

Tester pro dlouhodobou analýzu superkapacitorů a akumulátorů pro projekt pikosatelitu PilsenCUBE a první výsledky ověřovacích testů

I. Veřtát¹, M. Ondráček¹

¹ Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : ivertat@kae.zcu.cz, ondracek@students.zcu.cz

Anotace:

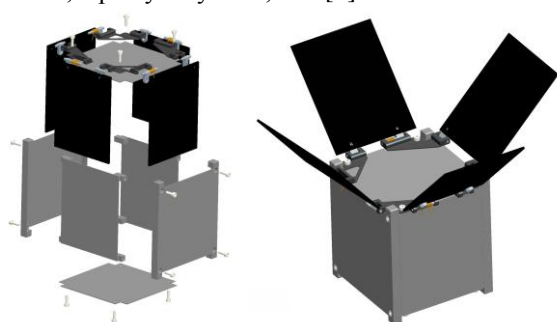
V článku popisujeme tester s řídicí aplikací navržený pro dlouhodobou analýzu chování superkapacitorů a akumulátorů během nabíjecích a vybíjecích cyklů. Zařízení umožňuje u superkapacitorů dlouhodobě sledovat účinnost uskladňování náboje a energie v průběhu cyklování, analyzovat změny ve vnitřní impedanci a samovybití, vyhodnocovat změny v kapacitě a sledovat dynamické změny kapacity v závislosti na napětí. Toto zařízení také umožňuje sledovat některé obdobné charakteristiky i u akumulátorů. Článek obsahuje i ukázkou výsledků prvních ověřovacích testů superkapacitorů Maxwell pro potřeby pikosatelitu PilsenCUBE, vyvíjeného na Fakultě elektrotechnické, ZČU v Plzni.

Abstract:

This paper deals with super-capacitor and accumulator tester and also some results of Maxwell super-capacitors are mentioned. The tester device is capable to realize long-term charging and discharging cycles and evaluate several parameters change in time. It is possible to analyze an efficiency of charge and energy storing, to analyze an internal resistance and self-discharging, to analyze capacity changing in time domain and in relation to applied voltage. Results from tester devices were used in picosatellite PilsenCUBE, developed at the Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen.

ÚVOD

Od roku 2009 vyvíjíme na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni pikosatelit PilsenCUBE, který patří do skupiny standardizovaných satelitů třídy CubeSat. Tyto pikosatelity představují pro tvůrce velkou výzvu vzhledem k nutnosti vejít se do velmi tvrdých omezení celkové hmotnosti (1,33kg) a rozměrů (cca 100mm x 100mm x 113mm) a přitom splnit všechny předepsané akceptační testy odolnosti proti vibracím, vakuu, tepelným cyklům, atd. [1].



Obr. 1: Těleso pikosatelitu PilsenCUBE.

Zásobníky elektrické energie v těchto pikosatelitech na nízké oběžné dráze Země jsou během jednoho roku činnosti vystaveny velkému počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů (cca 5000) za velkého rozpětí možných provozních teplot [2], [3]. Akumulátory vystavené takovému počtu nabití a vybití ztrácí na své kapacitě, nejsou poté schopny pokrývat krátkodobé poža-

davky na špičkové proudové odběry, což vede k poklesům napětí na napájecí sběrnici a k celkovému selhávání funkce pikosatelitu. Pokud je nám známo, chystáme se jako první tým řešit tento problém pro pikosatelity třídy CubeSat využitím technologie superkapacitorů. Superkapacitory jsou prvky, které využívají uhlíkové nanočástice a v porovnání s běžnými akumulátory stárnou téměř tisícínásobně pomaleji. Jejich nevýhodou proti akumulátorům je však vyšší hmotnost a nižší provozní napětí.

Cílem tohoto článku je představit tester navržený tak, aby dovolil sledovat parametry superkapacitorů během velkého počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů, který bude použitelný se softwarovou úpravou i pro měření LiFePO₄ akumulátorů, které tvoří hlavní zásobník elektrické energie pikosatelitu PilsenCUBE.

POŽADAVKY NA TESTER

Tester by se měl skládat z běžně dostupného a nahraditelného vybavení laboratoře (napájecí zdroj s proudovou regulací, řídicí počítač s měřicí kartou, umělé výkonové zátěže) a jednoduchého říditelného přepínače mezi nabíjením ze zdroje a vybíjením do ohmické zátěže.

