



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Sestavení a testy solární stěny pikosatelitu PilsenCUBE

Autor práce: Luděk Grešl
Vedoucí práce: Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.

Plzeň 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luděk GREŠL**
Osobní číslo: **E10B0582P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Sestavení a testy solární stěny pikosatelitu PilsenCUBE**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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


1. Navrhněte a sestavte vzorky solárních stěn pikosatelitu PilsenCUBE.
2. Provedte teoretický výpočet parametrů solární stěny a ověřte měřením.
3. Popište všechny otázky, které musí být vzaty v potaz při návrhu solární stěny.
4. Navrhněte a proveďte případné další testy vedoucí k ověření spolehlivosti a parametrů solární stěny.

Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


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

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

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


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgijevič
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, konstrukcí a měřením solární stěny pikosatelitu PilsenCube. Návrh stěny byl proveden v aplikaci Formica 4.40. V následujícím textu naleznete informace o výklopné stěně osazené solárními články typu TASC, způsobu jejich uchycení na desku plošných spojů a způsobu kontaktování kladného a záporného pólu solárních článků. Dále jsou zde uvedeny výpočty očekávaného výkonu, který by výklopné křídlo mělo dodávat a naměřené výkonové hodnoty sestrojeného prototypu. V závěru naleznete zhodnocení konstrukčních metod a návrhy vedoucí k vylepšení procesu konstrukce.

Klíčová slova

Pikosatelit, PilsenCube, cubesat, solární článek, výklopná stěna

Abstract

Grešl, Luděk. *Constructing and testing of solar panels for picosatellite PilsenCUBE* [Sestavení a testy solární stěny pikosatelitu PilsenCUBE]. Pilsen 2012.

Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electrics and Telecommunications. Supervisor: Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.

In this thesis is described design, construction and measurement of solar panels for picosatellite PilsenCUBE. The design of the panels was made in application called Formica 4.40. In this thesis you can find the informations about deployable panel. This panels is covered by TASC type of solar cell. In this thesis is described method of its fitting and bonding. The following text is about calculations and measuring of prototype. At the end of this thesis you can find evaluation of construction methods and proposal for improving construction process.

Keywords

Picosatellite, PilsenCube, cubesat, solar cell, deployable panel

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne

Luděk Grešl

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Ivu Veřtátovi, Ph.D., za rady, konzultace a metodické vedení při vytváření této práce. Na konstrukci křídla se dále podíleli pan Ing. Aleš Voborník, Ph.D. a pan Ing. Jiří Čengery, Ph.D., kterým také velice děkuji za spolupráci a jejich čas strávený na tomto projektu.

Práce byla finančně podporována Grantovou agenturou České republiky, číslo projektu 102/09/0455: Energeticky úsporná platforma pro experimentální výzkum na bázi pikosatelitů.

OBSAH

Seznam symbolů a zkratk:	9
1 – ÚVOD A CÍLE PRÁCE	10
2 – VÝKLOPNÁ STĚNA.....	12
2.1. Použité solární články TASC.....	12
2.2. Konstrukce výklopné stěny.....	13
2.3. Návrh PCB výklopné stěny v systému Formica	14
2.4. Osazování PCB výklopné stěny solárními články	19
2.5. Propojení solárních článků do funkčních bloků	22
3 – VÝPOČTY A MĚŘENÍ NA VÝKLOPNÉ STĚNĚ.....	24
3.1. Teoretické výpočty dodávaného výkonu výklopného křídla.....	24
3.2. Měření dodávaného výkonu výklopného křídla	27
4 – PEVNÉ STĚNY PILSENCUBE	31
5 – TESTY VEDOUcí KE ZJIŠTĚNÍ SPOLEHLIVOSTI SOLÁRNÍCH STĚN	37
6 – ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ.....	39
7 – POUŽITÁ LITERATURA	41
PŘÍLOHY	42
Příloha A – Foto výklopného křídla	42
Příloha B – Projektová dokumentace Cubesat, rozměry	44

Seznam symbolů a zkratek:

A [m^2]	- plocha solárního článku; jednotka metr čtvereční
BOT	- označení spodních vrstev PCB směrem od středu
Cu	- měď
EUR	- měna euro
GaAs	- arzenit galia
GaAs/Ge	- arzenit galia/germaniový substrát
I [A]	- elektrický proud; jednotka amper
ITJ	- solární článek standardního řezu, používaný v jiných projektech
MPPT	- inteligentní solární regulátor
NASA	- Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NASA GSFC-STD	- specifická norma NASA
P [W]	- výkon; jednotka watt
P-POD	- vypouštěcí pouzdro pro pikosatelit
PCB	- deska plošných spojů
S [W/m^2]	- plošná hustota slunečního svitu; jednotka watt na metr čtvereční
sin	- sinus; goniometrická funkce
SMD	- součástka určená pro povrchovou montáž na PCB
TASC	- solární článek trojúhelníkového tvaru používaný na osazení výklopného křídla
TOP	- označení pro horní vrstvy PCB směrem od středu
U [V]	- elektrické napětí; jednotka volt
USD	- měna americký dolar
η	- účinnost
φ	- úhel dopadu slunečního svitu

1 – ÚVOD A CÍLE PRÁCE

O projektu CubeSat

Roku 1999 vznikl na amerických univerzitách California Polytechnic University a Stanford University projekt, pod vedením prof. Roberta Twiggse, který se zabývá vývojem standardizovaných pikosatelitů CubeSat. Důvod vzniku tohoto programu je prostý. Účelem je zajistit relativně levnou a rychlou cestu k výzkumu a experimentům v kosmickém prostoru pro různé organizace či univerzity.

Obecně se dá říci, že pikosatelit třídy cubesat má tvar krychle, o rozměrech 100 mm x 100 mm x 113 mm, s hmotností nepřevyšující 1,33 kg (standard „1U“- číslo znamená délku pikosatelitu v decimetrech). Na oběžné dráze již krouží několik pikosatelitů, které slouží k různým nekomerčním a výzkumným účelům.

Rozměry pikosatelitu jsou normovány projektovou dokumentací („CubeSat design specification rev. 12“), která obsahuje i další požadavky na tyto satelity. Dodržení rozměrů je důležité zejména proto, že samotné satelity jsou dopravovány na orbitu ve vypouštěcích pouzdrech, tzv. P-POD (Poly-PicoSatellite Orbitální Deployer), které jsou umístěny na jednotlivých nosičích.

V České republice se od roku 2004 zabývá vývojem cubesatu občanské sdružení czCube, v roce 2009 byl zahájen vývoj pikosatelitu na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Tento projekt je finančně podporován Grantovou agenturou České republiky. Projekt si klade několik cílů, mezi které patří sestavení funkčního vzorku pod názvem PilsenCUBE, jeho vypuštění, postupnou analýzu pikosatelitu za provozu, provádění měření a experimentů na komunikačním subsystému.

Cíle práce

Cílem práce bylo navrhnout a sestavit solární stěnu pikosatelitu PilsenCube, následně na zkonstruovaném vzorku provést testy a měření. Poznatky, sesbírané při realizaci praktické části, by měly přispět k zjednodušení výroby dalších kusů solárních stěn a finální solární výbavy pikosatelitu.

Bude popsána výroba výklopného křídla pikosatelitu s danými požadavky a parametry kusu, který se v budoucnu použije přímo jako zdroj elektrické energie pro satelit.

Důraz je kladen na to, aby plocha pokrytá solárními články byla alespoň taková, jako při pokrytí standardními řezy ITJ, používaných běžně u těchto typů pikosatelitů.

Výhody stěny pokryté TASC články

Stěny, které lze objednat od specializovaných prodejců, vyrobené přímo pro montáž na kostru satelitu, jsou finančně velice nákladné (cena se pohybuje okolo 2000 – 2500 EUR za kus). Nami vyrobený vzorek by tuto cenu neměl přesahovat. Dalším důvodem individuálního projektování je možnost zvýšení spolehlivosti, a to vytvořením sérioparalelních spojení použitých TASC solárních článků. Na originálních stěnách nalezneme pouze dva velké ITJ solární články. V případě poruchy na stěně tedy dojde k omezení dodávaného výkonu na polovinu, případně k úplnému výpadku, podle propojení ITJ článků. To není zrovna příznivé. Na stěnách, zkonstruovaných podle konceptů PilsenCube, by mělo být toto riziko potlačeno právě sérioparalelním spojením jednotlivých solárních článků přes oddělovací diody (viz. kapitola *propojení solárních článků*). Nevýhodou standardních řezů je i jejich velikost. Pokud má být v PCB umístěn nějaký konstrukční otvor, musí se přizpůsobit rozmístěným článkům. Jestliže použijeme TASC články, dají se kompromisy mezi rozmístěním článků a umístěním otvorů hledat snáze, než u standardních řezů.

Nesmíme zapomenout na možnost odporového měření provozní teploty výklopné stěny, tudíž i solárních článků. Tuto možnost nám poskytuje meandr, který je ukrytý přímo ve vodivých vrstvách PCB.

2 – VÝKLOPNÁ STĚNA

2.1. Použité solární články TASC

Z rozboru probíhajících projektů vyplývá, že převážná část pikosatelitů je dnes osazována GaAs články na germaniovém substrátu, které poskytují účinnost blížící se k 30%. Některé starší projekty nebo projekty s omezenými finančními zdroji uvažují křemíkové solární články. Pro pikosatelit PilsenCUBE jsou použity GaAs/Ge fotovoltaické články s účinností 25% až 30%, zatímco klasické fotovoltaické články na bázi křemíku poskytují účinnost pouze kolem 15%. [1.]

