

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroniky a informačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Fotovoltaické panely pro satelit PilsenCUBE

Autor práce: **Bc. Josef Holát**
Vedoucí práce: **Ing. Ivo Veřtát Ph.D**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef HOLÁT**
Osobní číslo: **E20N0061P**
Studijní program: **N0714A060013 Elektronika a informační technologie**
Specializace: **Informační a komunikační technologie**
Téma práce: **Fotovoltaické panely pro satelit PilsenCUBE**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište problematiku napájení malých satelitů z fotovoltaických panelů.
2. Navrhněte a realizujte vzorky fotovoltaických panelů pro satelit PilsenCUBE.
3. Otestujte vlastnosti navržených a realizovaných fotovoltaických panelů.
4. Připravte dokumentaci s podrobným postupem pro osazení fotovoltaických panelů a postupem otestování správné funkce.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


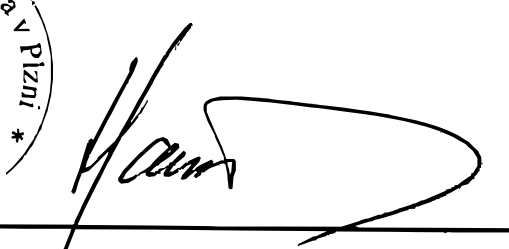
Seznam doporučené literatury:

1. VEŘTÁT, I., VOBORNÍK, A. Efficient and Reliable Solar Panels for Small CubeSat Picosatellites. INTERNATIONAL JOURNAL OF PHOTOENERGY, 2014, roč. 2014, č. June, s. 1-8. ISSN: 1110-662X
2. 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 , ISSN: 1803-7232

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh, konstrukci a následné zhodnocení vlastností solárních stěn pro pikosatelit PilsenCUBE. Konstrukce satelitu obsahuje řadu senzorů, které brání jednoduchému pokrytí všech stěn satelitu stejným rozložením solárních článků. Cílem bylo navrhnout pro každou stěnu originální rozmístění solárních článků respektující umístění senzorů. Zároveň bylo nutné usilovat o co největší počet umístěných solárních článků na stěnu pro maximalizaci elektrického výkonu. Tomuto účelu vyhovují malé články typu TASC, které lze díky malé velikosti umisťovat značně variabilně. Návrh stěn je proveden v programu Eagle. Na základě návrhu jsou provedeny výpočty očekávaného výkonu. Dále je popsán způsob kontaktování a přichycení článků na desku, kdy bylo použito lepení. Na základě zkušeností je zhodnocen postup výroby a doporučeny změny postupu. U hotových stěn je ověřena jejich funkčnost. Navržené řešení solárních stěn zajišťuje vyšší spolehlivost dodávky elektrické energie vzhledem k nezávislým sekcím solárního panelu a efektivní sdílení plochy stěny satelitu s konstrukčními otvory pro senzory.

Klíčová slova

PilsenCUBE, fotovoltaický článek, solární článek, cubesat, napájení malých satelitů

Abstract

This thesis focuses on the design, construction and subsequent evaluation of the solar wall properties for the PilsenCUBE picosatellite. The satellite surface contains a series of sensors that prevent the simple layout of solar cells on all walls. The aim was to design a unique solar cell layout for each wall, respecting the location of the sensors. But as many solar cells on the wall as possible to maximize electrical power were also important. This purpose is suited to small TASC cells, which can be placed in a highly variable way because of their size. The design of the walls made in the Eagle program. Based on the design, calculations of the expected performance are made. The method of contacting and attaching the cells to the board is also described, where gluing was used. Based on experience, the manufacturing process is evaluated and changes to the process are recommended. The performance of the finished walls is verified. The proposed solar wall solution ensures higher reliability of the solar cells divided into independent sections and effective sharing of the satellite wall area with the sensor holes.

Key Words

PilsenCUBE, photovoltaic cell, solar cell, cubesat, power supply for small satelites

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1.1 Cíle práce.....	- 2 -
2 Napájení malých satelitů	- 3 -
2.1 Provozní prostředí	- 3 -
2.2 Ukládání elektrické energie.....	- 8 -
2.3 Zdroje energie	- 10 -
2.4 ITJ a TASC články	- 13 -
3 Návrh fotovoltaických stěn.....	- 16 -
3.1 Poznatky z předchozích návrhů.....	- 16 -
3.2 Definování mechanických požadavků	- 16 -
3.3 Definování elektrických požadavků.....	- 20 -
3.4 Technické parametry TASC článku	- 21 -
3.5 Součástky, DPS a konektor	- 22 -
3.6 Navržené rozložení článků na stěnách	- 23 -
3.7 Výpočet výkonu fotovoltaických stěn.....	- 26 -
4 Osazovací šablona	- 29 -
5 Osazování	- 31 -
5.1 Lepení.....	- 31 -
5.2 Výsledky lepení.....	- 33 -
5.3 Kontaktování katody	- 35 -
6 Testování	- 36 -
6.1 Podmínky testu správnosti zapojení.....	- 36 -
6.2 Výsledky testu správnosti zapojení.....	- 37 -
Zhodnocení a závěr	- 39 -
Literatura.....	- 40 -
Přílohy.....	I
Příloha A – Výkresy a schémata	I
Příloha B – fotografie osazených stěn	VI
Příloha C – přiložené soubory	IX

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
a	Zrychlení	[g]
f	Frekvence	[Hz]
h	Výška. Vzdálenost od zemského povrchu.	[m]
t	Teplota	[°C]
A	Výkonová hustota záření.	[W/m ²]
C_{ff}	Fill Factor. Činitel Plnění	[-]
D	Absorbovaná dávka ionizujícího záření	[rad]
E_{λ}	Intenzita záření	[W/m ² /nm]
I_{mp}	Proud při maximálním výkonu	[A]
I_{sc}	Proud nakrátko	[A]
J	Proudová hustota	[A/cm ²]
J_{mp}	Proudová hustota při maximální výkonu	[A/cm ²]
J_{sc}	Proudová hustota nakrátko	[A/cm ²]
N_V	Objemová hustota částic	[m ⁻³]
P	Elektrický výkon	[W]
S	Plocha	[m ²]
T	Čas	[h]
U_{mp}	Elektrické napětí při maximálním výkonu	[V]
U_{oc}	Napětí na prázdno	[V]
α	Úhel	[°]
η_n	Nominální účinnost	[-]
λ	Vlnová délka	[nm]
ρ	Účinnost článku závislá na úhlu ozáření, normalizovaná k η_n	[-]
σ	Účinnost článku závislá na teplotě, normalizovaná k η_n	[-]
1U	Základní velikost standardu CubeSat	
BOL	Na začátku provozní životnosti. Beginning of life.	
CIGS	Měď-indium-galium-diselenid	
EOL	Na konci provozní životnosti. End of life.	
EPS	Elektrický napájecí systém. Electrical power system.	
GaAs	Arzenid galia	
GaInP ₂	Galium indium fosfid	
Ge	Germanium	
ITJ	Improved Triple Junction	
MPPT	Sledování bodu maximálního výkonu. Maximum Power Point Tracking.	
TASC	Triangular Advanced Solar Cells	

Úvod

Pikosatelity standardu CubeSat jsou dnes častou platformou pro technologické demonstrátory, materiálový výzkum, nebo malé vědecké družice. Standardizované rozměry odstraňují problémy s adaptérem nákladu na raketovém nosiči a díky unifikaci dílů snižují výrobní náklady. Základem standardu CubeSat je konstrukce o rozměrech 100 x 100 x 113 mm. Tento rozměr je nazýván jako 1U a lze z něj vytvářet větší celky (2U, 3U, 6U, 12U). Parametry jsou podrobně popsány v CubeSat Design Specifications [1]. Díky své nižší ceně umožňuje stavbu satelitů hlavně pro nízké oběžné dráhy i menším firmám a vzdělávacím institucím.

Práce je řešena v souvislosti s projektem stavby studentského CubeSatu PilsenCUBE, který je realizován na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni ve spolupráci s dalšími pracovišti. Pikosatelity mají ze své podstaty malé rozměry, a to přináší problémy mimo jiné i pro zajištění dostatečného množství elektrické energie. Odhaduje se, že nedostatek elektrické energie a selhání napájecího systému pikosatelitu je jednou z nejčastějších příčin celkového selhání mise [2]. Proto je součástí prací na satelitu PilsenCUBE i návrh efektivního a spolehlivého napájecího systému, jehož nedílnou součástí jsou stěny satelitu pokryté fotovoltaickými články. Solární články umístěné přímo na povrchu satelitu musí navíc sdílet plochu s dalšími součástkami, jako jsou kamery a jiné senzory.

Základní jednotkou povrchu CubeSatu je rozměr 100 x 100 mm, tedy jedna strana základní 1U velikosti. Tato plocha není celá využitelná, část je vyhrazena pro konstrukční prvky definované CubeSat specifikací. Často se využívá řešení, kdy jsou na jedné takové stěně umístěny dva fotovoltaické články typu ITJ. Takové řešení se zdá být konstrukčně jednodušší, ale při nutnosti sdílet plochu satelitu s nějakým konstrukčním otvorem je málo flexibilní a neposkytuje moc možností rozmístění. Řešením tohoto problému může být použití vyklápěcích stěn nebo menších fotovoltaických článků. Použití vyklápěcích stěn významně navyšuje plochu pro fotovoltaické články, ale také přináší nové problémy spojené s řešením výklopného mechanismu. Druhou možností je použít menší články, které umožňují variabilnější rozmístění a efektivnější využití plochy povrchu satelitu. V tomto případě se jedná o malé trojúhelníkové články typu TASC. Více menších článků také přináší výhodu z hlediska spolehlivosti. Články jsou zapojené sérioparalelně přes oddělovací diody a selhání jednoho článku tak nepředstavuje významné snížení dodávek elektrické energie.

1.1 Cíle práce

Hlavním cílem práce je navrhnout rozložení fotovoltaických článků na všech šesti stěnách 1U CubeSatu PilsenCUBE a připravit technologii pro jejich snadné osazení, která nebude vyžadovat speciální a nákladné technické vybavení.

Rozložení článků na stěnách musí zajišťovat maximální využití plochy umístěním co největšího počtu článků. Rozložení musí zároveň respektovat konstrukční otvory ve stěnách dané dalším vybavením satelitu. Články na stěnách jsou rozděleny do nezávislých sekcí oddělených diodami, aby v případě poruchy nebyla ovlivněna celá stěna. Dvě protilehlé stěny jsou vždy navzájem spojeny do jednoho napájecího okruhu. Dva okruhy využívají Li-ion akumulátory a třetí, experimentální, využívá pro ukládání energie superkapacitory.

Po návrhu je popsána výroba solárních stěn, která vycházela z předešlé práce zabývající se osazováním TASC článků [3]. Byla ověřena správnost zapojení a kontaktování hotových desek. Předpokládaný elektrický výkon byl určen pomocí výpočtu. U fotovoltaických stěn, stejně jako i ostatních částí CubeSatu, je třeba provést i mechanické testy na vibrační stolici. Tyto testy se ale provádějí s kompletním CubeSatem umístěným ve vypouštěči, proto nebyly součástí této práce.

2 Napájení malých satelitů

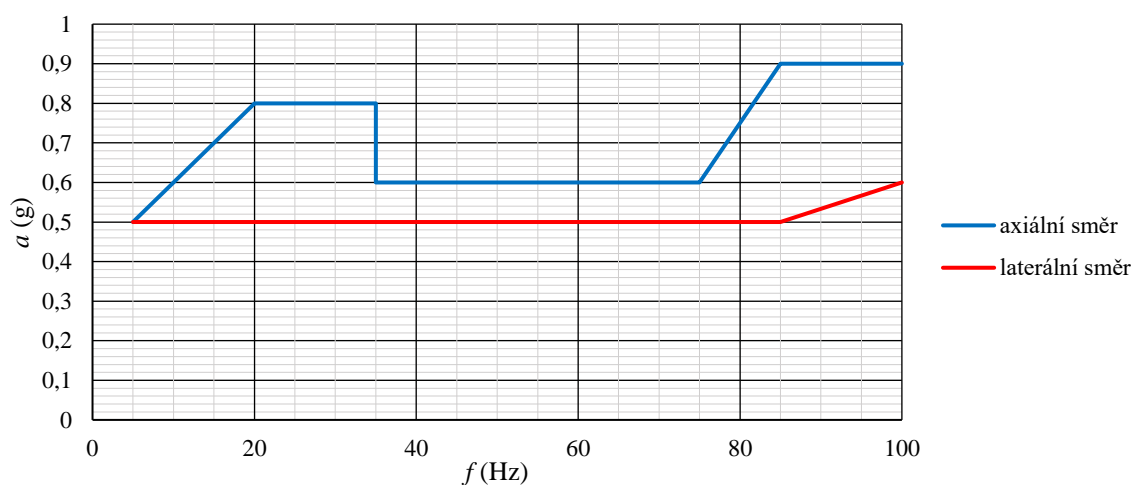
Elektrický napájecí systém (EPS) je hlavní subsystém satelitu, který se skládá ze zdroje energie, uložistiště a rozvodů [4]. Dle [5] obecně potřebujeme malý, lehký, odolný a spolehlivý zdroj elektrické energie, který bude schopný pracovat po celou dobu mise, což může být i několik let.

Zdroje energie dělíme do dvou skupin. Tou první jsou zdroje s vlastním primárním zdrojem energie. Mezi ně řadíme chemické baterie, jaderné zdroje, palivové články a mechanické zásobníky energie. Druhou skupinou jsou zdroje bez vlastního primárního zdroje, což jsou fotovoltaické články.

2.1 Provozní prostředí

Při startu a následně během provozu na oběžné dráze je napájecí systém vystaven nepříznivým vlivům prostředí, na které musí být navrhnout a testován. Mezi tyto vlivy, které jsou krátce popsány v této podkapitole, patří mechanické zatížení a vibrace při startu, odpor zbytků atmosféry, oxidační účinky atmosféry a ionizující a neionizující záření.

Mechanické zatížení působí na konstrukci satelitu během startu na raketovém nosiči a mohlo by způsobit popraskání fotovoltaických článků. Tyto podmínky jsou pro každý nosič unikátní a satelit jim musí být přizpůsoben. Tyto podmínky jsou popsány v uživatelské příručce nosiče. Například uživatelská příručka [6] raket Falcon uvádí maximální zrychlení v podélném směru až 8,5 g a v bočním směru až 3 g. Na satelit působí také silné harmonické vibrace. V příručce jsou uvedeny v rozsahu 5 až 100 Hz a jejich amplituda je mezi 0,5 g a 0,9 g (graf 1).

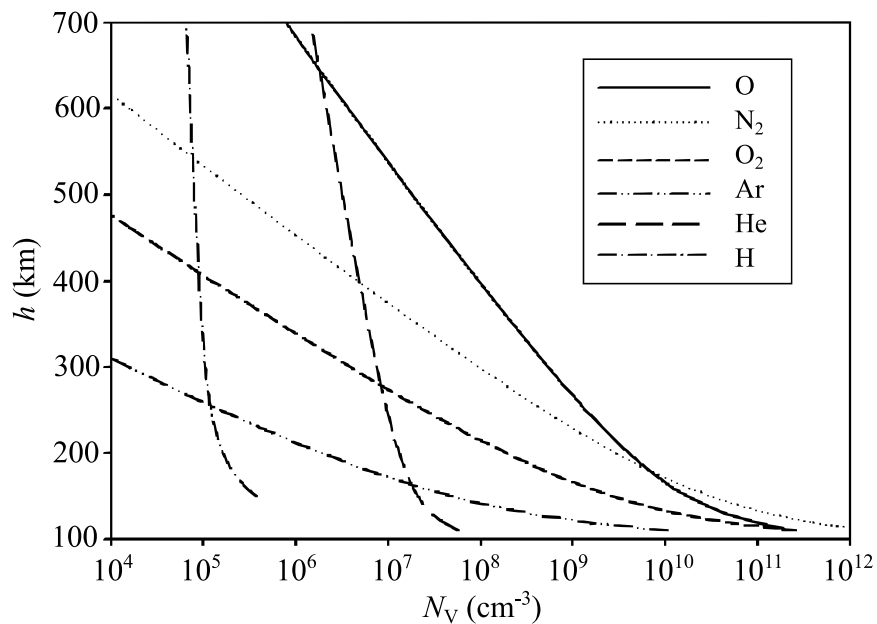


Graf 1: Maximální mezní úrovně ekvivalentních sinusových vibrací pro Falcon 9 - převzato z [6]

Odpor atmosféry, jak uvádí [4], je jedním z vlivů působících na nízké oběžné dráze Země (LEO), což je dráha kde se CubeSaty používají nejčastěji. Tento vliv lze na rozdíl od ostatních považovat z určitého pohledu za příznivý, protože omezuje dobu setrvání satelitu na oběžné dráze a tím zamezuje zanášení orbity vysloužilými satelity. Tato doba závisí na konkrétní výšce orbity, kdy pokud je satelit dostatečně nízko, tak na něj působí zbytky atmosféry a zpomalují ho.

Dobu takového postupného zpomalování lze i aktivně ovlivnit. Například, pokud má satelit výklopné solární panely, tak jejich plocha může být důležitým faktorem. Změnou orientace satelitu lze potom výrazně ovlivnit plochu, na kterou bude zpomalující atmosféra působit. V případě technické závady, kdy je stále možnost řídit orientaci, lze nastavit proti atmosféře tu největší plochu a urychlit tím bezpečný zánik v atmosféře.

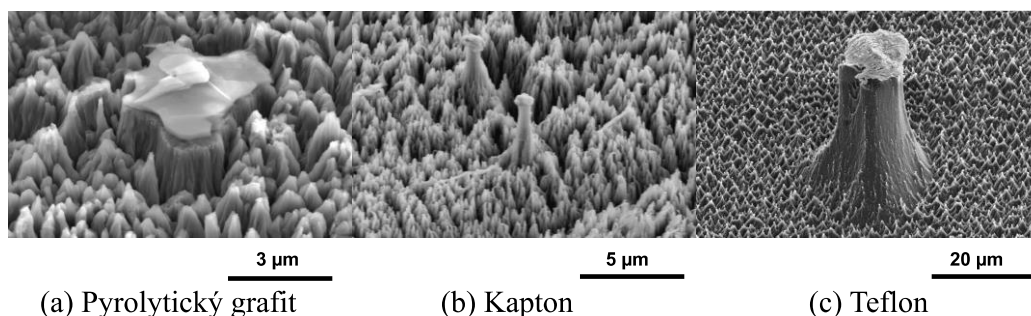
Oxidační účinky jsou dalším projevem zbytků atmosféry. Konkrétně se jedná o vliv atomárního kyslíku, který vzniká vlivem ultrafialového záření, kdy dochází k rozkladu molekul O_2 na samotné atomy kyslíku. Menší počet částic ve vyšších výškách omezuje rekombinaci zpět na O_2 . Atomární kyslík je tak typicky nejrozšířenější částicí ve výškách od 180 km do 650 km [7], jak ukazuje graf 2.



Graf 2: Hustota částic atmosféry v závislosti na nadmořské výšce – převzato z [7]

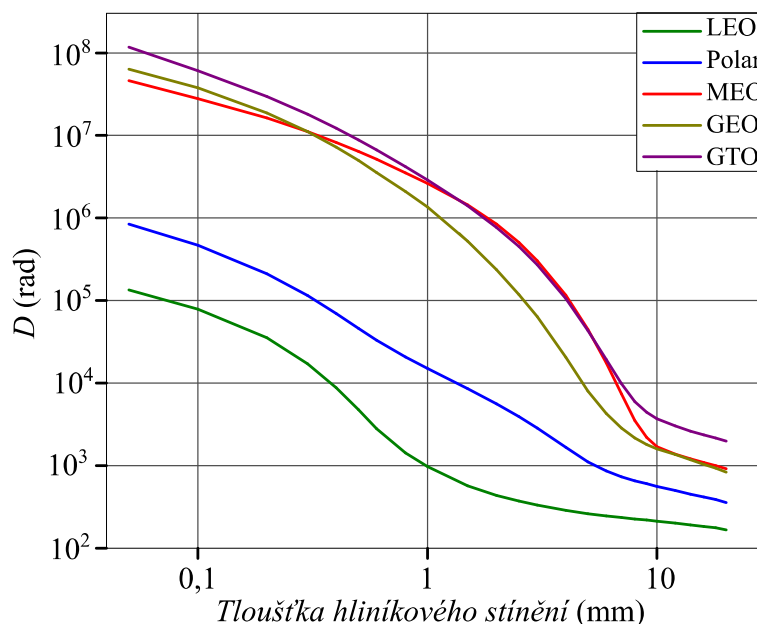
Atomární kyslík snadno reaguje s mnoha materiály používanými na satelitech. Týká se to hlavně polymerů na bázi uhlovodíků. Dochází u nich k erozi povrchu, jak ukazuje obr. 1. Proto se materiály jako kapton pokrývají vrstvičkou hliníku (nebo jeho oxidu), který polymerní materiál chrání. Ochranná vrstva je ale velmi citlivá na jakékoliv poruchy vzniklé nečistotami při výrobě, nebo odřením. Každá takováto porucha vystaví chráněný polymer

erozi a při velkém počtu poruch může dojít až k úplné ztrátě podkladového polymerního materiálu [7]. Na povrchu fotovoltaických článků potom mohou dekomponovat vrstvy materiálů unikajících ze satelitu. To snižuje jejich účinnost.



Obr. 1: Eroze povrchu vlivem atomárního kyslíku – převzato z [7]

Ionizující záření je dalším nežádoucím účinkem. Jednou z cest, jak se s tímto vlivem vypořádat je použít stínění. To musí absorbovat energii ionizujícího záření a zeslabit ji na přijatelnou úroveň. Pravděpodobnost interakce vysokoenergetické částice se stínícím materiálem roste s hustotou atomů. Účinné jsou těžké kovy, jako olovo, wolfram, vizmut, cín nebo antimon. Pro použití na satelitu je ale podstatná hmotnost a proto se u nich spíše používají kompozitní materiály bohaté na vodík nebo uhlík, případně hliník, nebo jejich kombinace [8]. Při pohlcení záření stíněním v něm může dojít k sekundární emisi a ta může dále negativně ovlivňovat systémy satelitu.