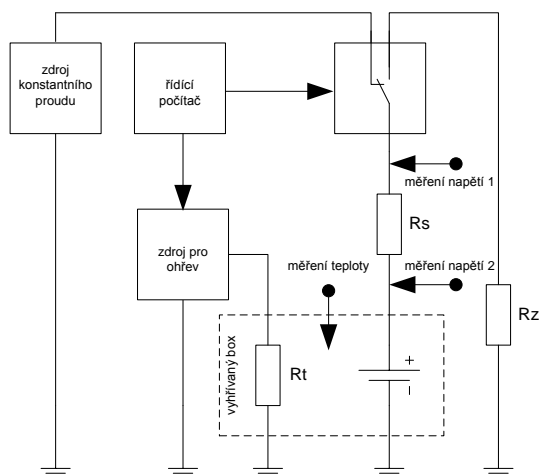
Pro měření parametrů superkapacitorů je důležité mít možnost nastavit maximální napětí, po jehož dosažení dojde k překlopení na vybíjení, a minimální napětí, po jehož dosažení dojde k překlopení na nabíjení. Ze zaznamenaných průběhů napětí a proudů je pak vyhodnocována účinnost uskladňování energie, ná-

boje, změna vnitřní impedance, změna kapacity a samovybití.

Při měření akumulátorů je účelné sledovat pro přepínání nabíjení a vybíjení kromě napětí také odčerpávanou kapacitu vyjádřenou v mAh. Životnost akumulátorů se v satelitech prodlužuje tak, že se z jejich celkové kapacity odčerpává pouze určitá malá část, např. 30 % [3]. Pokud nedochází k hlubokému vybití, prodlužuje se počet možných cyklů. Z toho důvodu je požadavek na tuto podmínku ukončení vybíjení implementován také u navrženého testeru.

ŘEŠENÍ TESTERU

Na obr. 2 je vyobrazeno zjednodušené silové schéma navrženého testeru superkapacitorů s vyznačením bodů měření (napětí na superkapacitoru, nabíjecí a vybíjecí proud, teplota uvnitř boxu). Základem testeru je běžný laboratorní zdroj, který má nastavitelné proudové omezení. Díky němu můžeme pracovat v režimu nabíjení konstantním proudem. Superkapacitor je vybíjen do výkonové zátěže R_z s pasivním chladičem. Pro větší ztrátové výkony je možné zátěž chladit odpařováním kapaliny.



Obr. 2: Zjednodušené schéma testeru superkapacitorů.

Připojení superkapacitoru k nabíjecímu zdroji, k vybíjecí zátěži nebo odpojení od obojího je realizováno řízenými tranzistorovými přepínači. Celý tester je řízen aplikací v Simulinku pomocí měřicí karty od firmy National Instruments. Přes analogové vstupy snímá aktuální napětí na superkapacitoru, nabíjecí a vybíjecí proud z úbytku napětí na rezistoru R_s a případně teplotu prostředí v boxu z platinového senzoru Pt1000. Aplikace v Simulinku na základě předem určených podmínek (dosažení limitů napětí u superkapacitorů, dosažení limitů napětí nebo přečerpávaného náboje u akumulátorů) rozhoduje, zda má docházet k nabíjení, vybíjení nebo odpojení superkapacitoru, případně zda se má aktivně vytápět box připojením zdroje k odporové zátěži R_t , pokud je vyžadováno měření za zvýšených teplot.

VYHODNOCOVÁNÍ MĚŘENÍ

Ze záznamů napětí na superkapacitoru a ze záznamů úbytku napětí na snímacím rezistoru (přepočteného na nabíjecí nebo vybíjecí proud) jsou vyhodnocovány následující údaje pro každý cyklus nabití / vybití:

Účinnost uskladňování náboje

Účinnost η_Q je počítána jako poměr mezi množstvím odčerpávaného náboje Q_{out} a množstvím uskladněného náboje Q_{in} během cyklu podle vztahu:

$$\eta_Q = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (1)$$

Množství odčerpávaného náboje je počítáno ze vztahu:

$$Q_{out} = T_S \cdot \sum_{k=t_2}^{t_3} I_{out}(k) \quad (2)$$

Množství uskladněného náboje je počítáno ze vztahu:

$$Q_{in} = T_S \cdot \sum_{k=t_1}^{t_2} I_{in}(k) \quad (3)$$

V těchto vztazích jsou I_{out} a I_{in} vybíjecí a nabíjecí proudy a T_S je perioda vzorkování měřených proudů. Časový interval od t_1 do t_2 představuje dobu nabíjení superkapacitoru a interval od t_2 do t_3 dobu vybíjení.

