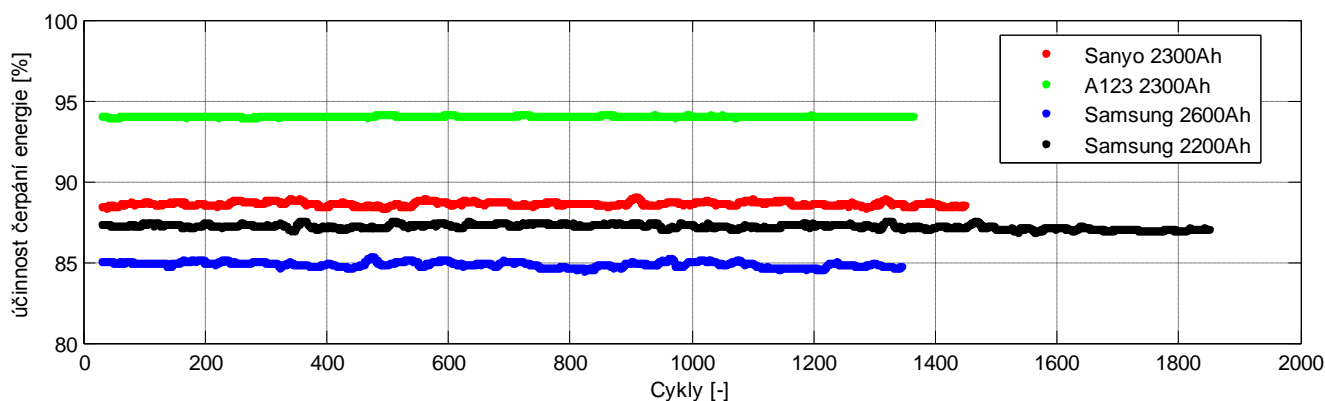
Obr. 3.22 Vnitřní impedance akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.23 Procentuální závislost vnitřní impedance akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.24 Závislost samovybíjení akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů

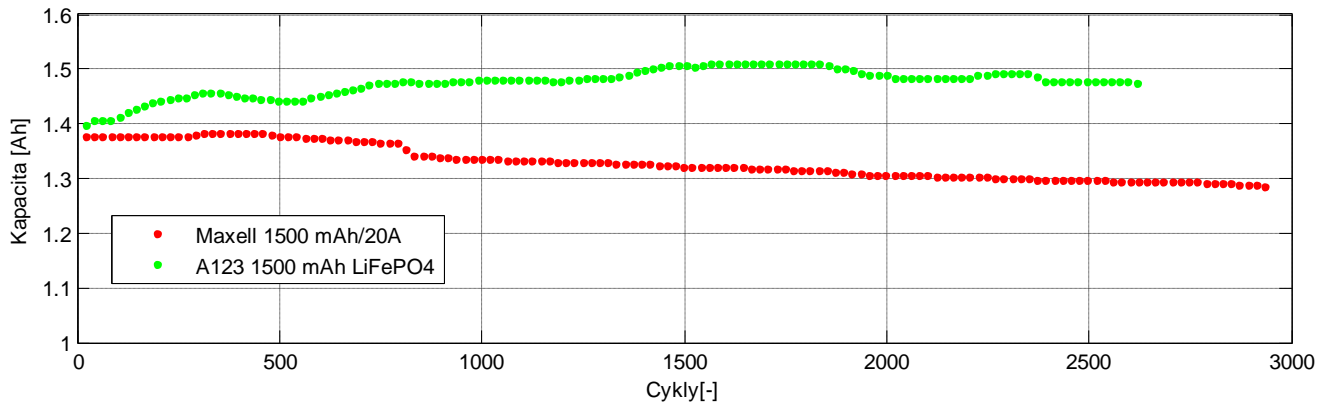


Obr. 3.25 Závislost účinnosti čerpání energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů

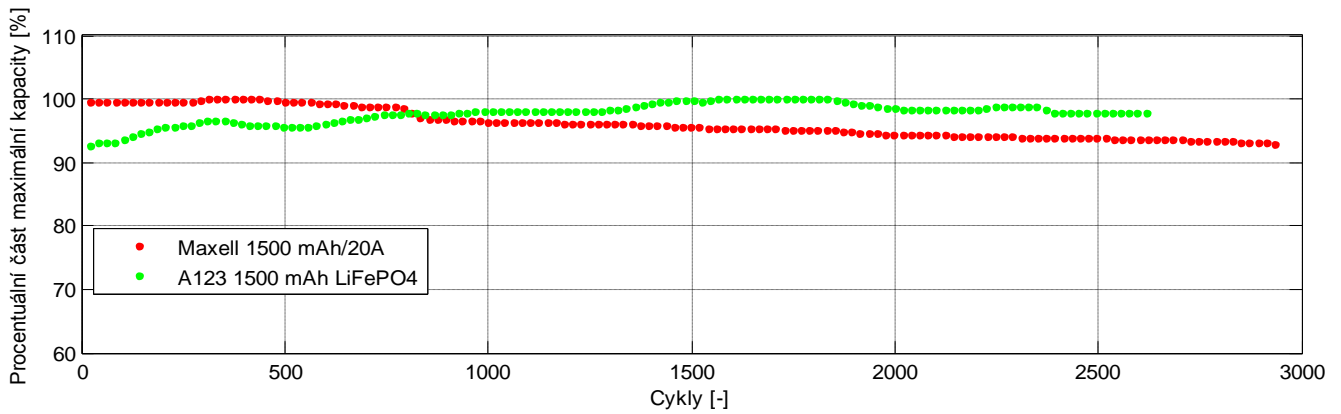
Měření těchto čtyř akumulátorů bylo ovlivněno chybou měřicího softwaru, kdy po přibližně 1500 cyklech došlo kromě akumulátoru Samsung 2200 mAh k vybití ostatních vzorků pod minimální napětí stanovená výrobcem. Závislosti, včetně těch po úplném vybití, jsou pro ilustraci uvedeny v příloze.

Na pikosatelitu vzhledem k časovým poměrům letu na slunci a ve stínu není možné použít výrobcem doporučený průběh nabíjení, tj. s dlouhým doběhem na konstantní napětí a akumulátor bude tedy nabíjen bez tohoto doběhu (tj. nedojde k plnému nabití), a tak i při testech je použito pouze nabíjení konstantním proudem s ukončením mírně pod napětím při doběhu na konstantní úroveň. Tedy u článků, kde nabíjecí napětí je maximálně 4,2 voltu, jako úroveň plného nabití byla stanovena hranice 4,18 V. Z tohoto důvodu je maximální změřená kapacita o několik procent nižší, než jmenovitá. Z obrázku 3.22 je zřejmé, že vnitřní impedance akumulátoru závisí na jeho rozměrech. Akumulátor A123 v pouzdře UR26650 má vnitřní impedanci jen o málo vyšší než 0,01 Ω na rozdíl od akumulátorů v pouzdře UR18650, kde je vnitřní impedance přibližně 0,06 Ω . Účinnost čerpání energie je u akumulátoru A123 přibližně 94 %, u dalších akumulátorů je to pak mezi 85 a 90 %. Samovybíjecí proudy se u všech testovaných vzorků pohybují kolem 10 μA .

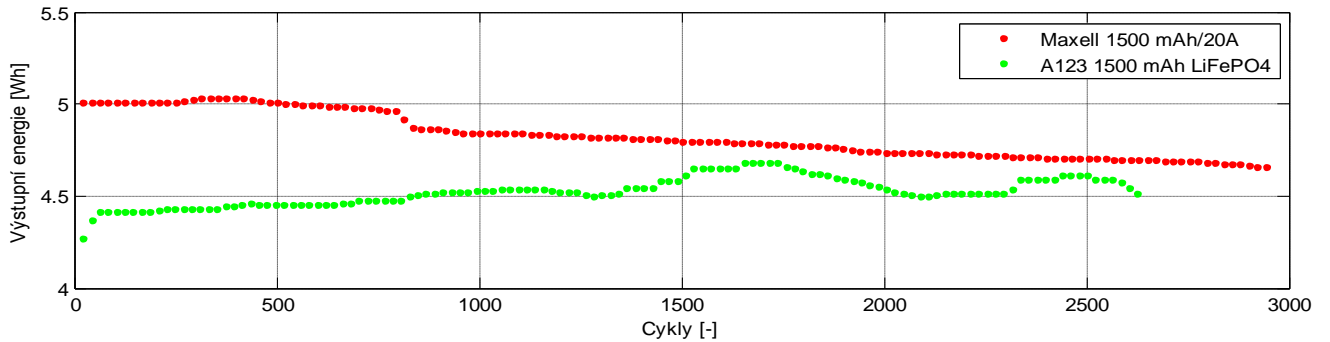
Dalším testovaným vzorkem byl akumulátor Maxell 1500 mAh v pouzdře UR18650W určený pro výkonové aplikace s dovoleným maximálním odebíraným proudem až 20 A, a také akumulátor A123 1500 mAh v pouzdře UR26650 a technologií LiFePO_4



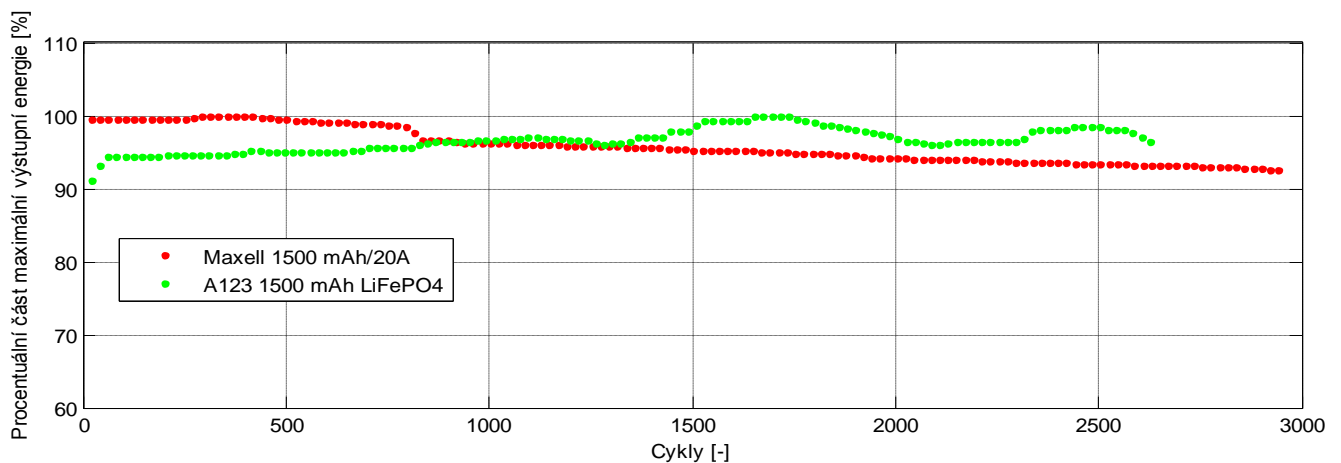
Obr. 3.26 Kapacita akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



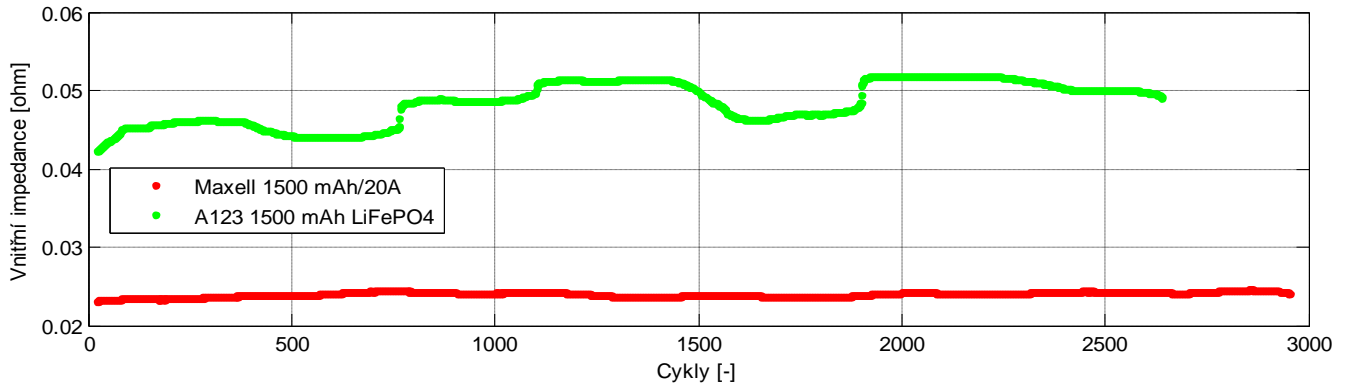
Obr. 3.27 Procentuální závislost kapacity akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



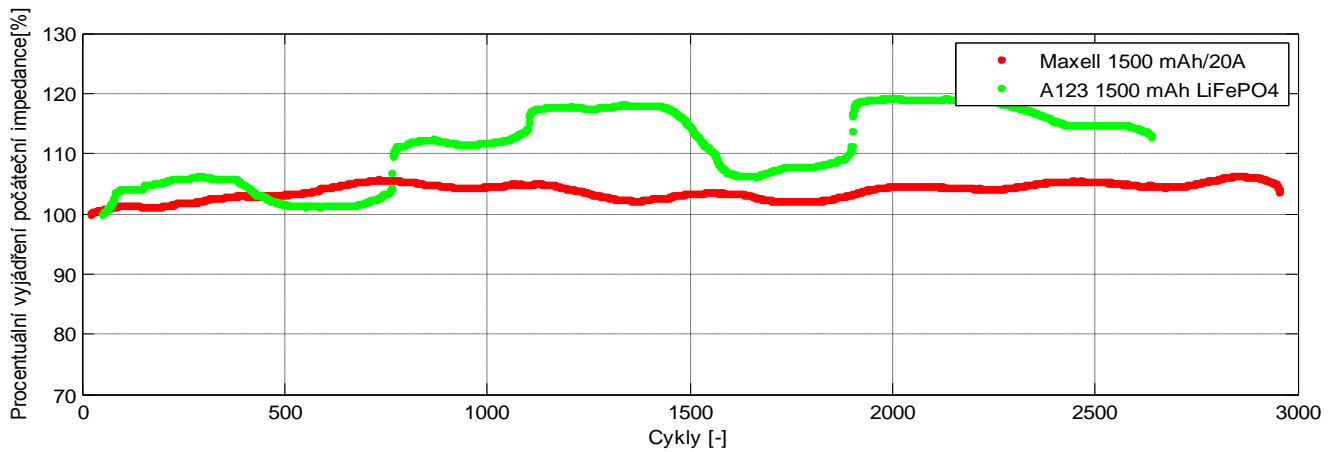
Obr. 3.28 Výstupní energie akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



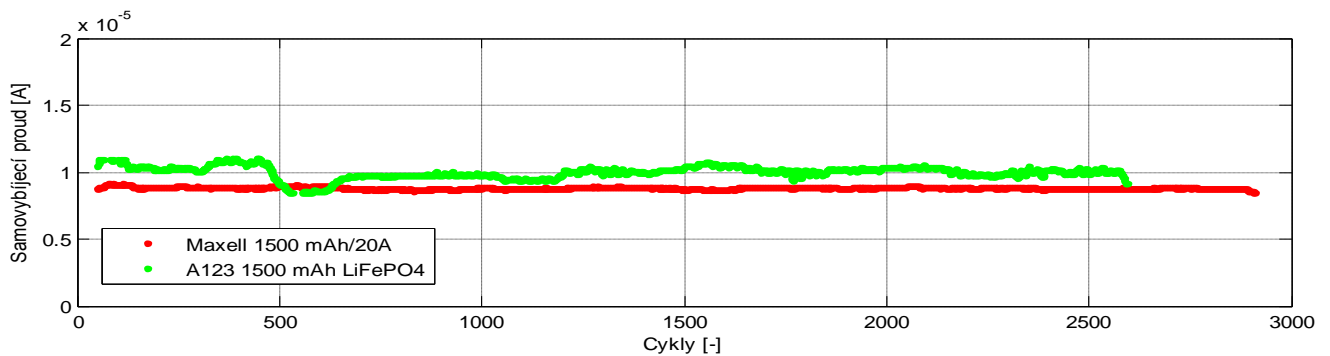
Obr. 3.29 Procentuální závislost výstupní energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