Požadovaná vysoká účinnost solárních článků je důsledkem malých rozměrů pikosatelitu a hmotnostních norem – ty omezují použití rozvíjených solárních stěn. Použití GaAs/Ge fotovoltaické články TASC dosahují účinnosti 25% až 30%. Pod označením TASC se skrývají přesněji trojúhelníkové odřezky od firmy Spectrolab, které vznikají jako odpad při výrobě jiného typu solárního článku (z výrobních forem ITJ). Použití TASC článků je výhodné nejen z ekonomického hlediska, jelikož jejich cena není v porovnání s jinými produkty podobného typu příliš vysoká, ale nabízí také i snadnou realizovatelnost sérioparalelních spojení. Tato spojení zajistí větší spolehlivost dodávky elektrické energie ze stěn. Velkou nevýhodou těchto článků je jejich křehkost. Při manipulaci se velice snadno stane, že se články při menším mechanickém namáhání lámou.

Technické specifikace

TASC články jsou trojúhelníkového tvaru, o rozměrech odvěsen 13mm a 32 mm, tloušťka článku je 190 μ m, plocha 2,277cm², hmotnost 0,234g. Účinnost až 27%.

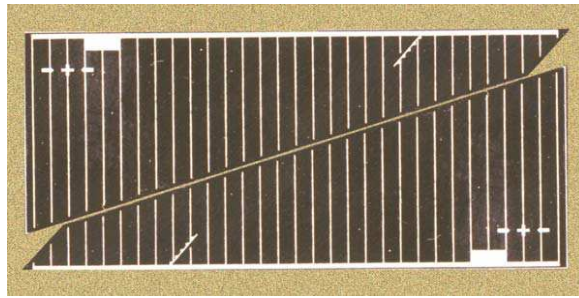
Jediný článek o těchto rozměrech je schopen dodat:

napětí naprázdno 2,52V

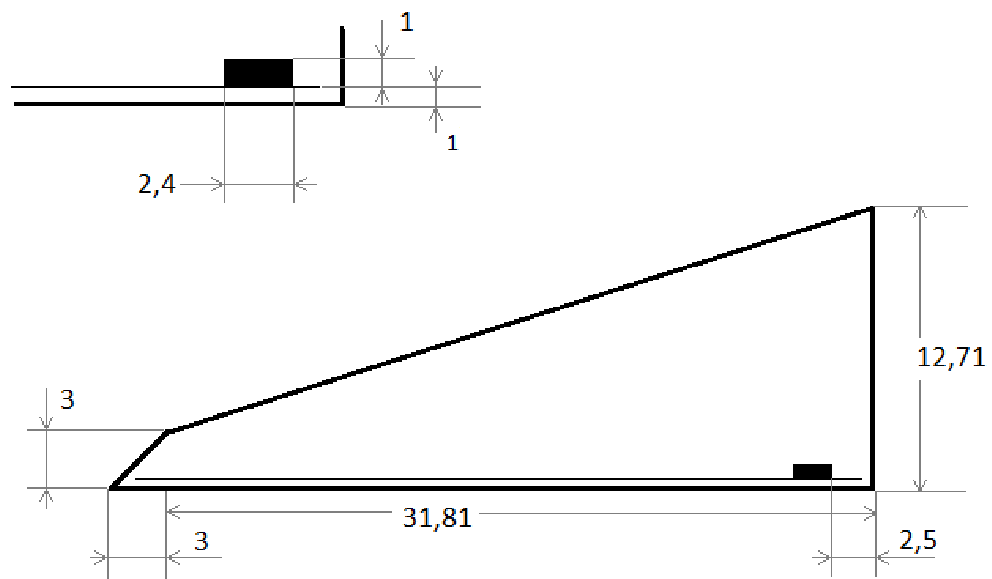
proud nakrátko 31mA

pozn. Udáváno výrobcem, měřeno při teplotě 25°C, výkon dopadajícího záření 100mW/cm²

Další specifikace, jako je například teplotní závislost udávaná výrobcem, jsou uvedené v datasheetu.



Obr.2.1.1. Solární článek TASC – foto [4].



Obr.2.1.2. Solární článek TASC – rozměry.

2.2. Konstrukce výklopné stěny

Praktická část této bakalářské práce byla zaměřena především na konstrukční řešení výklopných stěn (křídel) pikosatelitu. Tyto stěny budou na pikosatelitu celkem čtyři. Důvodem umístění výklopných stěn ke cubesatu je navýšení dodávky elektrické energie. Požadavek na rozměry je omezen projektovou dokumentací (CubeSat design specification rev. 12). Rozměry tedy nesmějí přesáhnout velikost 100 mm x 83 mm. Před rozmístěním jednotlivých solárních článků bylo nutné vyřešit uchycení křídel k samotné kostře cubesatu. Nejvhodnější variantou bylo uchycení křídel pomocí pantů, ke kterým je křídlo přiděláno

nýty. Na každé výklopné stěně jsou dva panty. Kvůli konstrukčním otvorům pro přichycení křídla k pantům se plocha, kterou je možné pokrýt solárními články, zmenšuje.

U veškerých prvků tvořících satelit je důležitá jejich hmotnost. Jinak tomu není ani u desek plošných spojů, které jsou osazeny solárními články. Jelikož jsou křídla pokryta solárními články oboustranně a uvnitř desky se nachází další dvě vrstvy s meandrem, snadno si spočítáme, že se jedná o čtyřvrstvou PCB. Celková tloušťka desky nesměla přesáhnout 0,8 mm. Výroba s těmito požadavky byla zadána firmě Pragoboard s. r. o. (www.pragoboard.cz). Po osazení solárními články a po nakontaktování pólů by hmotnost stěny s těmito parametry neměla přesáhnout 30 gramů.

Spolu s křídlem byla zhotovena kovová šablona, která usnadňovala usazení článků na správnou pozici. Rozměry otvorů v šabloně byly odvozeny od obrysů solárních článků.

2.3. Návrh PCB výklopné stěny v systému Formica

Návrh desek plošných spojů tvořící solární stěny byl proveden v návrhovém systému Formica 4.40. V knihovnách tohoto softwaru bohužel nebyly nadefinovány solární články, ani konektory použité na výklopných stěnách, a to návrh částečně zkomplikovalo.

Rozměry satelitu jsou pevně dány normou, tudíž se jim návrh musel přizpůsobit.

Článek TASC v programu Formica

Výrobce článků TASC sice v datasheetu udává rozměry, ale po důkladném změření jednoho z článků bylo zjištěno, že údaje jsou přibližné a liší se v řádu setin milimetru od skutečné velikosti. To může být způsobeno tím, že TASC článek vzniká jako vedlejší produkt výroby, jak již bylo zmíněno.

Byl tedy vytvořen model článku s následující strukturou vrstev:

- a. obrys a název článku
- b. nepájivá maska
- c. vodivá vrstva

Podle obrysů článků byla vyrobena snímatelná šablona, která usnadnila vystředění článku při osazování na PCB. Vodivá vrstva byla koncipována takovým způsobem, aby článek bylo možné na PCB přilepit a připájet, a to podle požadavků vedoucího práce. (Více v kapitole *Osazování solárních článků na PCB*.)

Deska PCB pro výklopné stěny

Články pokrývají povrch křídla z obou stran, což znamená, že deska bude muset mít více vrstev.

Struktura křídla je následující (od TOP do BOT):

1. strana:
 - a) solární články TASC - obrys
 - b) nepájjivá maska
 - c) vrstva Cu pro propojení článků
 - d) vrstva Cu pro meandr
2. strana:
 - a) vrstva Cu pro meandr
 - b) vrstva Cu pro propojení článků
 - c) nepájjivá maska
 - d) solární články TASC - obrys

(vrstvy jsou seřazeny chronologicky od nejvyšší po nejnižší)

Pokrytí výklopné stěny články TASC

Vzhledem k tomu, že na křídlech nejsou žádná čidla a speciální konektory, jejich plocha se dá pokrýt články celá, respektive se dá pokrýt tak, jak nám to umožní technologie montáže článků a konstrukce upevnění křídel.

V původním konceptu (čerpáno z www.pilcencube.cz) bylo počítáno se čtyřiceti osmi články na křídlo. Tohoto počtu bohužel dosaženo nebylo.

Rozměry desky pro křídlo jsou 100 x 83mm. Při těchto hodnotách, rozměrech konektoru, velikosti a umístění konstrukčních otvorů pro panty, se podařilo na jedno křídlo umístit celkem čtyřicet dva solárních článků. Na straně, kde se nachází konektor, je článků dvacet (dva kompletní bloky po šesti člancích, dva po čtyřech) a na straně bez konektoru je článků dvacet dva (tři bloky po šesti člancích a jeden po čtyřech).

Meandr

Meandr je měděná čára s přesně stanovenými parametry, která slouží k odporovému měření teploty stěny.

Rozměry meandru jsou následující:

Délka 1,3 m, šířka 0,2 mm, výška meandru 18 μm (byla požadována šířka 0,203 mm, čára s takovouto tloušťkou bohužel nešla v programu Formica nadefinovat).

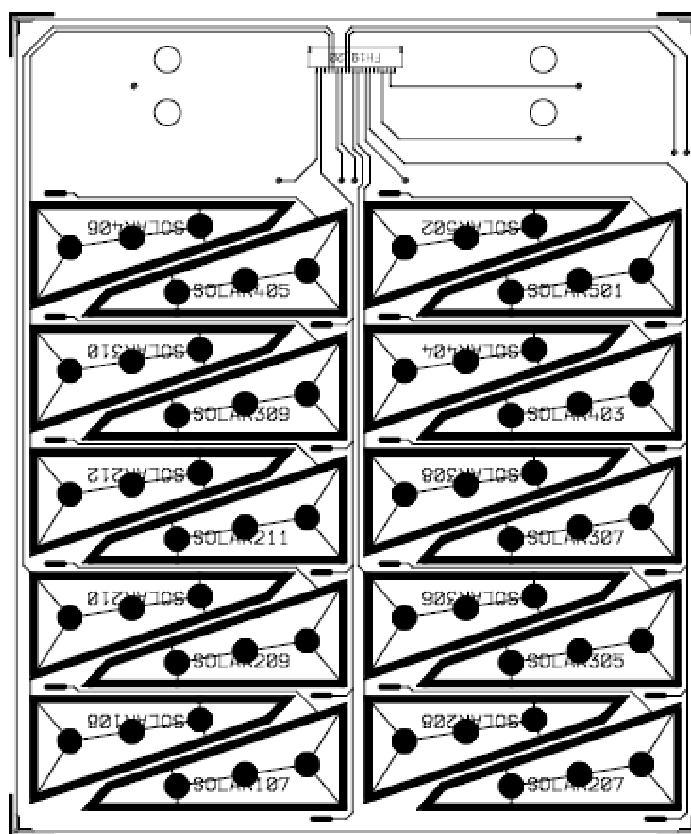
Meandr se nachází ve dvou vodivých vrstvách, v každé s danou délkou 1,3 metru. Celková délka je tedy 2,6 metru. Tvar meandru byl uzpůsoben tomu, aby se na PCB vešel a nepřekážel konstrukčním otvorům.