Účinnost přečerpávání energie

Účinnost η_W je počítána jako poměr mezi množstvím odebrané energie W_{out} a množstvím dodané energie W_{in} během cyklu podle vztahu:

$$\eta_W = \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (4)$$

Množství odebrané energie je počítáno ze vztahu:

$$W_{out} = T_S \cdot \sum_{k=t_2}^{t_3} U(k) \cdot I_{out}(k) \quad (5)$$

Množství dodané energie je počítáno ze vztahu:

$$W_{in} = T_S \cdot \sum_{k=t_1}^{t_2} U(k) \cdot I_{in}(k) \quad (6)$$

V těchto vztazích jsou I_{out} a I_{in} vybíjecí a nabíjecí proudy, U je aktuální napětí na superkapacitoru a T_S je perioda vzorkování měřených proudů a napětí. Časový interval od t_1 do t_2 představuje dobu nabíjení superkapacitoru a interval od t_2 do t_3 dobu vybíjení.

Kapacita superkapacitoru

Výpočet kapacity superkapacitoru vychází ze vztahů pro výpočet energie uskladněné běžným kapacitorem, protože pro superkapacitor platí identické vztahy. Je

zde ovšem nutné brát v potaz to, že superkapacitor během testů není vybíjen do nulového napětí, protože to by neodpovídalo reálné situaci v napájecím zdroji pikosatelitu. Během testů je superkapacitor cyklován mezi 0,25 V a svým maximálním provozním napětím 2,70 V. Energie odebraná ze superkapacitoru je při těchto podmínkách rovna:

$$W_{out} = \frac{1}{2} C 2,7^2 - \frac{1}{2} C 0,25^2 \quad (7)$$

Kapacitu superkapacitoru tedy vyjádříme úpravou vztahu (7) jako:

$$C = \frac{2W_{out}}{2,7^2 - 0,25^2} \quad (8)$$

Zajímavým jevem u superkapacitorů je fakt, že jejich okamžitá kapacita je závislá na jejich napětí. To vede při nabíjení konstantním proudem k nelineárnímu nárůstu jejich napětí. Pokud chceme znát závislost kapacity superkapacitoru na napětí, můžeme ji analyzovat z diferenciálního vztahu:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \quad (9)$$

V tomto vztahu ΔQ značí změnu náboje při změně napětí ΔU . Pro vyšší napětí superkapacitor vykazuje i vyšší kapacitu.

Samovybíjecí proud superkapacitoru

Protože je superkapacitor v napájecím subsystému pikosatelitu neustále využíván, není pro nás v této situaci zajímavý dlouhodobý samovybíjecí proud (ten by byl důležitý např. pokud by ze superkapacitoru byla dlouhodobě zálohována paměť nebo obvod reálného času), zajímá nás spíše průměrný samovybíjecí proud během jednoho cyklu nabití a vybití a jeho změny se zvyšujícím se počtem cyklů. Při výpočtu můžeme vycházet z množství uskladněného a odčerpaného náboje. Samovybíjecí proud tedy přímo souvisí s účinností uskladňování náboje, protože způsobuje zmenšení odčerpaného náboje vůči náboji dodanému.

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

Ve vztahu (10) je I_s průměrný samovybíjecí proud během cyklu nabití a vybití, Q_{in} a Q_{out} jsou dodané a odčerpané náboje ze superkapacitoru během jednoho cyklu a T je doba trvání jednoho cyklu.