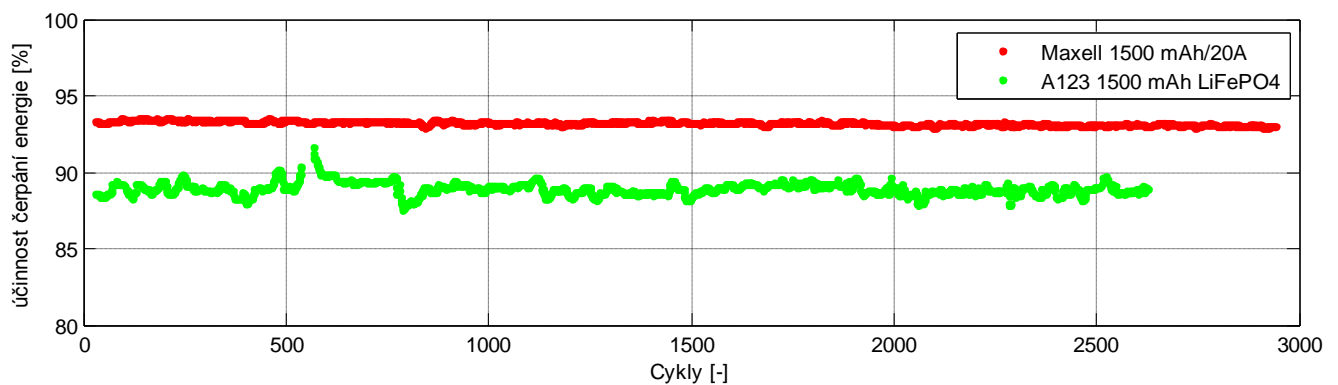
Obr. 3.30 Vnitřní impedance akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.31 Procentuální závislost vnitřní impedance akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



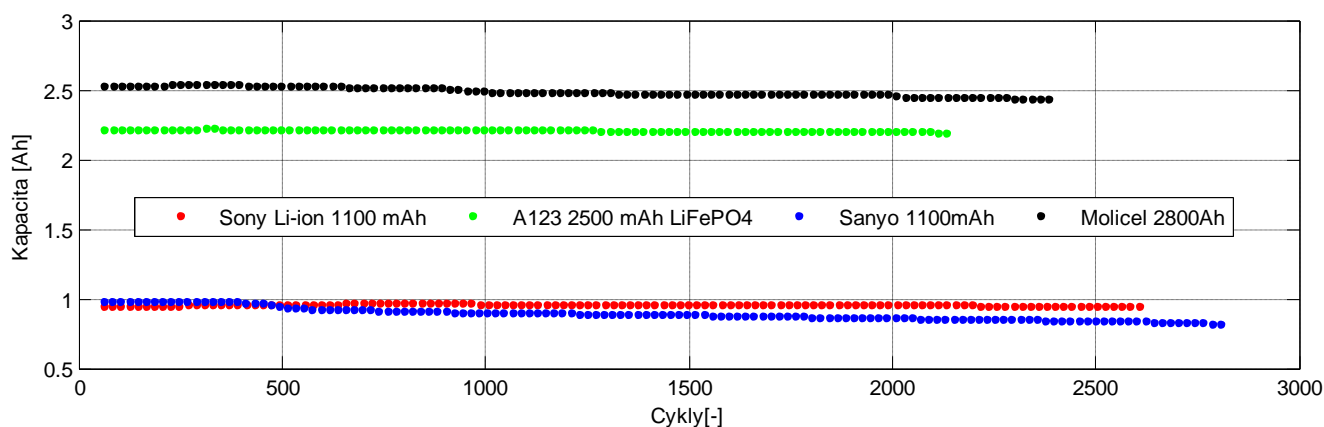
Obr. 3.32 Závislost samovybíjení akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



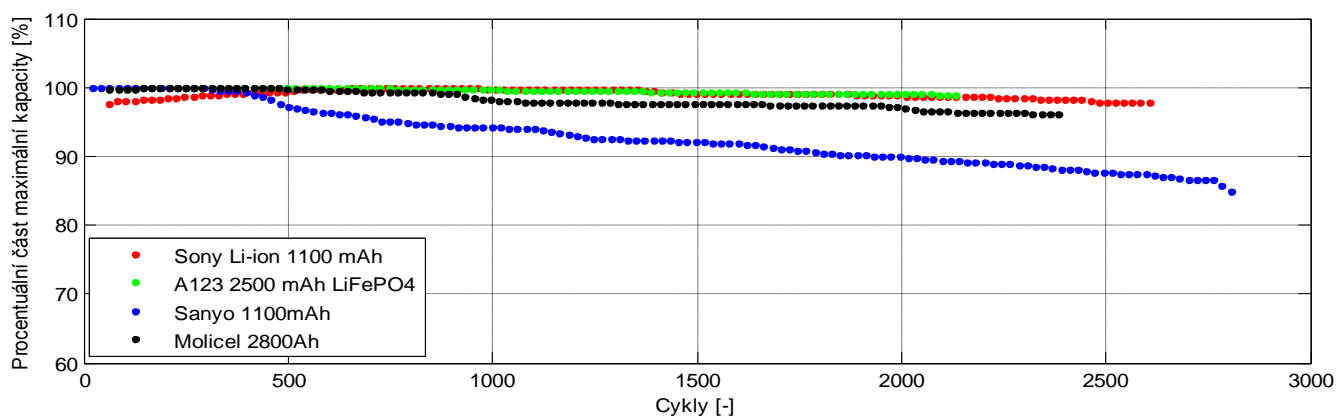
Obr. 3.33 Závislost účinnosti čerpání energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů

U Lithium-Metalového akumulátoru je zvláštní vývoj kapacity v závislosti na nabíjecích cyklech. Kapacita, jak je vidět na obrázku 3.26, nejprve postupně narůstá. U akumulátoru Maxell je pokles kapacity prakticky lineární. Akumulátor Maxell má také nižší vnitřní impedanci, přibližně $0,03 \Omega$. U akumulátoru A123 je vnitřní impedance vyšší, přibližně $0,05 \Omega$. Nižší uskladněná energie v Lithium-Metalovém akumulátoru je zapříčiněna tím, že tento akumulátor má nižší jmenovité napětí ($3,3 \text{ V}$) oproti klasickému napětí lithium-iontových akumulátorů ($3,7 \text{ V}$). Účinnost čerpání energie je vyšší u akumulátoru Maxell a to přibližně 93% , u lithium-fosfátového akumulátoru je pak účinnost pod hranicí 90% . Samovybíjecí proudy se pohybují kolem $10 \mu\text{A}$. Přibližně po 800 nabíjecích cyklech bylo z důvodů opravy měřicího PC testování přerušeno. Akumulátory byly po tuto dobu uchovávané v nabitěm stavu, jak je ale vidět na obrázcích, za tuto dobu však u akumulátoru Maxell mírně poklesla kapacita.

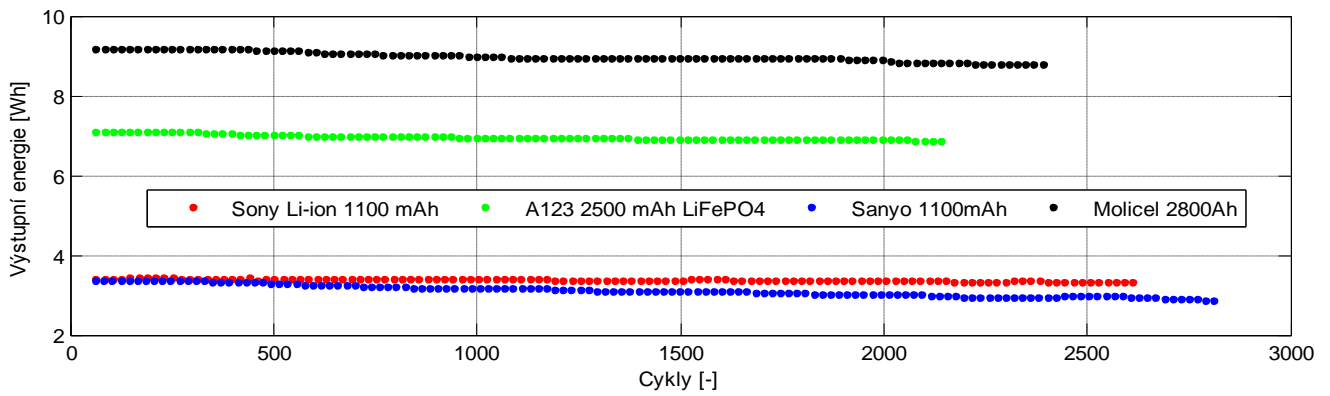
V další sérii měření byly testovány opět čtyři akumulátory. Všechny je možné použít i pro výkonové aplikace s velkým maximálním dodávaným proudem a dlouhou životností, a to akumulátory Sony 1100 mAh a Sanyo 1100 mAh, oba v pouzdře UR18650, dále akumulátor A123 2500 mAh v pouzdře ANR26650 a akumulátor Molicel 2800 mAh v pouzdře UR27000.



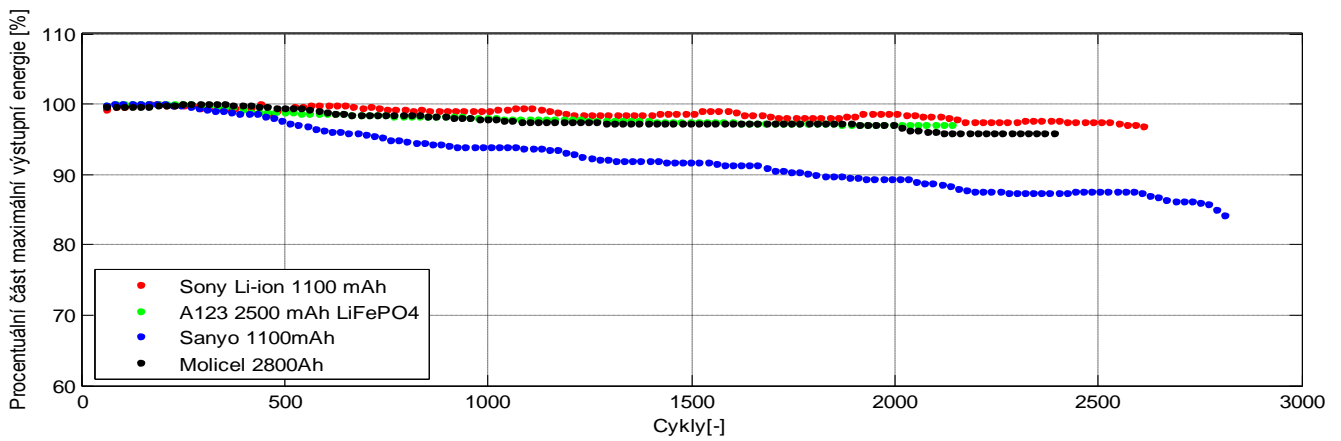
Obr. 3.34 Kapacita akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



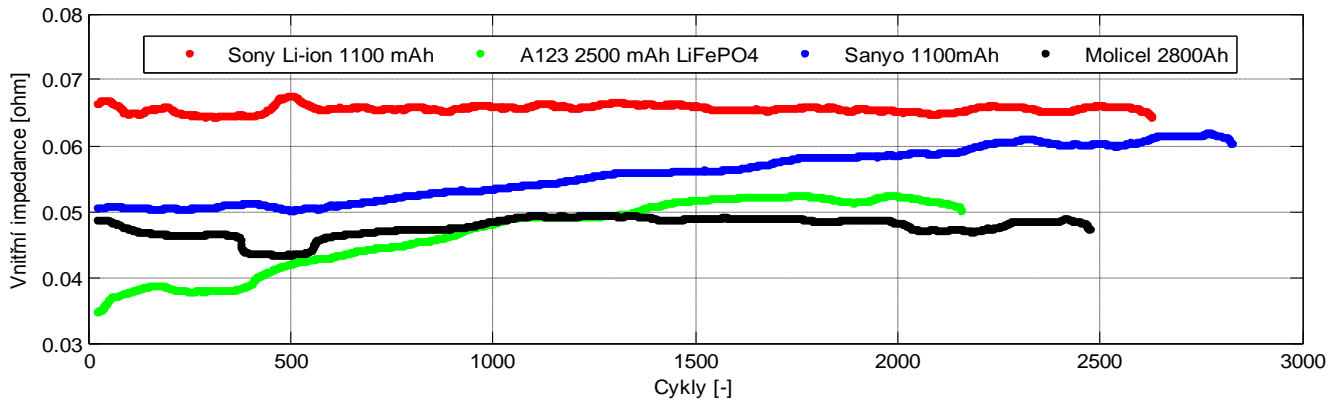
Obr. 3.35 Procentuální závislost kapacity akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



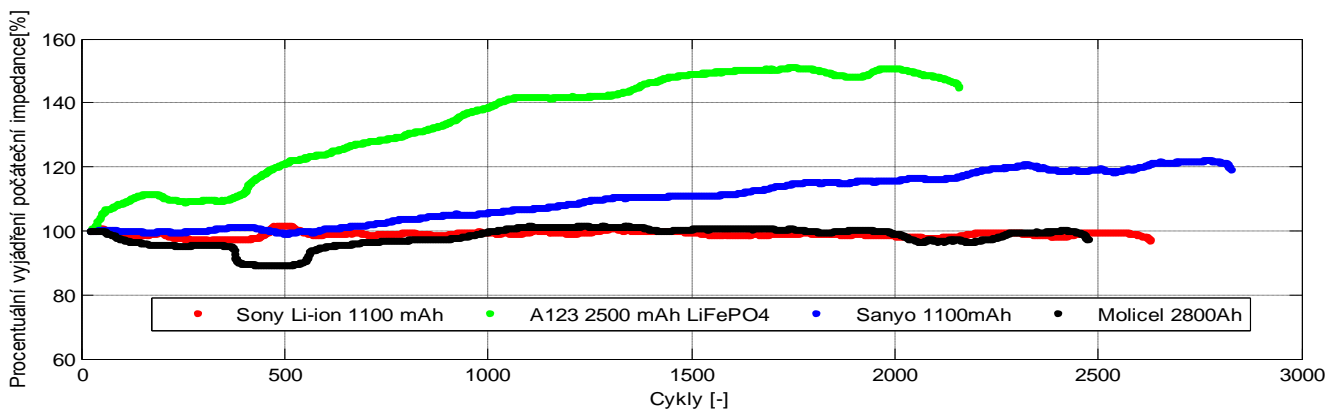
Obr. 3.36 Výstupní energie akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



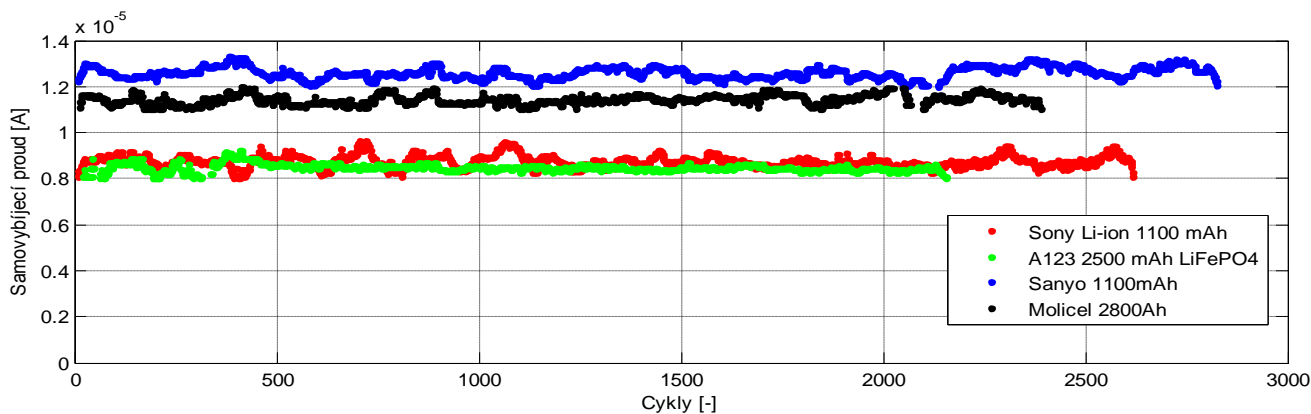
Obr. 3.37 Závislost účinnost čerpání energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