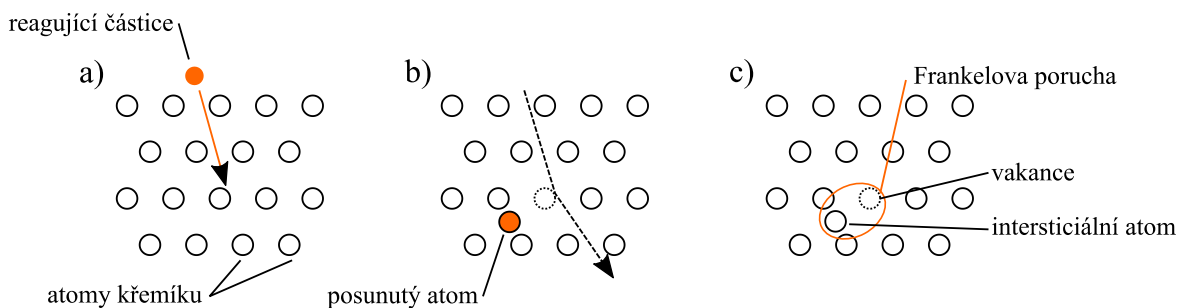


Graf 3: Křivky celkové dávky ionizujícího záření pro různé oběžné dráhy kolem Země pro jednoletou misi v závislosti na tloušťce stínění – převzato z [9]

Vliv ionizujícího záření lze také omezit volbou nízké oběžné dráhy Země. Kolem Země totiž existují takzvané Van Allenovy pásy. To jsou oblasti kolem Země, kde je vysoká

koncentrace nabytých částic (iontů, elektronů), protože jsou zde zachyceny magnetickým polem Země [10]. Tvar těchto pásů odpovídá tvaru magnetického pole Země, to znamená, že inklinace oběžné dráhy satelitu by pro minimalizaci radiačního zatížení měla být taková, aby pásy neprotínala. To ukazuje i graf 3, kde dávka záření na polární dráze je vyšší, než na LEO dráze s nižší inklinací.

Lze zmínit dva vlivy ionizujícího záření na elektroniku. Jedním z nich je celková zachycená dávka, kdy při průchodu záření vzniká přebytečný náboj. V případě vodičů a polovodičů dochází k rekombinaci, která může způsobit další problémy. V případě izolantů dochází k hromadění elektrického náboje [8].



Obr. 2: Vznik poruchy v krystalické mřížce – převzato z [8]

Druhým z vlivů je způsobování poruch v krystalické mřížce, kdy je některý z atomů vlivem vysokoenergetické částice vychýlen ze své pozice, jak ukazuje obr. 2. To má degradabilní účinky i na fotovoltaické články, kdy se snižuje jejich účinnost. Proto se u nich udává tzv. BOL (Beginning of life – na začátku životnosti) účinnost a EOL (End of life – na konci životnosti) účinnost. Při návrhu napájecího systému je nutno s tímto snížením účinnosti počítat.

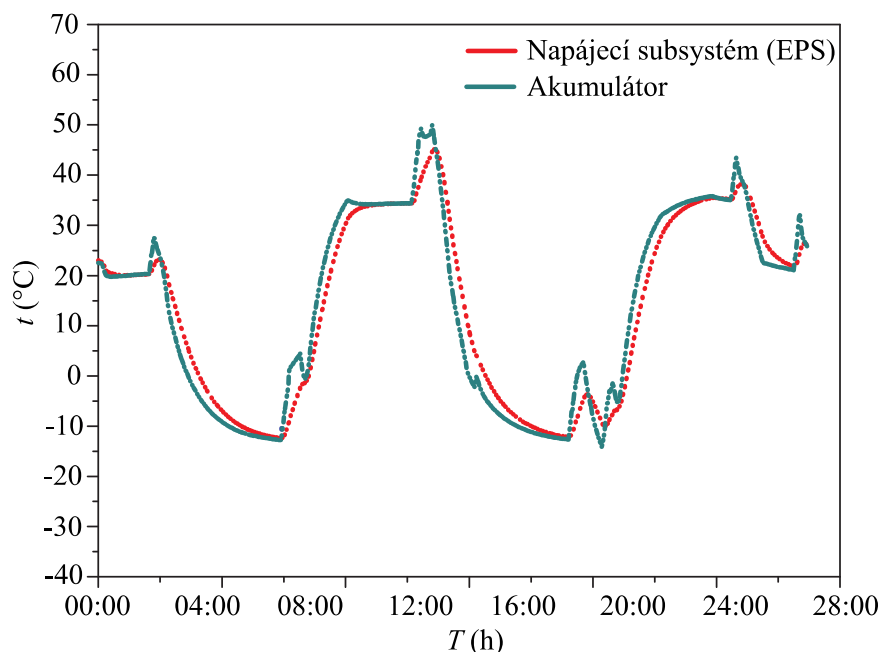
Jak ukazuje i zmíněný graf 3, u ionizujícího záření je podstatná celková dávka, která vzrůstá s časem. V případě kratších misí na nízké oběžné dráze lze tak klást nižší nároky na kvalitu a tím i cenu elektronických součástek [4].

Neionizující záření má na satelit tepelné účinky a využívá se pro výrobu elektrické energie pomocí fotovoltaických článků. Z toho pohledu je důležitá hustota energie ze Slunce, která je daná výkonem v poměru k ploše (W/m^2) a tedy s rostoucí vzdáleností od Slunce hustota energie klesá. Tento údaj je důležitý pro volbu emisivity povrchu satelitu, která je důležitá z hlediska teploty a pro nadimenzování plochy fotovoltaických článků, jelikož potřebná plocha solárních článků pro vygenerování stejného množství elektrické energie narůstá se vzdáleností od Slunce. Proto byla zavedena tzv. sluneční konstanta, kterou [11] definuje jako celkovou přijatou energii ze Slunce na jednotku plochy za jednotku času

na teoretický povrch kolmý ke slunečnímu záření ve střední vzdálenosti Země od Slunce. Sluneční konstanta se rovná 1366 W/m^2 . Tato hodnota ale není zcela konstantní a kolísá o přibližně 0,1 % v takzvaných slunečních cyklech.

Vlivem střídání světla a zemského stínu ale vznikají teplotní cykly, které mají nežádoucí účinky. Tento faktor je závislý na zvolené oběžné dráze. V praxi může být satelit například 2/3 času osvětlen a poté 1/3 času ve stínu, což je běžné pro CubeSaty na nízké oběžné dráze. V některých případech lze využít možnost heliosynchronní dráhy (SSO), která může zajistit nepřetržitý výhled satelitu na Slunce [12]. Při výběru dráhy satelitu ale nelze brát ohled pouze na požadavky základních subsystémů satelitu, ale i na cíle mise.

Stěny CubeSatu pokryté tmavými fotovoltaickými články mají díky své pohltivosti zásadní vliv na jeho teplotní stabilitu. Pokrytí maximální plochy satelitu fotovoltaickými články je výhodné z hlediska možného dosaženého výkonu, ale reálný výkon solárních článků je silně závislý na jejich teplotě. V dokumentaci se běžně uvádí účinnost pro teploty okolo $25 \text{ }^\circ\text{C}$, ale při osvětlení stěny satelitu může docházet k jejímu zahřívání až k hodnotám mezi $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní vlastnosti se testují ve vakuové komoře, kde je CubeSat vystaven cyklické změně teplot. Příklad výsledků takovéto zkoušky ukazuje graf 4.



Graf 4: Příklad výsledků testování ve vakuové komoře - převzato z [13]

Rostoucí teplota snižuje elektrický výkon článků. Je tedy vhodné udržovat jejich teplotu co nejnižší. To lze ovlivnit dobrou tepelnou vodivostí mezi povrchem satelitu a zbytkem jeho konstrukce. Tím se sníží teplotní špičky během cyklu.

U velkých satelitů nemusí být pokles výkonu vlivem teploty problém, protože mají dostatečnou výkonovou rezervu. V případě CubeSatů se ale může jednat o významný faktor ovlivňující výkon napájecího systému. Teplotní cykly fotovoltaických článků jsou ještě výraznější, pokud jsou články umístěné na výklopných křídlech. V takovém případě totiž není zajištěn přestup tepla z fotovoltaických článků do zbývající konstrukce satelitu. Fotovoltaické články se potom přehřívají [14].

Změny teploty ale neovlivňují jen elektrické vlastnosti. Ovlivňují i konstrukční materiály, které musí být vybírány i na základě takových kritérií, jako je jejich teplotní roztažnost nebo jejich odpařování. Rozdílná teplotní roztažnost fotovoltaického článku a substrátu, na kterém je článek připevněný může při výrazných změnách teploty způsobit poškození článku nebo jeho elektrického kontaktu.

Nízká míra odpařování je potom například kritériem pro výběr lepidla, kdy se pro vesmírné aplikace musí používat k tomu certifikovaná tzv. „low Outgassing“ lepidla. Uvolňované nečistoty by mohly ovlivňovat jak přímo fotovoltaické články, tak i další systémy satelitu.

2.2 Ukládání elektrické energie

Pro satelity, které se během svého oběhu kolem Země dostanou do jejího stínu je důležité, aby energie získaná na osvětlené straně nejen pokrývala okamžitou spotřebu, ale aby vznikala i energie navíc, kterou je možné akumulovat.

Výběr systému pro ukládání elektrické energie závisí na požadovaném maximálním výkonu, celkovém množství uložené energie, hmotnostním limitu, požadavkům na samovybíjení, cyklické životnosti, teplotních podmínkách, bezpečnostních požadavcích a případně i na dalších kritériích [15].

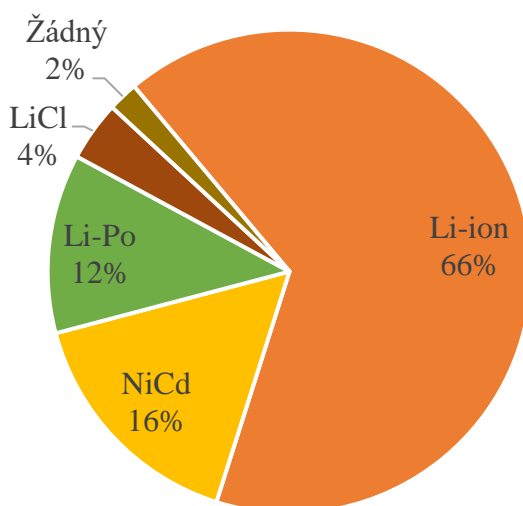
Na výběr jsou úložiště energie na elektrochemickém principu, což jsou sekundární akumulátory z různých materiálů, nebo palivové články pracující s vodíkem a kyslíkem. Dále jsou k dispozici úložiště pracující na elektrostatickém principu, což jsou kapacitory a superkapacitory. Další možností jsou elektromechanická úložiště, která využívají kinetickou energii setrvačnicků, které mohou zároveň sloužit i pro řízení orientace satelitu. energii lze ukládat i ve formě tepla, které ohřeje materiál na palubě satelitu (např. palivo pohonného systému). Takto uložená energie může být přeměněna zpátky na elektrickou pomocí Stirlingova motoru nebo turbíny [15].

Nejčastější volbou pro ukládání energie jsou chemické akumulátory. Jak uvádí [4], v roce 2021 tento systém využívalo přibližně 85 % nanosatelitů. Může se jednat o nikel-kadmiové

(NiCd), lithium-chloridové (LiCl), nikl-vodíkové (NiH₂), lithium-iontové (Li-ion) a lithium polymerové (Li-Po) akumulátory, které byly dříve na malých satelitech často používány. Jak ukazuje graf 5, tak dnes nejpoužívanějším typem jsou Li-ion akumulátory, protože mají nízkou hmotnost, dobré dobíjecí schopnosti a vysokou energetickou hustotu, kdy dosahují až ~270 Wh/kg. Pracovní napětí Li-ion článků je obvykle 3,6 V.

Energetická hustota je sice důležitý parametr z hlediska hmotnosti satelitu, ale je třeba hledět i na výkon, který mohou akumulátory dodávat a úroveň degradace kapacity vlivem cyklického dobíjení, kdy k výraznému poklesu kapacity dochází už při 1000 nabíjecích cyklech. U satelitu na nízké oběžné dráze může být takových nabíjecích cyklů mezi 12 až 16 za 24 hodin [16]. To by při využívání plné kapacity akumulátoru během jedné orbity vedlo k rychlé degradaci akumulátorů. Proto je jejich kapacita naddimenzována, aby při jedné orbitě došlo k nabití/vybití například jen o 20 %.

Perspektivním úložištěm energie pro satelity jsou také superkapacitory. Jejich výhodou je, že dokáží pracovat ve větším rozsahu teplot (-40 °C až 70 °C), než akumulátory a vydrží až miliony nabíjecích cyklů [17, 18]. Na rozdíl od akumulátorů mají nižší výkonovou hustotu (100 kW/kg). To se na první pohled může zdát jako zásadní nevýhoda, ale je třeba si uvědomit, že kapacita akumulátorů se musí vzhledem k jejich životnosti výrazně naddimenzovat. U superkapacitorů nikoliv.



Graf 5: Typy akumulátorů používané v piko- a nanosatelitech – převzato z [19]

U superkapacitorů je ale zase problémem to, že nejsme schopni využít celou jejich kapacitu. Ideálně bychom je potřebovali vybit až na nulové napětí. To však není možné, protože napěťový měnič připojený k superkapacitoru má určitý limit napětí, se kterým je

ještě schopen pracovat. Minimální napětí se tak pohybuje okolo 1 V. Z toho důvodu se superkapacity řadí do série.

Není pravděpodobné, že by superkapacity zcela nahradily akumulátory, ale v některých aplikacích by výrazně mohly snížit využití akumulátoru [4]. Kombinaci využívání Li-ion akumulátorů a superkapacitorů má testovat i CubeSat PilsenCUBE, jenž bude obsahovat dvě samostatné větve s Li-ion akumulátory a jednu větev se superkapacity. Každé z větví budou poskytovat energii dvě stěny fotovoltaických článků.

2.3 Zdroje energie

Nejčastějším zdrojem energie pro satelity na oběžné dráze Země jsou právě fotovoltaické články. Nejdříve je popsána základní struktura fotovoltaického článku, poté některé jejich speciální typy a nakonec je zmíněno použití fotovoltaických článků na CubeSatech.

Základní struktura fotovoltaického článku se skládá z krycí opticky propustné antireflexní vrstvy, která musí minimalizovat ztráty odrazem a účinně zachycovat světlo dopadající na fotovoltaický článek a podporovat jeho přenos do vrstev pod krytím. Antireflexní vrstva je obvykle oxid křemíku, titanu nebo tantalu nanesený rotační nebo vakuovou metodou [20].

Dále následuje horní vodivá vrstva uspořádaná obvykle do mřížkového vzoru, který je tvořen tenkými kovovými vodiči. Mřížka musí být dostatečně jemná na to, aby dobře odváděla elektrický proud, ale zároveň nesmí být příliš hustá, aby neblokovala přístup světla. Zadní vodivá vrstva není omezena požadavkem na propustnost světla, proto může být tvořena jednolitou vrstvou kovu [20].

Hlavní vrstvou je absorpční vrstva, umístěna mezi horní a dolní vodivou vrstvou. Je tvořena polovodivým materiálem, kterým může být křemík, arsenid galia, fosfid india, nebo měď-indium selenid [20]. Absorpční vrstva je aktivní vždy jen v omezeném rozsahu vlnových délek. Tím je dána účinnost fotovoltaického článku.

Multi-junction Solar Cells (vícepřechodové solární články) jsou články s více P-N přechody z různých polovodičových materiálů, kdy každý P-N přechod může reagovat na jinou vlnovou délku dopadajícího světla [21]. Tím se zvyšuje schopnost článku absorbovat sluneční světlo a přeměnit ho na elektrickou energii. Tuto technologii využívají i v této práci použité články TASC, které sdílí konstrukci s ITJ články a mají tedy tři přechody [22]. Jak je zmíněno i dále, tyto články mají účinnost 27 %.

Vývoj vícepřechodových článků ale dále probíhá. Například tento článek [23] uvádí dosažení účinnosti 33,3 % na člancích založených na 0,002 mm tenkém křemíku. Jedná se

ale pouze zatím o experimentální články, protože není vyřešený problém s jejich složitou vnitřní strukturou. Dosažitelná účinnost je ale ještě výše, protože například SpectroLab experimentuje s články s pěti až šesti přechody s teoretickou účinností až 70 % při osvětlení koncentrovaným slunečním zářením [24].

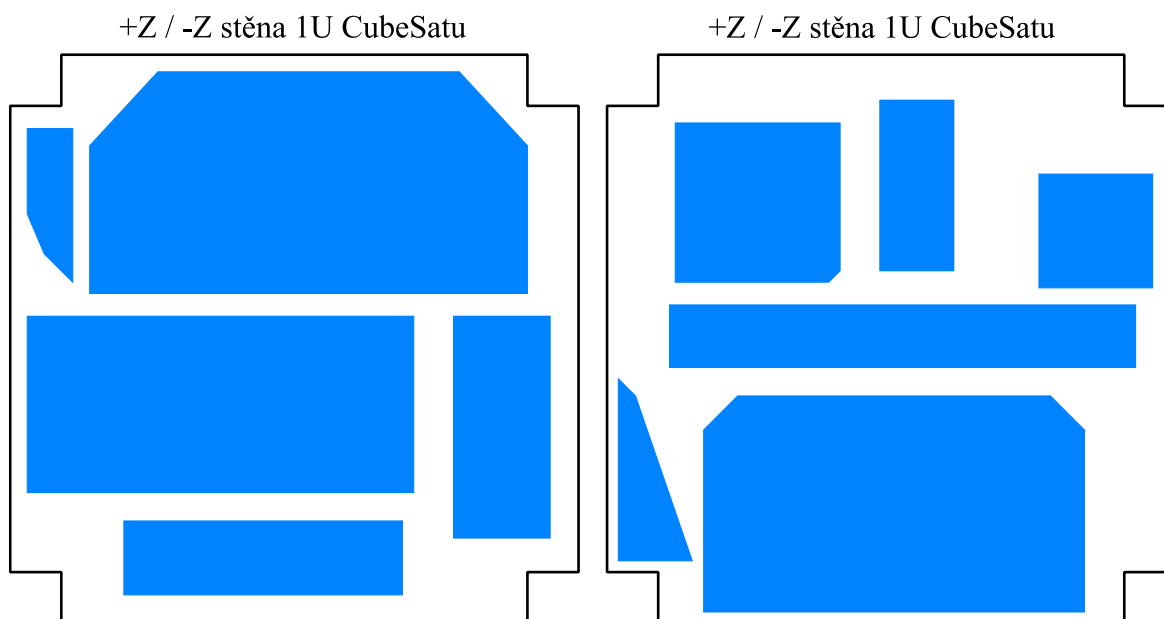
Flexible Solar Cells (ohebné solární články) využívají skleněný nebo plastový substrát a oproti běžným článkům, které mají vrstvu fotovoltaického materiálu tlustou 350 μm , mají tuto vrstvu tlustou pouze 1 μm . Díky tomu jsou články ohebné, lehké a levnější, protože se na jejich výrobu spotřebuje méně surovin [4]. Mezi tyto články patří například články na bázi CIGS (měď-indium-galium-diselenid). Výhodou těchto článků je jejich velmi nízká hmotnost a malý objem ve složeném stavu.

Organic Solar Cells (organické solární články) jsou podle [4] další perspektivní technologií fotovoltaických článků. Využívá se organických polymerů a molekul, které absorbují světlo a vytvářejí odpovídající náboj. Jedná se o efektivní technologii, kdy malé množství materiálu dokáže absorbovat velké množství světla. To zaručuje jejich flexibilitu, nízkou hmotnost a cenu.

Jak dále uvádí [4], vývoj a hlavně využívání této technologie je teprve na začátku. Ve spolupráci společnosti Toyobo Co, Ltd. a francouzského vládního výzkumného institutu CEA vznikli organické články na skleněném substrátu s vysokou účinností konverze. Při neonovém osvětlení o intenzitě 220 luxů (odpovídá tmavé místnosti) byla potvrzena účinnost zkušební vzorku přibližně 25 %. To je o 60 % více než u amorfních fotovoltaických článků.

Již proběhl i letový test organických článků na stratosférickém balonu a jeho výsledky ukazují, že existuje potenciál pro využívání organických článků v kosmickém prostoru. Pro tuto technologii ale zatím nejsou k dispozici žádné standardizované testy stability, které by umožnily důkladné pochopení chování organických fotovoltaických článků [4].

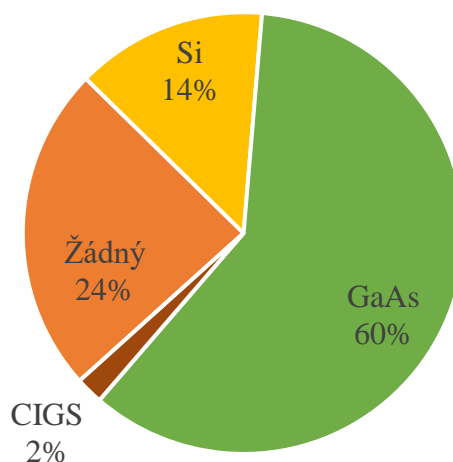
Použití fotovoltaických článků na CubeSat je výhodné z hlediska konstrukční jednoduchosti a škálovatelnosti výkonu, kdy se články spojují sériově a paralelně do větších celků. Výkon celého pole solárních článků je pak kompromisem mezi energetickými požadavky mise a potřebnou plochou (váhou). V některých případech je plocha potřebná pro solární články dostatečně malá na to, aby bylo možné je umístit přímo na povrch satelitu. V závislosti na požadavcích lze zvolit různé tvary a velikosti fotovoltaických článků. Jejich příklad je uveden na obr. 3. Rozměry článků jsou orientační a vychází z fotek CubeSatů dostupných v [25].



* rozměry fotovoltaických článků jsou orientační

Obr. 3: Ukázka rozměrů a tvarů fotovoltaických článků používaných na CubeSatech

Pikosatelity mají vzhledem ke svým rozměrům velmi omezenou plochu pro umístění fotovoltaických článků. Navíc, povrch satelitu musí být často sdílen i s dalšími komponentami, jako jsou antény, optické senzory, kamery a přístupové porty. Pokud dostačuje umístění článků na stěny, odpadá nutnost použití různých vyklápěcích (rozvinovacích) mechanismů.



Graf 6: Typy fotovoltaických článků používané v piko- a nanosatelitech – převzato z [19]

Možnost, jak zvýšit plochu pro fotovoltaické články, je využít mechanicky pohyblivé části, jako například výklopná křídla. Nějakou formu rozkládacích panelů je vybaveno přibližně 16 % vypuštěných piko- a nanosatelitů [19]. Rozkládací panely jsou třeba v případě větších energetických nároků a tím pádem velké potřebné plochy solárních článků.

Takové mechanismy ale zvyšují celkovou hmotnost a složitost konstrukce. To má vliv na spolehlivost napájecího systému a zvyšuje se tím riziko selhání mise [4].

