

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza telemetrických dat z mise satelitu VZLUSAT-1

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Mariia OVSIENKO**
Osobní číslo: **E16B0177P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Analýza telemetrických dat z mise satelitu VZLUSAT-1**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se se strukturou pravidelně zaznamenávaných dat na palubě satelitu VZLUSAT-1 a sledovacím programem v pozemní řídicí stanici na FEL ZČU.
2. Z uložených dat zpracujte základní statistiky (teploty systémů, spotřeby, stav akumulátorů) a jejich vývoj během celé mise satelitu.
3. Pokuste se analyzovat příčiny některých jevů na palubě satelitu (pravidelné resety palubního počítače, rozkolísávání teplot palubních systémů...).

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Vertat, I. a kolektiv autorů: „Small Satellite Ground Station in Pilsen – Experiences with VZLUSAT-1 Commanding and Future Modifications Toward Open Reference Ground Station Solution“, konference Radiokomunikace 2018, Praha, 2018.

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

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



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



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

Abstrakt

Předmětem této práce je analýza telemetrických dat, které charakterizují aktuální stav vnitřních systémů nanodružice VZLUSAT-1. Úvod obsahuje technickou informaci o satelitu a popis experimentů, které má na starosti. Dále je popsán formát dat, který byl požadován projektem QB50. Praktická část je zaměřena na zpracování základních statistik teploty, napětí a proudu elektronických a komunikačních systémů satelitu, popis jejich funkčnosti v souvislosti se změnou okolních podmínek a vnitřních procesů. Pro více detailní analýzu byly provedeny další výpočty (energie, klouzavé průměry, příkon), které poskytly doplňující informaci o chování systému. Teoretická část je zaměřena na vysvětlení příčin jevů, které byly odhaleny během zpracování. Pak následuje zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova

Nanodružice, VZLUSAT-1, Cubesat, telemetrická data, analýza, QB50, satelit

Abstract

The goal of this thesis is analysis of telemetry data that characterise the current state of the internal systems of the nanosatellite VZLUSAT-1. The introduction includes technical information about the satellite and a description of the experiments it is in charge of. It also describes the data format that was requested by the QB50 project. The practical part is focused on processing the basic temperature, voltage and current statistics of the satellite's electronic and communication systems, describing its functionality in the context of a change in ambient conditions and internal processes. For more detailed analysis, additional calculations (energy, power, running averages) were made to provide more information of the behaviour of the systems. The theoretical part is aimed at explaining the causes of phenomena that were detected during processing. Then there is an assessment of the results achieved.

Key words

Nanosatellites, VZLUSAT-1, Cubesat, telemetric data, analysis, QB50, satellite

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala 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.

.....

podpis

V Plzni dne 19.06.20

Mariia Ovsienko

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ivo Veřtátovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych ráda poděkovala zakladatelům a účastníkům projektu QB50, jejichž práce umožnila zpracování této odborné práce. Satelit VZLUSAT-1 je řešen s finanční podporou TA ČR v rámci projektu TAO3011329.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	7
Úvod.....	7
VZLUSAT-1.....	8
Cíle práce	12
1. Popis telemetrických dat.....	13
1.1. NAPĚTÍ BATERIE	14
1.2. PROUD BATERIE.....	14
1.3. TEPLoty.....	14
1.4. PROUD NA 5V A 3V3 SBĚRNICI.....	14
2. Rozbor naměřených telemetrických dat	16
2.1. TEPLota BATERIE	17
2.2. TEPLota NAPÁJECÍHO SYSTÉMU.....	21
2.3. TEPLota RÁDIA.....	24
2.4. TEPELNÁ ROVNOVÁHA KOSMICKÝCH TĚLES VE VESMÍRU	28
2.5. PROUD NA 5V SBĚRNICI.....	32
2.6. PROUD BATERIE.....	34
2.7. NAPĚTÍ BATERIE	37
3. Rozbor dodatečně vypočtených údajů.....	38
3.1. 5V SBĚRNICE	38
3.2. BATERIE	39
4. ZÁVĚR.....	40
5. Seznam literatury a informačních zdrojů.....	42
Přílohy	1

Seznam symbolů a zkratek

DPS	Deska plošných spojů	
MCU	Jednočipový počítač (Microcontroller unit)	
VZLÚ	Výzkumný a zkušební letecký ústav	
MATLAB	Matrix laboratory	
P	Výkon	[W]
I_{c5}	Proud 5V sběrnice	[A]
t	Čas	[s]
I_{bat}	Proud baterie	[A]
U_{bat}	Napětí baterie	[V]
W	Energie	[J]