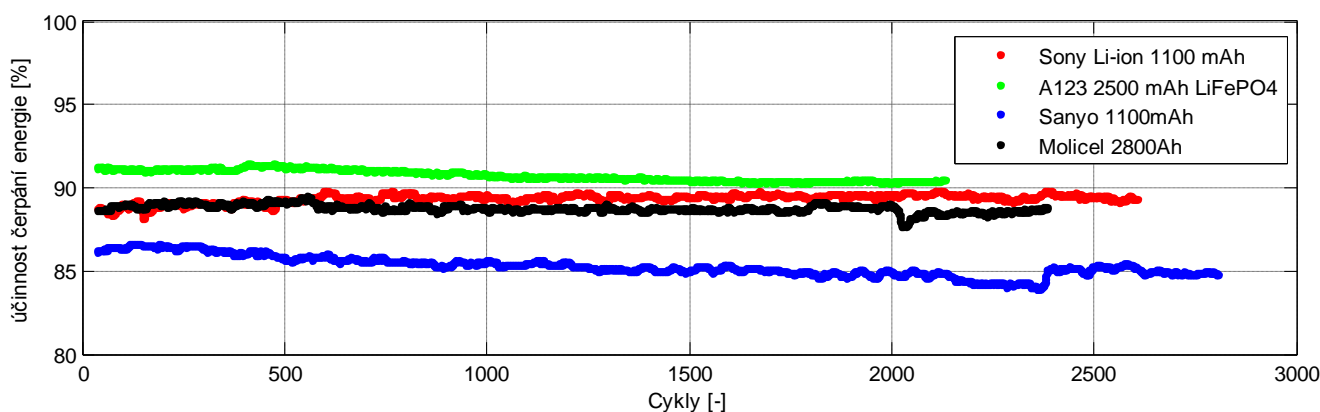
Obr. 3.38 Vnitřní impedance akumulátorů v závislosti na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.39 Procentuální závislost vnitřní impedance akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.40 Závislost samovybíjení akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.41 Závislost účinnosti čerpání energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů

Tato série testovaných akumulátorů se vyznačuje možností dodávat do zátěže poměrně vysoké proudy (až 30 A). Nejhuře z tohoto měření vychází akumulátor Sanyo 1100 mAh, jehož životnost klesá rychlostí přibližně 5 % za 500 cyklů. Vzhledem k velkému rozdílu kapacit jednotlivých vzorků se také velmi liší množství uskladněné energie. Akumulátor Molicel je schopen pojmout přibližně 9 Wh energie, A123 přibližně 7 Wh a zbylé dva akumulátory pouze jen asi 3,5 Wh. Vnitřní impedanci má nejvyšší článek Sony a pohybuje se kolem 0,07 Ω . Ostatní články mají impedanci kolem 0,05 Ω a nejrychlejší nárůst vnitřní impedance má akumulátor Sanyo. Účinnost čerpání energie se pohybuje u všech vzorků od 85% do 92% a nejlepší účinnost má lithium fosfátový akumulátor, který má tedy i nejnižší samovybíjecí proud (kolem 8 μA). Nejvyšší samovybíjecí proud má akumulátor Sanyo a to přibližně 13 μA .

3.6 Srovnání výsledků

Vzhledem k nemožnosti použít u pseudokapacitorů Nesscap časovou kompresi testování, bylo provedeno méně nabíjecích cyklů než u superkapacitorů Maxwell. Srovnání změřených výsledků je nejlépe zřejmé v tabulce 3.17. Srovnání s predikcí dalšího vývoje je provedeno v další části práce.

Tab. 3.17 Srovnání naměřených hodnot superkapacitorů

	100% nabíjení		110% přebíjení		115% přebíjení		120% přebíjení	
	Nesscap	Maxwell	Nesscap	Maxwell	Nesscap	Maxwell	Nesscap	Maxwell
Kapacita po 500 cyklech [F]	278	382	271	381	256	380	260	385
Kapacita po 2500 cyklech [F]	279	375	251	372	217	370	218	374
Úbytek kapacity [%]	-0,4	1,8	7,4	2,4	15,2	2,6	16,2	2,9
Vnitř. Imp. po 500 cyklech [mΩ]	22	3,0	22	3,2	22	3,5	45	4,0
Vnitř. Imp. po 2500 cyklech [mΩ]	22	3,0	22	3,2	45	3,5	82	4,0
Zvýšení impedance [%]	0,0	3,5	0,0	0,0	105	0,0	82	0,0
Energie po 500 cyklech [Wh]	0,20	0,29	0,19	0,37	0,20	0,41	0,22	0,46
Energie po 2500 cyklech [Wh]	0,20	0,28	0,18	0,36	0,17	0,40	0,19	0,45
Úbytek energie [%]	0,0	3,5	5,3	2,7	15,0	2,4	13,6	2,2
Prům. účinnost čerpání energie [%]	94,4	96,4	84,5	95,9	72,5	95,1	81,2	94,3
Prům. samovyb. proud [μA]	1,6	10,2	3,1	12,1	6,4	14,7	4,1	15,9
Energie odčerpána samovybjením [μWh]	4,2	32,7	9,1	41,3	19,3	51,9	12,7	57,8

V tabulce 3.17 jsou uvedeny změřené kapacity, vnitřní impedance a uskladněné energie obou typů měřených superkapacitorů při různých úrovních přebíjení. Tyto hodnoty jsou uvedeny a porovnány vždy po 500 a 2500 cyklech. Z tabulky je zřejmé, že parametry pseudokapacitorů Nesscap při jakékoliv úrovni přebíjení jmenovitého napětí degradují mnohem rychleji. Ovšem při nabíjení na nominální hodnotu napětí je úbytek kapacity a uložené energie vyšší u superkapacitorů Maxwell – 1,83 % (Nesscap – 0 %). Shodný vývoj při nízké úrovni přebíjení mají u obou technologií vnitřní impedance, které zůstávají

konstantní. U superkapacitorů Maxwell se vnitřní impedance mění velmi nepatrně také při 115 a 120% přebíjení nominální hodnoty napětí a je vždy přibližně 4 mΩ. U pseudokapacitorů Nesscap při přebíjení na 115 a 120 % nominální hodnoty napětí vnitřní impedance značně roste a to až trojnásobně během 2000 cyklů. Při přebíjení na 110 % nominální hodnoty napětí u superkapacitorů Maxwell klesne kapacita po dvou tisících cyklech o 2,4 %, energie o 2,7 % a u Nesscap kapacita klesne o 7,4 %, energie o 5,3 %. Při vyšším přebíjení je rozdíl obou technologií ještě větší. Superkapacity Maxwell mají úbytek energie i kapacity obdobný při všech měřených možnostech přebíjení, kdežto pseudokapacity Nesscap mají pokles energie i kapacity při vyšším přebíjení kolem 15 % během dvou tisíc cyklů. Účinnosti čerpání náboje a s nimi spojené samovybíjecí proudy mají poměrně stálý trend vývoje během cyklování a lze říci, že se mění jen nepatrně. Daleko více záleží u těchto ukazatelů na úrovni přebíjení než přibývajícím počtu cyklů.

Dle tabulky 3.17 lze také říci, že superkapacity Maxwell mají o řád vyšší samovybíjecí proud než pseudokapacity Nesscap. To, že Maxwell mají vyšší účinnost čerpání náboje, je dáno časovou kompresí testu, kdy během krátké doby nestačí samovybíjením ubýt velké množství uskladněného náboje. Aby bylo možné účinnosti porovnat, je tedy nutné je srovnávat spíše jako energie, které se samovybíjením odčerpají během stejné doby. Tento přepočet lze provést podle vzorce 13. V tabulce 3.17 jsou tedy uvedeny také průměrné hodnoty energie odčerpané samovybíjením během jednoho obletu země (za 95 minut) a při nabíjení na nominální hodnotu napětí je energie odčerpaná samovybíjením u Nesscap asi 8 krát nižší než u Maxwell. S vyšším přebíjením pak poměr mírně klesá.

$$W_{sam} = I_{sam} \cdot U_{stř} \cdot t \quad (13)$$

Kde:

I_{sam}	průměrný samovybíjecí proud [A]
$U_{stř}$	střední napětí během jednoho cyklu[V]
t	doba trvání jednoho cyklu [s]

Všechny předcházející výsledky jsou pro měření jednoho samostatného článku. V úvahu je ale potřeba vzít fakt, že paralelním spojením tří článků pseudokapacitorů Nesscap lze z pohledu fyzických vlastností (hmotnosti a objemu) získat stejný článek jako jeden superkapacitor Maxwell. Ztrojnásobí se tedy kapacita i uložená energie a na třetinu sníží vnitřní impedance, čímž se smazávají hlavní výhody superkapacitorů Maxwell. Srovnání tří

paralelně spojených článků Nesscap a jednoho Maxwell jsou v tabulce 3.18. Není zde zohledněna životnost a degradace parametrů, které odpovídají naměřeným charakteristikám, ale pouze stav po 2500 nabíjecích cyklech.

Tab. 3.18 Srovnání tří paralelně spojených Nesscap a jednoho Maxwell

	100% nabíjení		110% přebíjení		115% přebíjení		120% přebíjení	
	Nesscap 3 čl.	Maxwell	Nesscap 3 čl.	Maxwell	Nesscap 3 čl.	Maxwell	Nesscap 3 čl.	Maxwell
Kapacita po 2500 cyklech [F]	837	375	753	372	651	370	654	374
Energie po 2500 cyklech [Wh]	0,45	0,28	0,54	0,36	0,51	0,40	0,57	0,45
Vnitř. Imp. po 2500 cyklech [mΩ]	7,0	3,0	7,0	3,2	15	3,5	13,7	4,0

U měření akumulátorů bylo možné použít při měřeních časovou kompresi, ale kvůli velikosti nabíjecích proudů pouze omezenou. Bylo tedy vždy změřeno omezené množství nabíjecích cyklů. V další části práce je také provedena predikce vývoje na tříletou misi pikosatelitu. Kvůli poruše při měření první série akumulátorů jsou v následující tabulce 3.19 jako hodnoty po 2500 cyklech brány hodnoty získané extrapolací. Vzhledem k poměrně jasnému trendu křivek lze s velkou přesností u těchto čtyř vzorků jejich parametry předpovědět.

Tab. 3.19 Srovnání naměřených hodnot akumulátorů

	Kapacita po 500 cyklech [Ah]	Kapacita po 2500 cyklech [Ah]	Úbytek kapacity [%]	Vnitř. Imp. po 500 cyklech [mΩ]	Vnitř. Imp. po 2500 cyklech [mΩ]	Zvýšení imp. [%]	Energie po 500 cyklech [Wh]	Energie po 2500 cyklech [Wh]	Úbytek ener. [%]
Sanyo 2,3 Ah	2,1	1,9	5,9	65	66	1,5	7,2	6,7	7,1
A123 2,3 Ah	2,1	2,0	2,9	11	11	0,0	6,8	6,7	0,7
Samsung 2,6 Ah	2,2	2,1	3,2	57	60	5,0	7,7	7,1	7,6
Samsung 2,2 Ah	1,9	1,9	3,6	57	64	10,9	6,8	6,5	3,7
Maxel 1,5 Ah	1,4	1,3	5,1	24	25	4,0	5,0	4,7	6,0
A123 1,5 Ah	1,5	1,5	-3,4	45	50	10,0	4,5	4,6	-2,2
Sony 1,1 Ah	1,0	1,0	0,0	68	70	2,9	3,4	3,3	1,5
A123 2,5 Ah	2,2	2,2	0,9	43	50	14,0	7,0	6,9	1,4
Sanyo 1,1Ah	1,0	0,9	9,4	50	60	16,7	3,4	3,0	10,4
Molicel 2,8 Ah	2,6	2,4	5,9	42	48	12,5	9,2	8,9	3,3

Výsledky testů přináší poměrně jasné srovnání mezi akumulátory Li-ion a LiFePO₄. Lithium fosfátovým akumulátorům, které byly testovány ve dvou vzorcích (A123 1500 mAh a A123 2500 mAh, obě v pouzdrech UR26650) degraduje kapacita a měrná energie značně

pomaleji, než akumulátorům lithium iontovým. U obou těchto vzorků nepoklesla kapacita během 2000 měřených nabíjecích cyklů ani o jeden celý procentní bod. Naopak vnitřní impedance u těchto akumulátorů narůstá rychleji, než u většiny ostatních testovaných akumulátorů. Kromě jedné výjimky, akumulátoru Sanyo 1100 mAh, klesá kapacita všech testovaných akumulátorů rychlostí nižší než 6 % během 2000. cyklů. Z Li-ion akumulátorů vychází z testů z hlediska degradace parametrů akumulátor Sony 1100 mAh. Tento akumulátor se liší od ostatních složením katody, která obsahuje mangan [14]. S jistotou lze také říct, že na úbytek kapacity ani přírůstek impedance nemá vliv velikost (pouzdro) akumulátoru.

Tab. 3.20 Průměrné hodnoty samovybíjení a účinnosti akumulátorů

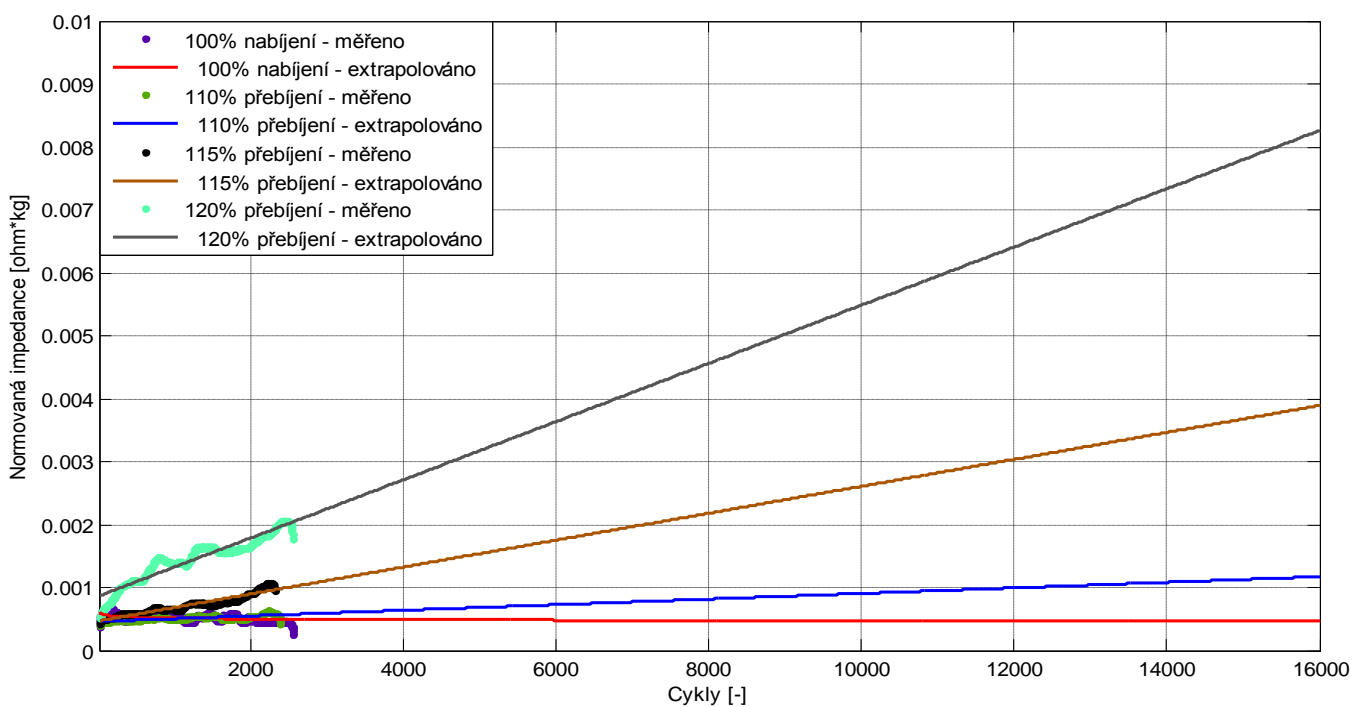
	Prům. samovyb. proud [μ A]	Prům. účinnost čerpání energie [%]	Prům. účinnost čerpání náboje [%]
Sanyo 2300 mAh	9,87	88,61	96,48
A123 2300 mAh	8,4	94,02	96,51
Samsung 2600 mAh	13,6	84,86	91,65
Samsung 2200 mAh	11,5	87,13	90,07
Maxell 1500 mAh	8,6	93,19	96,94
A123 1500 mAh	9,6	88,91	95,64
Sony 1100 mAh	8,8	89,3	96,84
A123 2500 mAh	8,6	90,7	96,43
Sanyo 1100 mAh	12,6	85,2	92,04
Molicel 2800 mAh	11,5	88,73	90,21

Podle tabulky 3.20 lze říci, že samovybíjecí proudy u všech testovaných akumulátorů jsou velmi podobné a pohybují se okolo hodnoty 10 μ A. Totéž pak platí i o účinnostech čerpání energie, která se pohybuje přibližně od 88 do 94 %. Účinnosti čerpání náboje jsou vyšší, než účinnosti čerpání energie ze stejného důvodu jako u superkapacitorů, tedy že se do nich nepromítá vnitřní impedance a pohybuje se u všech testovaných vzorků nad 90 %. Akumulátory lze na rozdíl od superkapacitorů podle vypočítaných účinností přímo srovnávat, protože testy byly prováděny v přibližně stejných časových kompresích.