Vnitřní impedance superkapacitoru

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. Vnitřní impedanci superkapacitoru je pak možné vyjádřit jako:

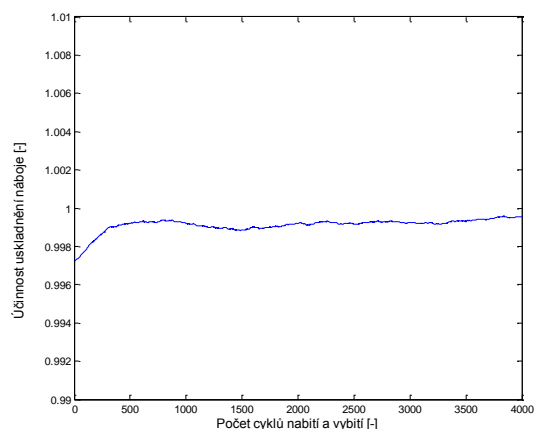
$$R_i = \frac{U_{ch} - U_d}{I_{in} - I_{out}} \quad (11)$$

V tomto vztahu je U_{ch} koncové napětí, při kterém dojde k přepnutí z nabíjení do vybíjení, U_d je napětí po přepnutí, I_{in} je nabíjecí proud v okamžiku před přepnutím a I_{out} je vybíjecí proud hned po okamžiku přepnutí. Polarita proudů je ve vztahu volena kladná pro nabíjení a záporná pro vybíjení superkapacitoru.

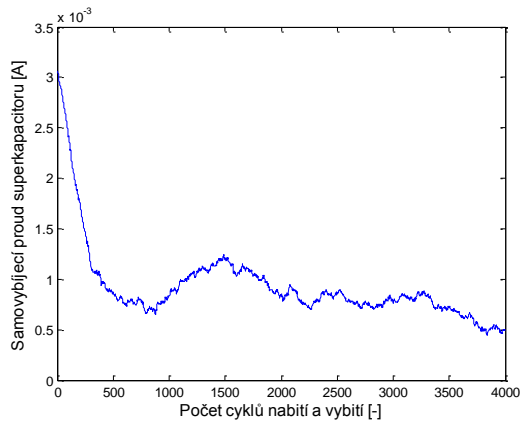
VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA TESTERU

Na navrženém testeru byla realizována první série ověřovacích měření, jejichž cílem bylo odladit metodiku zpracování výsledků z naměřených údajů a poznat základní chování superkapacitorů během nabíjecích a vybíjecích cyklů. Testovány byly superkapacitory Maxwell BCAP0350 s kapacitou 350 F a provozním napětím 2,7 V. Nabíjecí proud byl nastaven na hodnotu 1,5 A a celková impedance, do které probíhalo vybíjení dvojice sériově zapojených superkapacitorů, byla 0,96 Ω . Takovéto hodnoty zajistily podmínky, kdy nabíjení probíhá přibližně po 2/3 doby cyklu a vybíjení po 1/3 doby cyklu, což odpovídá poměrům na nízkých oběžných drahách. Zároveň cyklování probíhá přibližně 10x zrychleně pro urychlení dlouhodobých testů.

Na obr. 3 jsou výsledky měření účinnosti uskladnění náboje v superkapacitoru, která souvisí s velikostí samovybíjecího proudu (obr. 4). Z obrázků je patrné, že během prvních několika set cyklů dochází k postupnému ustálení samovybíjecího proudu z počáteční vysoké hodnoty na velikost odpovídající hodnotě z dokumentace [4]. S ustálením samovybíjecího proudu se postupně vylepšuje účinnost uskladnění náboje, která je vzhledem k proudům, jakými byl superkapacitor cyklován, velmi vysoká. Po počátečním náběhu dosahuje hodnot cca 0,999 s mírným kolísáním, které může být způsobeno měřením za nestabilizované teploty během léta.

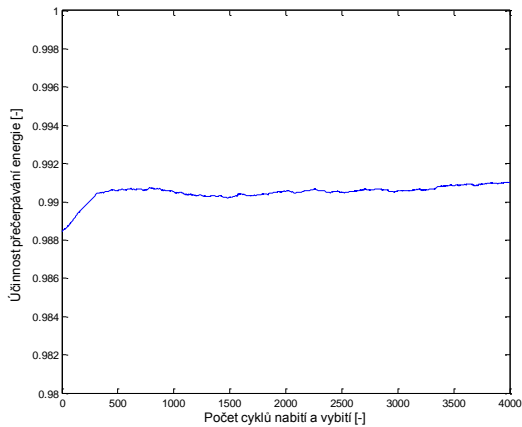


Obr. 3: Účinnost uskladnění náboje v superkapacitoru.