Konektor

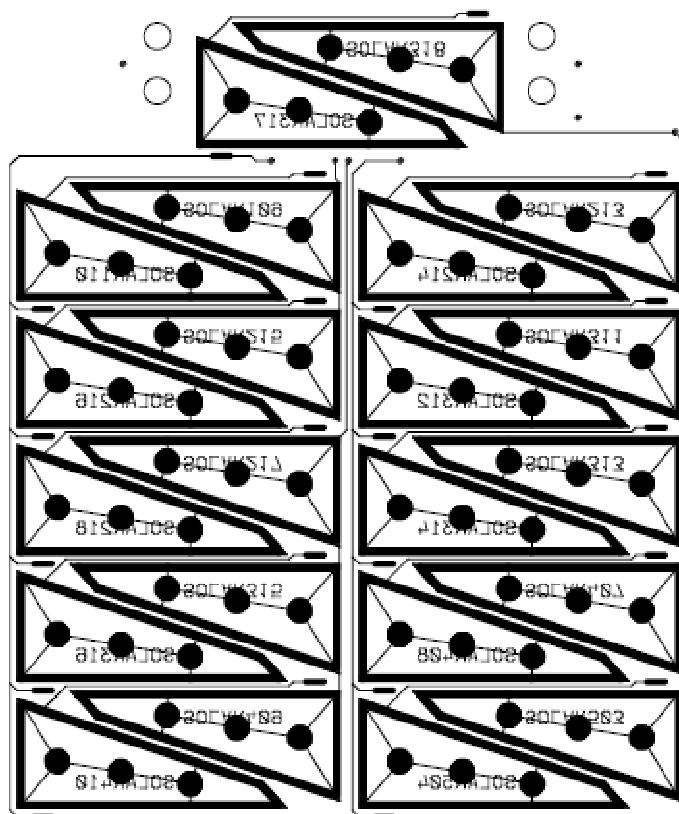
Konektor, který byl použitý na výklopných stěnách, je od firmy HRS electric. Jedná se o dvacetipinový, SMD konektor s nízkým profilem typu FH19SC-20S.

Rozvržení pinů je následující:

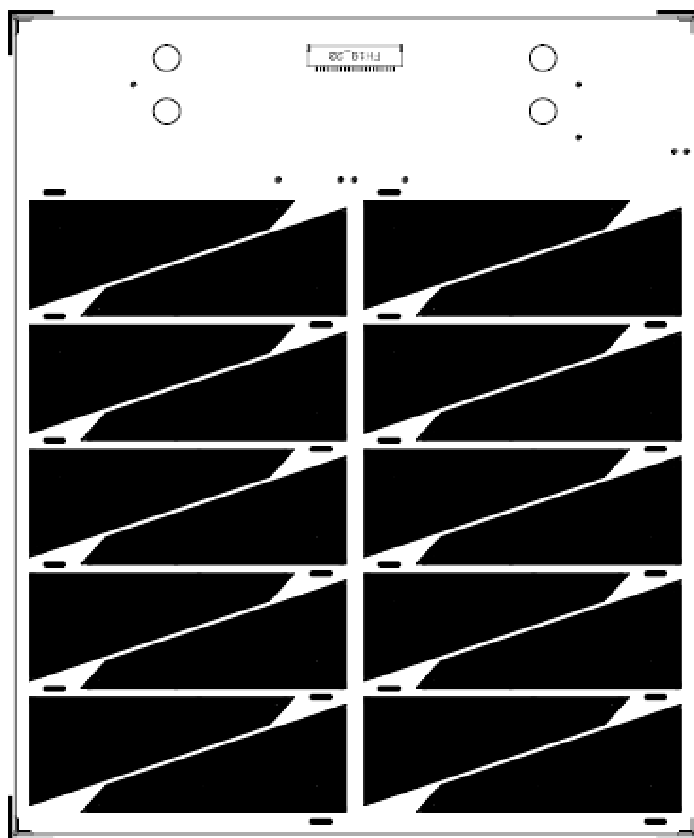
pin 1, 2	propojeny a je z nich vyveden začátek meandru
pin 3, 4	propojeny, ukončení meandru
pin 7 až 9 a 18 až 20	použity pro záporné póly funkčních bloků
pin 10 až 17	použity pro kladné póly funkčních bloků
pin 5, 6	nevyužity – rezerva



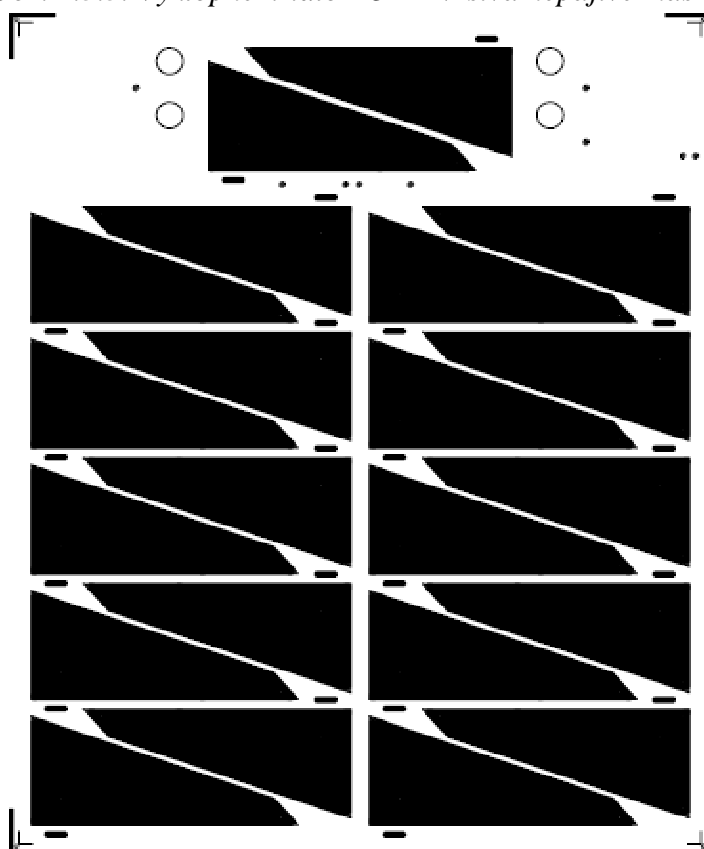
Obr. 2.3.1. Výklopné křídlo TOP - vodivá vrstva a rozmístění součástek.



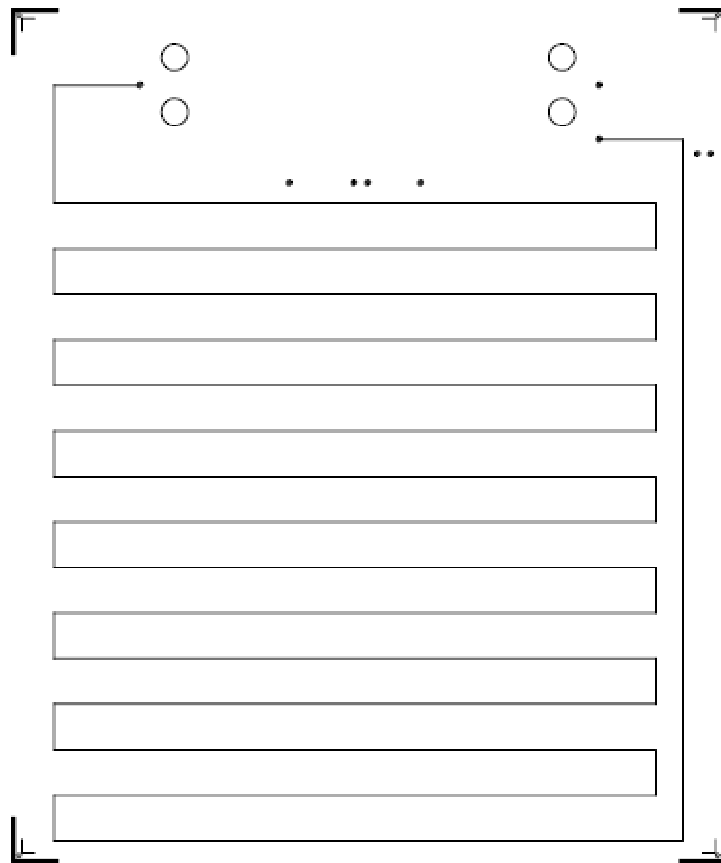
Obr. 2.3.2. Výklopné křídlo BOT – vodivá vrstva a rozmístění součástek.



Obr. 2.3.3. Výklopné křídlo TOP – vrstva nepájivé masky.



Obr. 2.2.4. Výklopné křídlo BOT – vrstva nepájivé masky.



Obr. 2.3.5. Výklopné křídlo – vrstva meandru (vrstvy TOP i BOT jsou shodné).