Úvod

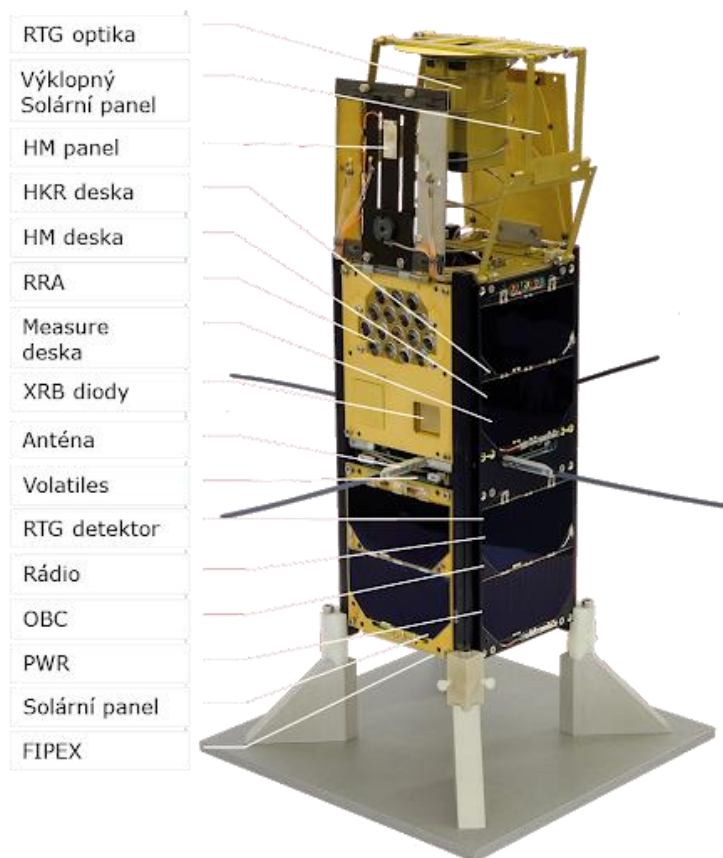
Zájem o malé satelity v poslední době prudce narůstá. Nižší náklady na výrobu a možnosti, blížící se možnostem velkých satelitů, je činí přitažlivými pro mnoho vědců a studentů, kteří zkoumají vesmír.

Satelity typu CubeSat se účastní nejrůznějších experimentů. V roce 2018 satelit RemoveDebris, jehož cílem bylo představit světu možnosti sběru kosmického smetí, vypustil CubeSat, na nějž následně vystřelil síť, která jej zachytila.^[5] STRaND-1 byl prvním CubeSat postaveným na platformě Android. Jeho cílem bylo ověřit teorii, že ve vesmíru se zvukové vlny nešíří. GeneSat-1 byl navržen pro zkoumání množení bakterií v nulové gravitaci.^[7] PilsenCUBE II, který bude první studentskou nanodružicí v České republice, bude obsahovat na palubě šest různých experimentů: testování procesorů a paměti, měření úhlové rotace satelitu, testování infračervené kamery, testování CMOS kamery, testování magnetometru, měření radiačního prostředí uvnitř satelitu.^[7]

Další výhodou malých satelitů je možnost zaznamenávat celou řadu zajímavých údajů o aktuálním stavu, které se obvykle nijak dlouhodobě nevyhodnocují, ale ze kterých je možné komplexnějším zpracováním a analýzou zjistit zajímavé informace, což bude náplní této práce.