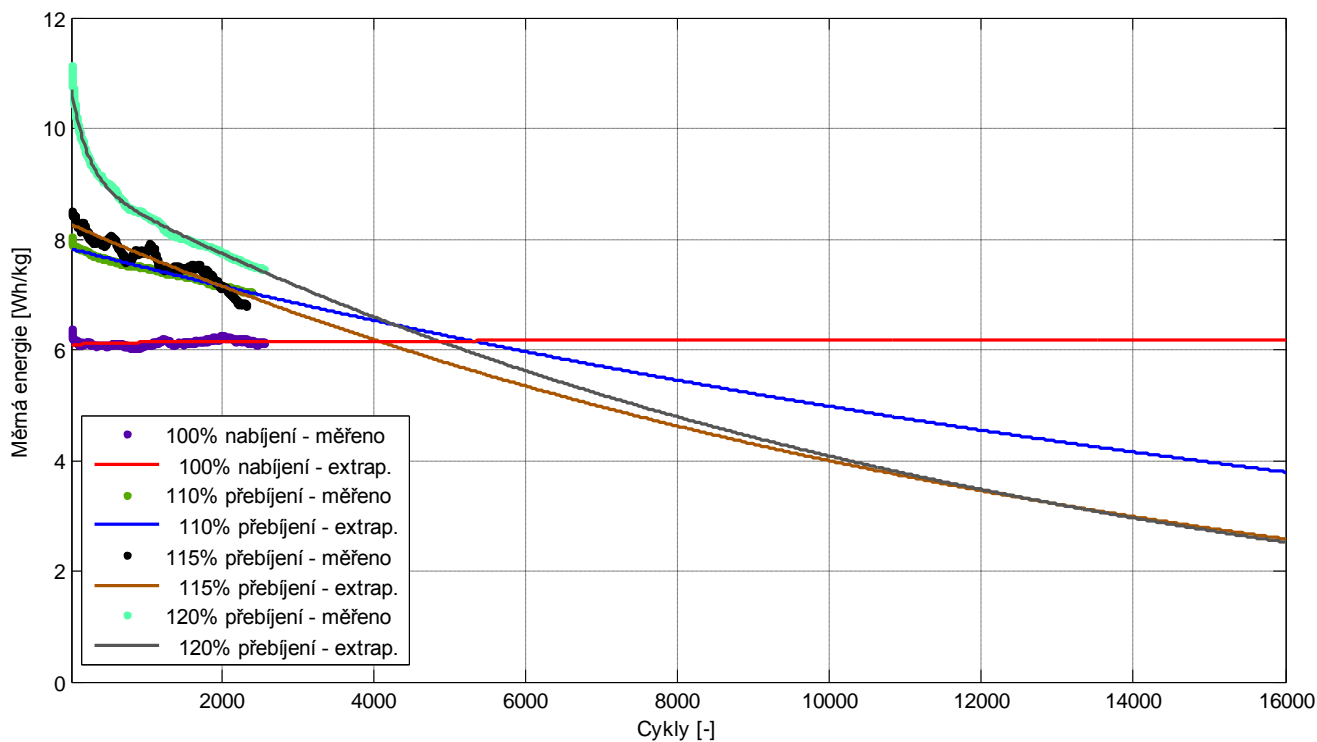
3.7 Odhad budoucího vývoje

Vzhledem k velké časové náročnosti všech testů, pro odhad vývoje parametrů zásobníků energie pro delší mise pikosatelitů je nutné naměřené charakteristiky extrapolovat. Mise pikosatelitu PilsenCUBE je plánována na tři roky, to znamená přibližně 16500

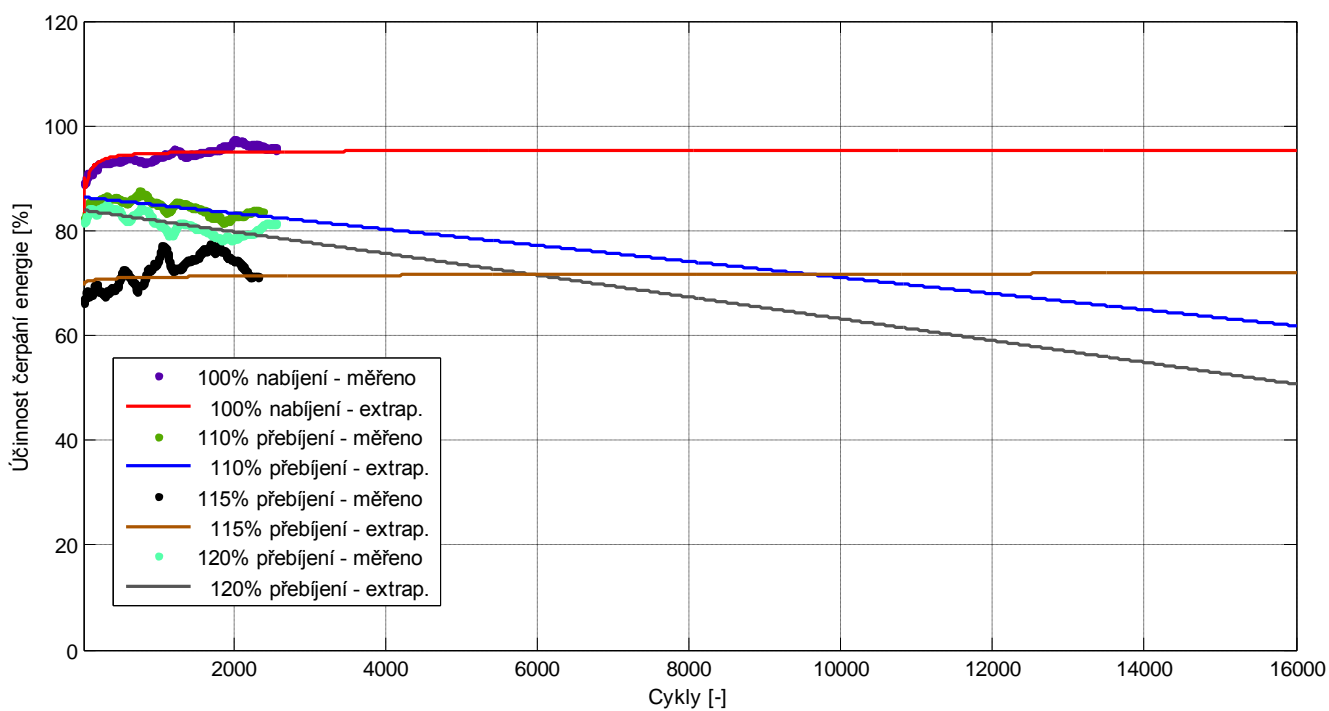
nabíjecích a vybíjecích cyklů. Takovéto množství nabíjecích cyklů bylo možno změřit pouze u superkapacitorů Maxwell. Je také velmi podstatné určit, jaké veličiny a parametry je vhodné extrapolovat a poté mezi sebou porovnávat. Jedním z nejdůležitějších parametrů z hlediska napájení subsystemů je výstupní energie. Jak je uvedeno v tabulkách 3.1 a 3.2, superkapacity Maxwell mají přibližně 3x větší objem a hmotnost než Nesscap. Pro objektivní srovnání je tedy vhodné výstupní energie normovat hmotností, protože při obsazení stejného objemu a hmotnosti v pikosatelitu lze použít jeden superkapacitor Maxwell, nebo tři Nesscap, měrná energie pak vychází v jednotkách Wh/kg. Druhým důležitým parametrem je vnitřní impedance (kvůli omezení rizika poklesu napětí při špičkových proudových odběrech. Při paralelním spojení tří pseudokapacitorů Nesscap se vnitřní impedance sníží na třetinu. Vzhledem k trojnásobné velikosti a objemu superkapacitorů Maxwell oproti Nesscap, je vhodné i u vnitřní impedance zavést normování, ale opačným způsobem než měrnou energii. Při paralelním řazení se vnitřní impedance snižuje na rozdíl od energie, proto pro normování používáme jednotku $\Omega \cdot \text{kg}$. Třetí extrapolovanou veličinou jsou účinnosti čerpání energie. V pikosatelitu bude totiž pouze omezené množství energie dodávané ze solárních článků. Jak je uvedeno v kapitole 1, průměrná spotřeba pikosatelitu při letu ve stínu je přibližně 1,3 Wh, energie k uskladnění 2,25 Wh a rezerva tedy asi 0,9 Wh. Účinnost čerpání energie všech zásobníků tedy nesmí klesnout pod přibližně 60 %. Pokud by se tak stalo, nebylo by ze zásobníků možné hradit po dobu obletu ve stínu veškeré energetické potřeby.



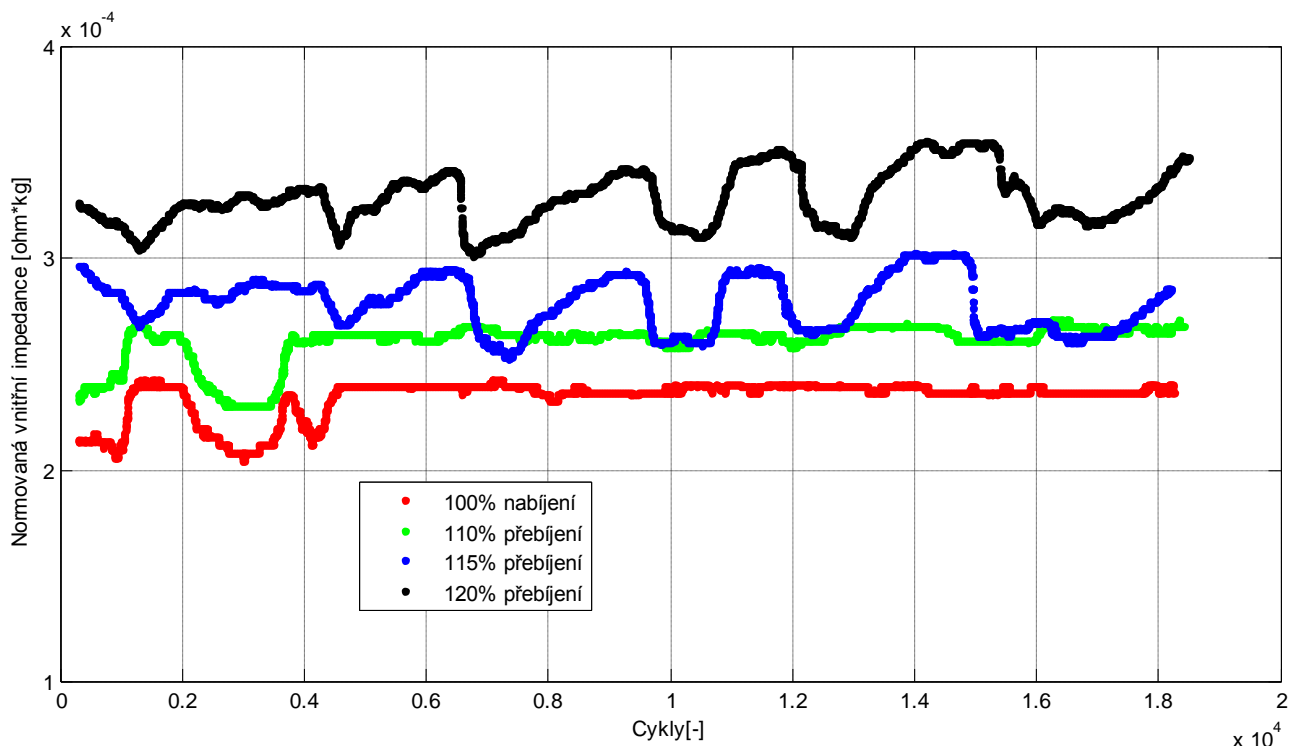
Obr. 3.42 Závislost normované impedance pseudokapacitorů Nesscap na počtu nabíjecích cyklů



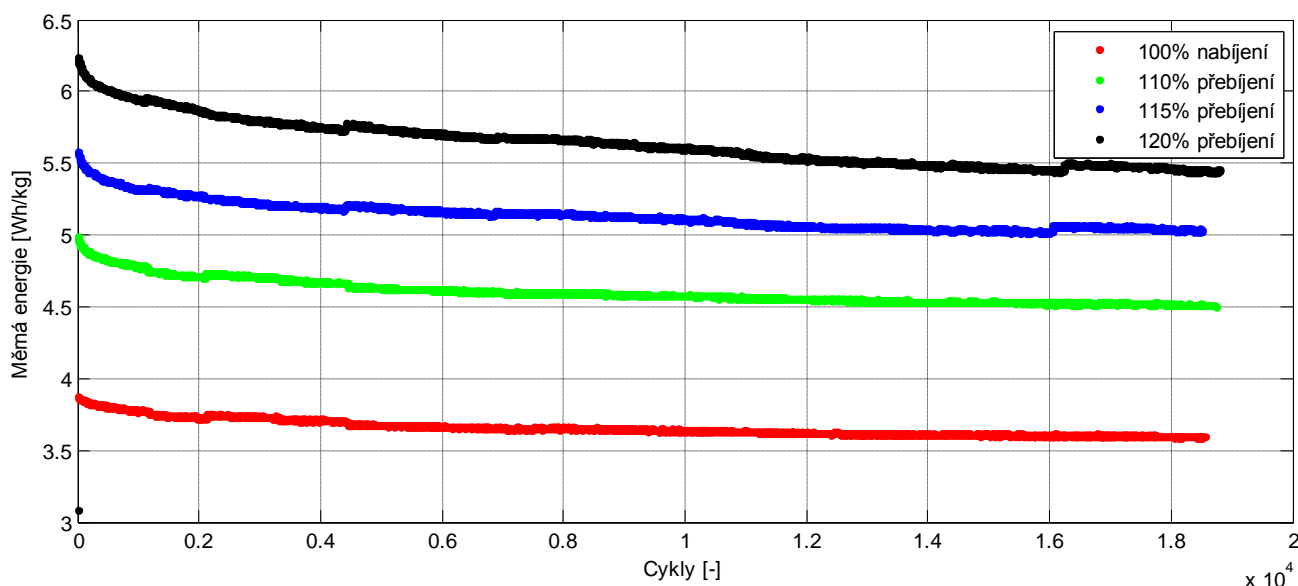
Obr. 3.43 Závislost měrné energie pseudokapacitorů Nesscap na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.44 Závislost účinnosti čerpání energie pseudokapacitorů Nesscap na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.45 Závislost normované impedance superkapacitorů Maxwell na počtu nabíjecích cyklů

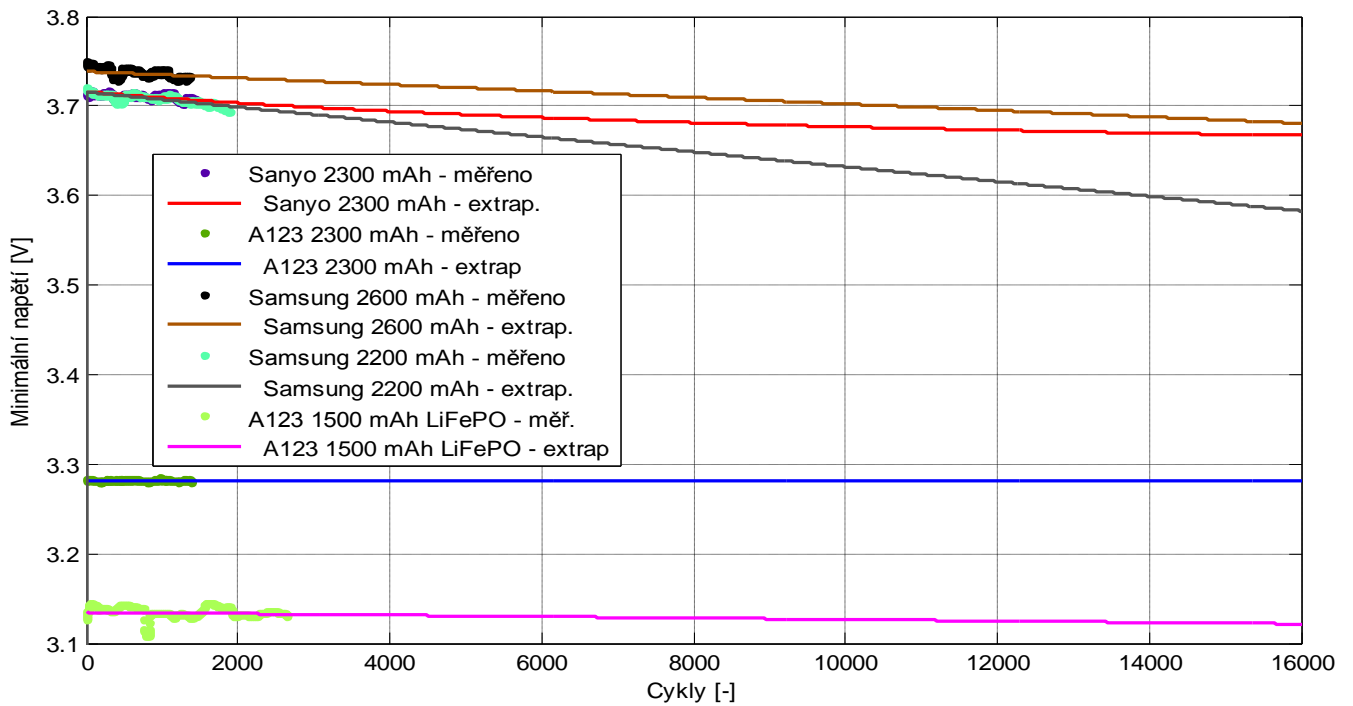


Obr. 3.46 Závislost měrné energie superkapacitorů Maxwell na počtu nabíjecích cyklů