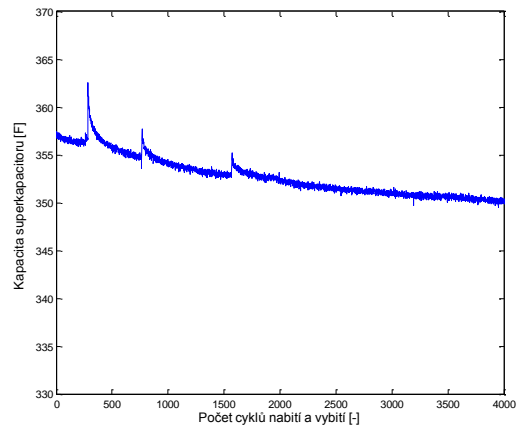
Obr. 4: Samovybíjecí proud superkapacitoru.

Při testech superkapacitory vykázaly dále velmi vysokou účinnost přečerpávání energie (na obr. 5) vlivem malého samovybíjecího proudu a malé vnitřní impedance v řádu jednotek $m\Omega$. Tato účinnost po prvotním poklesu samovybíjecího proudu dosahuje hodnot přes 0,99 s malým kolísáním.



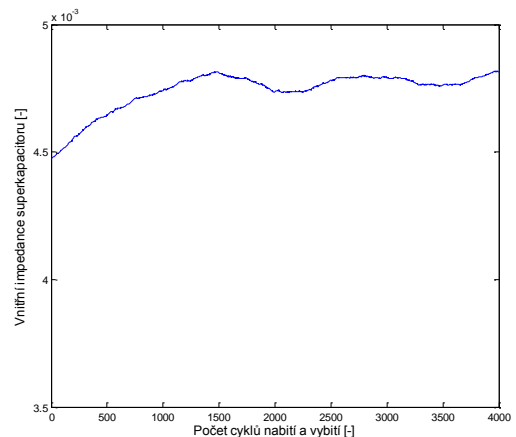
Obr. 5: Účinnost přečerpávání energie superkapacitoru.

Velmi zajímavé výsledky vykazuje měření kapacity superkapacitoru. Kapacita dle očekávání s počtem cyklů klesá, její pokles je však velmi malý. Měřené superkapacitory vykázaly pokles kapacity o 2 % po 4000 cyklech nabití a vybití, pokles se navíc zpomaluje. Dalším zajímavým výsledkem je určitá schopnost regenerace kapacity po přerušení cyklování, jak je patrné z obr. 6 (porušení monotónního tvaru křivky). Během relativně malého počtu cyklů ovšem účinek regenerace mizí.



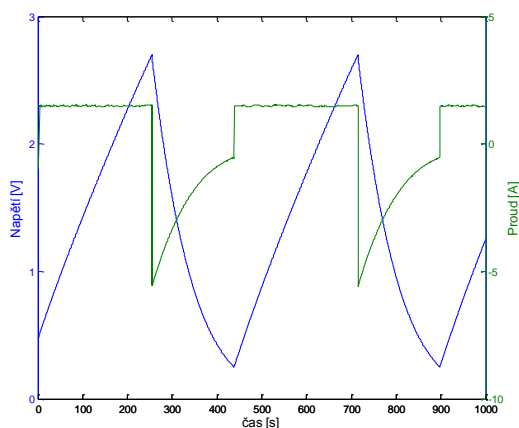
Obr. 6: Kapacita superkapacitoru během cyklování.

Supercapacitory vykazují velmi malou vnitřní impedanci s počátečním nárůstem během formování superkapacitoru (na obr. 7). Posléze hodnota vnitřní impedance zůstává stálá s mírným kolísáním po celých 4000 cyklů. U měřených superkapacitorů byla vnitřní impedance cca $4,8 m\Omega$.



Obr. 7: Vnitřní impedance superkapacitoru.