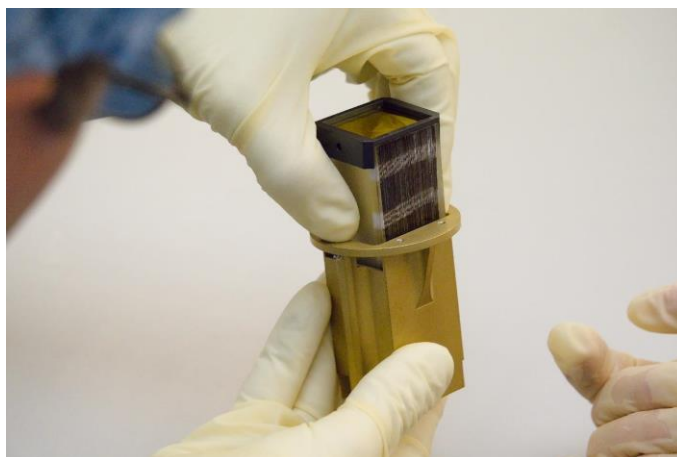
VZLUSAT-1

VZLUSAT-1 je nanodružice, která byla navržena a realizována v České republice ve spolupráci Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu (VZLÚ), komerčních firem a elektrotechnických fakult Českého vysokého učení technického v Praze a Západočeské univerzity v Plzni. Jako základní koncept byl pro vývoj použit standard nanosatelit u CubeSat, který vznikl v roce 1999 ve Spojených státech amerických. Rozměry satelitu VZLUSAT-1 byly v okamžiku vystřelení na oběžnou dráhu Země 20x10x10 cm, o hmotnosti 2 kg a komunikuje se Zemí v radioamatérském pásmu na frekvenci 437,240 MHz. Nanodružice byla 23. 6. 2017 vynesena na kruhovou oběžnou dráhu do výšky 505 km v rámci mezinárodní mise QB50 společně s dalšími 30 družicemi.^{[1][2][3][5]}

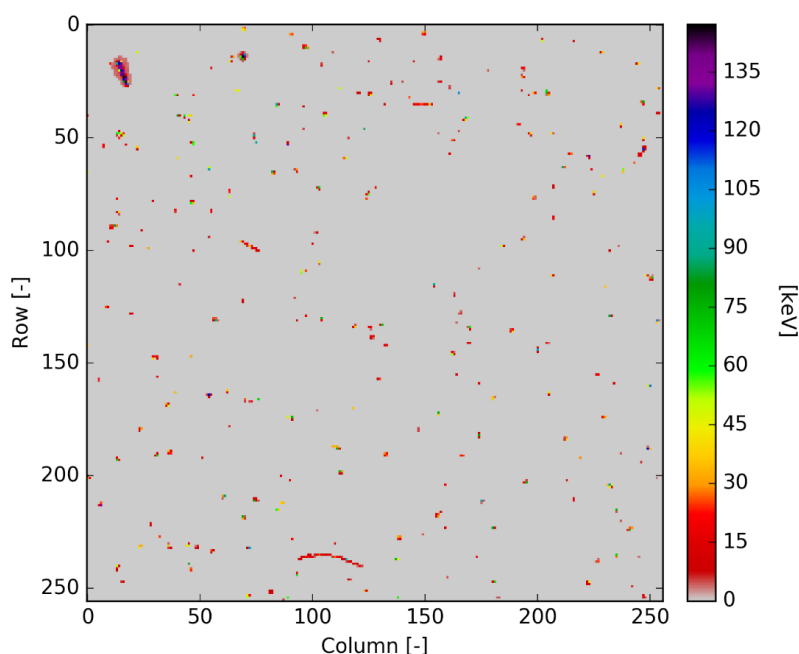
Obr. 1: VZLUSAT-1^[1]

Cílem projektu bylo ověřit fungování kosmických výrobků a technologií na takto malém satelitu, který byl vystaven nepříznivým okolním podmínkám vesmíru. Satelit nese tři základní experimenty.

Cílem prvního experimentu bylo *ověřit nový koncept miniaturizovaného rentgenového dalekohledu, který nebyl dosud v kosmu použit.*^[4] Dalekohled se skládá z vyklápěcího širokouhlého systému typu račí oko (Lobster eye), tvořeného multifóliovou optikou, jejíž optická dráha prochází tělem satelitu. Ohnisková vzdálenost dalekohledu je 25 cm. Rentgenové paprsky dopadají na pixelový detektor TIMEPIX, který pracuje v několika režimech a poskytuje informace o energii a množství dopadajících fotonů. Plánovaný rozsah měření je 3 až 60 keV. V budoucnu by mohl dalekohled sloužit pro předpovídání vesmírného počasí a astrofyzikální pozorování.^{[1][3]}



Obr. 2: Přístroj TIMEPIX



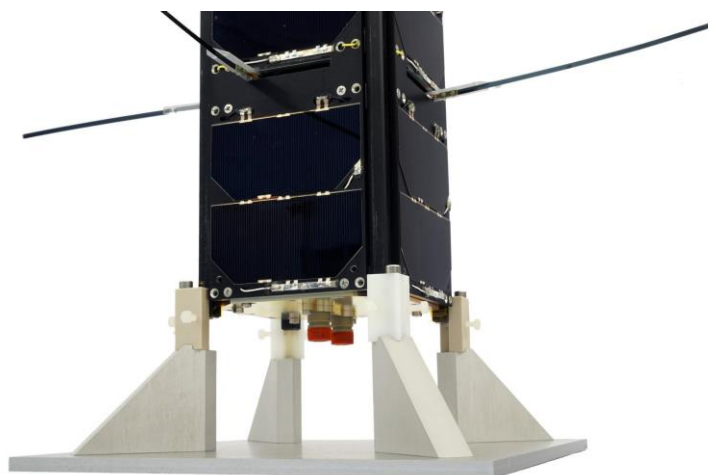
Obr. 3: Sluneční fotony zachycené přístrojem TIMEPIX dne 21. srpna 2017. Barva pixelů odpovídá energii fotonů dle stupnice umístěné napravo.