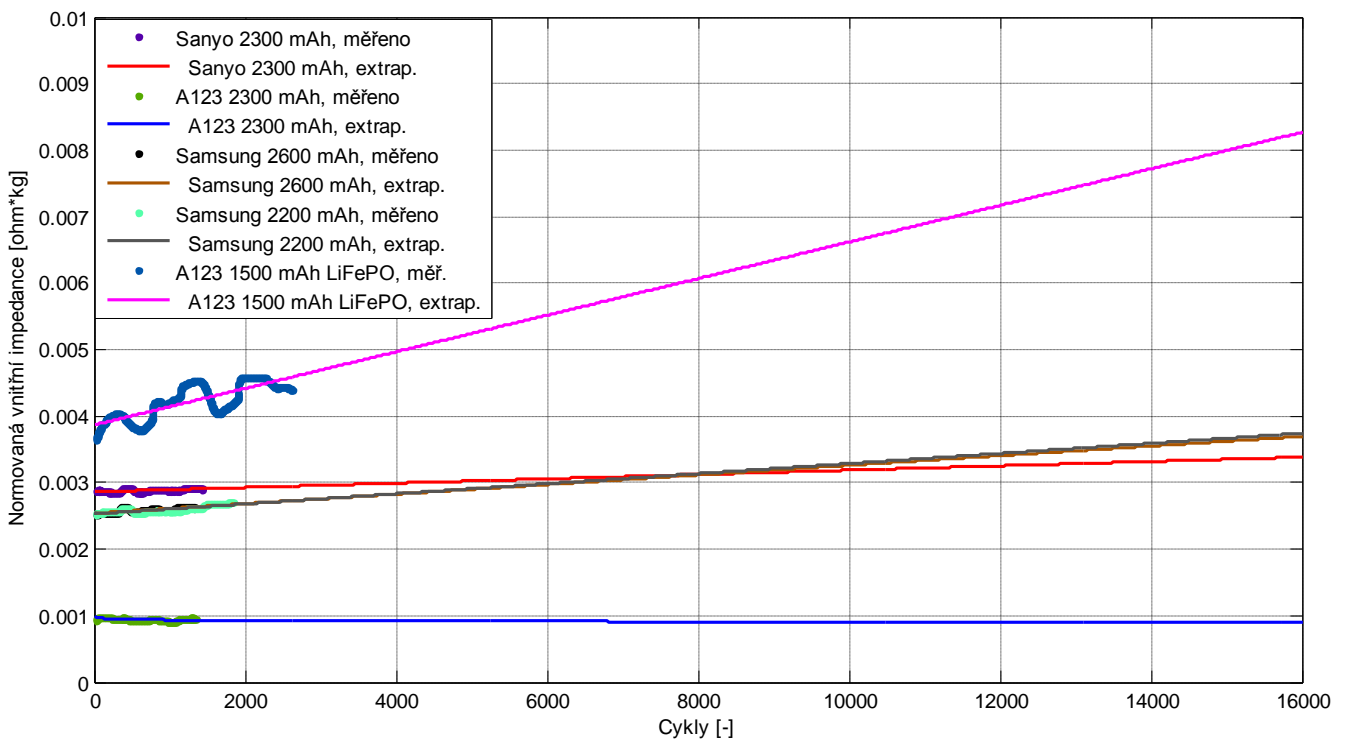
Normovaná impedance u nových pseudokapacitorů Nesscap je přibližně $0,5 \text{ m}\Omega \cdot \text{kg}$, ovšem s vyšší úrovní přebíjení a přibývajícím počtem cyklů značně narůstá. Po tříleté misi pikosatelitu by při 120% přebíjení nominální hodnoty napětí dosáhla přibližně $8 \text{ m}\Omega \cdot \text{kg}$. Naopak při nabíjení na nominální hodnotu napětí zůstává impedance přibližně konstantní. U superkapacitorů Maxwell je vývoj odlišný, kdy již od začátku používání je vnitřní impedance superkapacitorů s úrovní přebíjení vyšší, ale drží se na přibližně stejné hodnotě během celé doby používání. Při nabíjení na nominální hodnotu napětí je jejich vnitřní impedance asi

0,23 mΩ*kg a při 120% přebíjení asi 0,32 mΩ*kg. Měrná energie pseudokapacitorů Nesscap při nabíjení na nominální hodnotu napětí je asi 6 Wh/kg a u Maxwell asi 3,7 Wh/kg. U superkapacitorů Maxwell, je ovšem přebíjení velice výhodné, protože při 120% přebíjení je měrná energie více než 5,5 Wh/kg a trend poklesu je pro všechny měřené způsoby nabíjení stejný. To neplatí u Nesscap, kde přibližně po 5000 cyklech začne být nejvýhodnější jen nabíjení na jmenovitou hodnotu napětí. Z pohledu účinnosti čerpání energie nastává při přebíjení pseudokapacitorů Nesscap také problém, protože již při 110% přebíjení nominální hodnoty napětí se účinnost dostává po 16 tisících cyklech ke kritické hodnotě 60 %. Účinnost čerpání energie superkapacitorů Maxwell je uvedena na obrázku 3.17 a pohybuje se vždy nad 94 %. Vzorek Nesscap přebíjený na 115 % nominální hodnoty napětí nelze brát jako vypovídající, protože jak již bylo uvedeno dříve, má výrobní vadu.

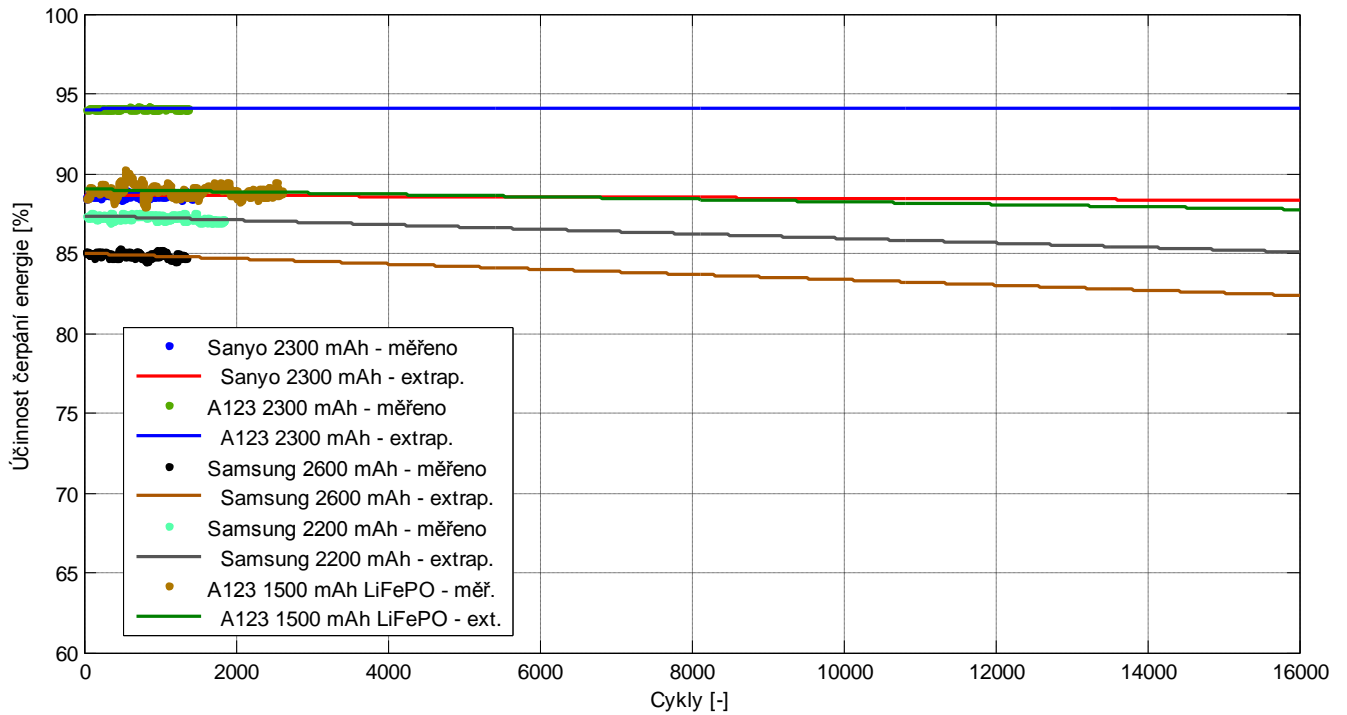
U akumulátorů vzhledem k jejich plánovanému mělkému vybíjení není důležitý jako u superkapacitorů pokles měrné energie, ale do kdy bude akumulátor schopen uchovat a dodat požadované množství energie (u PilsenCUBE je to 1 Wh). Toto množství energie je akumulátor schopen dodat, pokud po jejím odčerpání neklesne napětí článku pod minimální bezpečnou hranici. Proto jsou zde pro predikci životnosti v satelitu brána napětí na konci vybíjení každého cyklu. Stejně jako u superkapacitorů, tak i u akumulátorů záleží na účinnosti čerpání energie, která nesmí klesnout pod 60 %. Tyto průběhy jsou tedy také extrapolovány. A jako další vnitřní impedance, normovaná stejným způsobem jako u superkapacitorů. Pro přímé srovnání akumulátorů a superkapacitorů je zde také uvedena normovaná energie po započítání efektu mělkého vybíjení, protože ve skutečnosti využíváme pouze část z nominální uskladněné energie.



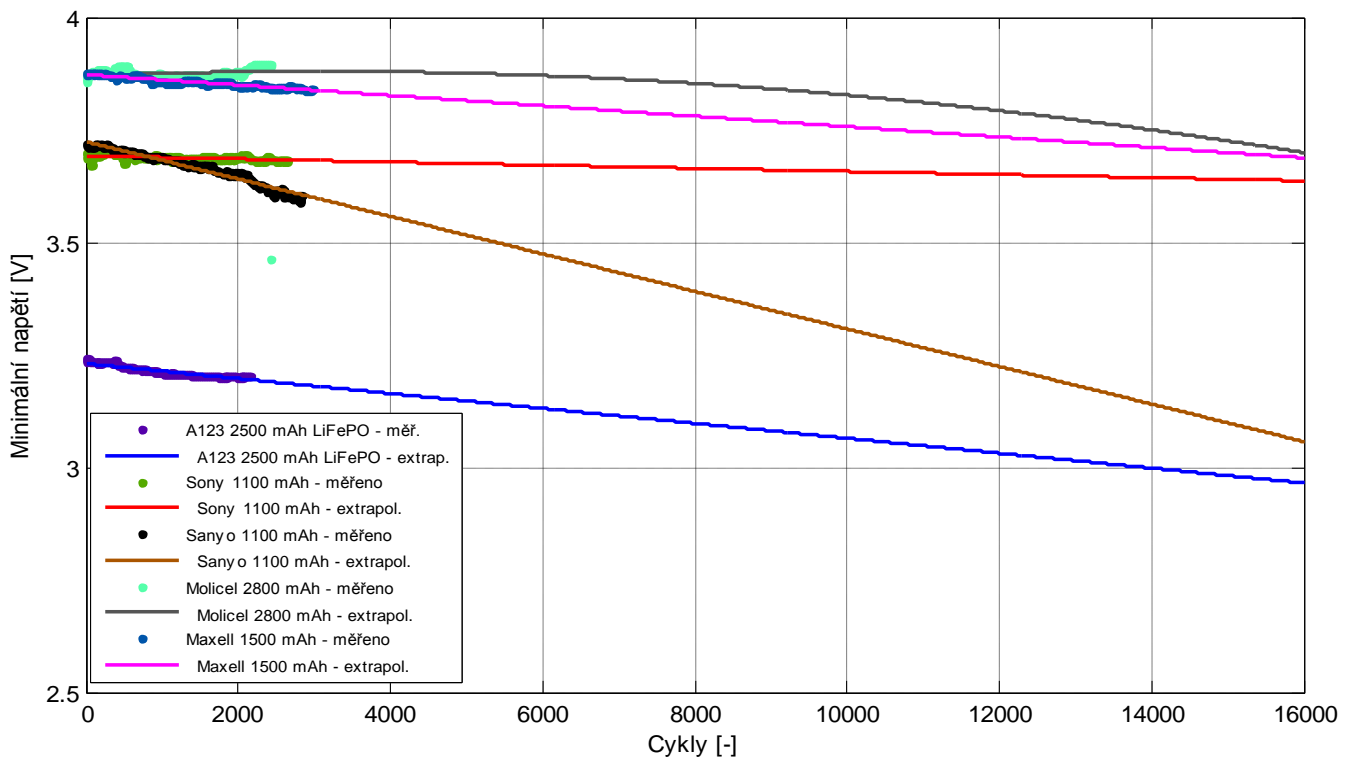
Obr. 3.47 Závislost napětí na konci vybíjení akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



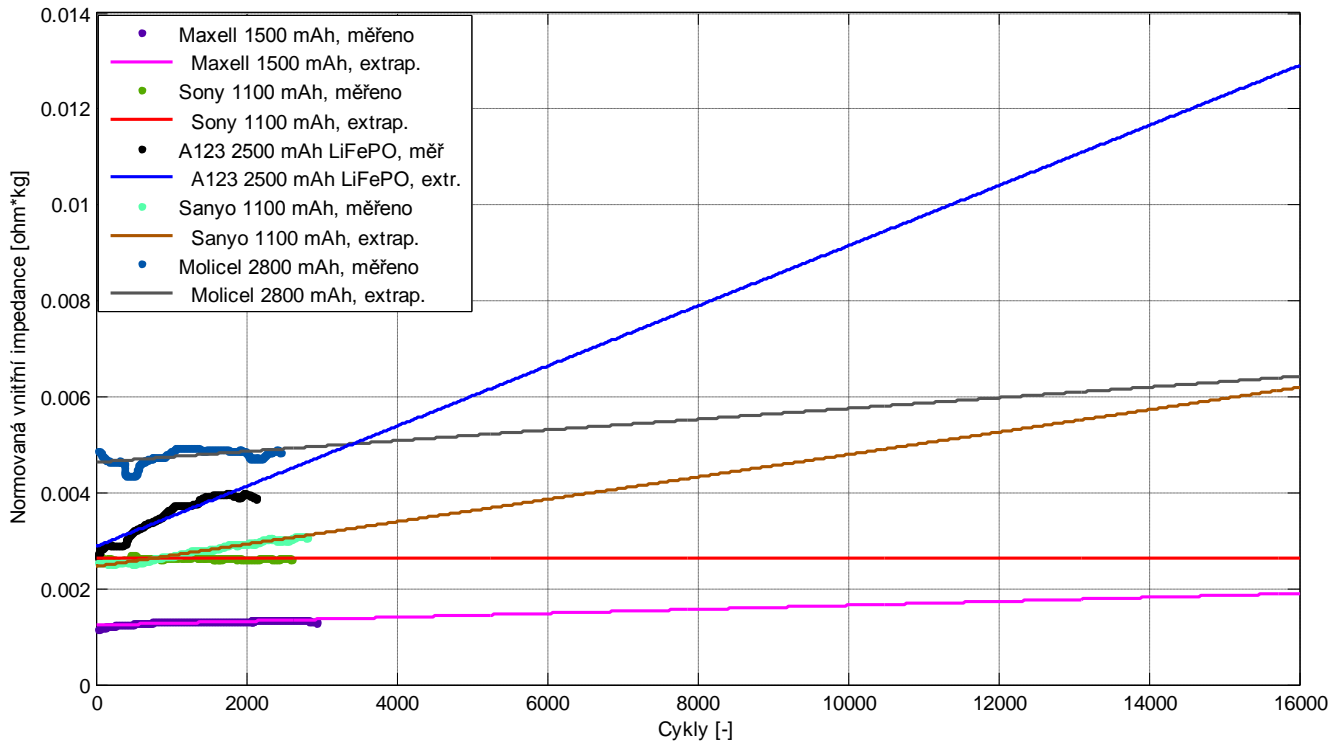
Obr. 3.48 Závislost normované vnitřní impedance akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