2.4. Osazování PCB výklopné stěny solárními články

Pikosatelit bude v kosmickém prostoru vystaven změnám teploty velkého rozsahu, proto je třeba zvážit možnosti kontaktování pólů vzhledem k těmto teplotním výkyvům. Problémem se může stát rozdílná teplotní roztažnost materiálů, ze kterých jsou vyrobeny solární články, desky plošných spojů, lepidla a pájka.

Záporný pól solárního článku

Záporný pól článku je tvořen ploškou na jeho vrchní straně a úzkou linkou, která je na plošku napojena. Kontaktování bylo tedy provedeno pomocí připájení propojky mezi ploškou záporného pólu na solárním článku a kontaktní ploškou na PCB.

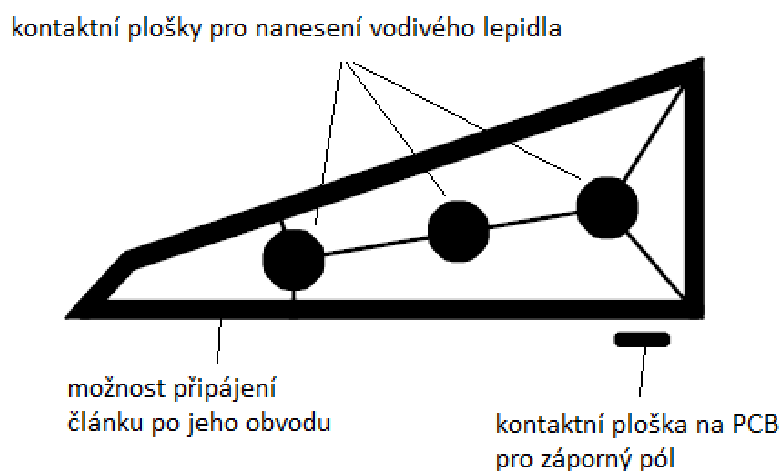
Při realizaci spoje mezi záporným pólem a ploškou kontaktu na PCB je třeba dbát na to, aby nevznikl zkrat mezi kontaktním drátkem, který vede od záporného pólu k PCB a kladným pólem článku. Proto bude nutné použít nějaký nástroj, přes který se drátek ohne a vznikne tak jistá izolační vzdálenost. Tento spojovací vodič by bylo dobré nějakým

způsobem zafixovat a snížit tak pravděpodobnost jeho mechanického poškození. K fixaci by se dala použít látka na bázi silikonu, vyhovující technickým požadavkům a normám NASA, které musí takovéto materiály vypouštěné do kosmického prostoru splňovat.

Kladný pól solárního článku

Kladný pól je tvořen pokovenou zadní stranou článku a zasahuje i na jeho boční hrany. Po konzultaci s vedoucím práce byla zamítnuta možnost připájení článku po celé jeho ploše a zvolila se alternativa lepeného spoje spolu s částečným zapájením článku po jeho obvodu. Částečné pájení kladného pólu na hranách článku je z důvodu zvětšení mechanické odolnosti spoje. Při vysokých teplotách dochází k degradaci vlastností solárního článku a celoplošné pájení by mohlo článek těmto teplotám vystavit.

V systému Formica byl tedy tvar vodivé vrstvy pod článkem a tvar nepájivé masky přizpůsoben zvoleným způsobům kontaktování. Článek nebude přilepen po celé své ploše, ale jen na několika bodech. Tyto body jsou tvořeny pozlacenými ploškami mědi ve vodivé vrstvě. Nepájivá maska pak odkrývá celou plochu článku, a to by mělo usnadnit jeho usazení na správnou polohu. Další pomůcka usnadňující usazování článků je nerezová šablona, o které se píše v kapitole *konstrukce výklopného křídla*.



Obr. 2.4.1. Vodivá vrstva TASC článku ze systému Formica.

Proces osazování stěny solárními články

Samotné osazování PCB výklopné stěny pikosatelitu probíhalo v několika fázích. Nejprve byla články pokryta jedna ze stran křídla. Veškeré plochy PCB, na které přiléhaly solární články, byly očištěny technickým lihem, stejně tak byly očištěny i kladné póly použitých solárních článků. Nerezová šablona byla zafixována na osazovanou desku takovým způsobem, aby při pozdější manipulaci nedošlo k nechtěnému posuvu těchto dvou prvků.

Jelikož lepidlo použité pro lepení (kontaktování) kladného pólu bylo dvousložkové, bylo nutné složky nejdříve namíchat ve správném poměru. Poměr je udáván výrobcem lepidla ve hmotnostním podílu složek. K přesnému odměření jednotlivých složek posloužily laboratorní váhy.

Pomocí jehly bylo lepidlo nanášeno na kontaktní plošky PCB. Pod každým solárním článkem jsou tyto plošky tři. Výhodou bezesporu bylo to, že doba zpracovatelnosti použitého lepidla je přibližně šest hodin po namíchání. Proto se nemuselo s usazováním článků příliš spěchat a vyvarovali jsme se tak zbytečným chybám. K přesnému usazení článků na správné místo byla použita vakuová pipeta a další nástroj pro vystředění článku na správnou pozici.

Po osazení jedné strany bylo nutné nechat elektricky vodivé lepidlo vytvrdit při zvýšené teplotě. Aby nedošlo k degradaci vlastností článků, zvolila se teplota 60°C, která není pro články nějak kritická. Deska byla této teplotě vystavena po dobu přibližně šesti hodin. Vytvrzování probíhalo ve speciální komoře.

Po této fázi se osadila solárními články i druhá strana křídla. Osazování probíhalo stejným způsobem.

Lepidlo použité na kladný pól

Jednalo se o dvousložkové, elektricky vodivé lepidlo EPO – TEK E4110 – LV, které se skládá z epoxidové a stříbrné složky. V dokumentaci lepidla je udáno, že se jedná o verzi s nižší viskozitou (značeno písmeny LV v názvu lepidla). Namíchaná směs držela bez problémů na jehle injekční stříkačky, proto se dala na plošky nanášet celkem snadno. Doba zpracovatelnosti namíchaného lepidla byla šest hodin.

Důležité je, že toto lepidlo splňuje tzv. low-outgassing standart normu NASA (při správném vytvrzování), která zaručuje to, že z lepidla nebudou unikat nebezpečné plyny.

Výrobce uvádí, že tepelná odolnost spoje je v rozsahu -55°C až 150°C , chvilkově lepidlo odolá teplotě až 250°C . Tyto teplotní rozsahy by měly použití na pikosatelitu vyhovovat.

Lepidlo je možné nechat zaschnout po aplikaci samovolně při pokojové teplotě. Tuhnutí by ale za takovýchto podmínek trvalo tři dny, a to z časových důvodů nebylo příliš vhodné. Navíc by spoj nemusel mít takové elektrické a mechanické vlastnosti, jako při vytvrzování za zvýšené teploty. Podle dokumentace jsme tedy odvodili, že při teplotě 60°C bude na vytvrzování stačit časový úsek přibližně šesti hodin. Tato teplota by neměla ohrozit vlastnosti solárních článků.

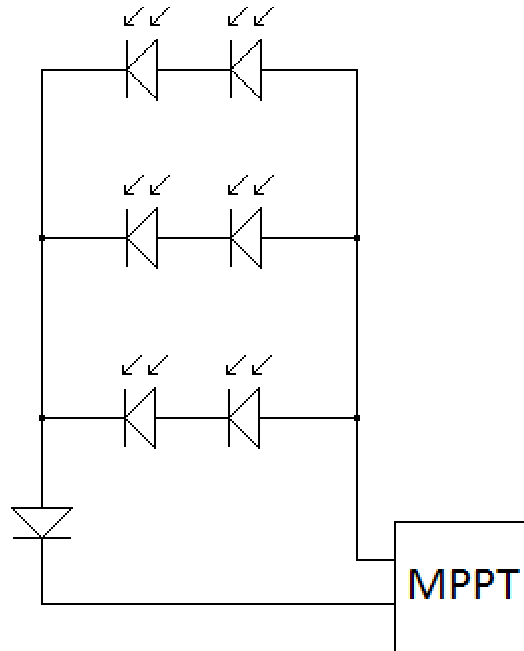
2.5. Propojení solárních článků do funkčních bloků

Články TASC mají malé rozměry, a to do jisté míry komplikuje návrh PCB pro solární stěny. Na druhou stranu tato vlastnost umožňuje větší procento pokrytí stěn články a provedení sérioparalelních spojení jednotlivých kusů. Sérioparalelní spojení, přes oddělovací diody do několika nezávislých větví, zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie ze solárních stěn v případě poruchy některého ze solárních článků.

Propojení jednotlivých segmentů je následující:

Dva články jsou zapojeny sériově a tři tyto dvojice jsou spojeny paralelně. To znamená, že šestice těchto článků tvoří jeden funkční blok, který je přes oddělovací diodu napojen mimo PCB na svůj MPPT měnič. Když nastane porucha na jednom z měničů, diodě nebo se poškodí nějaký ze solárních článků na PCB, nedojde k přerušení dodávky elektrické energie z celé stěny. Vyřazen bude maximálně ten blok, na kterém porucha nastane. V lepším případě pouze dvojice solárních článků, která je spojena sériově. Tím se snižuje pravděpodobnost toho, že dodaný výkon neklesne pod mez nezbytnou pro funkčnost důležitých částí pikosatelitu.

Pokud na některé ze stěn není počet článků dělitelný šesti, nedá se vytvořit celý funkční blok. Je provedeno takové spojení článků, že vzniká blok neúplný. To znamená, že blok je tvořen například jen čtveřicí solárních článků.