Dalším experimentem bylo testování materiálu určeného k ochraně elektroniky proti radiaci. Testovaný materiál je založen na bázi uhlíkového kompozitu - síti uhlíkových vláken nasycených polymerem, jenž obsahuje dopanty zvyšující radiační odolnost a pevnost. Materiál je testován z hlediska účinnosti stínění komparativním měřením třemi PIN diodami, z nichž každá je jinak stíněna – wolframovou destičkou, zkoumaným kompozitním materiálem a bez stínění. Zkoumá se také vliv kosmického prostředí na degeneraci kompozitu. Měření je založeno na změně vlastní frekvence materiálu v čase. V případě úspěchu by tyto materiály sloužily v budoucnu jako plast kosmických lodí s lidskou posádkou nebo součást konstrukce obydlí při osídlení Měsíce nebo Marsu. ^{[3][1]}



Obr. 4: Příprava testů radiačního stínění^[4]

Posledním experimentem, který poskytuje nejen technologická, ale i vědecká data, je výzkum atmosféry přístrojem FIPEX, jenž detekuje molekulární kyslík a další částice na oběžné dráze. Zbytkové molekuly kyslíku způsobující erozi družic, jsou vůči Zemi v klidu. Satelit se pohybuje rychlostí 8 km/s (1. kosmická rychlost) a svým povrchem naráží na veškeré částice. Cílem experimentu je zjistit, jak velké množství těchto částic je na nízké oběžné dráze a jak intenzivní jsou s tím související erozní jevy.^{[3][4]}



Obr. 5: Přístroj FIPEX je umístěn v nejspodnější části družice. [4]

Z důvodu značné energetické náročnosti se některé experimenty zapínají jednotlivě podle stanoveného plánu s ohledem na připravenost měřicích a řídicích systémů.^[3]

Cíle práce

- Seznámit se strukturou telemetrických dat, která jsou označována WOD (Whole Orbit Data).
- Zpracovat obdržená data a provést korekce podle potřeby.
- Provést základní statistiky, grafické zobrazení dat pro lepší přehlednost a učinit další, pro analýzu potřebné výpočty.
- Na základě zpracovaných statistik analyzovat příčiny některých jevů na palubě satelitu.
- Zamyslet se nad tím, jak se budou chovat systémy satelitu v budoucnu.

1. Popis telemetrických dat

V průběhu celé mise, zaznamenává satelit v minutových intervalech diagnostická data o svém vnitřním stavu, která se stahuje na Zem a ukládá do databáze. Tak malá frekvence vzorkování může způsobit nepřesnost při vyhodnocení. Podíváme-li se na frekvenci ukládání srovnatelných údajů například satelitů s lidskou posádkou, zjistíme, že četnost odesílání dat je výrazně větší. K dispozici jsou data popisující okamžité hodnoty napětí a proudu baterie, proudu 5V stabilizované sběrnici dodávající energii do subsystémů satelitu, teploty baterií, napájecího zdroje a rádia. Je zaznamenán čas od posledního resetu, počet resetů, teploty na desce s procesorem, úroveň signálu přijímaným satelitem, v pozemní stanici se zaznamenává maximální a minimální výška satelitu v km. Aby bylo možné realizovat výše zmíněné experimenty, které nese satelit a zaručit spolehlivost výsledku, je nezbytně nutné nepřetržité sledování údajů a bezchybného fungování základních řídicích systémů a zdrojů energie satelitu. Telemetrická data mají velký význam pro analýzu funkčnosti palubních systémů.