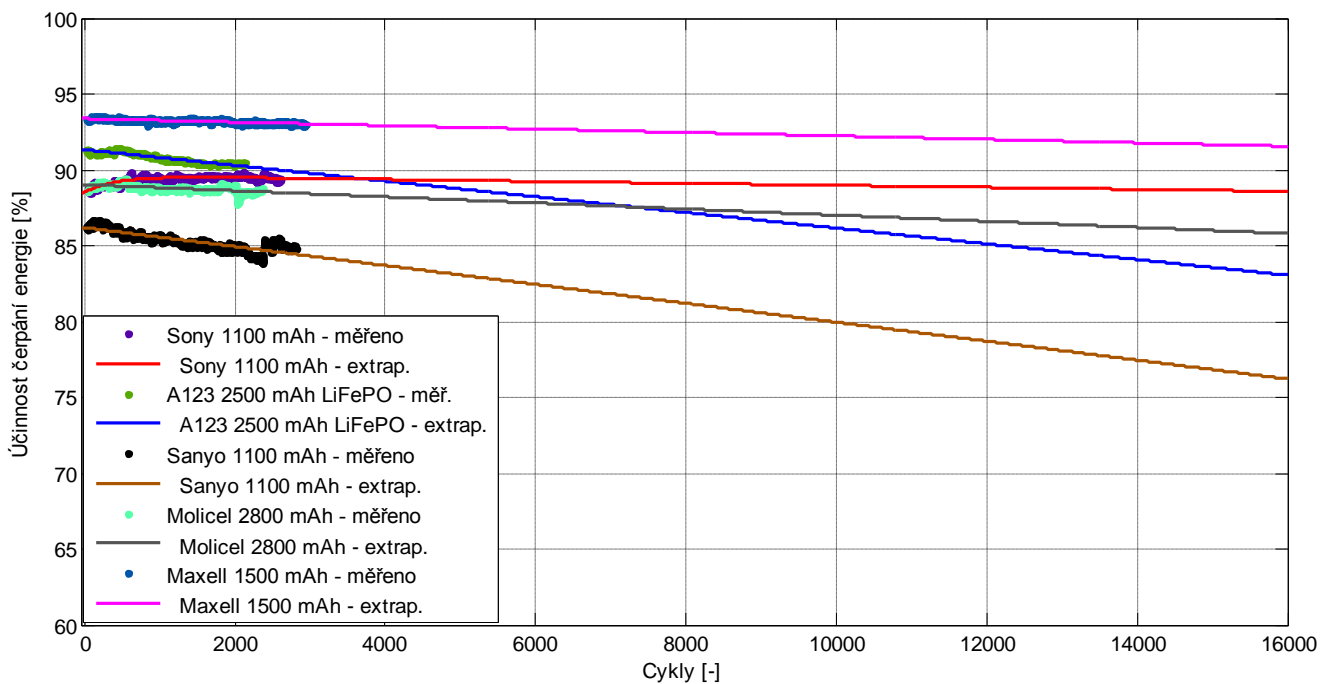
Obr. 3.49 Závislost účinnosti čerpání energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.50 Závislost napětí na konci vybití akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.51 Závislost normované vnitřní impedance akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů



Obr. 3.52 Závislost účinnosti čerpání energie akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů

Minimální bezpečné napětí, do kterého lze akumulátory vybíjet se pohybuje u běžných Li-ion akumulátorů kolem 2,5 V, u LiFePO_4 je to méně než 2 V. Na obrázcích 3.45 a 3.47 jsou vynesena napětí akumulátorů po odčerpání 1 Wh energie a po protažení trendu na hranici 16 tis. cyklů (odpovídá tříleté misi pikosatelitu) je zřejmé, že napětí žádného z akumulátorů pod stanovenou hranici neklesne. Nelze ale najít jasnou souvislost mezi hloubkou vybíjení a životností, protože například napětí na konci vybíjení u akumulátoru Sony 1100 mAh klesá prakticky zanedbatelně a přitom hloubka vybíjení je asi 25 %, proti například Samsung 2200 mAh, kde je hloubka vybíjení pouze asi 12,5 %, ovšem pokles napětí je rychlejší. Záleží tedy spíše na technologii výroby a konstrukci článku. Přírůstek vnitřní impedance je nejvyšší u Lithium-fosfátového akumulátoru A123 2500 mAh, naopak nejnižší přírůstek mají Li-ion akumulátory A123 2300 mAh a Sony 1100 mAh. Účinnost čerpání energie u žádného testovaného článku neklesne po 16 tis. cyklech pod hranici 75 %.

Srovnání superkapacitorů a akumulátorů pro použití v pikosatelitu je vhodné provést z hlediska měrné energie, kde je zohledněna jak uskladněná energie, tak hmotnost. Při používání obou technologií uchovávání energie standardní způsobem, tedy hlubokém vybíjení akumulátorů a nabíjení superkapacitorů na nominální hodnotu, mají akumulátory přibližně až 40 krát vyšší měrnou energii než superkapacity, ovšem při řádově tisíckrát nižší životnosti akumulátoru. Pokud používáme techniky prodloužení životnosti akumulátorů a techniky navýšení měrné energie superkapacitorů, pak využívaná měrná energie u akumulátorů je vyšší pouze již 2 až 4 krát oproti přebíjeným superkapacitorům. Z tohoto plyne, že současné superkapacity se stále nehodí jako hlavní zdroj energie pro napájení subsystémů pikosatelitů. Poskytují však o řád nižší normovanou impedanci i po velkém množství cyklů, a tak je můžeme používat pro podporu činnosti akumulátorů při špičkových proudových odběrech. Hodnoty odčerpávané měrné energie všech typů akumulátorů při periodickém odčerpávání 1 Wh energie jsou v tabulce 3.21. Pro srovnání jsou v tabulce 3.22 uvedeny měrné energie superkapacitorů.

Tab. 3.21 Odčerpávaná měrná energie akumulátorů

	Odebíraná měrná energie [Wh/kg]
Sanyo 2300 mAh	22,7
A123 2300 mAh	14,3
Samsung 2600 mAh	22,7
Samsung 2200 mAh	22,7
Maxel 1500 mAh	22,7
A123 1500 mAh	11,7
Sony 1100 mAh	25
A123 2500 mAh	13,1
Sanyo 1100 mAh	20
Molicel 2800 mAh	10

Tab. 3.22 Odčerpávaná měrná energie superkapacitorů

	Přebíjení	Měrná energie po 500 cyklech [Wh/kg]	Měrná energie po 2000 cyklech [Wh/kg]	Měrná energie po 16000 cyklech [Wh/kg]
Nesscap	100%	6,1	6,2	6,2
	110%	7,5	7,2	3,8
	115%	8	7,2	2,6
	120%	9,3	8	2,6
Maxwell	100%	3,8	3,7	3,6
	110%	4,8	4,7	4,5
	115%	5,3	5,2	5
	120%	6	5,8	5,4

Vzhledem k tomu, že u akumulátorů je velké množství měrné energie nevyužíváno pro prodloužení životnosti, jsou závislosti nevyužité měrné energie všech akumulátorů uvedeny v příloze.

4 Závěr

V této práci byly otestovány dva různé typy superkapacitorů, EDLC superkapacitory Maxwell a Pseudokapacitory Nesscap. U obou technologií byla testována možnost navýšení měrné energie přebíjením nominální hodnoty napětí a to o 110 %, 115 % a 120 %. Dále bylo otestováno deset vzorků akumulátorů na bázi lithia. U všech byla testována závislost mělkého vybíjení na prodloužení životnosti. Hloubka vybíjení byla u každého vzorku jiná, cyklicky byla odebírána vždy 1 Wh energie.

U pseudokapacitorů Nesscap se při provozování projevuje jejich konstrukční podobnost s lithiovými akumulátory. Měrná energie tedy lze přebíjením krátkodobě značně navýšit, ovšem tato výhoda se smazává u všech úrovní přebíjení přibližně po 5000 cyklech. Obdobné platí o účinnosti čerpání energie, která i při nejnižším přebíjení (110 % nominální hodnoty napětí) přibližně po 5000 cyklech klesne pod hranici 80 %. S tím souvisí vnitřní impedance, která s přebíjením značně narůstá. Pro dlouhodobé používání je tedy vhodné pseudokapacitory Nesscap nabíjet pouze na nominální hodnotu napětí. Ovšem pro použití v napájecím systému pikosatelitu je nutné doporučit otestování nabíjení na katalogovou hodnotu napětí během delšího počtu cyklů, protože z přibližně 2500 nabíjecích cyklů změřených v této práci nelze s dostatečnou jistotou předpovědět chování na konci dlouhodobé mise.

Superkapacitory Maxwell nabízejí větší prostor pro navýšení měrné energie přebíjením nominální hodnoty napětí. Měrnou energii lze navýšit velmi dlouhodobě, tedy na celou dobu plánované tříleté mise pikosatelitu. Vnitřní impedance těchto superkapacitorů s přibývajícím počtem cyklů nijak významně nenarůstá a neklesá ani účinnost čerpání energie, která se pohybuje vždy přes 94%.

Z hlediska doporučení pro projekt PilsenCUBE by bylo vhodné nadále dlouhodobě testovat pseudokapacitory Nesscap při nominálním nabíjení a superkapacitory Maxwell při přebíjení nominální hodnoty napětí 120 % a více, kdy obě technologie podle extrapolace z krátkých testů vykazují podobné výsledky po 2500 nabíjecích cyklech. Výstupní energie i vnitřní impedance jsou srovnatelné při použití jednoho superkapacitoru Maxwell nebo tří paralelně řazených Nesscap.

Ze zástupců akumulátorů bylo testováno osm vzorků Li-ion a dva vzorky Li-Metal. Obecně lze říci, že pro plánovanou tříletou misi pikosatelitu by bylo možné využít jako zásobníky energie všechny testované vzorky, protože 1 Wh energie jsou schopny uchovat i po plánovaných 16 tis. cyklech. Testované Li-Metalové vzorky (A123 1500 mAh a A123 2500

mAh) mají menší pokles kapacity než většina Li-iontových. Bylo by tedy možné například kvůli úspoře hmotnosti a prostoru na palubě pikosatelitu použít menší množství těchto článků a vybíjet je hlouběji. Bylo by však vhodné tyto články pro hlubší vybíjení opět otestovat. Obdobně nízký úbytek kapacity jako u dvou Li-Metalových článků má testovaný Li-ion akumulátor Sony 1100 mAh. U všech ostatních dochází k degradaci parametrů rychleji. Naopak oběma Li-Metalovým vzorkům nejrychleji narůstá jejich vnitřní impedance a klesá jejich účinnost. Řádově se však vnitřní impedance pohybují u všech testovaných akumulátorů stejně a účinnost čerpání energie u žádného neklesne pod kritickou hranici 60 %.

Pro krátkodobé mise pikosatelitu do jednoho roku se tedy jeví výhodnější ze superkapacitorů použít pseudokapacitory Nesscap, například přebíjené na 110 % nominální hodnoty napětí. Jejich měrná energie je vyšší než u superkapacitorů Maxwell a právě hranice jednoho roku je mez, kdy je ještě přebíjení Nesscap výhodnější. U akumulátorů by pro krátkodobé mise mohlo být nejvýhodnější použití menšího počtu článků a hlubšího vybíjení, protože při mělkém vybíjení je rezerva v životnosti značná. Pro dlouhodobé mise, tři a více let, u Nesscap přebíjení není možné využít a tak se nabízí dvě možnosti. První z nich je přebíjení superkapacitorů Maxwell na 120 % nominální hodnoty napětí a druhou nabíjení Nesscap na jmenovitou hodnotu napětí. Měrná energie je v těchto případech srovnatelná. U akumulátorů, vzhledem k tomu že z hlediska uchovávání energie všechny měřené vzorky vyhovují, bude vhodné volit články s nízkým objemem a hmotností kvůli efektivnímu využití místa na palubě.

Z celkového srovnání mezi akumulátory a superkapacitory vychází, že i po použití techniky navýšení měrné energie superkapacitorů přebíjením a prodloužení životnosti akumulátorů mělkým vybíjením, je vhodné jako primární zásobníky energie používat akumulátory, protože mají stále přibližně 2 až 4 krát vyšší využitelnou měrnou energii než superkapacitory. Ty však mají o řád nižší vnitřní impedanci a také větší teplotní rozsah. Je tedy vhodné použít superkapacitory v kombinaci s akumulátory. Výhody této kombinace se projeví například při odběrech špičkových proudů nebo při nutnosti zahájení funkce při nízké teplotě.

Pro měření dalších zásobníků energie na tomto měřícím pracovišti by mohlo být vhodné implementování několika inovací. Nejdůležitější z nich by mohla být instalace ochranných spínačů, které by připojily měřený objekt pouze v případě, že měřicí karta komunikuje s měřícím PC. V případě poruchy přenosu by byl měřicí objekt odpojen jak od zátěže, tak od zdroje proudu. Bez takovéto ochrany při poruše komunikace měřicí karty a PC z pravidla, pokud není obsluhou chyba včasně objevena, dojde k úplnému vybití, nebo naopak přebití

měřeného zásobníku energie. Další inovací, tentokrát softwarovou, by mohla být implementace automatického zálohování naměřených dat. Může dojít k tomu, že datový soubor, který je během měření vytvářen, se při špatném přenosu mezi měřicí kartou a PC poškodí a nelze jej pak použít pro další výpočty. Pokud tedy není zálohování v současné době prováděno obsluhou často, mohla by při nenadálé poruše nastat ztráta naměřených dat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY. *Cubesat design specifications* Rev. 12 [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf
- [2] How to Prolong Lithium-based Batteries. [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries
- [3] SCHAFFNER, Jake A. The Electronic System Design, Analysis, Integration, and Construction of the Cal Poly State University CP1 CubeSat. [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: http://polysat.calpoly.edu/download/JakeSchaffner_srproj.pdf
- [4] Nabíjení lithiových akumulátorů. [online]. [cit. 2014-01-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermetické-akumulatory/nabijeni-hermetických-akumulátoru/nabijeni-lithiových-akumulátoru>
- [5] What's the role of supercapacitor [online]. [cit. 2014-01-21]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
- [6] VEŘTÁT, Ivo. UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA. *Picosatellite Design Report*. 2013.
- [7] Studies of Supercapacitor Carbon Electrodes with High Pseudocapacitance [online]. [cit. 2014-01-19]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/download/get/type/pdfs/id/26963>
- [8] Pilsen CUBE: Z historie. [online]. [cit. 2014-01-25]. Dostupné z: <http://pilsencube.zcu.cz/cs/node/31>
- [9] ADDAIM, Adnane, Abdelhaq KHERRAS a El Bachir ZANTOU. Design of Low-cost Telecommunications CubeSat-class Spacecraft. [online]. Maroko [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/aerospace-technologies-advancements/design-of-low-cost-telecommunications-cubesat-class-spacecraft>
- [10] How it works: Highly reversible physical charging and discharging mechanism. [online]. [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.nesscap.com/product/how.jsp>
- [11] VEŘTÁT, Ivo, Jaroslav HROUDA a Jaroslav HOFMAN. *Spectralab triangular solar cell evaluation for usage in Pilsen CUBE Picosatellite* [online]. Plzeň, 2010 [cit. 2014-03-05]. ISBN 978-80-7043-865-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [12] VEŘTÁT, Ivo a Aleš VOBORNÍK. UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA. *Efficient and Reliable Solar Panels for Small CubeSat Picosatellites*.
- [13] VEŘTÁT, I. a M. ONDRÁČEK. Tester pro dlouhodobou analýzu superkapacitorů a akumulátorů pro projekt pikosatelitu Pilsen CUBE a první výsledky ověřovacích testů. [online]. roč. 2011, č. 3 [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2011/Cislo3_2011/r5c3c7.pdf