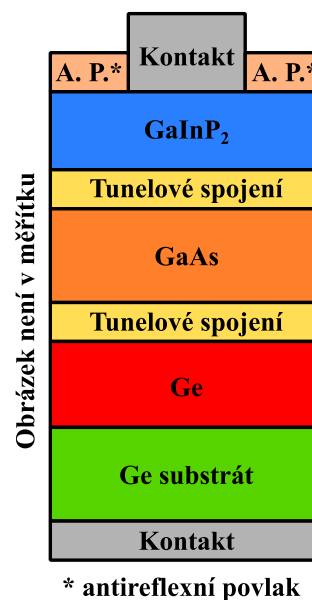
Nejpoužívanějším typem fotovoltaických článků jsou ty z arsenidu galia (graf 6). Dosahují totiž vysoké účinnosti až k 30 % a jsou snadno dostupné. I v nových pikosatelitech se stále ještě využívají i křemíkové články. Jejich účinnost je sice nižší, ale jejich cena je oproti GaAs článkům velmi nízká.

2.4 ITJ a TASC články

ITJ články vyrábí firma Spectrolab a jejich ukázka je na obr. 4. Je to běžně používaný formát fotovoltaického článku. Jedná se o tzv. triple junction GaInP₂/GaAs/Ge článek. Rozložení vrstev je vidět na obr. 5. Dosahují relativně vysoké účinnosti 26,8 % [22]. Co nejvyšší účinnost je třeba k dosažení co nejmenší osazené plochy. Typicky se dají umístit dva články na stěnu 1U CubeSatu. Při sériovém zapojení poté nemáme na dané stěně žádnou paralelní větev a při poruše tak ztratíme výkon celé stěny. To je v případě 1U CubeSatu velká část z původního výkonu. Navíc, pokud je stěnu třeba sdílet i s jinými systémy satelitu, například optickými senzory nebo anténami, tak jsou jen velmi omezené možnosti, jak se s tím vypořádat. Většinou to má za následek umístění jen jednoho článku na stěnu, čímž výkon stěny snižujeme o 50 %.



Obr. 4: Fotovoltaický článek ITJ – převzato z [22]



Obr. 5: Vrstvy ITJ článku – převzato z [22]

Proto je dále v práci popsáno použití menších článků typu TASC. Jejich rozměry jsou menší a umožňují tak vytvoření paralelních větví na jedné stěně, oddělených oddělovacími

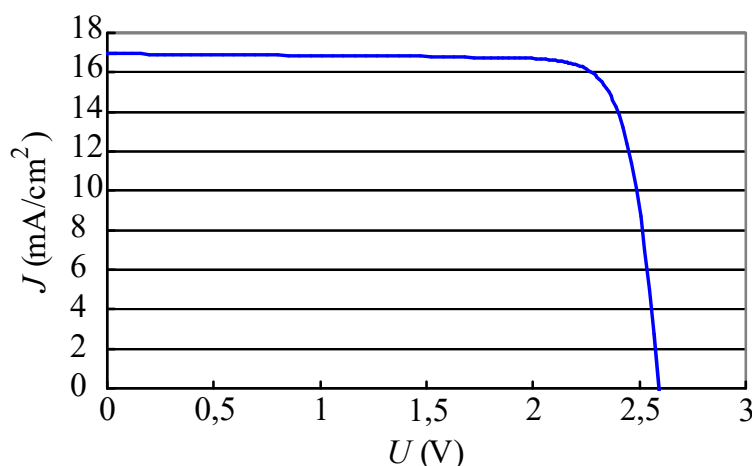
diody. Zároveň selhání jednoho článku znamená menší procento z celkového napájecího výkonu [26].

TASC články vznikají jako odřezky při výrobě ITJ. Jsou cenově dostupnější a přitom sdílejí technické vlastnosti s dražšími ITJ, jak ukazuje tabulka 1. Ta uvádí i další z výrobků firmy SpectroLab. Z tabulky je mimo jiné vidět i to, že na trhu jsou dostupné i fotovoltaické články s účinností přes 31 %. Uváděná účinnost u článků je tzv. BOL účinnost, což znamená účinnost na začátku životnosti. Vlivem kosmického prostředí fotovoltaické články degradují a jejich účinnost se snižuje.

Tabulka 1: Parametry fotovoltaických článků z nabídky firmy SpectroLab [4, 27]

Typ	BOL η_n (%)	U_{oc} (V)	U_{mp} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	J_{mp} (mA/cm ²)
XTJ	29,2	2,633	2,348	17,8	17,02
XTJ-Prime	30,4	2,715	2,39	18,1	17,4
XTE-SF	31,9	2,75	2,435	18,6	17,8
XTE-HF	31,8	2,782	2,49	18	17,4
XTE-LF	31,3	2,755	2,459	18,1	17,4
UTJ	28,4	2,66	2,35	17,14	16,38
TASC	27	2,52	2,19	18,36*	16,6*
ITJ	26,8	2,565	2,27	16,9	16

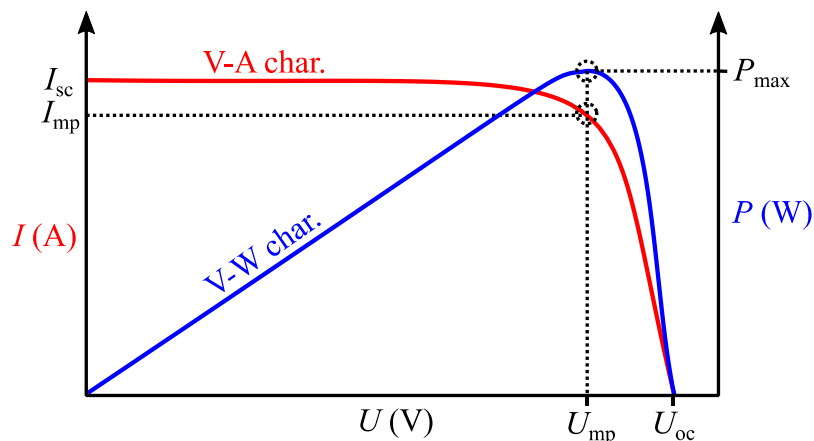
* V dokumentaci jsou parametry uvedeny pro jiné prostředí, byl nutný přepočít.



Graf 7: Typická VA charakteristika ITJ článku (spektrum AM0, 135,3 mW/cm², 28 °C, holý článek) – převzato z [22]

Fotovoltaický článek může pracovat s různou mírou zatížení, ale ideální je, když je pracovní bod VA charakteristiky (graf 7) nastaven tak, aby součin proudu a napětí dával

maximální hodnotu (graf 8). Ideální zatížení může zajistit zapojení s obvodem sledujícím bod maximálního výkonu (MPPT) a napěťovým měničem, jak ukazuje obr. 6. Ideální hodnoty zatěžovacího proudu a napětí uvádí tabulka 1. Napětí je uvedeno přímo jako U_{mp} a proud je vztažen na plochu článku a je uveden jako proudová hustota J_{mp} .

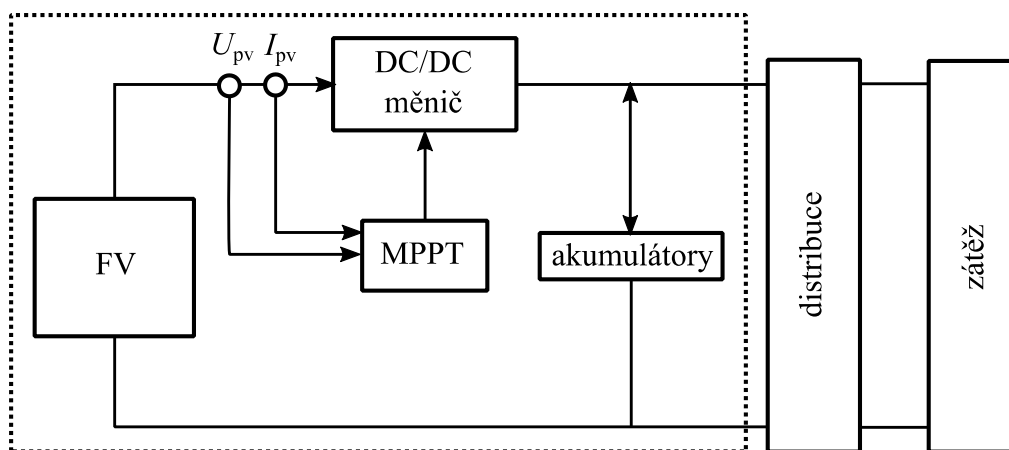


Graf 8: VA a výkonová charakteristika – převzato z [15]

Poměr plochy pod VA křivkou, kterou jsme schopni výkonově využít k celkové ploše pod křivkou určuje takzvaný Fill Factor [28], který se určí jako:

$$C_{ff} = \frac{I_{mp} \cdot U_{mp}}{I_{sc} \cdot U_{oc}} \quad (1)$$

Kde I_{mp} (A) je proud při maximálním výkonu, U_{mp} (V) je napětí při maximálním výkonu, I_{sc} (A) je proud nakrátko a U_{oc} (V) je napětí naprázdno. Ze vztahu plyne, že čím hranatější je VA charakteristika, tím vyšší je C_{ff} . Obvykle se jeho hodnota pohybuje mezi 0,4 až 0,85.



Obr. 6: Elektrický napájecí systém se sledováním bodu maximálního výkonu a napěťovým měničem – převzato z [15]

3 Návrh fotovoltaických stěn

3.1 Poznatky z předchozích návrhů

Návrhem fotovoltaických stěn pro CubeSat PilsenCUBE se zabývala už diplomová práce *Pozemní testy a simulace fotovoltaických článků pikosatelitu PilsenCUBE* [29] a později i bakalářská práce *Sestavení a testy solární stěny pikosatelitu PilsenCUBE* [3]. V obou pracích byly prezentovány i návrhy rozložení TASC článků, ze kterých bylo možné vycházet pro tuto práci. Dvě zmíněné práce kromě umístění na horní, dolní stěně a bočních stěnách počítaly i s umístěním fotovoltaických článků na výklopná křídla. S výklopnými křídly už se ale v současném návrhu nepočítá. Důvodem je zjednodušení mechanického řešení a ušetření hmotnosti.

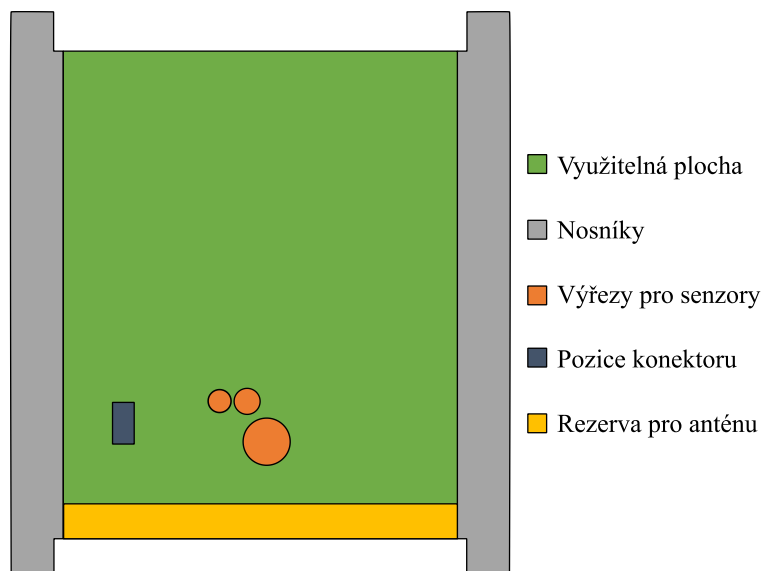
Práce [29] obsahuje návrhy s až 32 články na horní a spodní stěně a 24 články na stěnách bočních. Avšak nákresy rozmístění TASC článků nezahrnují jejich kontakty pro katodu a i díky tomu jsou umístěné velice hustě a blízko sebe. Taková hustota by při zahrnutí kontaktů katod nebyla možná. Návrh zároveň vůbec nebere v potaz omezení plochy stěn z důvodu umístění senzorů a antén. Počty umístěných článků jsou tak příliš optimistické a pro současné požadavky nerealizovatelné.

Druhá práce [3] obsahuje také návrhy jak pevných stěn, tak i výklopných křídel. V návrzích už jsou zahrnuty kontaktní plošky katod i plochy pro antény a senzory. Součástí práce byla i výroba vzorků desek a použití ocelové šablony pro osazování. Návrh tedy lépe reflektuje současné požadavky. Počty článků na jednotlivých pevných stěnách jsou 14 pro horní stěnu, 20 pro dolní a pravou stěnu, a 22 pro levou, přední a zadní stěnu. Celkem tedy návrh počítá se 120 články na pevných stěnách. To byla ale menší část z celkového navrhovaného množství článků, protože dalších 168 jich mělo být umístěno na výklopných křídlech. Současný návrh se tedy kvůli absenci výklopných křídel ani zdaleka nemůže přiblížit obdobnému celkovému počtu článků a tím i dodávanému elektrické u výkonu.

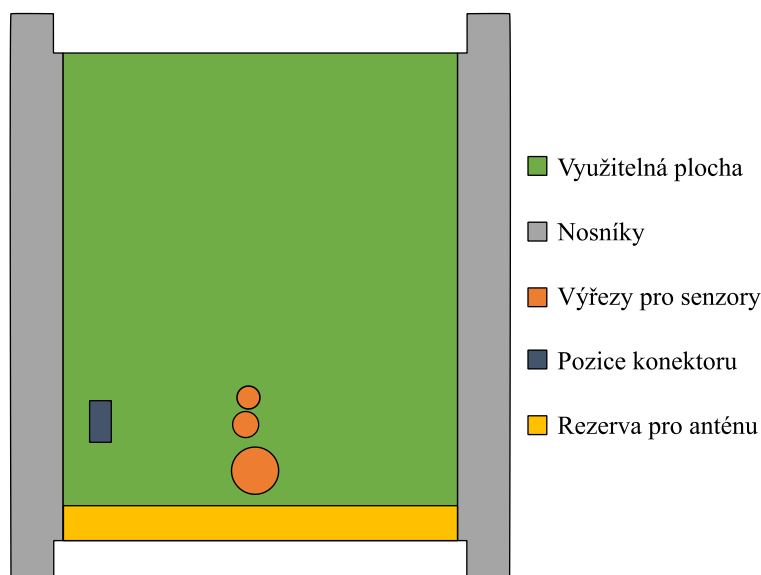
3.2 Definování mechanických požadavků

Při návrhu stěn se vycházelo z existující konstrukce satelitu PilsenCUBE. Ten má standardní rozměr 1U a na jeho povrchu je umístěna řada senzorů. Na čtyři boční stěny (stěny -X, +X, -Y, +Y) lze umístit desku o rozměrech 78x100 mm. Ale vzhledem k tomu, že není zatím vyřešeno umístění antén, nelze tuto plochu využít celou. Deska solární stěny je zmenšena o pruh o šířce 8 mm, který je v místě spodního nosníku satelitu. Plocha pro fotovoltaické články je tak omezena na 78x92 mm a je to jeden z výrazných faktorů

omezující maximální počet článků na stěně. Nákrasy využitelné plochy bočních stěn jsou na obr. 7, obr. 8, obr. 9 a obr. 10. Na horní a dolní stěnu (stěny +Z, -Z) lze umístit desky o rozměrech 100x100 mm s výřezy ve všech rozích 9x9 mm. Nákrasy využitelné plochy horní a dolní stěny jsou na obr. 11 a obr. 12.



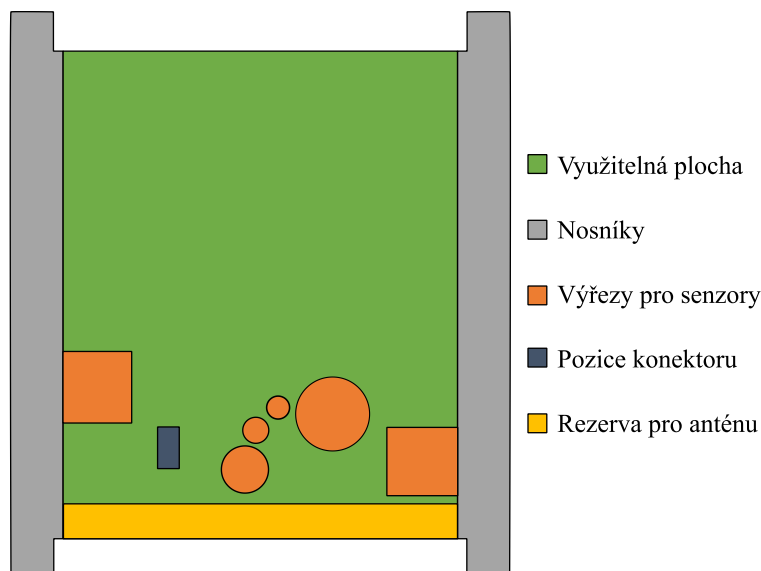
Obr. 7: Nákras využitelné plochy přední stěny (+Y)



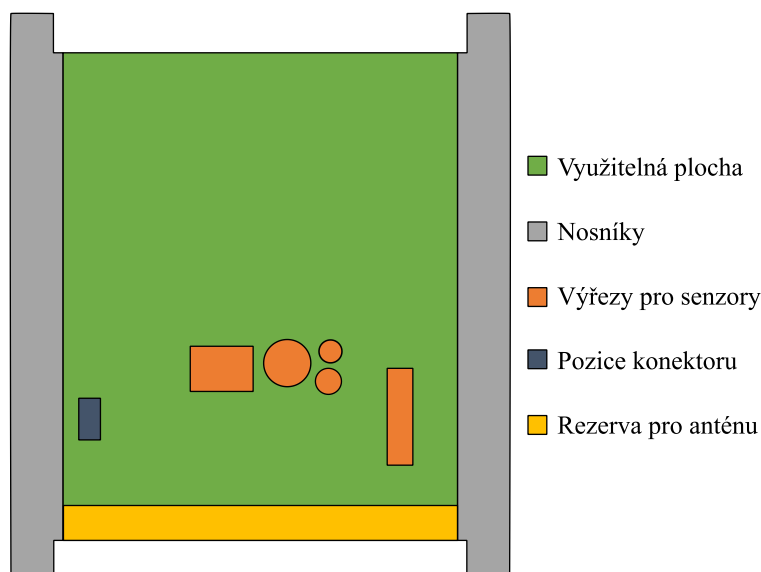
Obr. 8: Nákras využitelnosti plochy zadní stěny (-Y)

Každá solární stěna je připojena ke svému tzv. solárnímu modulu. Pro solární stěny je důležité jeho umístění v satelitu a pozice 9 pinového konektoru pro připojení solární stěny. Konektor má dva kolíky, které vyžadují otvory v desce, proto se solární články této pozici vyhýbají. Kromě konektoru solární moduly obsahují vždy i tři základní světelné snímače.

Konkrétně se jedná o UV fotodiodu EPD-365, infračervený senzor TPS 230 a fotodiodu BPW21R pracující ve viditelném spektru. Pro velikost otvorů pro tyto součástky byla brána určitá rezerva, takže otvor pro UV fotodiodu má poloměr 4,6 mm, pro diodu ve viditelném spektru je poloměr otvoru 2,7 mm a pro IR senzor je poloměr otvoru 2,25 mm.



Obr. 9: Nákres využitelnosti plochy pravé stěny (-X)

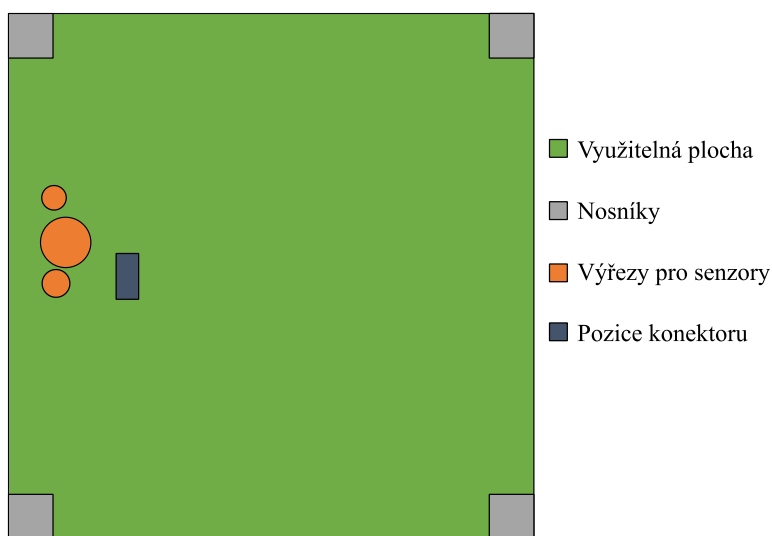


Obr. 10: Nákres využitelnosti levé stěny (+X)

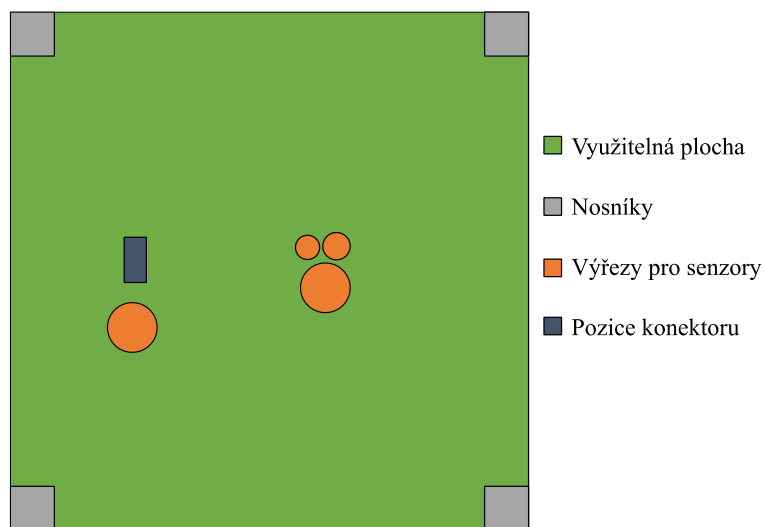
Umístění těchto senzorů bylo nutno odečítat z dodaného 3D modelu CubeSatu. Pro účely této práce, případně i pro další potřebu byly vytvořeny nákresy s okótováním výřezy. Tyto výkresy jsou v příloze A.

V některých případech umístění senzorů rozhodovalo o konečném počtu fotovoltaických článků na stěně. Proto byly na některých stěnách otvory pro fotodiody přesunuty. U takto

přesunutých fotodiód bude vyžadováno, aby nebyly umístěny přímo na desce solárního modulu, ale aby byly připojené pomocí krátké kabelové propojky. Mechanicky potom budou přilepené k desce solární stěny.