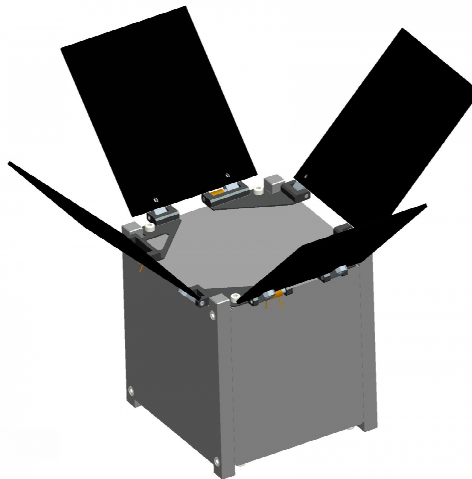
Obr. 2.5.1. Zapojení článků do funkčního bloku.

3 – VÝPOČTY A MĚŘENÍ NA VÝKLOPNÉ STĚNĚ

3.1. Teoretické výpočty dodávaného výkonu výklopného křídla

Výpočty v této bakalářské práci jsou zjednodušené, nejsou v nich zohledněny směrové a teplotní závislosti solárních článků. Výpočty se zohledněním závislostí lze najít v jiném odborném textu [9]. Počítány jsou dva stavy:

1. pikosatelit je ke Slunci orientován takovým způsobem, aby byla osvětlena co největší plocha osazená solárními články
2. pikosatelit je ke Slunci orientován tak, že je osvětlena co nejmenší plocha osazená solárními články



Obr 3.1.1. Poloha křídel pikosatelitu při plném vyklopení[1].

Stav 1

K tomuto stavu dojde právě tehdy, je-li horní stěna pikosatelitu spolu s otevřenými přídatnými křídly natočena kolmo ke Slunci. V této pozici je osvětleno celkem sto dva TASC článků, a to následujícím způsobem:

88 TASC článků na výklopných stěnách – dopadající sluneční paprsky svírají s rovinou stěny úhel 45°

14 TASC článků na horní pevné stěně – dopadající sluneční paprsky svírají s rovinou stěny úhel 90°

Stav 2

V okamžiku, kdy je jedna z bočních stěn natočena kolmo ke Slunci, dochází k osvětlení nejmenšího počtu solárních článků. V této chvíli dopadají sluneční paprsky pouze na čtyřicet článků:

20 TASC článků na pevné boční stěně – dopadající sluneční paprsky svírají s rovinou stěny úhel 90°

20 TASC článků na vnější straně výklopné stěny – dopadající sluneční paprsky svírají s rovinou stěny úhel 45°

To je případ, kdy jsou křídla satelitu vyklopena.

Pokud jsou křídla zavřena, nejmenší počet článků, který bude schopen dodávat nějaký výkon v této mezní poloze, je čtrnáct. Toto je stav, kdy je kolmo ke Slunci natočena horní stěna satelitu. (14 TASC článků – dopadající sluneční paprsky svírají s rovinou stěny úhel 90°)

Výpočet pro hodnotu hustoty výkonu slunečního svitu mimo atmosféru:

vychází se z těchto parametrů:

plocha jednoho TASC článku je $2,277\text{cm}^2$

účinnost TASC článku je 27%

plošná hustota výkonu slunečního svitu mimo atmosféru je 1350W/m^2

Teoretický výkon, dodávaný jedním článkem TASC při kolmém dopadu slunečních paprsků mimo atmosféru, je tedy následující:

$$P = \eta \cdot S \cdot A \cdot \sin \varphi \quad (3.1)$$

kde: η - je účinnost článku

S - je plošná hustota výkonu slunečního svitu

A - je plocha článku

φ - je úhel, který svírají dopadající sluneční paprsky a stěna pikosatelitu

$$P = 0,27 \cdot 1350 \cdot 2,277 \cdot 10^{-4} \cdot \sin 90^\circ$$

$$P = 0,083 \text{ W} \quad (3.2)$$

Při idealizovaném stavu 1, který slibuje největší počet osvětlených článků, tedy největší hodnotu výkonu, můžeme teoreticky od solárních stěn očekávat dodávaný výkon:

$$P_{\max} = (88 \cdot 0,27 \cdot 1350 \cdot 2,277 \cdot 10^{-4} \cdot \sin 45^\circ) + (14 \cdot 0,27 \cdot 1350 \cdot 2,277 \cdot 10^{-4} \cdot \sin 90^\circ)$$

$$P_{\max} = 5,16 + 1,16 = 6,32 \text{ W} \quad (3.3)$$

Při idealizovaném stavu 2, kde počítáme s nejmenším počtem osvícených článků, dostáváme výkonovou hodnotu:

$$P_{\min 1} = (20 \cdot 0,27 \cdot 1350 \cdot 2,277 \cdot 10^{-4} \cdot \sin 90^\circ) + (20 \cdot 0,27 \cdot 1350 \cdot 2,277 \cdot 10^{-4} \cdot \sin 45^\circ)$$

$$P_{\min 1} = 1,66 + 1,17 = 2,83 \text{ W} \quad (3.4)$$

$$P_{\min 2} = 14 \cdot P = 1,162 \text{ W} - \text{výpočet pro stav, kdy dochází pouze k osvitu horní stěny} \quad (3.5)$$

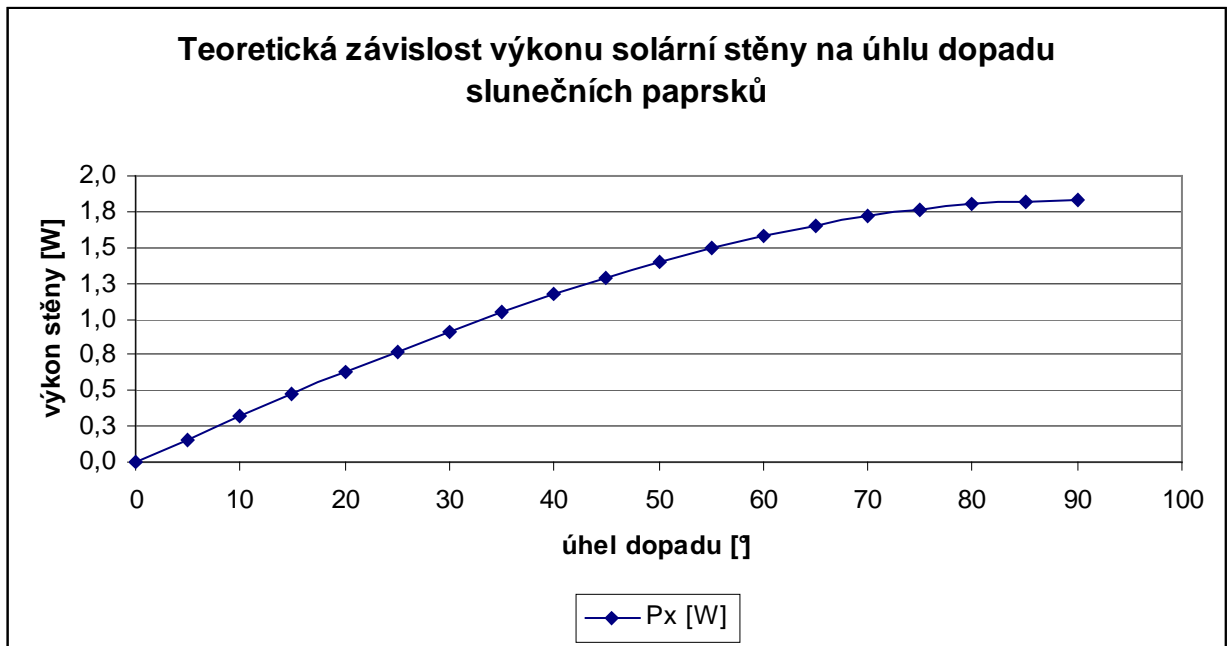
Teoretický výpočet závislosti výkonu výklopného křídla pikosatelitu na úhlu dopadu slunečních paprsků nad atmosféru:

Jelikož se povedlo sestrojít zatím jen jedno výklopné křídlo, uvedeme i několik výpočtů pro počet solárních článků, odpovídající počtu článků na jedné straně výklopného křídla. Jedná se o stranu bez konektoru, na které je umístěno dvaadvacet článků TASC.

Pro bližší představu jsou v tabulce 3.1.2. uvedeny výsledky i pro různé úhly dopadu slunečních paprsků. Závislost účinnosti článku na směru a teplotě není zahrnuta. Jak ukazují výsledky předchozích prací [9], lze ve skutečnosti očekávat v průměru až o 20 % méně elektrické energie.

Sin x [°]	Px [W]
90	1,8259
85	1,8200
80	1,7981
75	1,7637
70	1,7158
65	1,6548
60	1,5812
55	1,4957
50	1,3987
45	1,2911
40	1,1736
35	1,0473
30	0,9129
25	0,7716
20	0,6245
15	0,4725
10	0,3170
5	0,1591
0	0,0000

Tab. 3.1.2. Teoretická závislost výkonu výklopného křídla na úhlu dopadu slunečních paprsků nad atmosféru.



Obr. 3.1.3. Graf teoretické závislosti výkonu výklopného křídla na úhlu dopadu slunečních paprsků nad atmosféru.

3.2. Měření dodávaného výkonu výklopného křídla

Po kompletním sestrojení výklopného křídla přišlo na řadu měření jeho parametrů. Pozornost byla zaměřena především na elektrický výkon, který bude stěna schopná dodávat.

Měření probíhalo za teploty 29,4°C.

Postup měření byl následující:

Při kolmém dopadu slunečních paprsků na stěnu pikosatelitu byl měřen maximální dodávaný výkon jednotlivých nezávislých bloků. K měření byla použita měřicí karta National Instruments NI USB-6251 a měřicí aplikace vytvořená v programovém prostředí Matlab Simulink.

K bloku byla připojena odporová dekáda, na které byla zjišťována optimální hodnota zatěžovacího odporu. V závislosti na změně okamžitého výkonu byl měněn odpor dekády. Pokud byl nalezen bod, ve kterém se výkon dostal na svoji maximální hodnotu, byla zaznamenána velikost zátěže, dodávaný výkon, elektrické napětí na výstupu bloku a dodávaný proud. Jednotlivé hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 3.2.1.