- [14] Sony Launches High-power, Long-life Lithium Ion Secondary Battery Using Olivine-type Lithium Iron Phosphate as the Cathode Material. SONY. [online]. [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200908/09-083E/index.html#r=s>

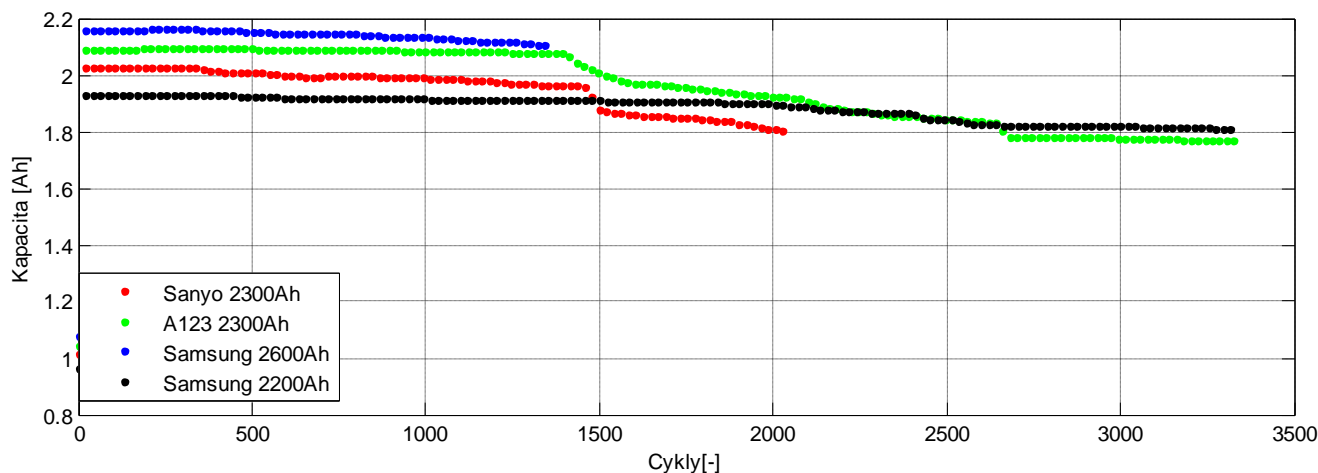
- [15] MAXWELL. *Datasheet* [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/bcseries_ds_1017105-4.pdf

- [16] NESSCAP. *Datasheet* [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.nesscap.com/product/pseudo.jsp>

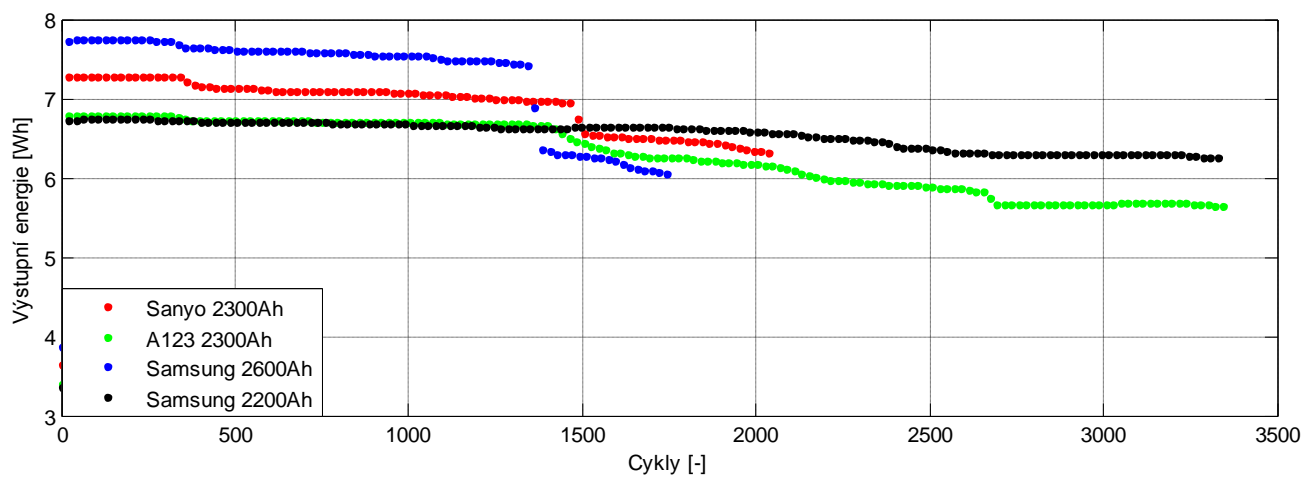
- [17] SAMSUNG 2200 UR18650. *Datasheet* [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.avacom.cz/Datasheety/Samsung/ICR18650-22F.pdf>

Přílohy

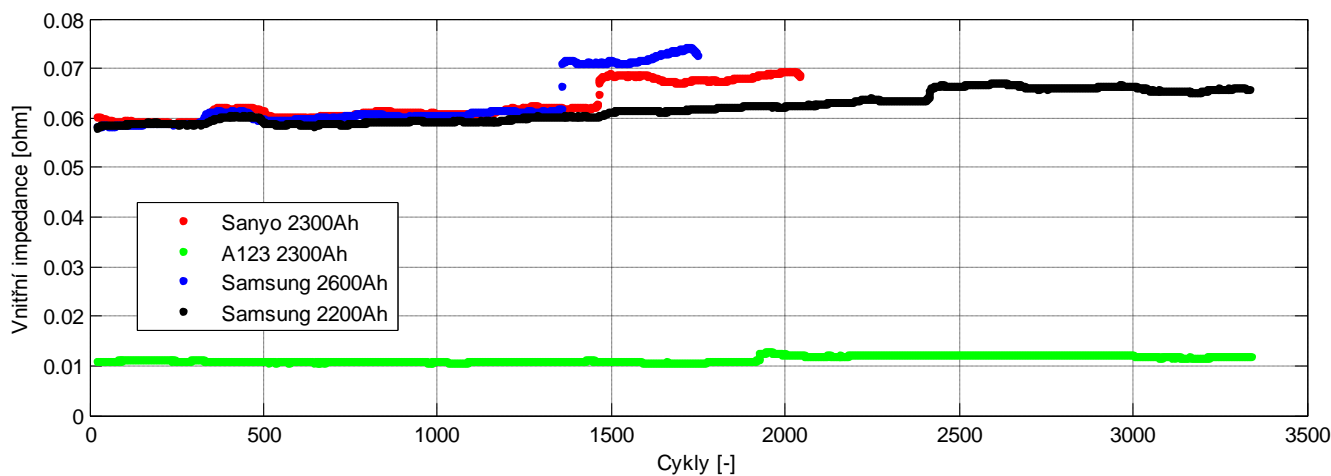
Příloha 1 Kapacita první sady akumulátorů včetně měření po úplném vybití

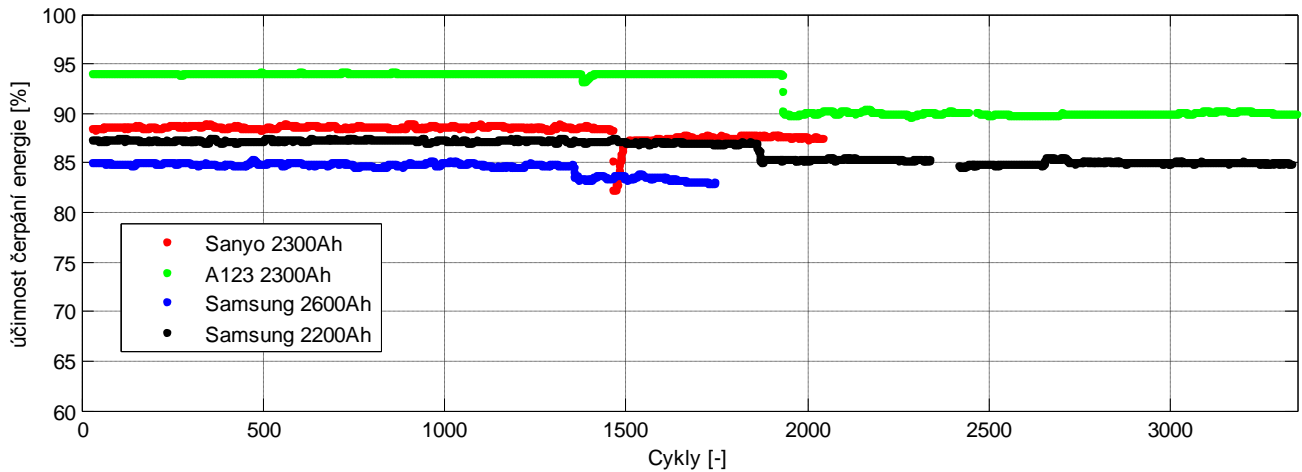
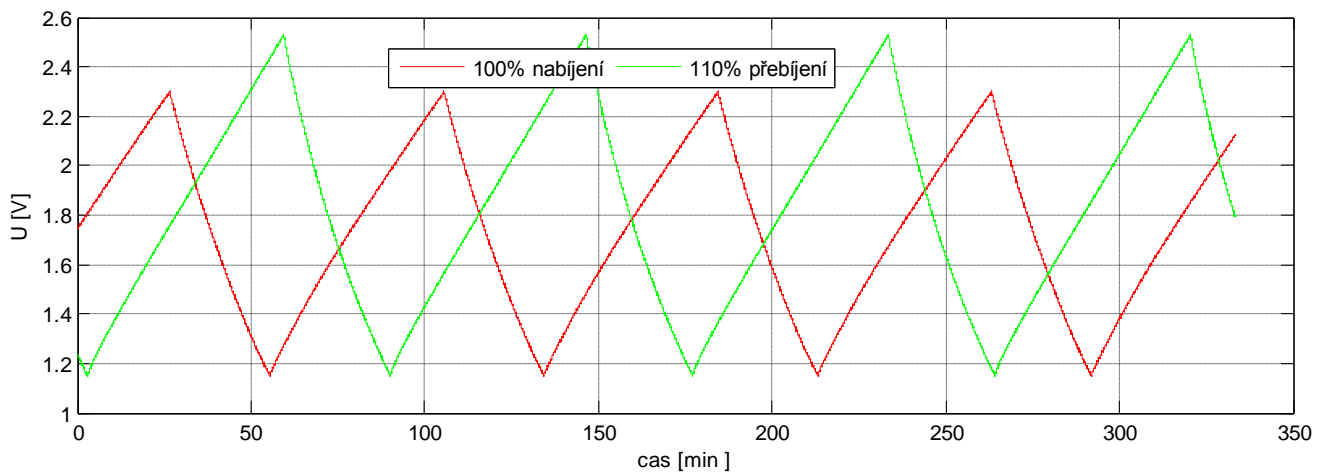
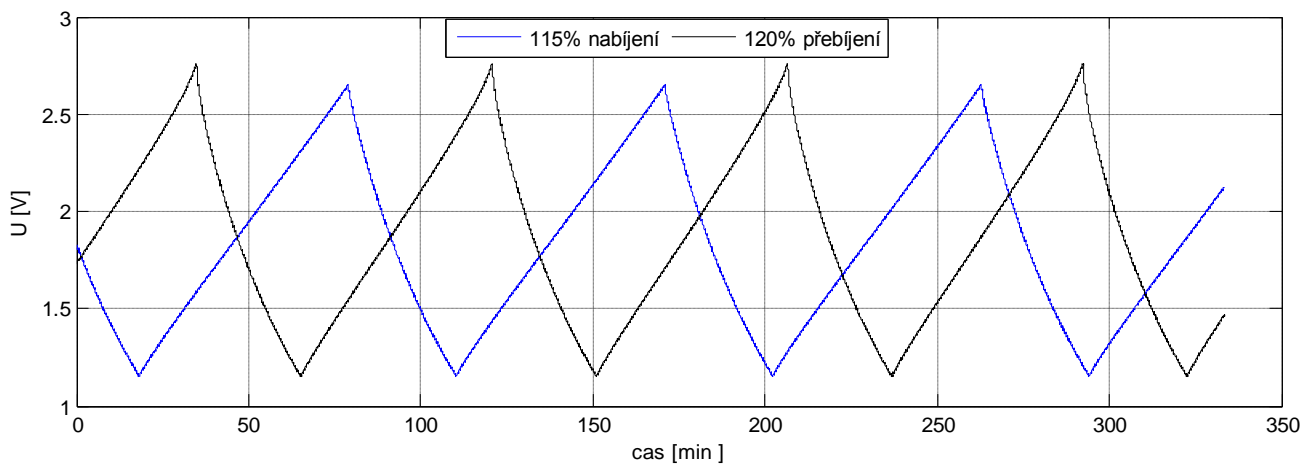


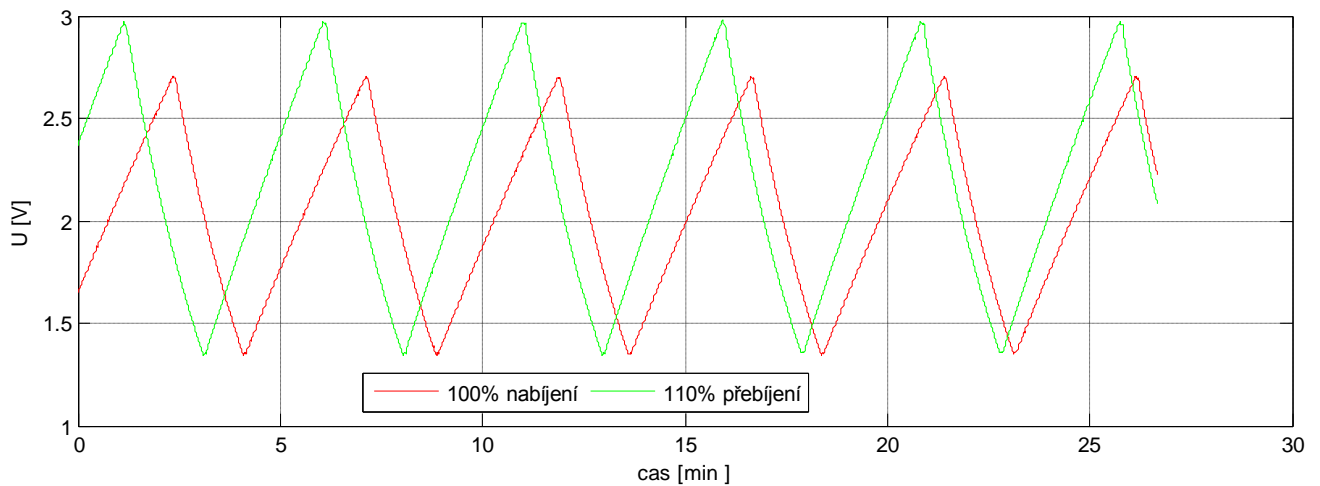
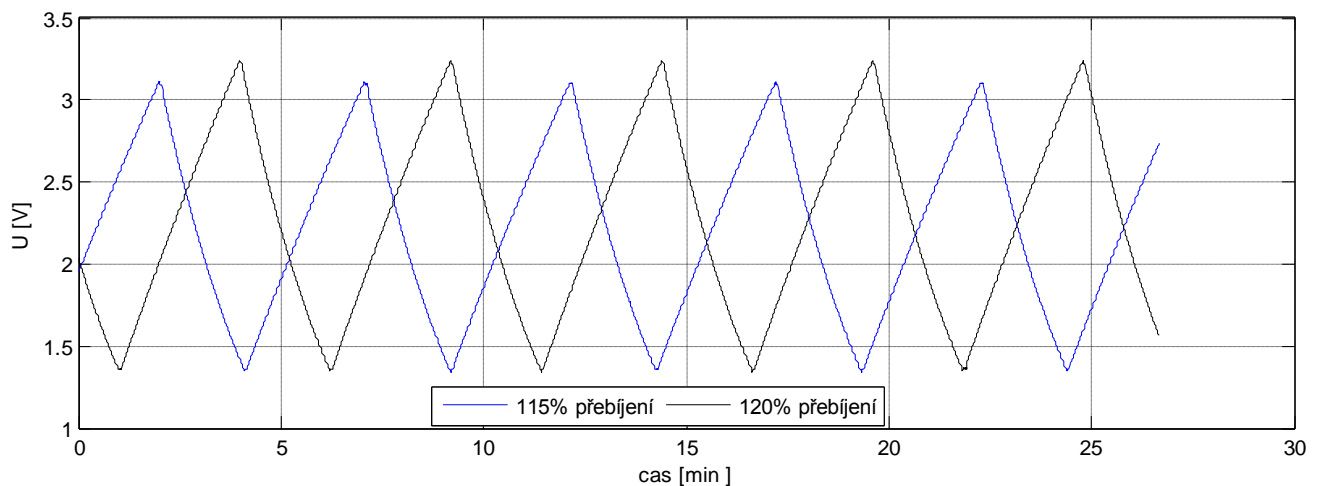
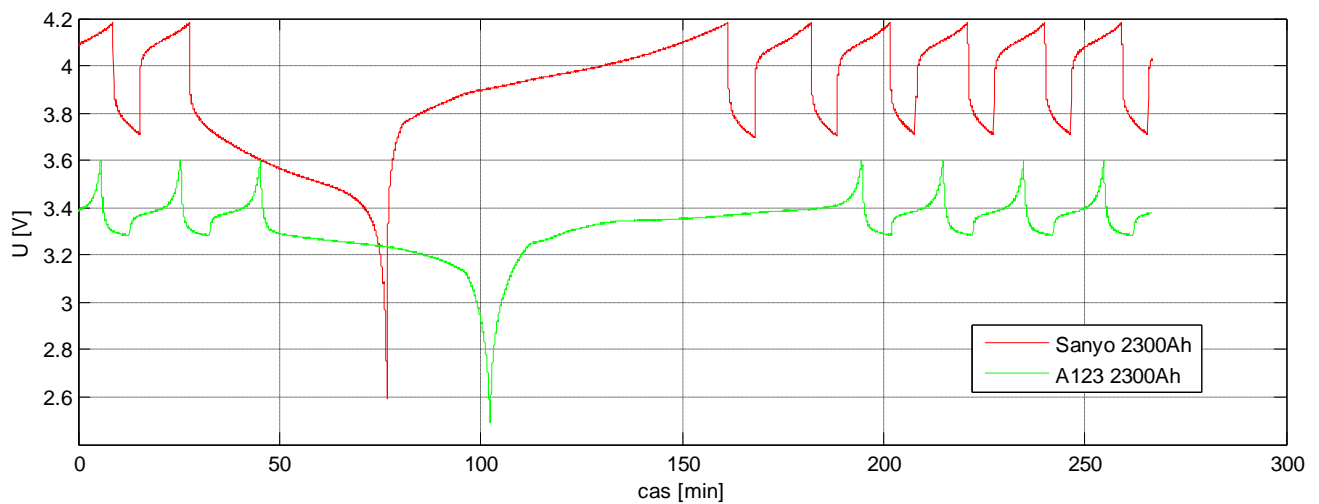
Příloha 2 Výstupní energie první sady akumulátorů včetně měření po úplném vybití