Obr. 11: Nákres využitelnosti plochy horní stěny (+Z)

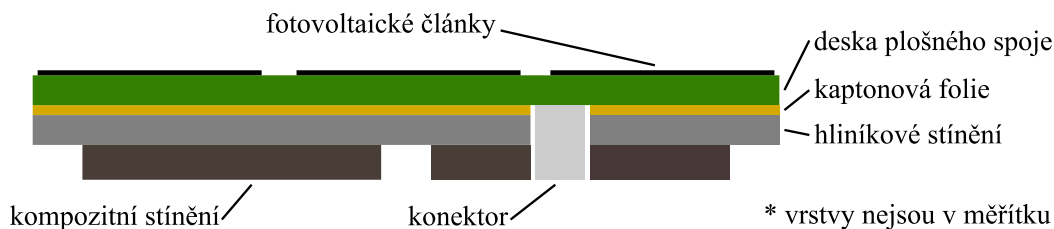


Obr. 12: Nákres využitelnosti plochy spodní stěny (-Z)

Pod deskami s fotovoltaickými články budou umístěny další vrstvy, jak ukazuje obr. 13. Na spodní stranu desek s fotovoltaickými panely bude přilepena oboustranná lepící kaptonová fólie. K ní bude z druhé strany přilepena destička hliníku tlustá asi 1 mm, která bude fungovat jako stínění před ionizujícím zářením. Pro ještě lepší stínění budou pod vrstvou hliníku přidány kompozitní štíty, které budou chránit i před sekundární emisí z hliníku. Kompozitní štíty budou zapuštěné v otvorech mezi kostrou CubeSatu.

Ve stínících vrstvách budou muset být výřezy pro konektor, senzory a oddělovací diody, které jsou umístěné na spodní straně solární desky v blízkosti konektoru. Hliníková deska

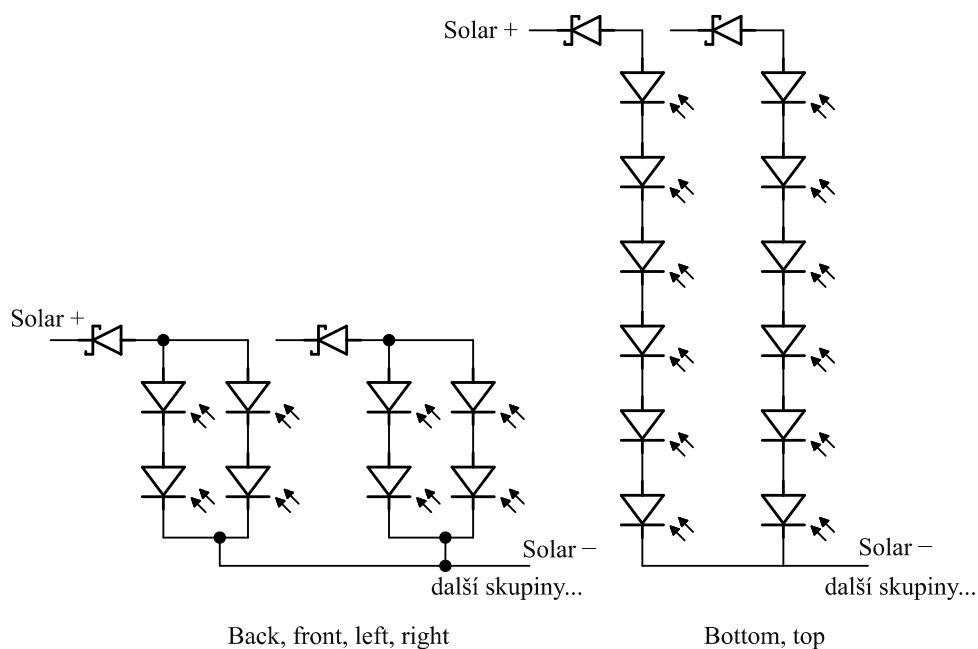
také zajistí lepší přestup tepla z povrchu satelitu do jeho konstrukce. Křehké fotovoltaické články, lepidlo a substrát totiž mají rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti a při přílišném teplotním namáhání by mohlo dojít k přerušení kontaktu mezi článkem a deskou. Teplota článků má i vliv na jejich výkon.



Obr. 13: Vrstvy stínění CubeSatu PilsenCUBE

3.3 Definování elektrických požadavků

CubeSat PilsenCUBE má tři samostatné napájecí kanály. Dva z nich používají pro ukládání energie Li-ion akumulátory. Články jsou přes ochranné diody připojené přímo k akumulátorům (direct energy transfer), není použitý žádný měnič napětí. Je tedy nutné, aby přímo články dodávaly potřebné napětí. Proto je základem sériové spojení dvou článků a tyto dvojice se vzájemně paralelně spojují (obr. 14 vlevo). Pro zvýšení spolehlivosti jsou články na každé stěně rozdělené do čtyř oddělených větví vyvedených odděleně na konektor. Teoreticky taková stěna může mít až 24 článků, ale tohoto počtu nebylo z důvodu rezervy pro antény a nutných výřezů pro senzory dosaženo na žádné boční stěně.

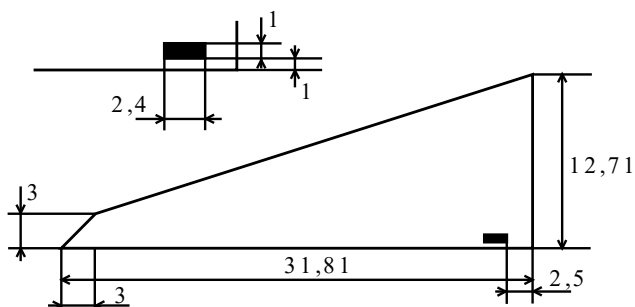


Obr. 14: Způsoby seskupování solárních článků

Horní a spodní stěna jsou součástí třetího napájecího kanálu. V něm jsou pro ukládání energie použity superkapacitory. Ty jsou ke článkům připojené přes měniče napětí, takže topologie článků je přizpůsobena tak, aby stěny dodávaly napětí vhodné pro měnič. To znamená 4 až 6 článků v sérii. Požadavkem bylo 16 až 24 článků ve čtyřech větvích. Všechny větve jsou ještě na desce spojeny a vyvedeny dohromady. Na horní i spodní stěně se podařilo dosáhnout maximálního počtu 24 článků, tzn. 4 větve po 6 člancích.

3.4 Technické parametry TASC článku

TASC články mají tvar pravoúhlého trojúhelníku s odvěsnami o délce 12,71 mm a 34,81 mm a plochou 2,277 cm² [3]. Proto je vhodné je umístit tak, aby dvojice tvořila obdélník. Podoba článku a rozměry jsou na obr. 15. Pokovená spodní strana článku tvoří anodu a malá ploška v rohu na svrchní straně je katoda. Tlusté jsou 190 μm a váží 0,234 g [17]. Vzhledem k menším rozměrům umožňují snadnou realizovatelnost sérioparalelního spojení i na malých plochách. To přispívá k vyšší spolehlivosti dodávek elektrické energie.



Obr. 15 Náčrt rozměrů TASC článku [3]

Dále jsou důležité elektrické vlastnosti článků, které jsou závislé na spektru světla, intenzitě záření a teplotě. Tyto parametry z technického listu jsou uvedeny v tabulce 2 a platí pro podmínky v atmosféře. To znamená spektrum AM1.5G při výkonové hustotě záření 1000 W/m² při teplotě 25 °C. V reálných podmínkách je důležitým parametrem i úhel dopadajícího paprsku.

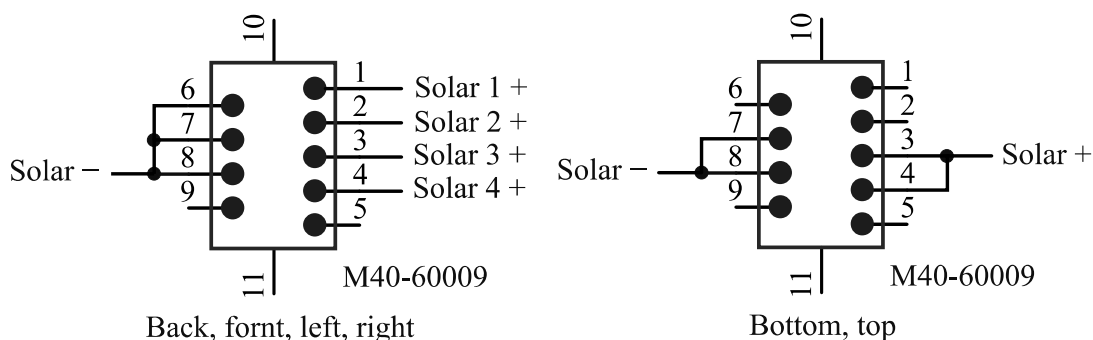
Z elektrického hlediska je výhodné, že ve srovnání s křemíkovými články poskytují TASC články více než 4 krát větší napětí, jeden článek tak nahrazuje sériové spojení několika křemíkových. Za ideálních podmínek má TASC článek $U_{mp} = 2,19$ V. Teoreticky bychom sériovým spojením dvou takových článků získali cca. 4,4 V. Ale vlivem skutečných provozních podmínek bude výsledné napětí nižší, cca. 3,6 V. Tím získáme vhodné napětí pro nabíjení Li-ion akumulátoru a nemusíme používat napěťový měnič.

Tabulka 2: Typické elektrické parametry pro AM1.5G 1000 W/m² a 25 °C - převzato z [27]

$I_{sc} = 31 \text{ mA}$	$I_{mp} = 28 \text{ mA}$
$U_{oc} = 2,52 \text{ V}$	$U_{mp} = 2,19 \text{ V}$
$P_{mp} = 0.027 \text{ W/cm}^2$	$C_{ff} = 80 \%$
Účinnost = $27 \pm 3\%$	Teplotní koeficient $U_{mp} = -6,2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$

3.5 Součástky, DPS a konektor

Rozměry a uspořádání vodivé vrstvy pro TASC článek bylo převzato z bakalářské práce [3]. Kromě vodivé vrstvy model obsahuje ještě vrstvu nepájivé masky a název článku. Obrys článku nebyl do modelu zahrnut, protože se zdál být nadbytečným (vodivá vrstva sama o sobě tvoří obrys). Vytvořena byla také samostatná vrstva pro osazování fotovoltaických článků, která se od nepájivé masky liší tím, že nezahrnuje kontaktní plošku katody vedle článku a je zvětšena v rozích. Na základě zkušeností z osazování byla vytvořena ještě vrstva pro lepidlo (viz. dále).



Obr. 16: Dvě varianty zapojení konektoru

Další model byl vytvořen pro devíti pinový konektor pro připojení solární stěny k solárnímu modulu. Nevýhodou konektoru je, že obsahuje dva mechanické kolíky, takže na jeho pozici jsou v desce dva otvory. Dále jsou na desce umístěny už jen ochranné diody.

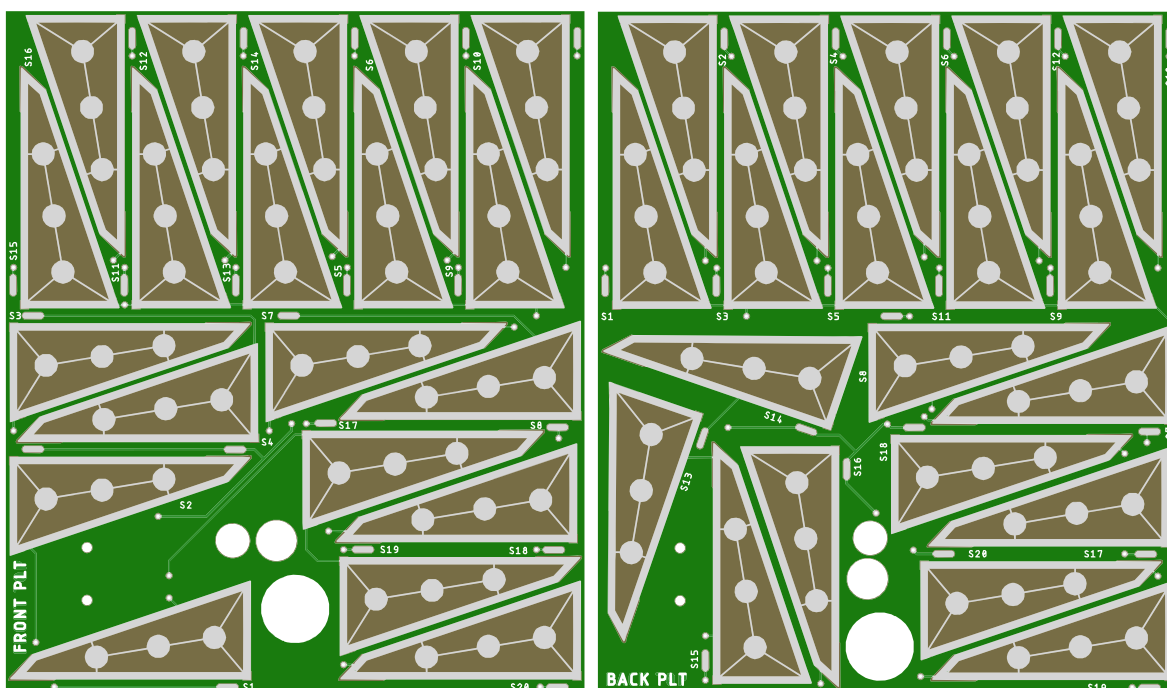
Desky jsou pouze dvouvrstvé. Na TOP straně je věnováno maximum prostoru TASC článkům, takže vodivé cesty, které by bránily umístění co nejvíce článkům jsou vedeny po BOT straně. Na BOT straně se potom ještě nachází konektor a ochranné diody.

Všechny stěny jsou připojené k solárním modulům prostřednictvím 9 pinového SMD konektoru Harwin M40-6200946. Jsou použity dvě varianty zapojení, které jsou ukázané na obr. 16. Jedena varianta pro horní a spodní stěnu a druhá pro pravou, levou, zadní a přední stěnu.

3.6 Navržené rozložení článků na stěnách

Jak bylo popsáno výše, plocha pro umístění článků je omezena plochou rezervovanou pro anténu, plochou konektoru, který je sice z druhé strany desky, ale má dva montážní kolíky procházející skrz desku a třemi základními světelnými snímači, umístěnými na deskách solárních modulů. Pozici celých solárních modulů není možné měnit, protože jsou zapuštěné dovnitř satelitu, kde mají minimum volného prostoru kolem sebe. Proto byla snaha pozice světelných senzorů co nejvíce respektovat. V případě tří senzorů bylo ale přistoupeno ke změně jejich polohy a bude je nutné umístit mimo solární moduly. Na některých stěnách bylo třeba uvolnit prostor i pro další prvky satelitu, jak je podrobněji popsáno níže.

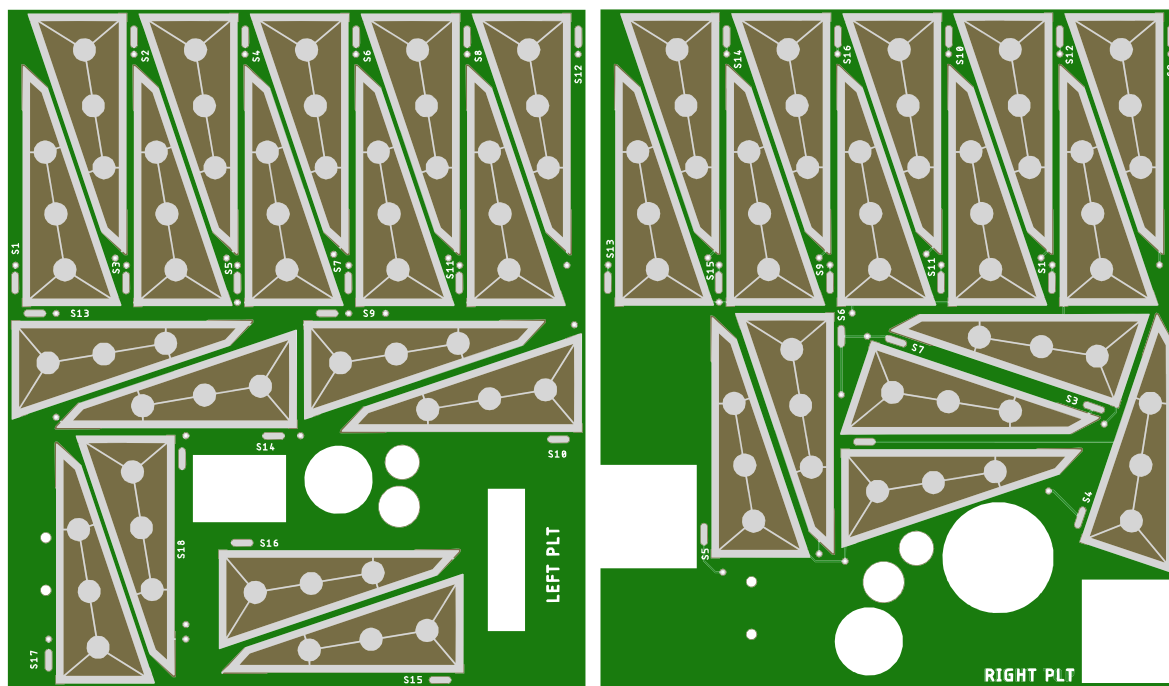
Přední stěna (+Y) obsahuje 20 z požadovaných 24 článků (obr. 17 vlevo). Na této stěně byly třeba výřezy jen pro tři základní světelné snímače. Pozice snímačů TPS 230 a EPD-365 odpovídají pozici solárního modulu. Pozice fotodiody BPW21R byla změněna, aby bylo dosaženo většího počtu článků. Tuto diodu bude tedy třeba připojit k desce solárního modulu kabelovou propojkou.



Obr. 17: Vizualizace DPS přední stěny (vlevo) a zadní stěny (vpravo)

Zadní stěna (-Y) stejně jako přední stěna obsahuje 20 článků (obr. 17 vpravo). Stejný byl i požadavek na výřezy pro senzory. Pro maximalizaci počtu článků na stěně byla také změněna pozice fotodiody BPW21R. Pozice menších dvou fotodiód se nezměnily a fotodiody tak budou moct být přímo na desce solárního modulu.

Levá Stěna (+X) obsahuje kromě tří základních fotodiód i IR snímač AMG88 a otvor pro servisní konektor, ke kterému je nutné zachovat přístup i ve složeném stavu pro diagnostické napojení na sběrnici satelitu a dobíjení akumulátorů (obr. 18 vlevo). Tyto nároky na výřezy způsobily, že na stěnu bylo možné umístit pouze 18 článků. Změna pozice některé ze tří fotodiód by nepřinesla možnost umístit další pár článků, proto všechny pozice senzorů odpovídají požadavkům solárních modulů.



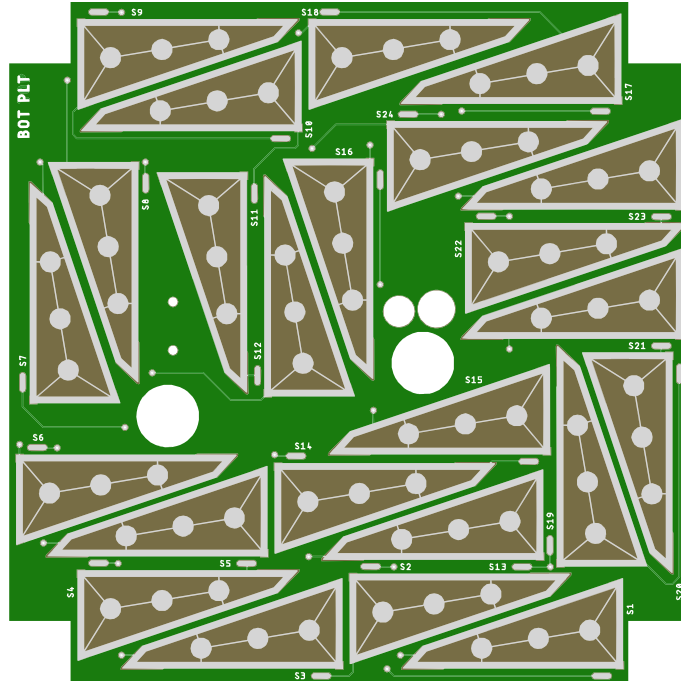
Obr. 18: Vizualizace DPS levé stěny (vlevo) a pravé stěny (vpravo)

Pravá stěna (-X) vyžadovala nejvíce místa pro senzory a zároveň byla omezená možnost upravovat pozice senzorů (obr. 18 vpravo). Článků na stěně je umístěno pouze 16, což je nejmenší počet ze všech stěn. Ze své původní pozice byla přesunuta pouze fotodióda TPS 230, všechny ostatní senzory na této stěně zůstaly na svých pozicích daných konstrukčními požadavky. Mezi tyto senzory patří fotodiody BPW21R, EPD-365, kamera a dva velké čtvercové výřezy pro polovodičové detektory ionizujícího záření.

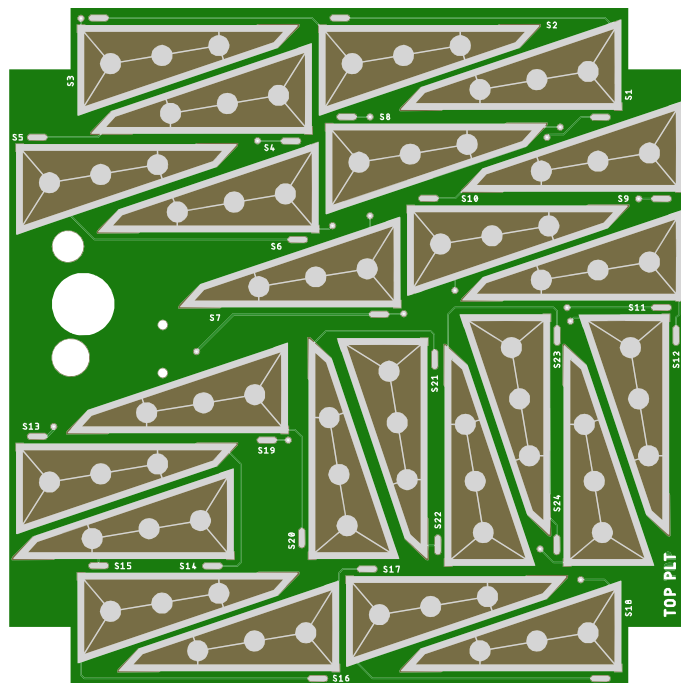
Dolní stěna (-Z) obsahuje požadovaných 24 článků (obr. 19). Kromě tří základních snímačů byl třeba výřez i pro IR snímač MLX90621. Výřezy pro všechny snímače jsou v pozicích vyžadovaných solárními moduly. Při zmenšení mezer mezi články by bylo bez obtíží možno umístit 26 článků.

Horní stěna (+Z) obsahuje 24 článků (obr. 20). Využitelná plocha tam byla největší, protože se nemuselo dělat místo anténě a na stěně jsou výřezy jen pro tři základní světelné snímače, které jsou všechny v polohách odpovídající umístění na solárním modulu. Prostor

pro umístění požadovaného počtu článků byl více než dostatečný, proto jsou mezery mezi články o něco větší, než na bočních stěnách. Při minimalizaci mezer mezi články by bylo možné dosáhnout umístění 28 článků. Takový počet ale neodpovídá požadovanému elektrickému uspořádání.