Pro snazší orientaci ve výsledcích je tabulka rozdělena na dvě části. Hodnoty naměřené na straně křídla s konektorem a bez konektoru.

Strana s konektorem:

Číslo bloku	počet solárních článků v bloku	výkon [mW]	napětí [V]	proud [mA]	zátěž [Ω]
1	6	302	3,82	85	40
2	6	308	3,82	79	40
3	6	310	3,94	78	50
4	4	202	3,75	62	60

Strana bez konektoru:

Číslo bloku	počet solárních článků v bloku	výkon [mW]	napětí [V]	proud [mA]	zátěž [Ω]
5	6	307	3,545	86	40
6	4	216	3,925	55	70
7	2	110	3,73	29	130
8	6	330	3,81	86	43

Tab. 3.2.1 Naměřené hodnoty jednotlivých bloků výklopné stěny.

Pozn. Blok 7 obsahuje pouze dva články, jelikož byl jeden z TASC článků nenávratně poškozen při odstraňování kovové šablony po osazování stěny. Z tohoto důvodu byla vyřazena ze zapojení sériová kombinace dvou solárních článků. Podle návrhu má blok 7 obsahovat standardně čtyři články.

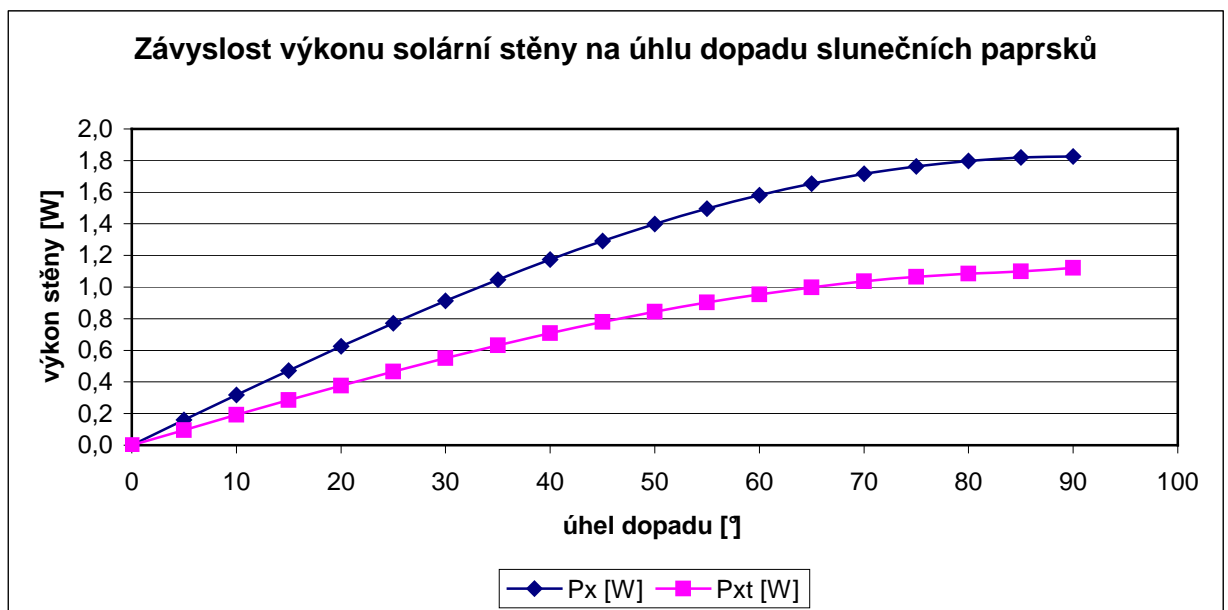
Celkový výkon strany bez konektoru: 1,122 W

Celkový výkon strany s konektorem: 0,963 W (stěna s poškozeným blokem)

Porovnáme-li naměřenou hodnotu výkonu pro úhel dopadu 90° a teoreticky vypočítanou hodnotu pro tentýž úhel, zjistíme, že naměřená hodnota je o 40% nižší, než hodnota teoretická. Tento rozdíl je v pořádku, jelikož hustota slunečního svitu v zemské atmosféře se pohybuje v hodnotách přibližně 870 W/m^2 (záleží na jevech probíhajících v atmosféře). Z měření tedy vyplývá, že stěna je plně funkční. Na základě rozdílu naměřené a teoreticky vypočtené hodnoty lze dopočítat hodnoty výkonu pro další dopadové úhly v atmosféře, založené na změřené výkonové hodnotě. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 3.2.2. a znázorněny graficky.

Sin x [°]	Pxt [W]
90	1,122
85	1,098
80	1,085
75	1,064
70	1,036
65	0,999
60	0,954
55	0,903
50	0,844
45	0,779
40	0,708
35	0,632
30	0,551
25	0,466
20	0,377
15	0,285
10	0,191
5	0,096
0	0,000

Tab 3.2.2. Vypočtené hodnoty předpokládaného výkonu výklopné stěny, vycházející z naměřených hodnot.



Obr. 3.2.3. Graf závislosti výkonu výklopného křídla na úhlu dopadu slunečních paprsků.

Pozn. V grafu je znázorněna křivka Px, vycházející pouze z teoretického výpočtu pro hodnotu hustoty slunečního svitu mimo atmosféru a křivka Pxt, která vychází z měřené

hodnoty pro úhel dopadu 90° a dalších dopočítaných hodnot, vycházejících z měření v atmosféře.

Vhodné by zřejmě bylo provést další, přesnější měření za různých teplot, kterým bude pikosatelit v kosmickém prostoru vystaven. Během měření by se měl měnit úhel dopadu slunečních paprsků. Účinnost solárních článků udávaná výrobcem je sice 27%, ale jedná se o nominální hodnotu, za teploty 25°C a kolmém dopadu slunečních paprsků.

4 – PEVNÉ STĚNY PILSENCUBE

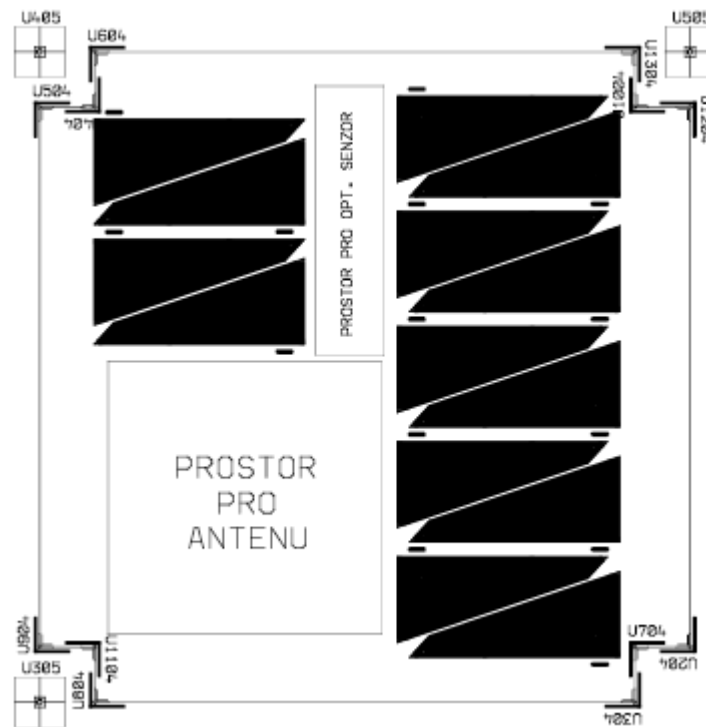
Na pikosatelitu najdeme kromě výklopných stěn ještě další plochy pokryté solárními články. Přesněji se jedná o pevné stěny, které jsou připevněny přímo ke kostře satelitu. Těchto stěn je celkem šest. Jelikož se tyto plochy, které tvoří nedílnou součást solární výbavy, nebudou naklápět, není nutné je pokrývat solárními články z obou stran. Z toho plyne, že k jejich výrobě stačí jednovrstvá technologie výroby PCB.

V pevných stěnách se nachází konstrukční otvory pro různé optické senzory a konektory. Část některých z ploch je rezervována pro antény. To nese jistá omezení pro pokrytí stěn solárními články.

Podle projektové dokumentace, ve které se nachází přesné rozměry pikosatelitu a předběžného konceptu rozmístění článků, konektorů a čidel na jednotlivých stěnách, byly v systému Formica vytvořeny layouty těchto stěn. Layouty nejsou zcela dokončené, jelikož není přesně určen způsob odvádění elektrické energie z jednotlivých PCB, přesné rozmístění a rozměry všech konstrukčních otvorů pro čidla, konektory. Vliv na návrh bude mít i uchycení desek ke kostře pikosatelitu. Bohužel se nepodařilo dodržet požadované počty TASC článků na některých stěnách. Při tvoření předběžného konceptu se totiž nebraly v potaz skutečné rozměry solárních článků, rezervy pro kontaktní plošky záporných pólů, ani vzdálenosti mezi jednotlivými články, které jsou nutné pro montáž článku na PCB.

Horní stěna

Na této stěně je nutné rezervovat prostor pro uchycení pantů, sloužících k uchycení křídel pikosatelitu, anténu a optické senzory. Vzhledem k těmto skutečnostem se podařilo na stěnu umístit čtrnáct solárních článků.