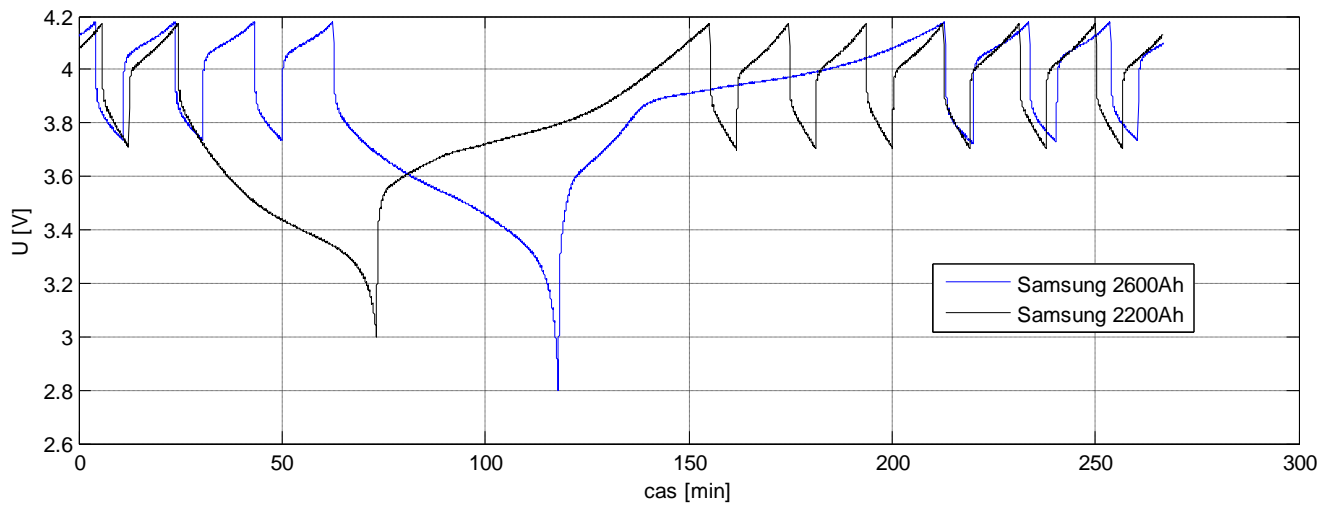
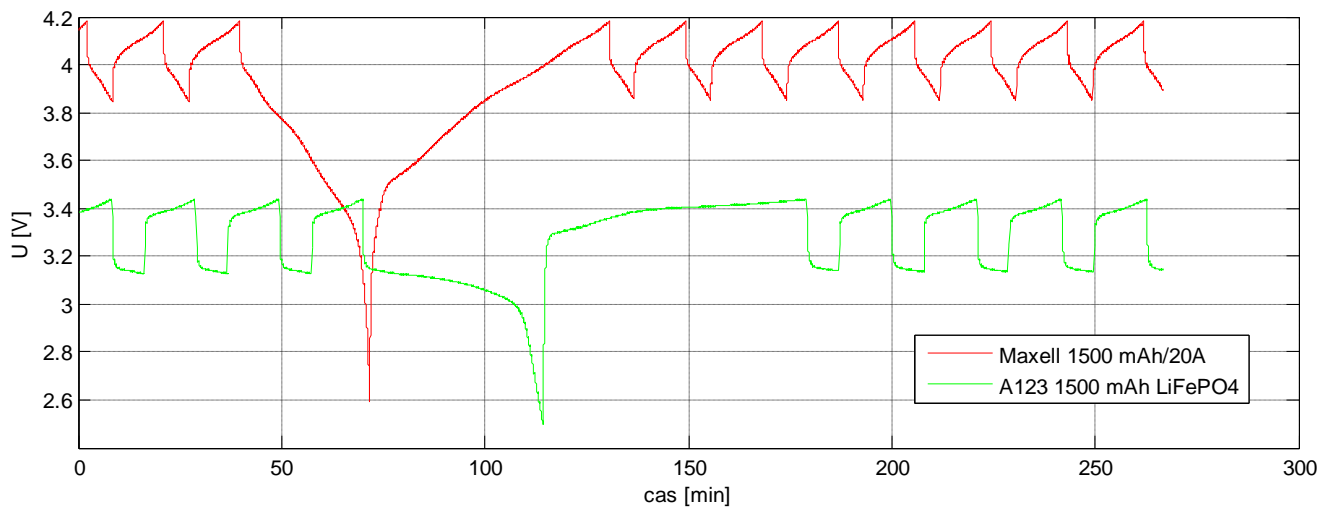
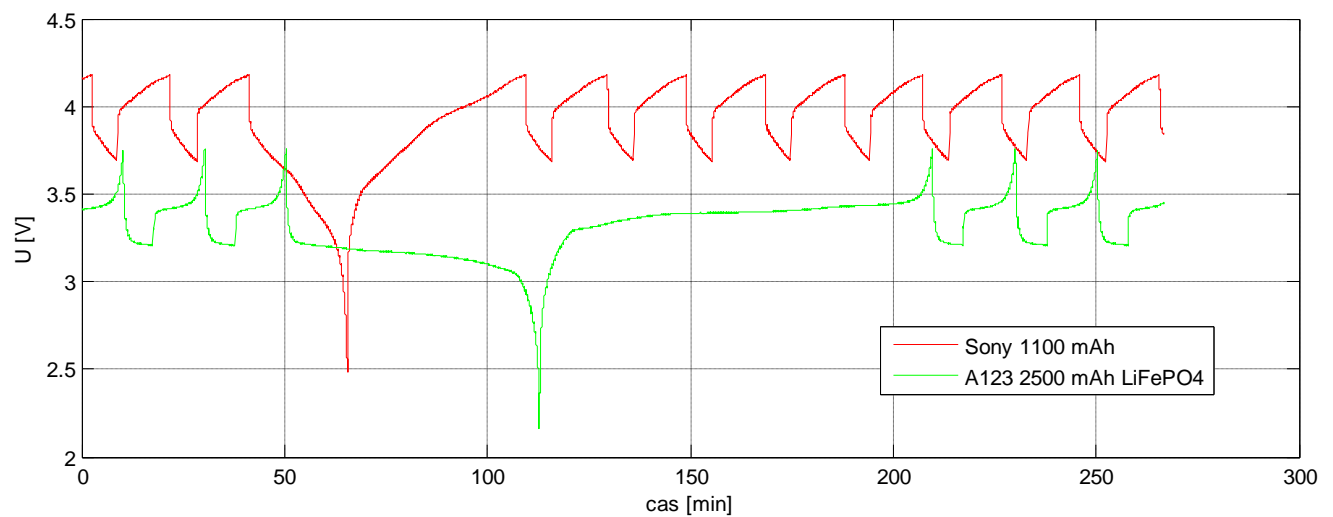


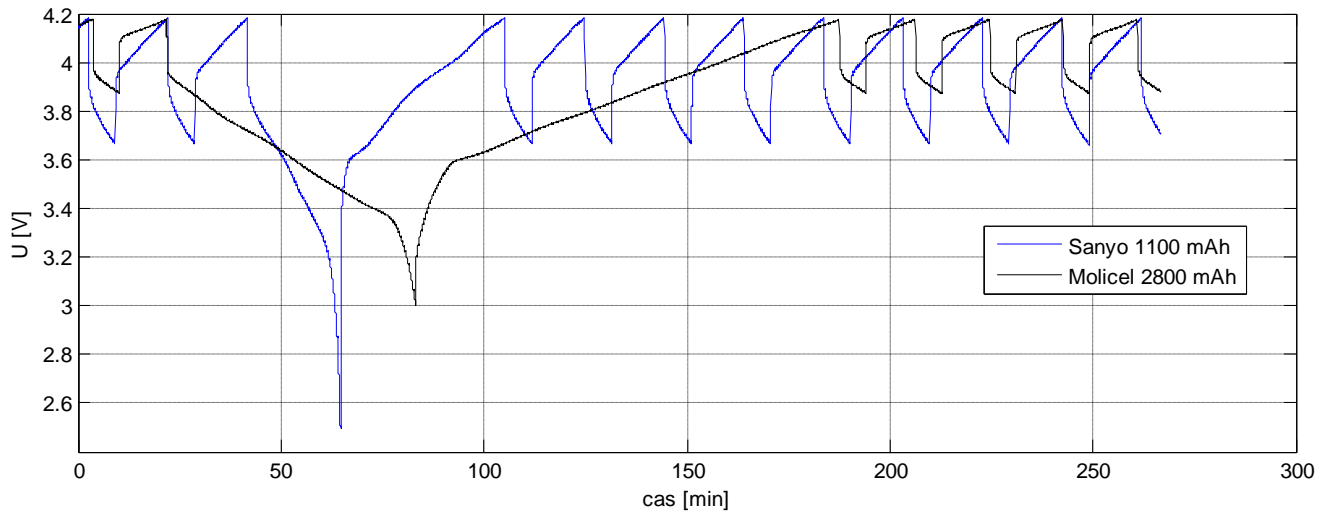
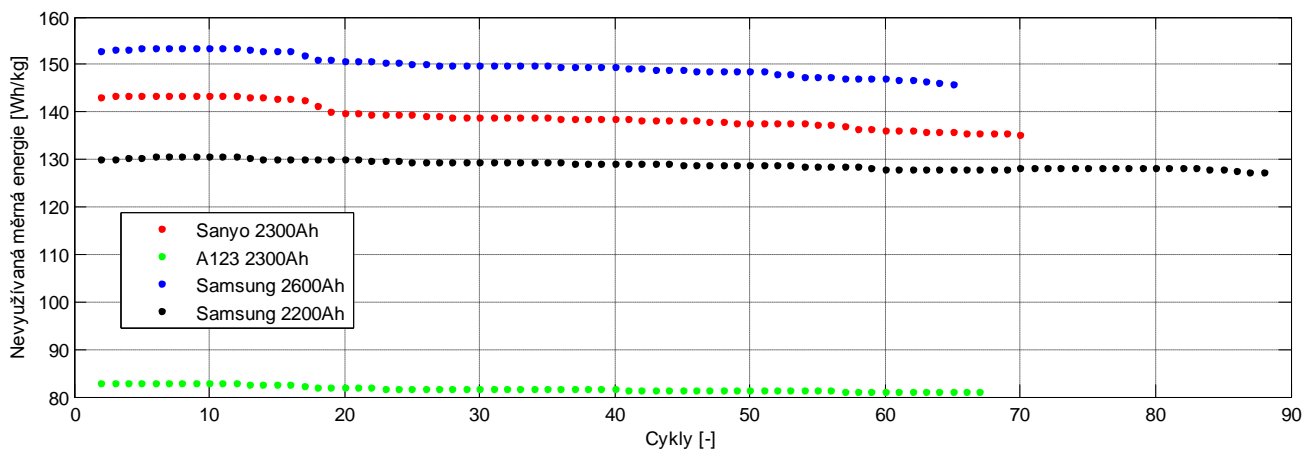
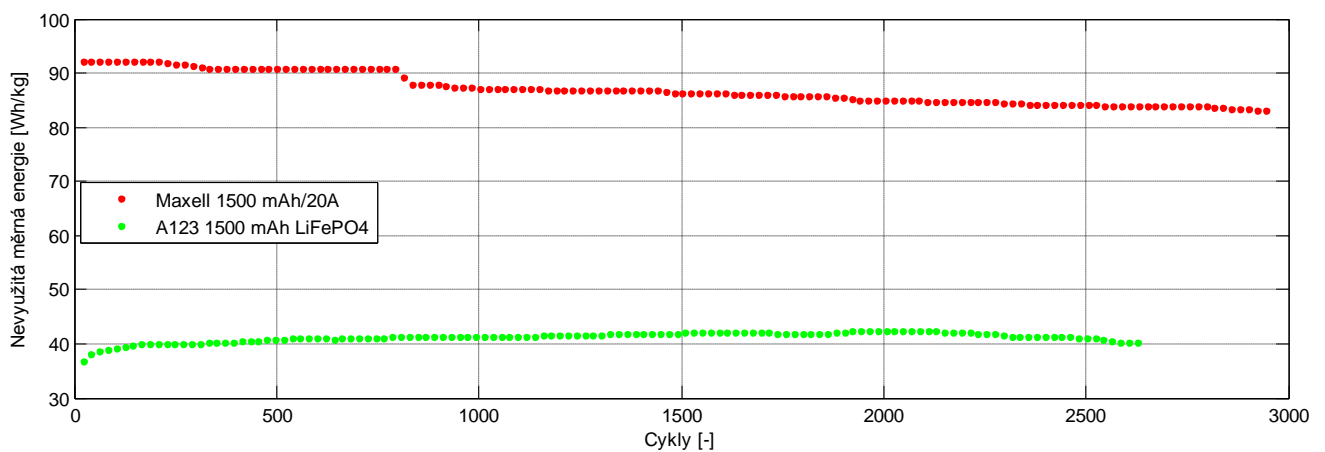
Příloha 3 Vnitřní impedance první sady akumulátorů včetně měření po úplném vybití



Příloha 4 Účinnost čerpání energie první sady akumulátorů včetně měření po úplném vybití**Příloha 5 Časový průběh napětí pseudokapacitorů Nesscap****Příloha 6 Časový průběh napětí pseudokapacitorů Nesscap**

Příloha 7 Časový průběh napětí superkapacitorů Maxwell**Příloha 8** Časový průběh napětí superkapacitorů Maxwell**Příloha 9** Časový průběh napětí akumulátorů Sanyo 2300 mAh a A123 2300 mAh

Příloha 10 Časový průběh napětí akumulátorů Samsung 2600 mAh a Samsung 2200 mAh**Příloha 11** Časový průběh napětí akumulátorů Maxell 1500 mAh a A123 1500 mAh**Příloha 12** Časový průběh napětí akumulátorů Sony 1100 mAh a A123 2500 mAh

Příloha 13 Časový průběh napětí akumulátorů Sanyo 1100 mAh a Molicel 2800 mAh**Příloha 14** Nevyužitá měrná energie první série testovaných akumulátorů**Příloha 15** Nevyužitá měrná energie druhé série testovaných akumulátorů

Příloha 16 Nevyužitá měrná energie třetí série testovaných akumulátorů