Obr. 19: Vizualizace DPS dolní stěny (-Z)



Obr. 20: Vizualizace DPS horní stěny (+Z)

3.7 Výpočet výkonu fotovoltaických stěn

Základní výpočet výkonu fotovoltaických stěn vychází z výpočtů uvedených v [19]. První přiblížení bere v úvahu pouze nominální účinnost TASC článku, jejich plochu na stěně a úhel dopadajícího záření. Při osvětlení satelitu může dojít ke dvěma krajním možnostem. První případ je kolmý dopad světla na stěnu, kdy je osvětlena jen jedna stěna satelitu. Druhým případem je rovnoměrné osvětlení tří stěn najednou při úhlu dopadajícího záření 35°.

Podle počtu článků může jít o stěnu s 24, 20, 18 nebo 16 články. Výpočet se provádí podle rovnice:

$$P = \eta_n \cdot A \cdot S \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

kde P (W) je výkon generovaný jednou stěnou, η_n (-) je nominální účinnost TASC článku (0,27), A (W/m²) je výkonová hustota slunečního záření (1350 W/m²), φ (°) je úhel dopadající světla, který je v tomto případě 90° a S (m²) je plocha článků na stěně. Výsledné výkony pro jednotlivé stěny ukazuje tabulka 3 ve sloupci Ideální P .

V druhém případě může být CubeSat nasvícený z osmi směrů, kdy je splněna podmínka pro dopad světla na tři stěny pod úhlem 35°. Výsledné kombinace počtu článků jsou vždy 60, nebo 62 osvětlených článků. Pro výpočet byl znovu použit vzorec (2) a výsledky obsahuje

tabulka 4 ve sloupci Ideální P . Tyto výsledky platí při teplotě článku 25 °C a neberou v potaz další faktory, které snižují účinnost článku. Proto je dále uveden zpřesněný výpočet.

Tabulka 3: Výkon při kolmém dopadu

Počet článků	Stěna	S (cm ²)	Ideální P (W)	Upřesněný P (W)
24	Horní (+Z), dolní (-Z)	54,6	1,99	1,81
20	Přední (+Y), zadní (-Y)	45,5	1,66	1,51
18	Levá (+X)	41	1,49	1,36
16	Pravá (-X)	36,4	1,33	1,21

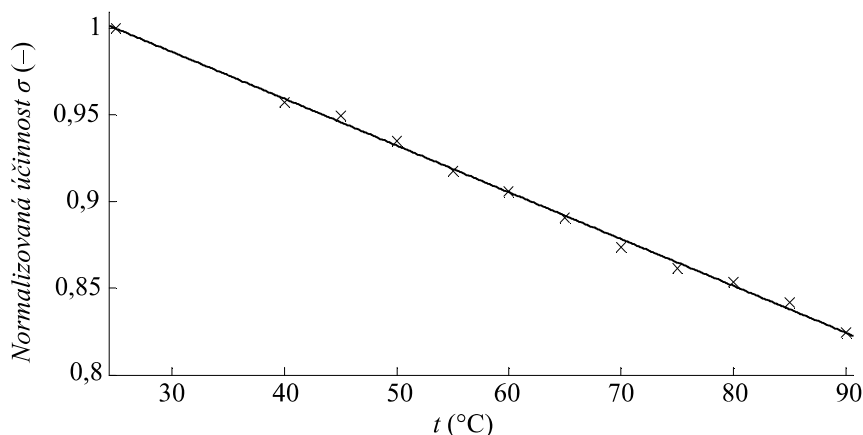
Tabulka 4: Výkon při rovnoměrném osvětlení tří stěn (úhel 35°)

Počet článků	S (cm ²)	Ideální P (W)	Upřesněný P (W)
60	136,6	2,86	2,19
62	141,2	2,95	2,27

Závislost účinnosti σ fotovoltaického článku na jeho teplotě byla zkoumána v rámci článku [19], který uvádí experimentálně změřené hodnoty. Závislost je normovaná k ideální účinnosti článku. Ukazuje ji graf 9 a z něho odvozený předpis:

$$\sigma = -0,0027 \cdot t + 1,086 \quad (3)$$

kde t (°C) je teplota článku.

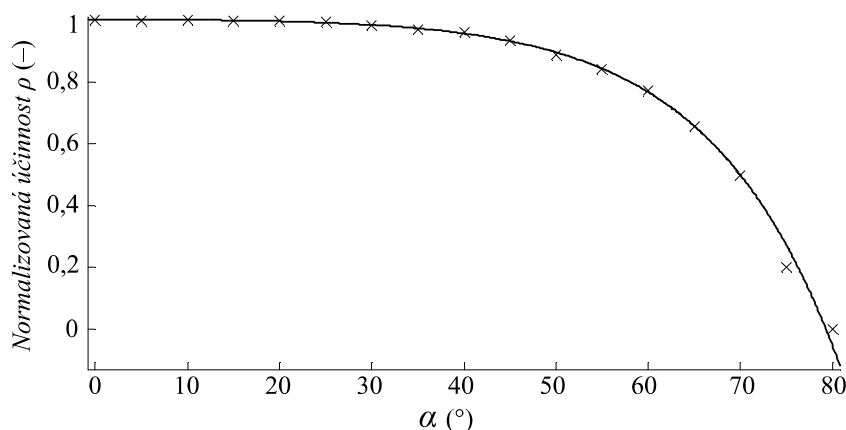


Graf 9: Závislost normalizované účinnosti na teplotě článku – převzato z [19]

V rámci [19] byl experimentálně zjištěn i vliv úhlu ozáření. Tato závislost byla měřena při teplotě článku 40 °C a ukazuje ji graf 10. Z něho je odvozen následující předpis pro účinnost ρ , která je také normalizovaná k ideální účinnosti:

$$\rho = -0,0035 \cdot e^{0,0718 \cdot \alpha} + 1,003 \cdot e^{0,0004 \cdot \alpha} \quad (4)$$

kde α (°) je úhel od normály kolmé k článku.



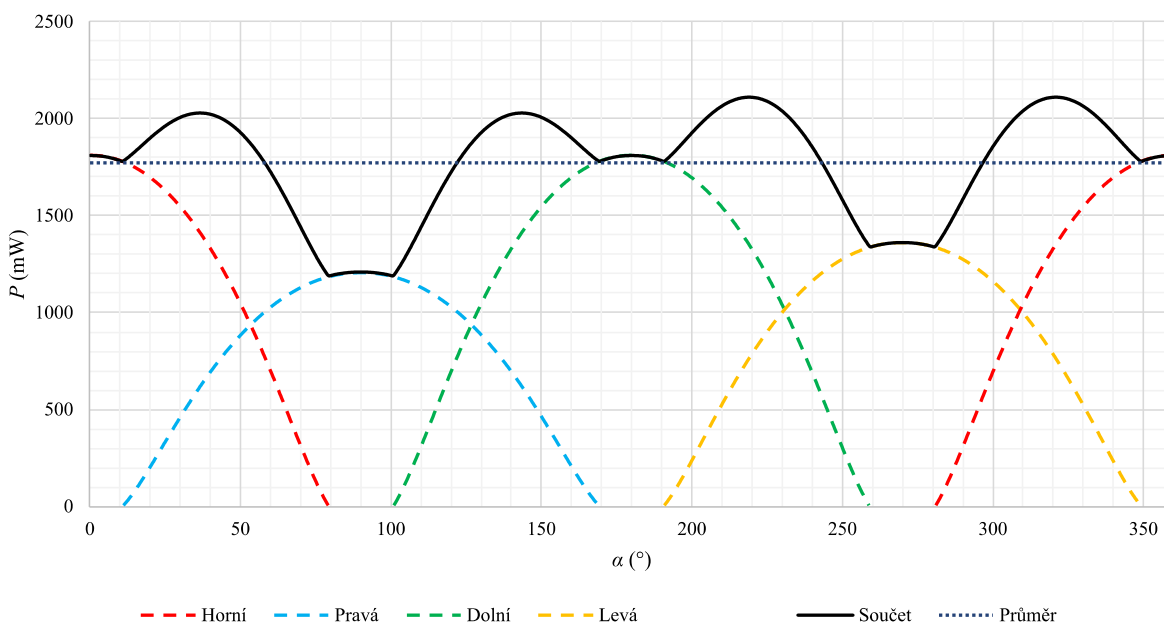
Graf 10: Závislost normalizované účinnosti na úhlu ozáření - převzato z [30]

Ze závislosti na grafu 10 je také patrné, že totální odraz od článku nastává už při 80°. Pro celkovou účinnost fotovoltaického článku tedy platí:

$$\eta_{(t,\alpha)} = \eta_n \cdot \rho \cdot \sigma \quad (5)$$

Kde ρ je závislé na úhlu α dopadajícího záření a σ je závislé na teplotě t .

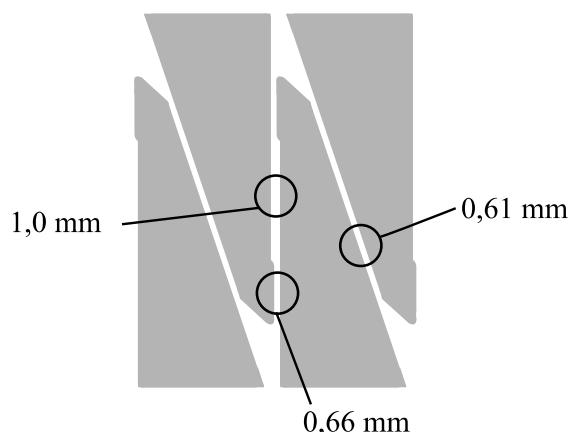
Z uvedených závislostí vyplývá, že ideální hodnoty z tabulek 3 a 4 budou ve skutečnosti nižší. Proto byl proveden další výpočet, který pro rovnici (3) uvažuje teplotu $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zahrnuje i závislost podle rovnice (4). Tyto zpřesněné hodnoty jsou uvedené v tabulkách 3 a 4 ve sloupci *Upřesněný P*. Zpřesněný výpočet, respektující teplotu a úhel ozáření, byl proveden i pro případ, kdy se satelit otáčí kolem vlastní osy tak, že sluneční záření dopadá postupně na horní, pravou, dolní a levou stěnu. Přední a zadní stěna nejsou vůbec osvětleny. Výsledek ukazuje graf 11. Průměrný výkon je v tomto případě $1,77\text{ W}$.



Graf 11: Předpokládaný výkon podle zpřesněného výpočtu. CubeSat orientován tak, že přední a zadní stěna není ozářena

4 Osazovací šablona

Při návrhu desek se počítalo s tím, že pro osazování fotovoltaických článků bude zároveň s deskami zadána výroba i osazovací šablony z ocelového plechu. Tento postup byl dříve úspěšně použit v rámci práce [3]. Výrobce ale podle zaslaných podkladů usoudil, že takto navržená ocelová šablona je nevyrobitelná. Jednotlivé trojúhelníkovité otvory pro články jsou podle jeho vyjádření příliš velké a zbytkového materiálu je příliš málo a při výrobě by docházelo ke kroucení plechu, což by mohlo zapříčinit poškození laserové hlavy. Příklady úzkých míst na šabloně jsou na obr. 21.



Obr. 21: Úzká místa na šabloně

Při konzultaci s Ing. Ivo Veřtátem Ph.D a Ing. Michalem Pokorným Ph.D. byly navrženy dvě možné alternativy. První možnost by byla zachovat stejný koncept šablony, ale místo vyřezáváním motivu do plechu by byla vyrobena 3D tiskem. Plastový motiv by byl nanesen přímo na desku DPS. Šablona by ale stejně jako ocelová šablona obsahovala velmi tenké části. Tento postup byl už dříve zkušeno a vytisknutí šablony takovýmto způsobem bylo velmi obtížné, až nemožné.

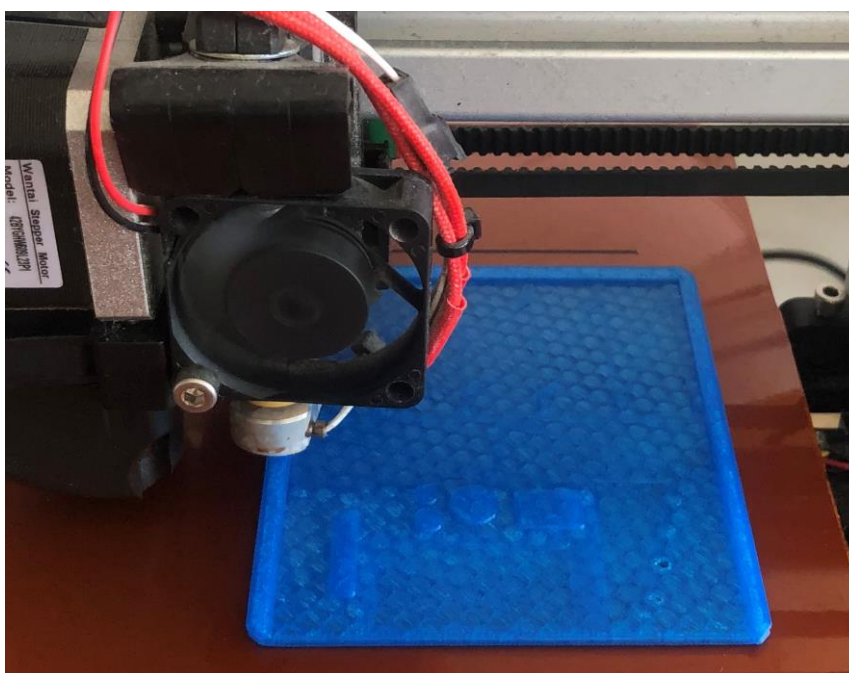
Druhá možnost, která byla zvolena pro realizaci, je na 3D tiskárně vytisknout několik mm tlustou destičku, která zajistí mechanickou pevnost a na ní vytvořit zrcadlově převrácenou šablonu jako reliéf. Články do takové šablony budou vkládány obráceně (kontaktní plochou nahoru). Deska DPS s naneseným lepidlem bude poté přiložena na už rozmístěné články. Tímto postupem se lze vyhnout problému malých mezer mezi články.

Na základě tohoto rozhodnutí bylo nutné se vrátit do návrhu DPS a upravit vrstvu určenou pro ocelovou šablonu tak, aby obsahovala pouze jednoduché obrysy TASC článků. Původní verze se totiž ukázala jako nevhodná pro export do jiného programu. Z Eaglu je možné

vyexportovat *.dxf soubor vybraných vrstev. Tento soubor bylo nutné importovat do Fusion 360, ve kterém bylo možné 2D nákres roztáhnout do 3D a uložit jej jako *.step.

Pro snadné použití tisknuté šablony byl na ni přidán rámeček odpovídající obrysu DPS. Rámeček obepíná DPS jen ze tří stran, aby bylo možné DPS snadno vyjmout. Z důvodu nepřesností 3D tisku byly vnitřní rozměry rámečku oproti rozměrům DPS zvětšeny na každou stranu o 0,4 mm a výřezy v DPS byly naopak na každou stranu o 0,1 mm zmenšeny. Rámeček kolem desky a výstupky na pozicích otvorů vysoké 1 mm zajistí, aby byla DPS přiložena na správnou pozici a ve správné orientaci. Zároveň je výška výstupků zvolena tak, aby nepřekážela při umístění závaží na DPS během lepení.

Reliéf pro TASC články bylo nutné udělat velmi mělký, protože samotné články jsou tlusté jen 190 μm . 3D tiskárna dokáže tisknout z rozlišením 100 μm . Reliéf je tak tvořen pouze dvěma vrstvami. To bude při osazování vyžadovat pečlivou manipulaci, aby nedošlo k posunutí článku mimo svou pozici. Ukázka z tisku je na obr. 22.



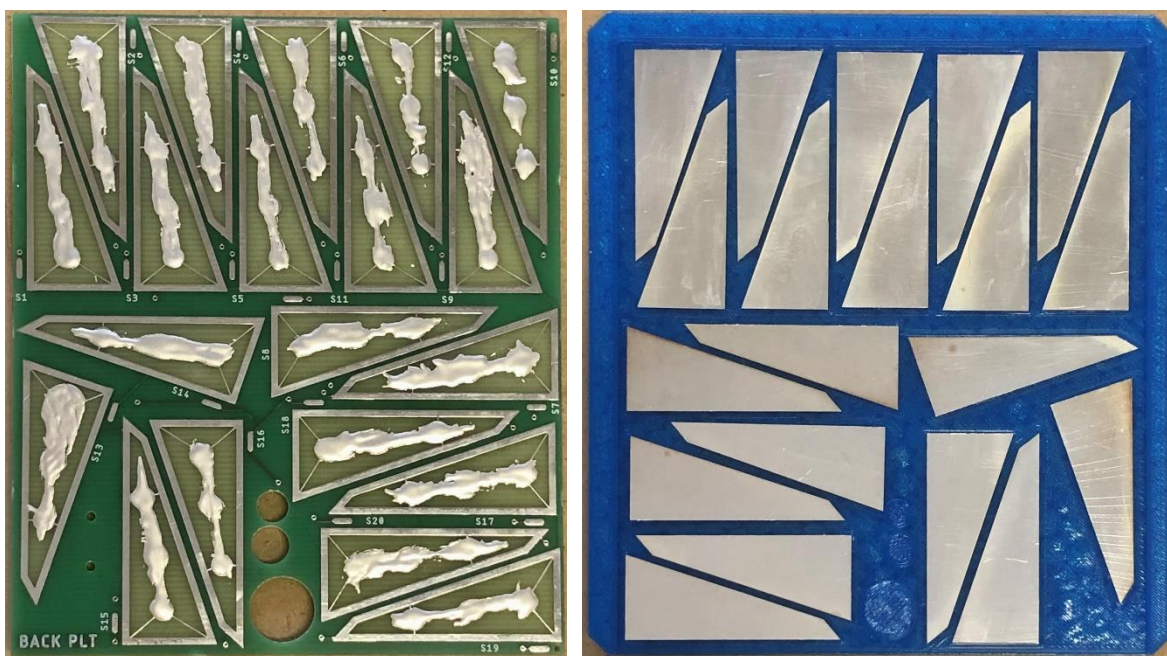
Obr. 22: Tisk šablony

5 Osazování

Osazování desek solárních stěn se skládá ze tří hlavních kroků. Nalepení TASC článků na desku, kontaktování katod článků pomocí tenkého drátku a doplnění oddělovacích diod a konektorů.

5.1 Lepení

TASC články jsou balené v polystyrénovém platu. Nejsnazší bylo jeden po druhém z plata vysypat a umístit na podložku. Pro snadnou manipulaci s nimi byla použita vakuová pipeta na osazování SMD součástek. Anoda i DPS byly očištěny izopropylalkoholem a očištěné články byly umístěny do šablony (obr. 23 vpravo).

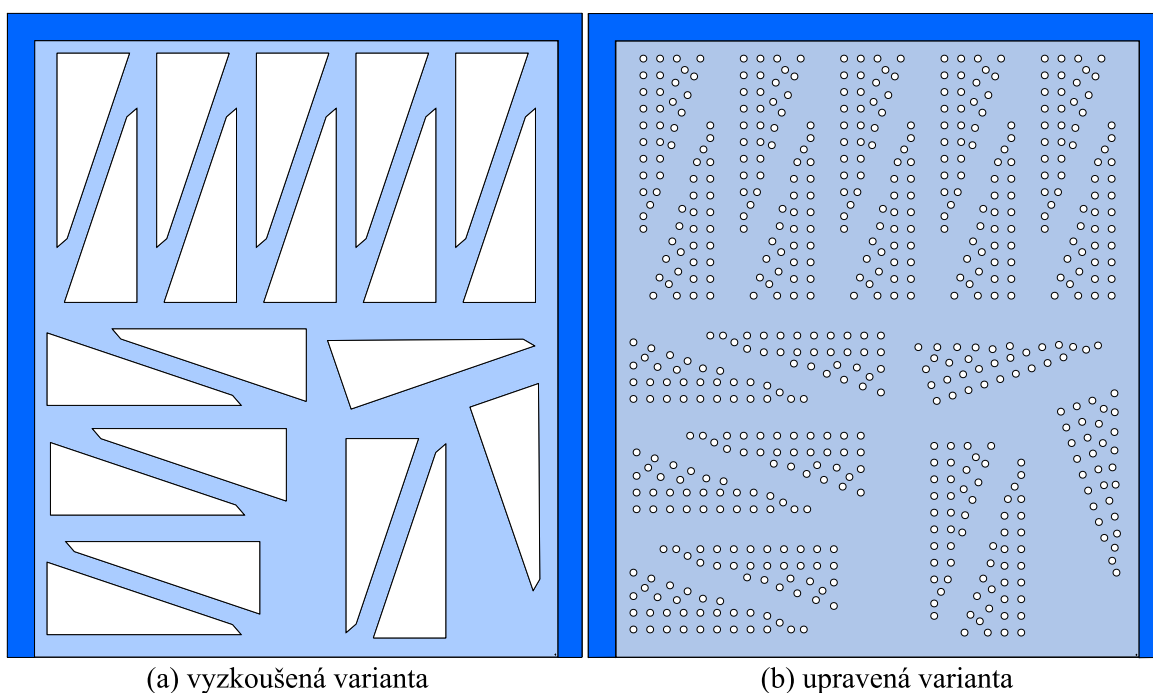


Obr. 23: DPS s naneseným lepidlem (vlevo) a šablona s umístěnými TASC články (vpravo)

Pro lepení bylo použito dvousložkové elektricky vodivé lepidlo EPO-TEK® E4110-LV, jehož jednou složkou je stříbrná pasta a druhou čirá tekutina. Složky je mísí v poměru 10:1 a po smísení je zpracovatelnost 6 hodin. Doporučený postup pro vytvrzování je 1 hodina při teplotě 150 °C. Při tomto postupu je dosažena nejvyšší elektrická vodivost. Ale jsou možné i další postupy, například 3 hodiny při teplotě 80 °C. Další podrobnosti lze nalézt v dokumentaci [31]. V rámci této práce byla pro vytvrzení lepidla použita vyhřívaná podložka 3D tiskárny, na kterou byla DPS v šabloně umístěna stranou DPS dolů. Shora byla přes šablony položena skleněná deska a závaží. Vytvrzování probíhalo při teplotě 60 °C po dobu minimálně osmi hodin.

Pro nalepení článků na jednu stěnu stačí cca 0,5 až 1 g lepidla. Lepidlo bylo nanášeno jednorázovou pipetou na DPS na tři kontaktní plochy uprostřed každého článku. Nanášené množství na každou plochu bylo velmi malé a s použitou pipetou se mohlo velice snadno stát, že nanesená kapka bude moc velká. Pro jistotu byly nanesené kapky pomocí párátko rozetřeny do větší plochy. Obr. 23 vlevo ukazuje nanesené lepidlo na jedné z prvních osazovaných stěn.