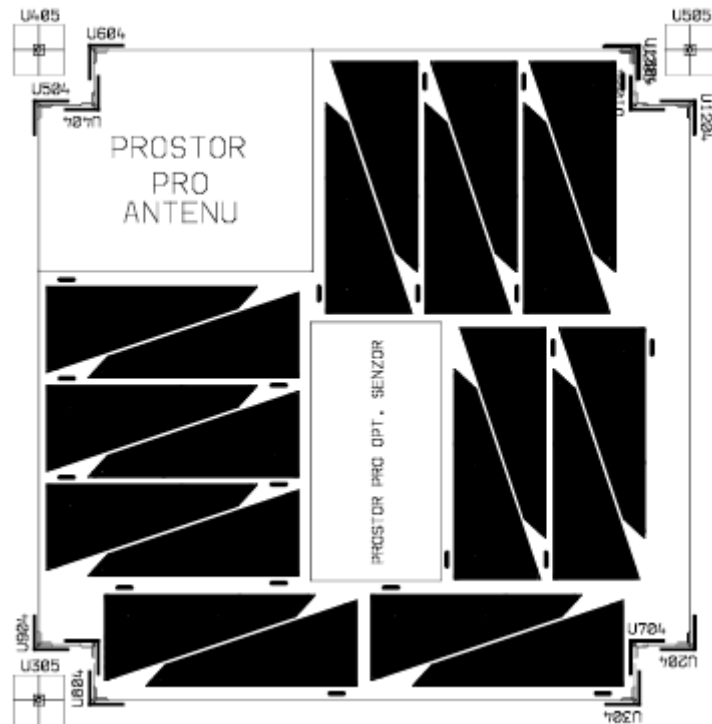
Obr.4.1. Rozmístění článků na horní stěně.

Teoretický maximální výkon, který můžeme od stěny očekávat je:

$$P_{TOP\max} = P \cdot 14 = 0,083 \cdot 14 = 1,162W$$

Dolní stěna

Část plochy dolní stěny zabírá anténa a optické senzory, na tuto stěnu je rozmístěno dvacet solárních článků.



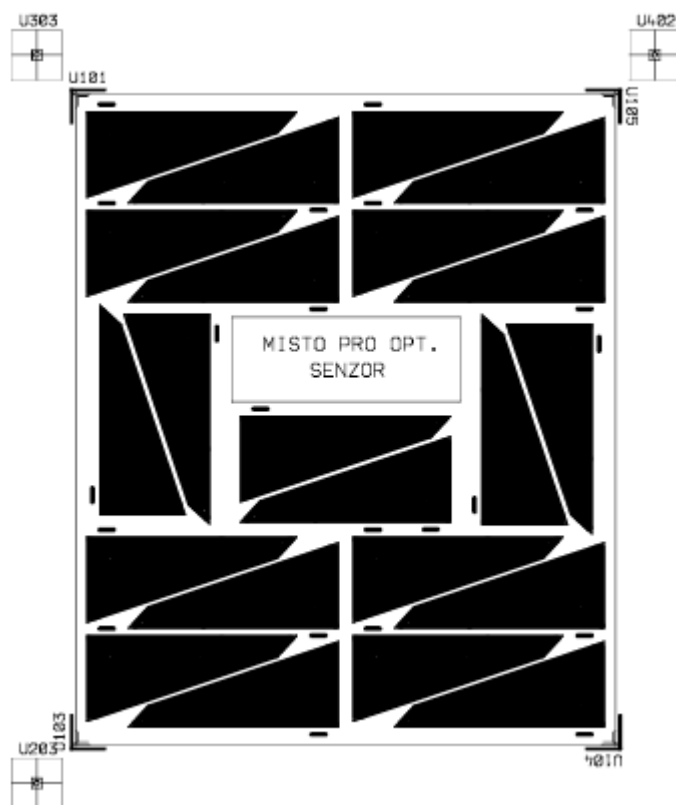
Obr.4.2. Rozmístění článků na spodní stěně.

Teoretický maximální výkon, který můžeme od stěny očekávat je:

$$P_{BASE \max} = P \cdot 20 = 0,083 \cdot 20 = 1,66W$$

Přední a levá stěna

Tyto stěny mají stejné rozměry jako výklopná křídla pikosatelitu. Na obou se nacházejí konstrukční otvory pro optické senzory. PCB jsou koncipovány shodně. Podařilo se na ně umístit dvacet dva TASC článků.



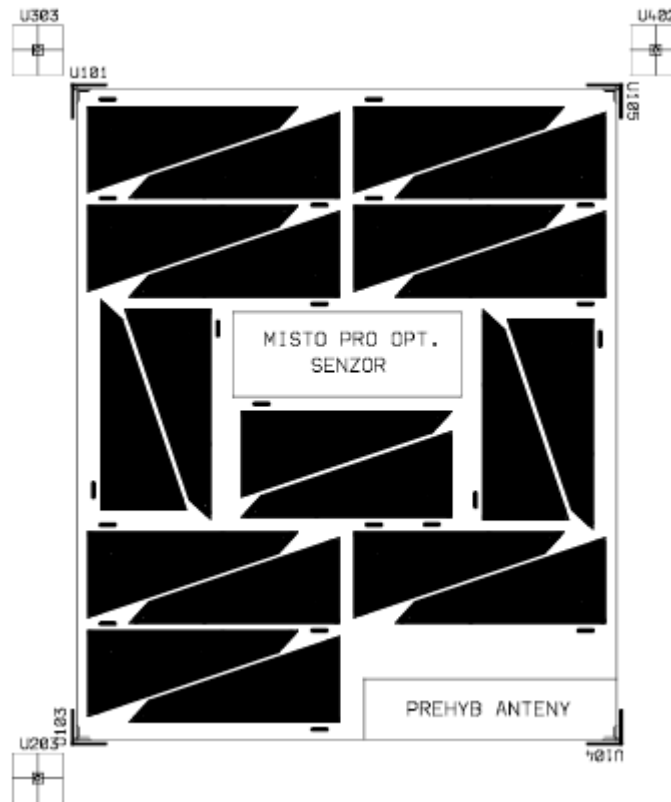
Obr.4.3. Rozmístění článků na přední a levé stěně.

Teoretický maximální výkon, který můžeme od jednotlivých stěn očekávat je:

$$P_{FRONT,LEFT\ max} = P \cdot 22 = 0,083 \cdot 22 = 1,826W$$

Pravá stěna

Rozměry stěny jsou shodné s rozměry výklopného křídla. Na tuto stěnu je nutné umístit konstrukční otvory pro optické senzory a ponechat prostor pro přehyb antény. Plocha pravé stěny je pokryta dvaceti TASC články.



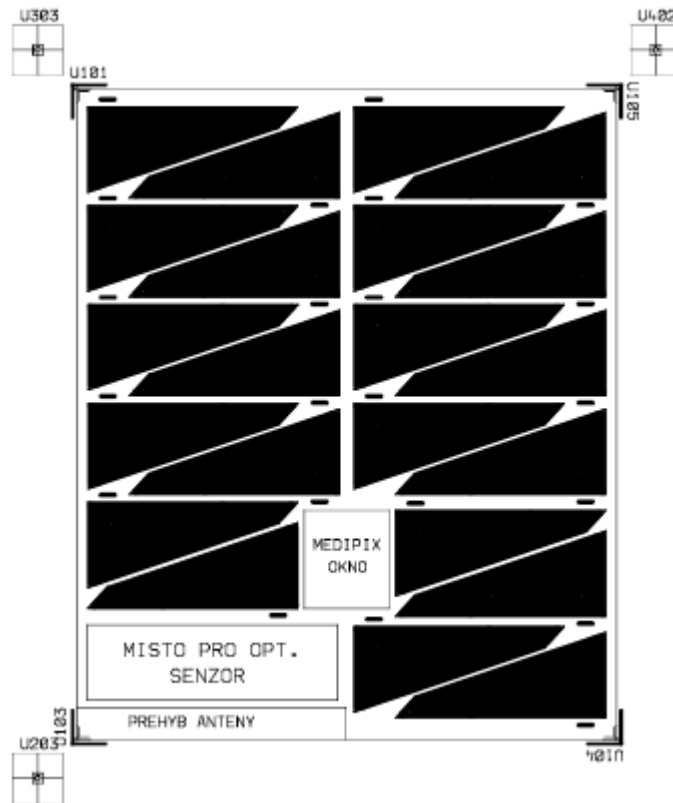
Obr.4.4. Rozmístění článků na pravé stěně.

Teoretický maximální výkon, který můžeme od stěny očekávat je:

$$P_{RIGHT \max} = P \cdot 20 = 0,083 \cdot 20 = 1,66W$$

Zadní stěna

Zadní stěna má rozměry opět stejné, jako výklopné křídlo. Na stěně se nachází konstrukční otvory pro optické senzory, okno Medipix a plocha pro přehyb antény. Zbytek plochy je pokryt dvaadvaceti solárními články.



Obr.4.5. Rozmístění článků na zadní stěně.

Teoretický maximální výkon, který můžeme od stěny očekávat je:

$$P_{BACK \max} = P \cdot 22 = 0,083 \cdot 22 = 1,826W$$

5 – TESTY VEDOUcí KE ZJIŠTĚNí SPOLEHLIVOSTI SOLÁRNíCH STĚN

Veškeré součásti pikosatelitu musí splňovat přísné technické normy, ať už to jsou specifické normy NASA či požadavky konkrétního nosiče. Jediný test, který byl na výklopném křídle proveden, byla vizuální kontrola. Další testy se z časových důvodů bohužel nedaly realizovat.

Zde naleznete alespoň návrh některých testů:

Vizuální kontrola

Při této kontrole by bylo provedeno přeměření rozměrů PCB. Důležité je, aby nebyl překročen přesný rozměr pikosatelitu udávaný projektovou dokumentací. Dále by bylo vhodné provést kontrolu TASC článků, a to především, zda nedošlo během výroby k mechanickému poškození. Při výrobě testovacího kusu křídla například došlo k poškození jednoho z článků, stalo se tak při snímání nerezové šablony. Výklopné křídlo bylo podrobeno kontrole pod mikroskopem. Hledány byly známky mechanického poškození článků a PCB, dále možné zkraty způsobené vytlačení lepida z prostoru pod článkem atd.