U běžných kondenzátorů při nabíjení konstantním proudem dochází k lineárnímu nárůstu napětí, protože vykazují kapacitu nezávislou na napětí. Pro kapacitu superkapacitorů toto neplatí. Její velikost se mění v závislosti na napětí (je vyšší pro vyšší napětí). Důsledkem je nelineární nárůst napětí s přibývajícím nábojem. S tímto je nutné počítat, když se bude zjišťovat přesný stav nabití a vybití superkapacitoru podle jeho svorkového napětí. Na obr. 8 jsou patrné průběhy při nabíjení superkapacitoru zdrojem konstantního proudu a vybíjení do neměnné odporové zátěže.

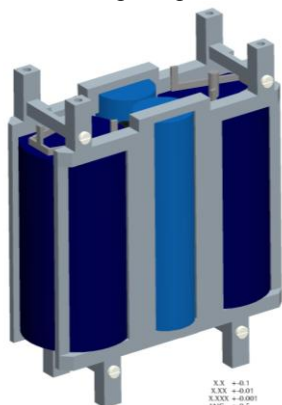


Obr. 8: Časové průběhy nabíjení a vybití superkapacitoru s nelineárním nárůstem napětí.

ZÁVĚR

Navržený tester superkapacitorů demonstruje jejich zajímavé vlastnosti a umožňuje dlouhodobou analýzu jejich parametrů při velkých počtech cyklů nabití a vybití. Stejný hardware je použitelný i pro analýzu dlouhodobých vlastností akumulátorů mírnou změnou ovládacího softwaru. Takováto dlouhodobá testování parametrů superkapacitorů a akumulátorů jsou nutná pro odhad jejich chování v napájecích subsystémech pikosatelitů na nízkých oběžných drahách Země, kde během jednoho roku činnosti mohou absolvovat několik tisíc cyklů nabití a vybití.

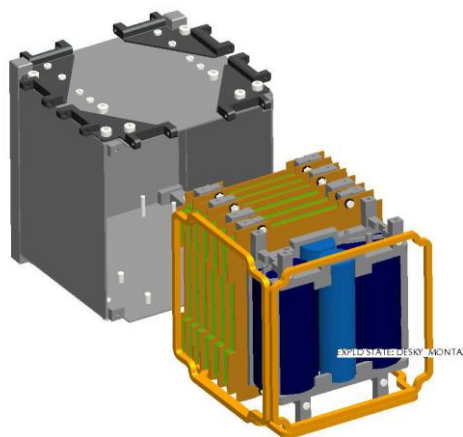
Při prvních testech superkapacitorů na navrženém testeru bylo dokázáno, že po počátečním ustálení svých parametrů vykazují dlouhodobě stabilní hodnoty velmi vysoké účinnosti uskladnění náboje, přečerpávání energie a nízké hodnoty vnitřní impedance. Rovněž pokles kapacity superkapacitorů je pomalý. Žádný z běžně dostupných akumulátorů v uvedených parametrech nemůže superkapacitorům konkurovat.



Obr. 9: Společný blok dvou superkapacitorů Maxwell a dvou LiFePO₄ akumulátorů pro pikosatelit PilsenCUBE.

Za tyto dobré vlastnosti superkapacitorů ovšem zaplatíme velkou hmotností v porovnání s akumulátory. Přesto se jejich použití v napájecích systémech pikosatelitů pro podporu činnosti rychle stárnoucích akumulátorů ukazuje jako správné řešení. Testy

probíhaly až do 4000 cyklů nabití a vybití, což odpovídá zhruba jednomu roku provozu v pikosatelitu na nízké oběžné dráze Země.



Obr. 10: Umístění superkapacitorů v pikosatelitu PilsenCUBE.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky projektům SGS-2010-037 a SGS-2010-018, dále za podpory Grantové agentury České republiky v projektu číslo 102/09/0455: Energeticky úsporná platforma pro experimentální výzkum na bázi pikosatelitů.

LITERATURA

- [1] S. Lee. CubeSat design specification – rev. 12. California Polytechnic State University, 2009.
- [2] T. Pratt, Ch. W. Bostian and J. E. Allnutt. Satellite communication. John Willey and Sons, 2003.
- [3] Ch. D. Brown. Elements of spacecraft design. American institute of aeronautics and Astronautics, 2002.
- [4] Maxwell technologies. BC series ultracapacitors – firemní dokumentace [online]. [cit. 2011-10-05]. Dostupné z WWW: <www.maxwell.com>.