Po prvním pokusu o nalepení článků (zadní stěna) se ukázalo, že došlo k odlomení nejužší části jednoho z TASC článků (popsáno níže), kde pod ním nebylo nanesené lepidlo. Proto byla při osazování dalších stěn kladena větší pozornost tomu, aby bylo lepidlo co nejlépe rozetřeno po celé ploše. Ani pečlivé rozetření lepidla po téměř celé ploše vymezené vnitřní hranou vodivé vrstvy článku na DPS však nezabránilo odlamování částí článků v některých dalších případech.



Obr. 24: Šablona pro nanášení lepidla

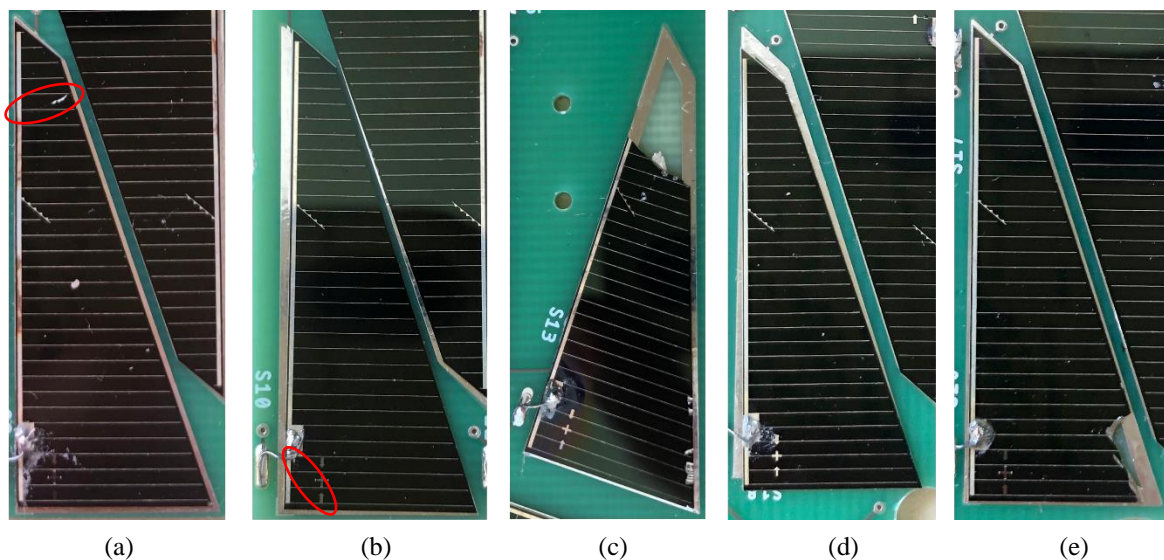
Za účelem snadného nanášení lepidla na celou plochu pro článek byla vytisknuta a vyzkoušena šablona, která měla ulehčit nanášení lepidla (obr. 24a). Po vyzkoušení na dvou stěnách se ale ukázalo, že vzhledem k tomu, že šablona je pružná a nepřiléhá těsně k povrchu DPS, tak pokud se lepidlo dostane do její blízkosti, má tendenci vzlínat pod šablonu a tím pádem dostávat lepidlo na ty části DPS, kde být nemá. Přínosy použité šablony nevyrovnaly následnou práci s očišťováním desky. Jako praktičtější se ukázalo pečlivé nanášení lepidla bez šablony.

Na základě zkušeností se šablonou pro nanášení lepidla byla navržena její další verze zobrazená na obr. 24b. Místo velkého otvoru pro každý TASC článek je plocha perforovaná otvory o průměru 1 mm. To by mělo zajistit lepší pevnost a dávkování lepidla, které přechází varianta šablony neřešila. Šablona je vyobrazena v tisknuté variantě, kdy obsahuje i obrys pro správné přiložení k DPS. Šablonu by šlo také vyrobit z ocelového plechu. Pro volbu materiálu a zvolení správné velikosti otvorů by bylo třeba další testování.

5.2 Výsledky lepení

Nalepení většiny článků proběhlo bez problémů. Avšak na některých stěnách po vyjmutí ze šablony bylo několik článků uštípnutých. V některých případech také došlo k posunutí článku z jeho původní polohy. Výraznější posun byl však výjimečný.

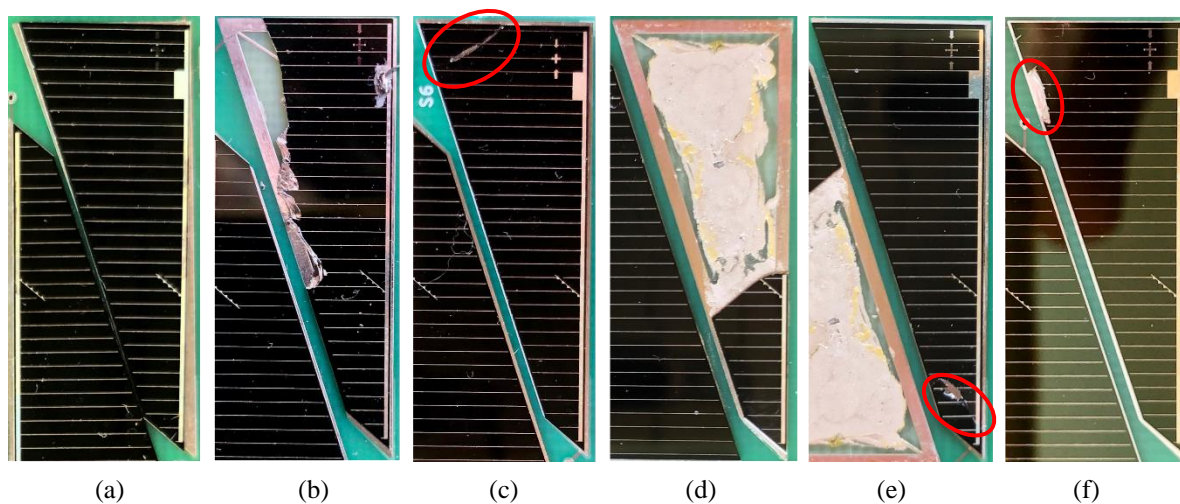
Nejvíce poškozených článků obsahovala zadní (-Y) stěna, ta byla lepena jako první. Defekty z ní jsou na obr. 25. Na článku S2 (obr. 25a) je cca 5 mm dlouhá prasklina, která odděluje nejužší část článku. Na dalším článku, S10 je podobná prasklina, která se nachází u pravého úhlu článku (obr. 25b). Článek S13 (obr. 25c) je ze všech článků na zadní stěně poškozen nejvýrazněji. Došlo u něj k úplnému odlomení části článku dlouhé cca 1 cm. U článku S18 došlo k výraznějšímu posunutí ze jeho pozice (obr. 25d), ale to nemá žádný vliv na jeho funkčnost. K výraznějšímu poškození došlo také u článku S20, u něhož došlo k odštípnutí okraje (obr. 25e) o velikosti cca 2 krát 5 mm.



Obr. 25: Defekty článků zadní (-Y) stěny

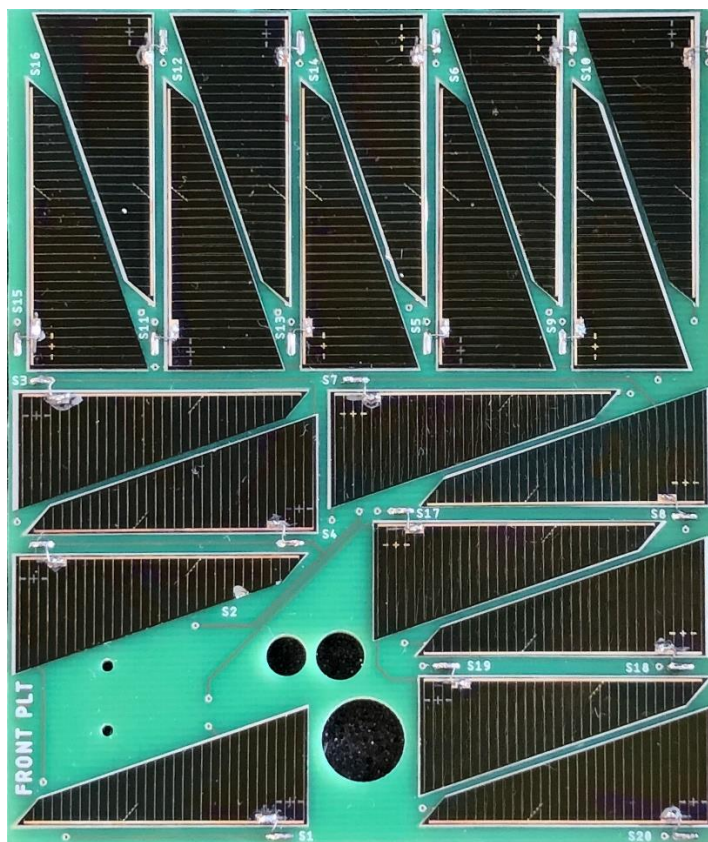
Lepení dalších stěn už probíhalo úspěšněji a závady ze všech ostatních stěn jsou na obr. 26. Na pravé stěně (+X) není po vizuální kontrole žádný poškozený článek. Pouze článek S1

je výrazněji posunutý ze své pozice a dotýká se článku S2 (obr. 26a), ale to nemá žádný vliv na funkčnost.



Obr. 26: Defekty článků na stěnách +X, -X, +Y, +Z a -Z

Na levé stěně (-X) došlo k největšímu poškození, kdy se odštípl prakticky celý článek S15 (obr. 26d). Dále je na této stěně poškozený článek S8, na kterém je cca 5 mm dlouhá prasklina v rohu (obr. 26c). Podobná prasklina je i na článku S16 (obr. 26e).



Obr. 27: Osazená přední (+Y) stěna

Bohužel i na horní stěně (+Z) s došlo k uštípnutí části jednoho článku, konkrétně článku S17 na obr. 26b.

Na spodní stěně (-Z) je jediným defektem uštípnutí čisti o velikosti cca 4 krát 1 mm na okraji článku S2 (obr. 26f).

Přední stěna (+Y) je se jeví jako nejpodařenější, při procesu lepení u ní nedošlo k žádnému poškození článků. Stav stěny po osazení článků ukazuje obr. 27. Fotografie dalších stěn po osazení jsou v příloze B.

5.3 Kontaktování katody

Kontakt katody TASC článku je umístěn v rohu na horní straně článku. Proto je v těchto místech na DPS vedle článku kontaktní ploška, ke které je třeba katodu článku připojit. Zároveň je třeba dbát na to, aby drátek nepřiléhal k desce a nevytvořil tak zkrat mezi katodou a anodou.



Obr. 28: Detail kontaktu mezi katodou a deskou

Byl zvolen postup, kdy na kontakt na článku bylo nanášeno malé množství pájecí pasty a připájen drátek. Použití pájecí pasty mělo za cíl omezit teplené namáhání fotovoltaického článku. Následně byl drátek ohnut tak, aby mezi kontaktem na článku a na desce vznikl oblouk, který zamezí kontaktu s anodou článku (obr. 28). Po uvedení do správné polohy byl drátek odříznut nožikem na požadovanou délku a ke kontaktu na desce plošného spoje připájen už s použitím drátového cínu.

Při pájení na TASC článek se projevila jeho teplená vodivost a uchycení drátku k TASC článku bylo proto obtížnější, než uchycení k DPS.

6 Testování

V rámci této práce byla provedena vizuální kontrola a testování elektrického zapojení. Vizuální kontrola se týkala kontroly rozměrů a výřezů desky plošných spojů. Dále se vizuální kontrola zaměřovala na samotné TASC články, protože při osazování pomocí šablony došlo k poškození některých článků. Tato poškození byla zadokumentována (viz. předchozí kapitola). Kontrolováno bylo i umístění článků. Dále bylo kontrolováno, jestli nedošlo k vytlačení lepidla z prostoru pod články, což by mohlo způsobit zkrat. To bylo ověřeno i elektrickým měřením.

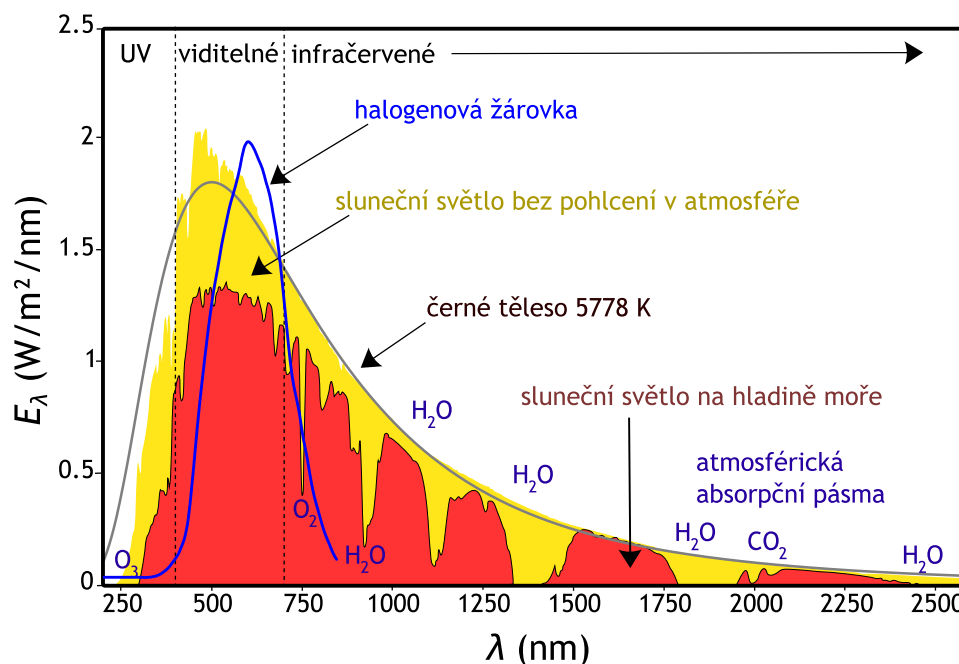
Před nasazením CubeSatu na oběžné dráze je nutné provést ještě další testy celé sestavy, kdy se provádějí vibrační testy testující mechanickou soudržnost a vakuově tepelné testy, při kterých se zjistí provozní teploty a případně se zaznamená, jestli se při zvýšené teplotě neuvolňují nějaké nebezpečné látky.

6.1 Podmínky testu správnosti zapojení

Proud nakrátko a napětí naprázdno byly měřeny na deskách osazených články, bez osazených ochranných diod a konektorů. Tím bylo zajištěno, že byla každá ze čtyř větví na stěně měřena samostatně. Cílem měření bylo ověřit správnost zapojení a kvalitu kontaktů. Konkrétně, jestli někde nevznikl studený spoj, zkrat mezi články vlivem roztečení lepidla, nebo zkrat mezi anodou a katodou, který by mohl vzniknout buď roztečením cínu při kontaktování katody, nebo nesprávným ohnutím kontaktačního drátku.

Podmínky měření neumožňovaly hlubší analýzu, například změření skutečného dodávaného výkonu. Měření probíhalo za použití multimetru a 500 W halogenového svítidla. Tento typ osvětlení nebyl pro měření ideální, protože parametry halogenové zářivky jsou jiné, než jaké je sluneční záření na oběžné dráze. Zmínit lze rozdíly v hustotě výkonu záření, která při tomto měření nebyla zjišťována a rozdíl ve spektru záření.

Rozdílná spektra ukazuje obr. 29. Na něm je žlutě vyznačeno standardní sluneční spektrum ve volném vesmíru, které se označuje jako AM0. Svou charakteristikou se blíží záření černého tělesa a jeho teplota chromatičnosti je 5900 K [32]. Oranžově je vyznačeno spektrum slunečního záření na hladině moře, označovaného jako AM1.5G. Toto spektrum má oproti AM0 vlivem absorpce atmosféry a odrazu od atmosféry o 28 % sníženou hustotu záření. Číslo 1.5 v označení znamená, že vrstva atmosféry se bere 1,5 krát větší, než když je Slunce v nejvyšším bodě na obloze. Modře je potom vyznačen příklad spektra halogenové žárovky. V závislosti na typu se u ní teplota chromatičnosti obvykle pohybuje okolo 3000 K.



Obr. 29: Srovnání spektra slunečního záření a spektra halogenové žárovky – převzato z [33, 34]

6.2 Výsledky testu správnosti zapojení

Výsledky měření proudu nakrátko a napětí naprázdno uvádí tabulka 5. Z hodnot je rozpoznatelný počet článků sériově a paralelně. Napětí na jednom článku se pohybovalo lehce přes 2 V a proud okolo 5 mA. Rozdíly naměřených hodnot lze primárně přičítat vlivu teploty článku, protože vlivem záření docházelo k jejich rychlému zahřívání. Teplota naměřená multimetrem s teplotní sondou přiloženou k článku dosahovala až 62 °C, přičemž se dá předpokládat, že teplota samotných článků byla ještě vyšší. Proto byla deska umístěna pod zdroj světla vždy jen na dobu nezbytnou k měření, aby byl vliv teploty omezen.

U skupiny článků číslo 19 měření neproběhlo, protože byla nalezena chyba v zapojení DPS, kdy skupina nebyla vyvedena na konektor. U skupiny 20 došlo při lepení k odštípnutí většiny článku S15, ten proto nemohl být nekontaktován a vyřadil z provozu i článek S16, který je s ním v sérii. Proto u této skupiny změřené hodnoty odpovídají pouze sériovému spojení dvou článků. Tento případ demonstruje výhodu použití malých článků TASC, kdy je omezena výkonová ztráta způsobená poruchou jednoho článku.

Tabulka 5: Změřené napětí naprázdno a proud nakrátko u jednotlivých skupin

Stěna	Číslo skupiny	Články ve skupině	U_{oc} (V)	I_{sc} (mA)
+Z	1	S1 - S6	12,3	4,95
	2	S7 - S12	12,6	5,1
	3	S13 - S18	12,75	4,48
	4	S19 - S24	13,12	5,11
-Z	5	S1 - S6	13,4	4,99
	6	S7 - S12	13,47	4,83
	7	S13 - S18	13,5	4,76
	8	S19 - S24	13,03	5
+Y	9	S1 - S4	4,11	10,44
	10	S5 - S10	4,124	15,78
	11	S11 - S16	3,917	17,34
	12	S17 - S20	4,211	9,88
-Y	13	S1 - S6	4,066	15,44
	14	S7 - S12	3,964	18,53
	15	S13 - S16	4,244	10,15
	16	S17 - S20	4,134	10,069
+X	17	S1 - S6	4,67	16,81
	18	S7, S8, S11, S12	4,78	9,94
	19	S9, S10, S13, S14	-	-
	20	S15 - S18	4,5	6,5
+X	21	1, S2, S3, S7	4,56	13,54
	22	S4, S5, S6, S8	4,4	10,25
	23	S9 - S12	4,57	10,42
	24	S13 - S16	4,58	9,88

Zhodnocení a závěr

Design navrhovaných fotovoltaických stěn vycházel z poznatků předchozích prací na toto téma a aktuálních požadavků na elektrické a mechanické vlastnosti fotovoltaických stěn pro CubeSat PilsenCUBE, které oproti předchozím návrhům neobsahují pohyblivé mechanické části (zvýšení spolehlivosti, snížení hmotnosti). Tyto požadavky měly za následek snížení celkového elektrického výkonu stěn.

Při rozmisťování fotovoltaických článků na stěnu se bral ohled na specifické požadavky každé stěny. Z toho důvodu nejsou stěny vzájemně zaměnitelné a v závislosti na konstrukčních omezeních obsahují různý počet TASC článků. Splnit požadavky na maximální počet 24 článků se podařilo jen u horní (+Z) a dolní (-Z) stěny. Na dalších stěnách už vlivem výřezů pro senzory a anténu nebylo možné počtu 24 článků dosáhnout a počty se tak pohybují mezi 16 a 20 články na stěnu. Celkově je na šesti stěnách umístěno 122 článků.

Při návrhu bylo počítáno s tím, že při osazování bude použita ocelová šablona a z toho důvodu byly mezi články dodržovány podobné rozestupy, jako v případě práce [3]. Výrobce ale uvedl, že tuto šablonu není schopen vyrobit. Proto byla k osazování použita plastová šablona vyrobená 3D tiskem, která neměla otvory pro TASC články, ale pouze reliéf, do kterého se články naskládaly. Z toho důvodu by se případný budoucí návrh dal upravit a články by bylo možné umisťovat blíže k sobě.

Tato šablona se ukázala být funkční, ale až na jednu stěnu vždy došlo k poškození alespoň jednoho článku. Řešením by mohlo být upravit šablonu, protože skutečné rozměry po vytisknutí a zchlazení se mírně lišily od modelu.

Při osazování byla vyzkoušena i plastová 3D vytisknutá šablona pro snazší nanášení lepidla. Ta se ale ukázala jako nevyhovující, protože vzhledem ke své malé tloušťce byla pružná a nepřiléhala tak těsně k desce plošného spoje. To mělo za následek vzlínání lepidla do prostoru pod šablonou. Proto byla navrhována další verze, která má místo jednoho velkého otvoru pro každý článek řadu menších. To by mělo zajistit větší mechanickou pevnost a umožnit lepší dávkování lepidla.

U přilepených článků bylo ještě nutné pomocí tenkého drátku nakontaktovat druhou elektrodu. Použitý způsob kontaktování se osvědčil, i když pájení na fotovoltaický článek šlo hůře, zřejmě vlivem velkého odvodu tepla.

Před kompletním osazením desky diodami a konektorem bylo provedeno ověření elektrických vlastností jednotlivých napájecích větví na stěně (každá stěna má 4). Tím byly odhaleny vadné kontakty, které byly následně opraveny.