Vibrační testy

Jde o simulaci podmínek při startu. Tyto testy jsou předepsány speciálně pro každý nosič. Pokud tomu tak není, je doporučeno se držet normy NASA GSFC-STD. V podstatě se testuje soudržnost jednotlivých součástí křídla během a po procesu tohoto testu.

Odolnost na teplotní cykly

Během své mise bude pikosatelit vystaven přibližně šestnácti hlubokým teplotním cyklům za jeden den (pokud se počítá s oběhem satelitu ve výšce 700km). Mohlo by dojít k degradaci vlastností TASC článku nebo by se mohl porušit spoj mezi PCB a solárním článkem. Problém je různá teplotní roztažnost těchto materiálů (PCB, lepidlo, pájka, solární článek).

Vakuově tepelné testy

Při těchto testech se kontroluje, zda se za zvýšené teploty ve vakuu neuvolňují nějaké nebezpečné látky. V našem případě by mohlo dojít uvolnění nebezpečných látek z vodivého lepidla (pokud nebylo vytvrzeno podle postupu doporučeného výrobcem), či hmoty sloužící k fixaci propojky mezi záporným pólem a deskou PCB. Tyto testy podléhají normám pro daný nosič. Pokud tomu tak není a nosič nemá speciální normy, doporučuje se řídit normou NASA GSFC-STD. Stejně jako v případě vibračních testů.

Radiační odolnost

Vlivem radiačního a UV záření může dojít k degradaci vlastností solárních článků. Z tohoto důvodu postupně klesá jejich účinnost. Tuto skutečnost zřejmě nemůžeme žádným způsobem ovlivnit. Pomocí testů a simulací můžeme přibližně určit, jak proces degradace bude probíhat.

6 – ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ

Práce si kladla za cíl zkonstruovat funkční prototyp výklopného křídla, provést na vzorku měření a testy. Poznatky sesbírané během výroby by měly být zúročené při výrobě dalších solárních stěn. Jako finální produkt bylo sestaveno výklopné křídlo pikosatelitu. Solární články pokrývají plochu $45,54 \text{ cm}^2$ a $50,094 \text{ cm}^2$. Kdyby se použily standardní řezy (ITJ), pokrytá plocha by byla rovna maximálně 62 cm^2 ($2 \times 31 \text{ cm}^2$), avšak na mnoha pevných stěnách kvůli anténám, optickým sensorům a servisním konektorům by mohl být pouze jeden standardní článek o velikosti plochy 31 cm^2 . Ekonomická náročnost projektu by použitím ITJ solárních článků znatelně stoupla.

Jak bylo zmíněno v předchozím textu, cena standardní stěny, pokryté dvěma solárními články ITJ, se pohybuje v rozmezí 2 000 – 2 500 EUR (tj. přibližně 50 000 – 62 500 Kč). Tato stěna má navíc solárními články pokrytou jen jednu stranu. Nejedná se o výklopné křídlo, ale o pevnou stěnu. Sestrojený vzorek křídla PilsenCUBE byl pokryt solárními články v celkové hodnotě 105 USD (tj. přibližně 2100 Kč). Připočteme-li k ceně TASC článků náklady spojené s výrobou PCB, nepřiblížíme se ani z daleka k ceně originální stěny.

Konstrukční postup, použitý během realizace praktické části, by mohl dostát určitých změn. Vhodné by zřejmě bylo upravit tvar snímatelné šablony, která byla použita pro usazování solárních článků, a to takovým způsobem, aby články nedoléhaly na šablonu v místě jejich vrcholů. Tím by se snížilo riziko poškození článků při jejím odstraňování, po vytvrzení lepidla. Dále by se dal vylepšit proces dávkování vodivého lepidla na plošky PCB. Občas se stávalo, že bylo nanášeno zbytečné množství lepidla a po přiložení článku došlo k vytlačení lepidla z prostoru pod článkem.

Z hlediska návrhu PCB by se mělo změnit umístění konektoru. Jeho posunutí, od kraje desky směrem ke středu křídla, by přispělo k větší rezervě pro ohyb vodiče, který odvádí elektrickou energii z výklopné stěny. Vzhledem k vibracím, kterým by mohlo být křídlo vystaveno, existuje riziko poškození izolační vrstvy na PCB v oblasti pod pantem, který slouží k uchycení křídla. Z tohoto důvodu by bylo vhodné přesunout spoje ve vnějších vodivých vrstvách do prostoru mimo panty. Podle hmotnostní rozvahy projektu PilsenCUBE je jedno výklopné křídlo limitováno hodnotou 30 gramů. PCB, námi sestaveného výklopného křídla, vážila před osazením články a konektorem 15 gramů. Po osazení hmotnost stoupla na 25 gramů. Hmotnostní limity jsou tedy splněny.

Z naměřených hodnot vyplývá, že jedna strana výklopného křídla pokrytá TASC články, je při pozemních testech schopná dodat výkon okolo jednoho wattu. Naměřená hodnota je přibližně o 40% nižší, než hodnota získaná teoretickými výpočty, které byly provedeny pro hodnotu hustoty slunečního svitu mimo atmosféru. Tento rozdíl byl předpokládán, jelikož v atmosféře je hodnota hustoty slunečního svitu přibližně o 40% nižší, než mimo ni. Můžeme tedy předpokládat, že v kosmickém prostoru se za určitých podmínek výkon výklopného křídla bude blížit teoreticky vypočteným hodnotám.

Jelikož během výroby došlo k poškození jednoho z TASC článků, byla z jednoho z funkčních bloků vyřazena sériově spojená dvojice obsahující tento článek. Při měření se potvrdilo tvrzení o spolehlivosti dodávky elektrické energie díky sérioparalelním spojení solárních článků. V porovnání s ostatními shodně navrženými bloky klesla dodávka energie z bloku s poruchou o jednu třetinu. Pokles byl úměrný počtu vyřazených článků ze zapojení.

Z časových důvodů nebylo možné realizovat veškeré testy vedoucí ke zjištění spolehlivosti výklopného křídla. V této bakalářské práci jsou uvedeny návrhy některých vhodných testů.

7 – POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PILSENCUBE, stránky věnované projektu stavby fakulního satelitu PilsenCUBE [on line], [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: <<http://pilsencube.zcu.cz/cs/node/42>>
- [2] LEE, Simon; MUNAKATA, Riki a kol., CubeSat design specification: rev. 12. [online]. 2009 [cit 2011-11-23]
Dostupné z: <http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf>
- [3] SPECTROLAB, a boeing company., data sheets of Improved Triple Junction (ITJ) Solar cell. [online]. 2008 . [cit 2012-02-12]
Dostupné z: <<http://www.spectrolab.com/DataSheets/TNJCell/tnj.pdf>>
- [4] SPECTROLAB, a boeing company., data sheets of Triangular Advanced Solar Cells (TASC). [online]. 2004 . [cit 2012-02-12]
Dostupné z: <http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/PV_NM_TASC_ITJ.pdf>
- [5] ISIS, CubeSatShop.com, [on line] 2006-2012. [cit 2012-04-12]
Dostupný z: <http://www.cubesatshop.com/index.php?option=com_virtuemart&page=s hop.browse&category_id=17&Itemid=79&vmcchk=1&Itemid=79>
- [6] HOFMAN, Jaroslav, Pozemní testy a simulace fotovoltaických článků pikosatelitu PilsenCUBE – Diplomová práce, Plzeň ZČU, květen 2010
- [7] HROUDA, Jaroslav, Testování germániových a křemíkových fotovoltaických článků – Diplomová práce, Plzeň ZČU, květen 2010
- [8] EPOXY, epoxy technology, Inc., data sheets of EPO-TEK E4110 LV, [on line] 2011. [cit 2012-04-21]
Dostupné z: <<http://www.epotek.com/SSCDocs/datasheets/E4110-LV.PDF>>
- [9] VEŘTÁT, I., HROUDA, J., HOFMAN, J. Spectrolab Triangular Solar Cell Evaluation for Usage in PilsenCUBE Picosatellite. In 2010 International Conference on Applied Electronics. Pilsen: University of West Bohemia, 2010. s. 363-366. ISBN: 978-80-7043-865-7.

PŘÍLOHY

Příloha A – Foto výklopného křídla



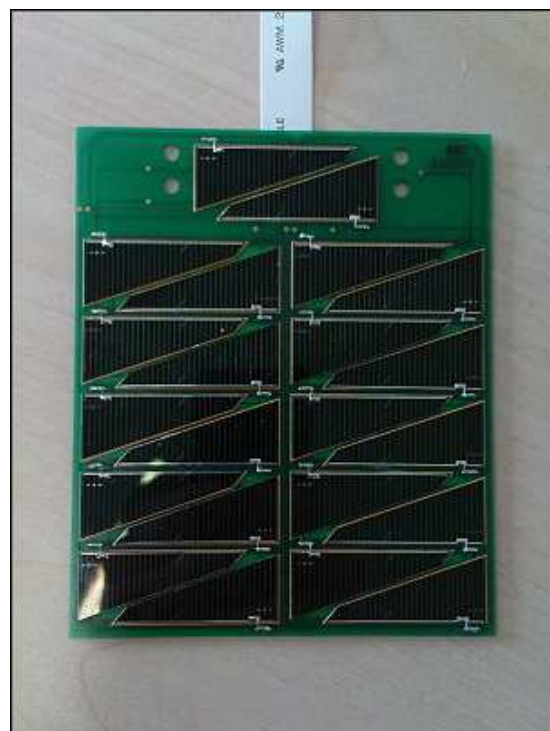
Obr. A.1.1. Deska PCB neosazená – TOP.



Obr. A.1.2. Deska PCB neosazená BOT.



Obr. A.1.3. Deska PCB osazená – TOP.



Obr. A.1.4. Deska PCB osazená BOT.



Obr. A.1.5. Nerezová šablona přiložená na PCB.

Příloha B – Projektová dokumentace Cubesat, rozměry