Literatura

- [1] JOHNSTONE, Alicia. *CubeSat Design Specification, revision 14* [online]. San Luis Obispo, CA: Cal Poly SLO. 2020 [accessed. 2021-10-13]. Available at: <https://www.cubesat.org/cds-announcement>
- [2] LANGER, Martin and Jasper BOUWMEESTER. Reliability of CubeSats - Statistical Data, Developers' Beliefs and the Way Forward. *Small Satellite Conference* [online]. 2016 [accessed. 2022-03-17]. Available at: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2016/TS10AdvTech2/4>
- [3] GREŠL, Luděk. *Sestavení a testy solární stěny pikosatelitu PilsenCUBE* [online]. Plzeň, 2012 [accessed. 2021-12-04]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ivo Veřtát. Available at: <https://theses.cz/id/dct36m/>
- [4] YOST, Bruce and Sasha WESTON. *State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology* [online]. 2021 [accessed. 2021-12-11]. Available at: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa>
- [5] ZAHL, Harold A. and Hans K. ZIEGLER. Power sources for satellites and space vehicles. *Solar Energy* [online]. 1960, **4**(1), 32–38 [accessed. 2021-12-11]. ISSN 0038-092X. Available at: doi:10.1016/0038-092X(60)90047-5
- [6] *Falcon Users's Guide* [online]. B.m.: Space Exploration Technologies Corp. September 2021 [accessed. 2022-03-20]. Available at: <https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf>
- [7] BANKS, Bruce, Kim DEGROH and Sharon MILLER. Low Earth Orbital Atomic Oxygen Interactions With Spacecraft Materials. *Materials Research Society Symposium Proceedings* [online]. 2004, **851** [accessed. 2022-05-06]. Available at: doi:10.1557/PROC-851-NN8.1
- [8] VEŘTÁT, Ivo. Lesson 2 – Space environment and conditions during launch. In: *Přednáška z předmětu Kosmické technologie*. 2021.
- [9] SAMWEL, Susan, A A HADY, J S MIKHAIL, Makram IBRAHIM and Yousry HANNA. Studying the Total Ionizing Dose and Displacement Damage Dose effects for various orbital trajectories. *Proceeding of the First Middle East-Africa, Regional IAU Meeting* [online]. 2008, 55–58 [accessed. 2022-05-03]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235692893_Studying_the_Total_Ionizi

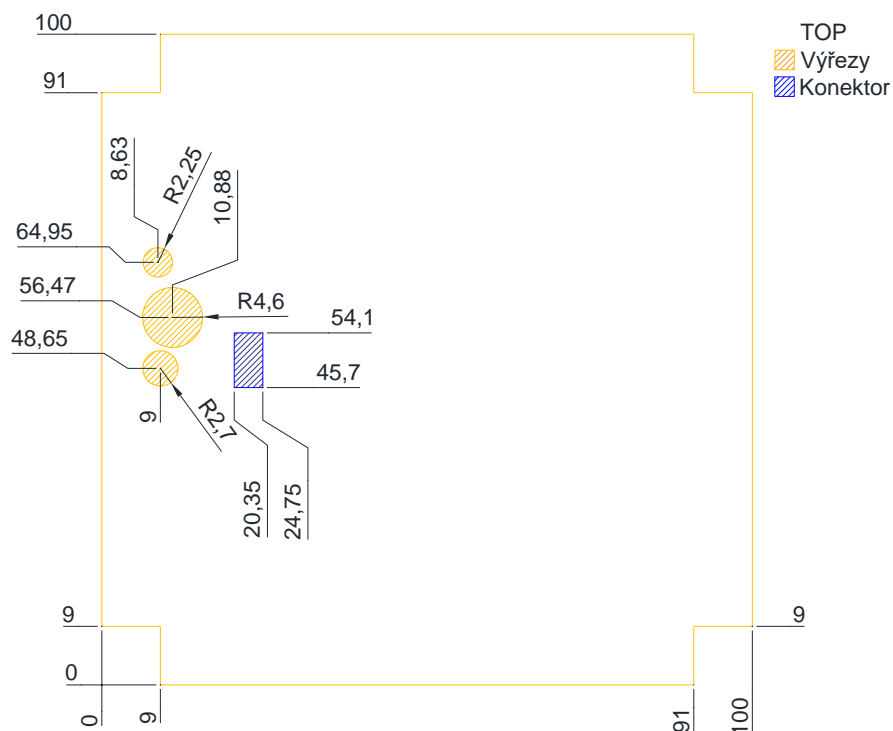
- ng_Dose_and_Displacement_Damage_Dose_effects_for_various_orbital_trajectories
- [10] HOWELL, Elizabeth. Van Allen Radiation Belts: Facts & Findings. *Space.com* [online]. 12. May 2018 [accessed. 2022-02-19]. Available at: <https://www.space.com/33948-van-allen-radiation-belts.html>
- [11] ZIRIN, Harold. Solar constant. In: *Encyclopedia Britannica* [online]. 2012 [accessed. 2022-02-19]. Available at: <https://www.britannica.com/science/solar-constant>
- [12] BOLDT-CHRISTMAS L. *Polar and Sun-synchronous orbit* [online]. [accessed. 2021-12-11]. Available at: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Polar_and_Sun-synchronous_orbit
- [13] SONG, Sua, Hongrae KIM and Young-Keun CHANG. Design and Implementation of 3U CubeSat Platform Architecture. *International Journal of Aerospace Engineering* [online]. 2018, **2018**, 2079219. ISSN 1687-5966. Available at: [doi:10.1155/2018/2079219](https://doi.org/10.1155/2018/2079219)
- [14] HORVÁTH, G, D CZIFRA, G MAROSY and Z VÁRHEGYI. Thermal design and characterization of solar cell arrays aimed to be used in CubeSat missions. In: *18th International Workshop on THERMAL INvestigation of ICs and Systems*. 2012, p. 1–4.
- [15] VEŘTÁT, Ivo. Lesson 4 – Technical solution of spacecraft subsystems EPS, TT&C and Ground Segment. In: *Přednáška z předmětu Kosmické technologie*. 2021.
- [16] BORTHOMIEU, Yannick. Satellite Lithium-Ion Batteries. *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications* [online]. 2014, 311–344 [accessed. 2022-03-07]. Available at: [doi:10.1016/B978-0-444-59513-3.00014-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00014-5)
- [17] GONZALEZ-LLORENTE, Jesus, Aleksander A. LIDTKE, Ken HATANAKA, Lakhdar LIMAM, Isai FAJARDO and Kei Ichi OKUYAMA. In-orbit feasibility demonstration of supercapacitors for space applications. *Acta Astronautica* [online]. 2020, **174**, 294–305 [accessed. 2021-12-12]. ISSN 0094-5765. Available at: [doi:10.1016/J.ACTAASTRO.2020.05.007](https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2020.05.007)
- [18] FAURE, Bertrand, Laurence COSQUERIC and Valéry GINESTE. *Evaluation and Qualification of Commercial Off-The-Shelf Supercapacitors for Space*. The Netherlands: 2nd Space Passive Component Days (SPCD) International Symposium Noordwijk. 2016

- [19] BOUWMEESTER, J. and J. GUO. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica* [online]. 2010, **67**(7–8), 854–862 [accessed. 2022-02-19]. ISSN 0094-5765. Available at: doi:10.1016/J.ACTAASTRO.2010.06.004
- [20] FONASH, Raymond, Stephen Joseph FONASH and S. ASHOK. solar cell. *Encyclopedia Britannica* [online]. 7. February 2022 [accessed. 2022-05-07]. Available at: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>
- [21] PUJAHARI, R.M. Solar cell technology. *Energy Materials* [online]. 2021, 27–60 [accessed. 2021-12-12]. Available at: doi:10.1016/B978-0-12-823710-6.00007-8
- [22] SPECTROLAB INC. *Improved Triple Junction (ITJ) Solar Cells* [online]. [accessed. 2021-12-04]. Available at: <https://www.spectrolab.com/DataSheets/TNJCell/tnj.pdf>
- [23] SEEGER, Daniel. *Fraunhofer ISE Announces 33% Efficiency for Multi-junction Solar Cell* [online]. 2018 [accessed. 2021-12-12]. Available at: <https://www.pv-magazine.com/2018/04/04/fraunhofer-ise-announces-33-efficiency-for-multi-junction-solar-cell/>
- [24] KING, R, Andreea BOCA, K EDMONDSON, M ROMERO, Harrison YOON, D LAW, Chris FETZER, Abdallah ZAKARIA, Watt HONG, Shoghig MESROPIAN and Dimitri KRUT. Raising the Efficiency Ceiling with Multijunction III-V Concentrator Photovoltaics. 2008.
- [25] KULU, Erik. Nanosatellite & CubeSat Database. *Nanosats Database* [online]. [accessed. 2022-05-07]. Available at: <https://www.nanosats.eu/database>
- [26] VERTAT, Ivo and Ales VOBORNIK. Efficient and Reliable Solar Panels for Small CubeSat Picosatellites. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2014, **2014**, 537645. ISSN 1110-662X. Available at: doi:10.1155/2014/537645
- [27] SPECTROLAB INC. *Triangular Advanced Solar Cells* [online]. [accessed. 2021-08-16]. Available at: https://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/PV_NM_TASC_ITJ.pdf
- [28] *Physics of Solar Cells* [online]. [accessed. 2022-03-20]. Available at: http://depts.washington.edu/cmditr/modules/opv/physics_of_solar_cells.html
- [29] HOFMAN, Jaroslav. *Pozemní testy a simulace fotovoltaických článků pikosatelitu PilsenCUBE*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ivo Veřtát.

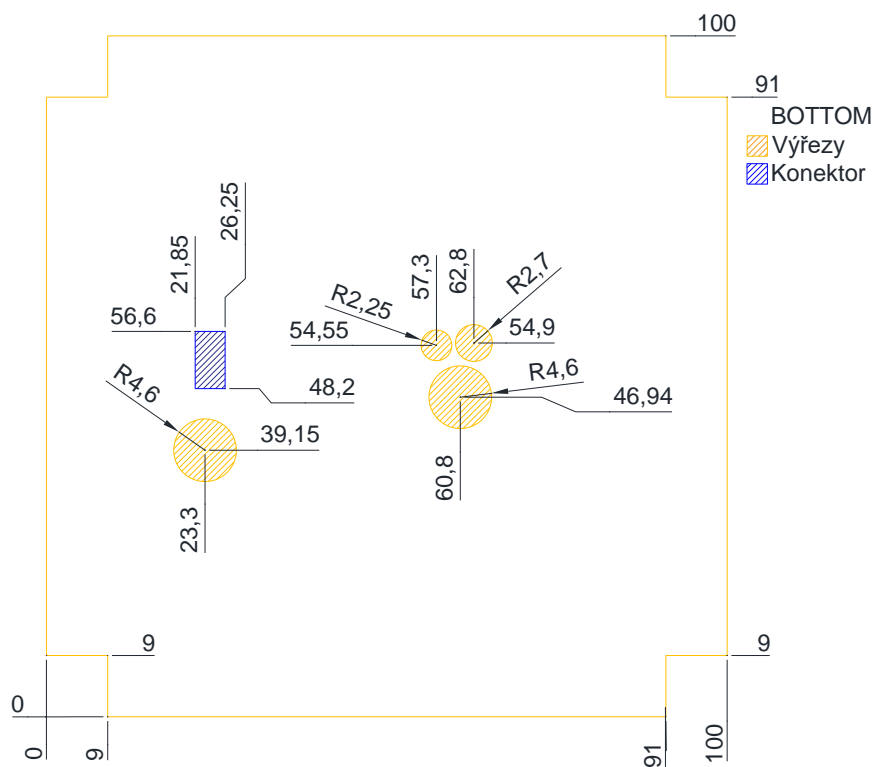
-
- [30] VEŘTÁT, I, J HROUDA and J HOFMAN. Spectrolab triangular solar cell evaluation for usage in PilsenCUBE picosatellite. In: *2010 International Conference on Applied Electronics*. 2010, p. 1–4. ISBN 1803-7232.
- [31] *EPO-TEK E4110_LV Technical Data Sheet* [online]. 14 Fortune Drive, Billerica, MA: Epoxy Technology, INC. 2017 [accessed. 2022-04-09]. Available at: <https://www.epotek.com/docs/en/Datasheet/E4110-LV.pdf>
- [32] LIEW, S. C. *Optical Remote Sensing* [online]. [accessed. 2022-04-24]. Available at: <https://web.archive.org/web/20120702174159/http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/optical.htm>
- [33] ROHDE, Robert A. *File:Solar spectrum cs.svg* [online]. [accessed. 2022-04-24]. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_cs.svg
- [34] YONG-SUNG CHOI. *Analysis of Electrical Properties for Optimal Operating Conditions of Mono-crystalline Si Solar Cell - Scientific Figure on ResearchGate* [online]. [accessed. 2022-04-24]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Spectrum-of-sunlight-and-halogen-light_fig1_264138242

Přílohy

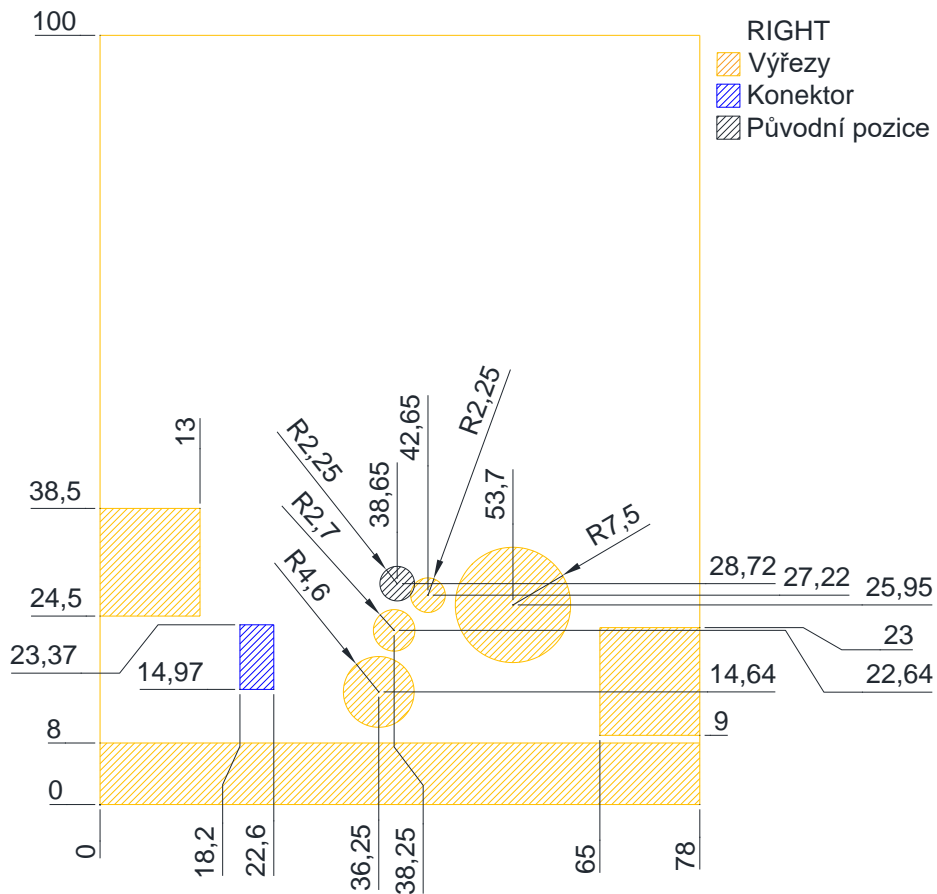
Příloha A – Výkresy a schémata



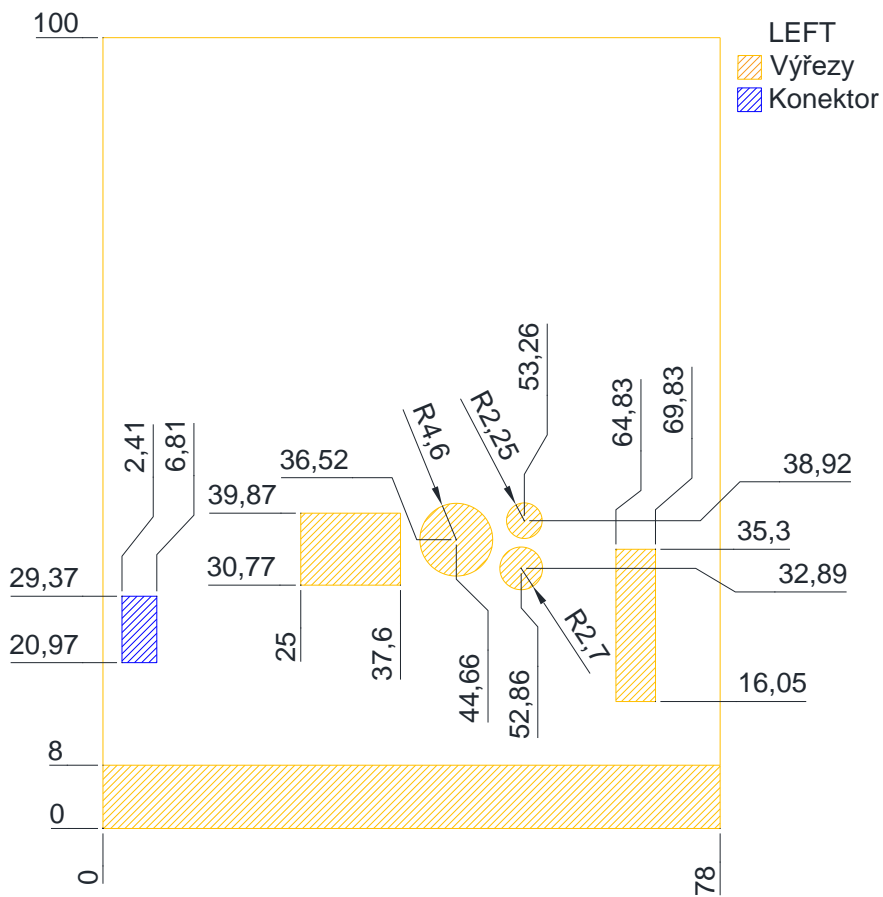
Obr. 30: Výkres výřezů horní stěny (+Z)



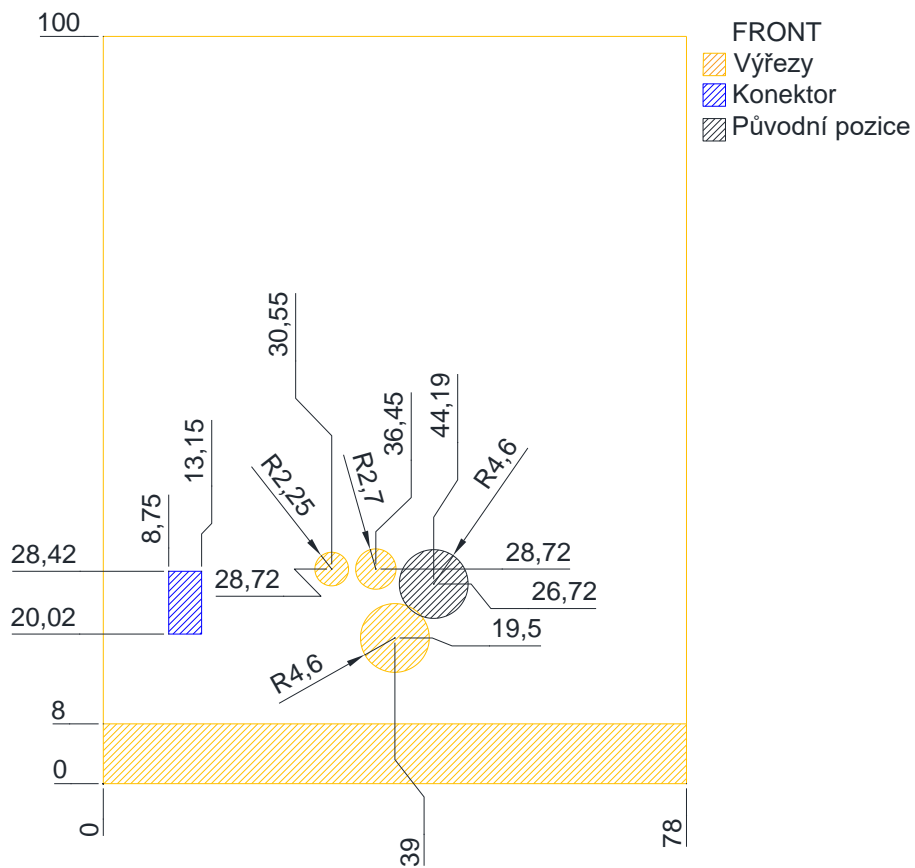
Obr. 31: Výkres výřezů spodní strany (-Z)



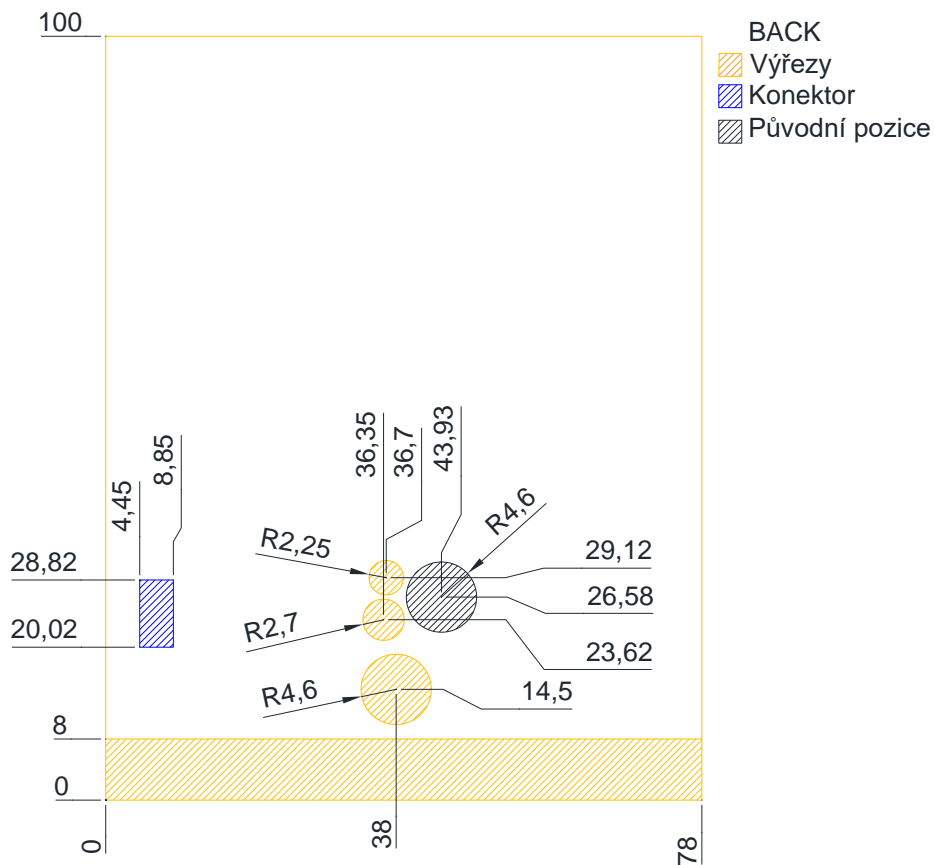
Obr. 32: Výkres výřezů pravé stěny (-X)



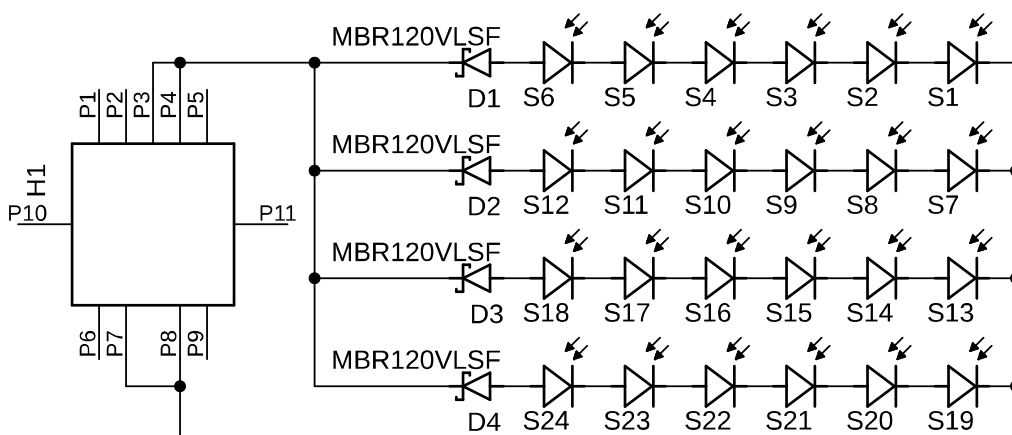
Obr. 33: Výkres výřezů levé stěny (+X)



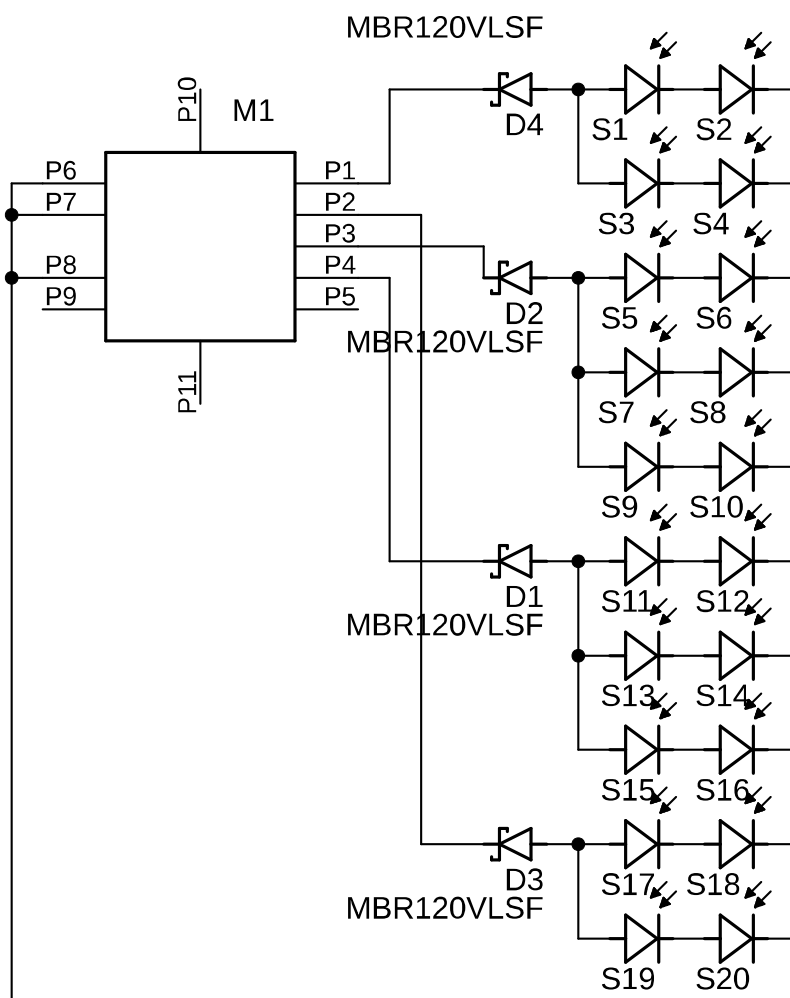
Obr. 34: Výkres výřezů přední stěny (+Y)



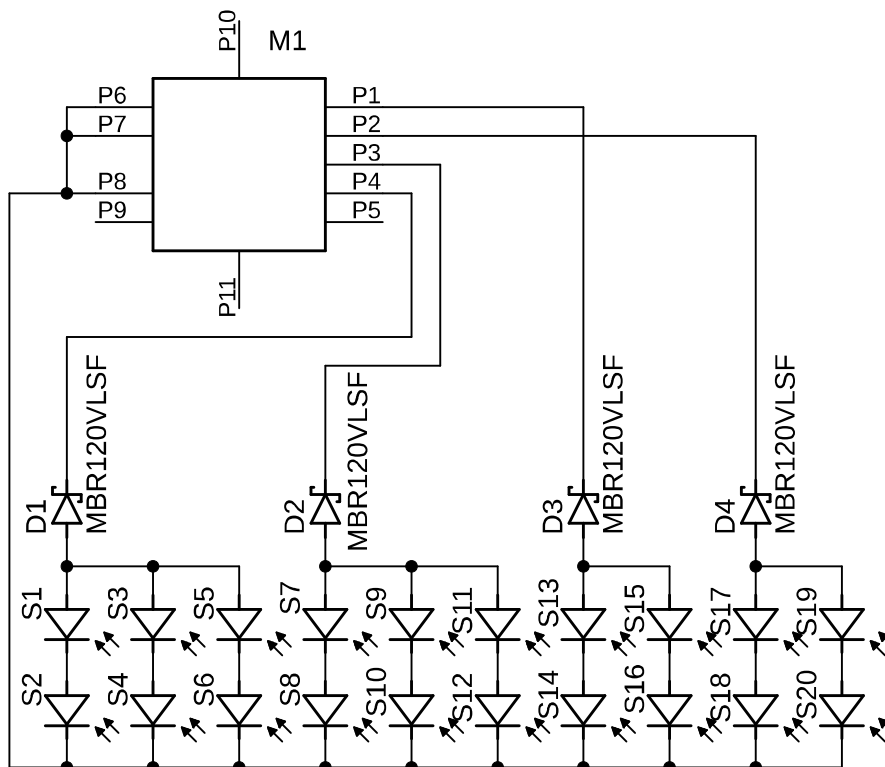
Obr. 35: Výkres výřezů zadní stěny (-Y)



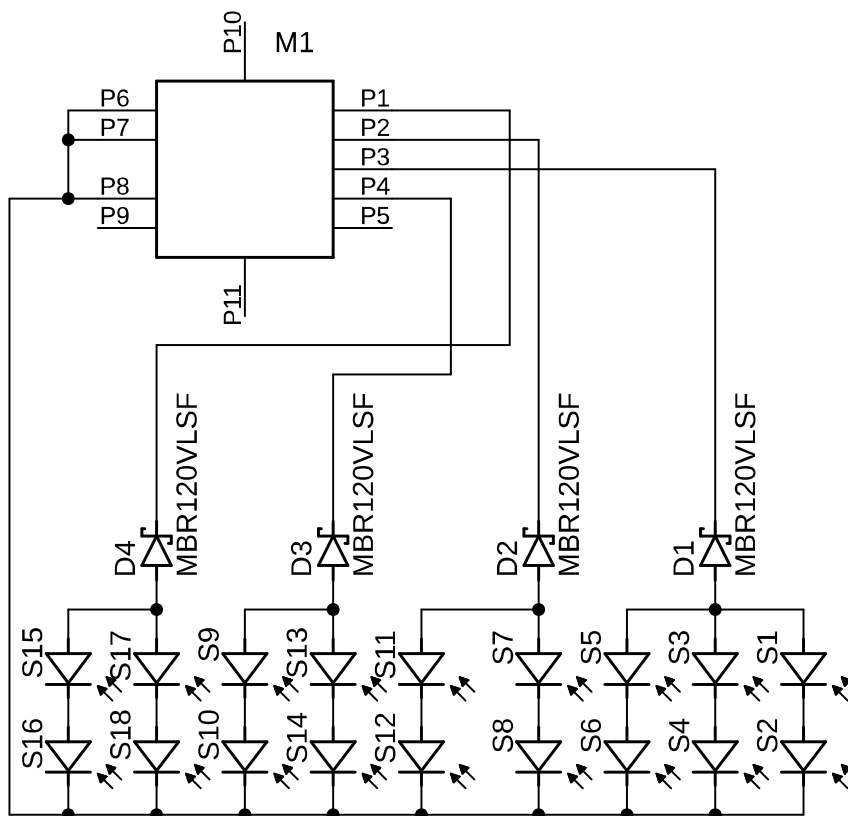
Obr. 36: Zapojení horní (+Z) a spodní (-Z) stěny



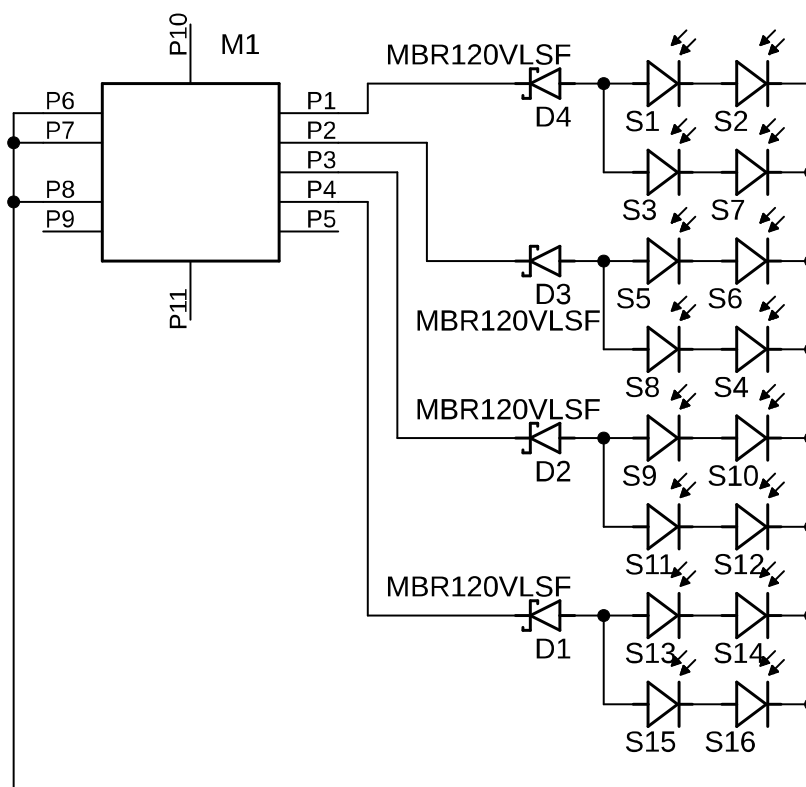
Obr. 37: Zapojení přední (+Y) stěny



Obr. 38: Zapojení zadní (-Y) stěny

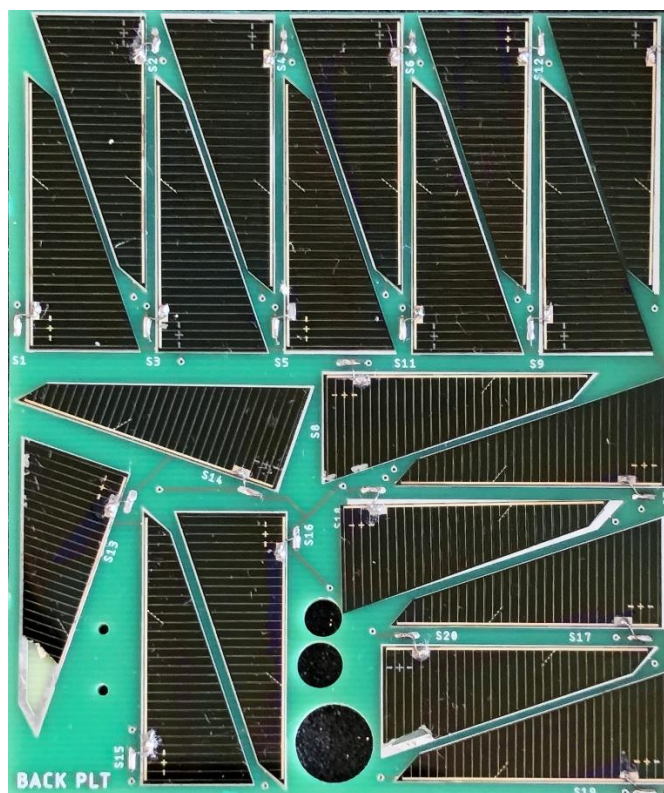


Obr. 39: Zapojení levé (+X) stěny

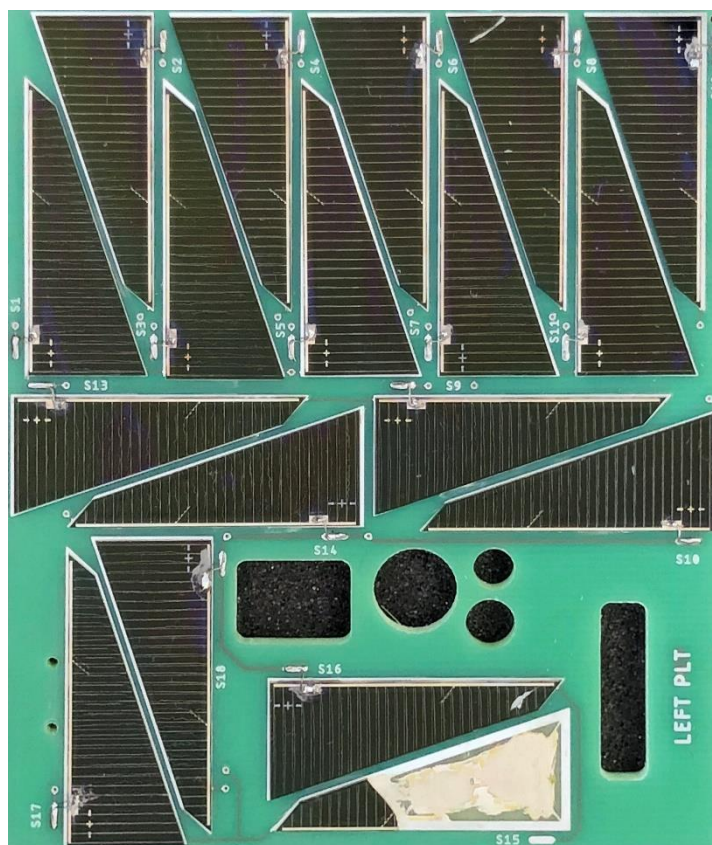


Obr. 40: Zapojení pravé (-X) stěny

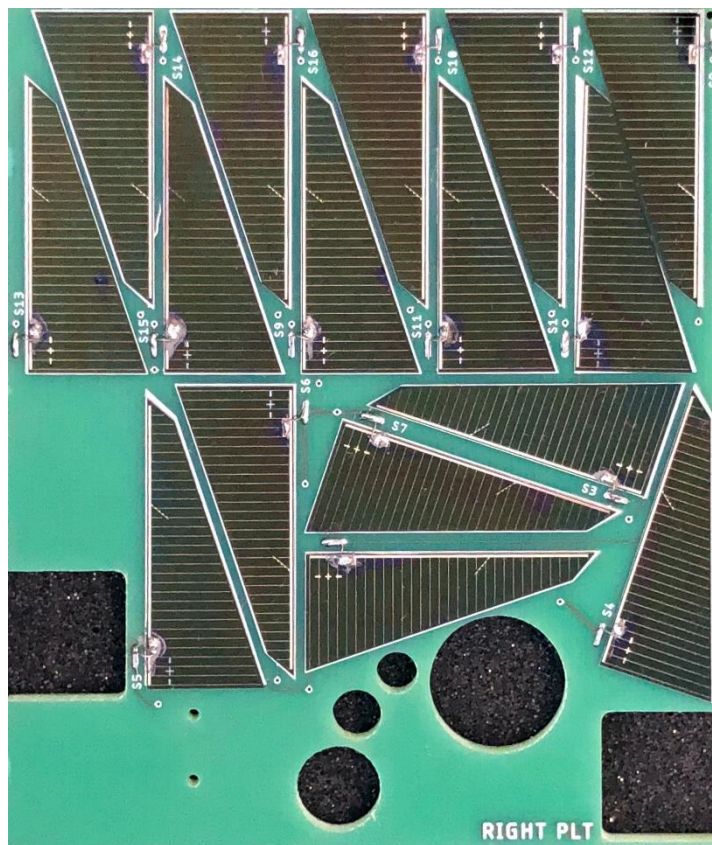
Příloha B – fotografie osazených stěn



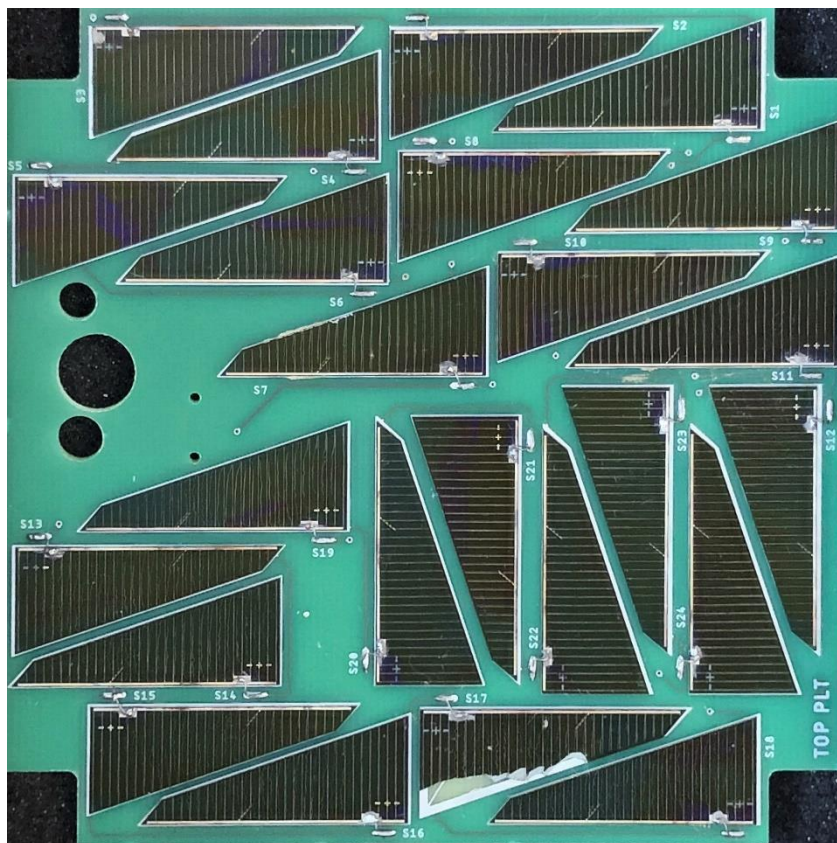
Obr. 41: Osazená zadní (-Y) stěna



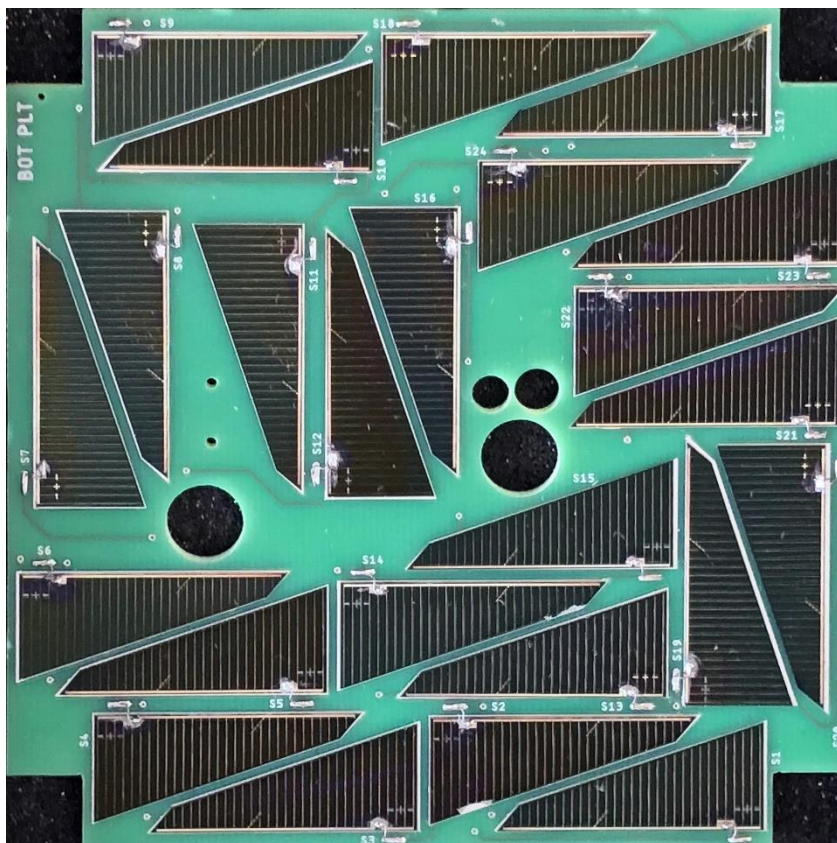
Obr. 42: Osazená levá (+X) stěna



Obr. 43: Osazená pravá (-X) stěna



Obr. 44: Osazená horní (+Z) stěna



Obr. 45: Osazená spodní (-Z) stěna

Příloha C – přiložené soubory

- Priloha_C
 - 3D_sablony
 - Back.step, Bot.step, Front.step, Left.step, Right.step, Top.step
 - Eagle
 - CAM.cam, PilsenCUBE.lbr, Back.brd, Back.sch, Bot.brd, Bot.sch, Front.brd, Front.sch, Left.brd, Left.sch, Right.brd, Right.sch, Top.brd, Top.sch
 - Gbr
 - Back
 - bot.gbr, glue.gbr, mill.gbr, plb.gbr, plt.gbr, pth.txt, sablona.gbr, smb.gbr, smt.gbr, top.gbr
 - Bot
 - bot.gbr, glue.gbr, mill.gbr, plb.gbr, plt.gbr, pth.txt, sablona.gbr, smb.gbr, smt.gbr, top.gbr
 - Front
 - bot.gbr, glue.gbr, mill.gbr, plb.gbr, plt.gbr, pth.txt, sablona.gbr, smb.gbr, smt.gbr, top.gbr
 - Left
 - bot.gbr, glue.gbr, mill.gbr, plb.gbr, plt.gbr, pth.txt, sablona.gbr, smb.gbr, smt.gbr, top.gbr
 - Right
 - bot.gbr, glue.gbr, mill.gbr, plb.gbr, plt.gbr, pth.txt, sablona.gbr, smb.gbr, smt.gbr, top.gbr
 - Top
 - bot.gbr, glue.gbr, mill.gbr, plb.gbr, plt.gbr, pth.txt, sablona.gbr, smb.gbr, smt.gbr, top.gbr