WOD (Whole Orbit Data) je sadou datových paketů, které byly použity v projektu QB50, a které v sobě obsahují záznamy o satelitním režimu, napětí baterie, proudu baterie, regulovaném proudu sběrnice, teplotě baterií, napájecího zdroje a rádia. Paket sestává z 32 datových sad (32 měření pokrývající 32 minut) a času prvního měření.^[6]

Time	Data set 1	Data set 2	...	Data set 32
32 bit	57 bits	57 bits	1653bits	57 bits

Tabulka 1: Formát datových sad WOD

Formát jedné sady dat je uveden v následující tabulce.^[6]

Mode	Bat. voltage	Bat. current	3V3 bus current	5V bus current	Temp. Comm	Temp. EPS	Temp. Battery
1 bit	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits

Tabulka 2: Formát jedné sady dat

Pokud není parametr na palubě satelitu k dispozici, musí být konkrétní pole nastaveno na 0x00 buď přímo na palubě před přenosem, nebo po příjmu na Zemi.^[6]

V následujících podkapitolách jsou parametry popsány podrobněji a je uveden

použitý vzorec převodu na 8-bitové celé číslo bez znaménka.

1.1. Napětí baterie

Battery voltage obsahuje přímo naměřené hodnoty napětí baterie ve voltech. Hodnota je převedená z napěťové úrovně na 8-bitové číslo pomocí následující rovnice.

$$U_{UI8} = \max(0, \min(2^8-1, \text{floor}(20 * U) - 60)) \quad (1)$$

Rozsah měřeného napětí je 3 V až 15,75 V s rozlišením 50 mV.^[6]

1.2. Proud baterie

Battery current představuje rychlost nabíjení a vybíjení baterie v časovém bodě měření. Kladné hodnoty představují nabíjení, záporné - vybíjení. Použitím informací z aktivních subsystémů lze příchozí energii odvodit z proudu. Měřený proud se převede na 8-bitové číslo pomocí následující rovnice.

$$I_{UI8} = \max(0, \min(2^8-1, \text{floor}(127 * I) + 127)) \quad (2)$$

Rozsah měřeného proudu je -1 A až 1,008 A s rozlišením 7,87 mA.^[6]

1.3. Teploty

Temperature COMM/EPS/Battery obsahují záznamy teplot ve °C. Snímání u komunikačního systému (COMM) a napájecího zdroje (EPS) se provádí na DPS a MCU. U baterie se sleduje teplota na povrchu. Je-li na deskách k dispozici více baterií nebo snímačů, musí se naměřené hodnoty zprůměrovat. Pro přenos se změřená teplota převede pomocí následující rovnice.

$$T_{UI8} = \max(0, \min(2^8-1, \text{floor}(4 * T) + 60)) \quad (3)$$

Rozsah měřené teploty je -15 °C až 48,75 °C s rozlišením 0,25 °C.^[6]

1.4. Proud na 5V a 3V3 sběrnici

3V3/5V bus current představuje odběr proudu na palubě satelitu na konkrétní

sběrnici - pro každou sběrnici se musí použít součet proudů, aby se zohlednilo každé elektrické vedení. Stav a činnosti subsystému lze odvodit ze spotřeby porovnáním s pozemními testy nebo hodnotami datových listů. Proudů uvedené v ampérech se převádějí na 8-bitové celé číslo pomocí následující rovnice.

$$I_{UI8} = \max(0, \min(2^8 - 1, \text{floor}(40 * I))) \quad (4)$$

Rozsah měření je 0 A až 6.375 A s rozlišením 25 mA.^[6]

Mode [-]	Bat. voltage [V]	Bat. current [A]	3V3 bus current [A]	5V bus current [A]	Temp. Comm [°C]	Temp. EPS [°C]	Temp. Battery [°C]
0	8.50	0.543	0.40	0.20	5.50	15.00	38.25

Tabulka 3: Výstupní parametry WOD

Tabulka 3 zobrazuje konečnou podobu dat, které se budou zpracovávat v následující kapitole. Základní analýza se bude provádět na základě graficky zobrazených dat v podobě průběhu okamžitých hodnot, histogramů a distribučních funkcí. Pro více detailní rozbor se budou provádět dodatečné výpočty:

- průměr teplot z celého měření za dobu mise satelitu;
- přepínatelný plovoucí průměr s několika hodnotami délky plovoucího okna (1 oběžná dráha, 1 den, 1 týden);
- výkon 5V sběrnice $P = 5 * I_{c5}$ [W];
- plovoucí průměr výkonu 5V sběrnice o délce plovoucího okna 1 týden;
- Výkon baterie $P = I_{bat} * U_{bat}$ [W];
- Energie $W = \varnothing P * \Delta t$ [Wh];

2. Rozbor naměřených telemetrických dat

Po načtení a následném zobrazení přijatých dat bylo zapotřebí provést některé úpravy, aby bylo možné s daty dále pracovat.

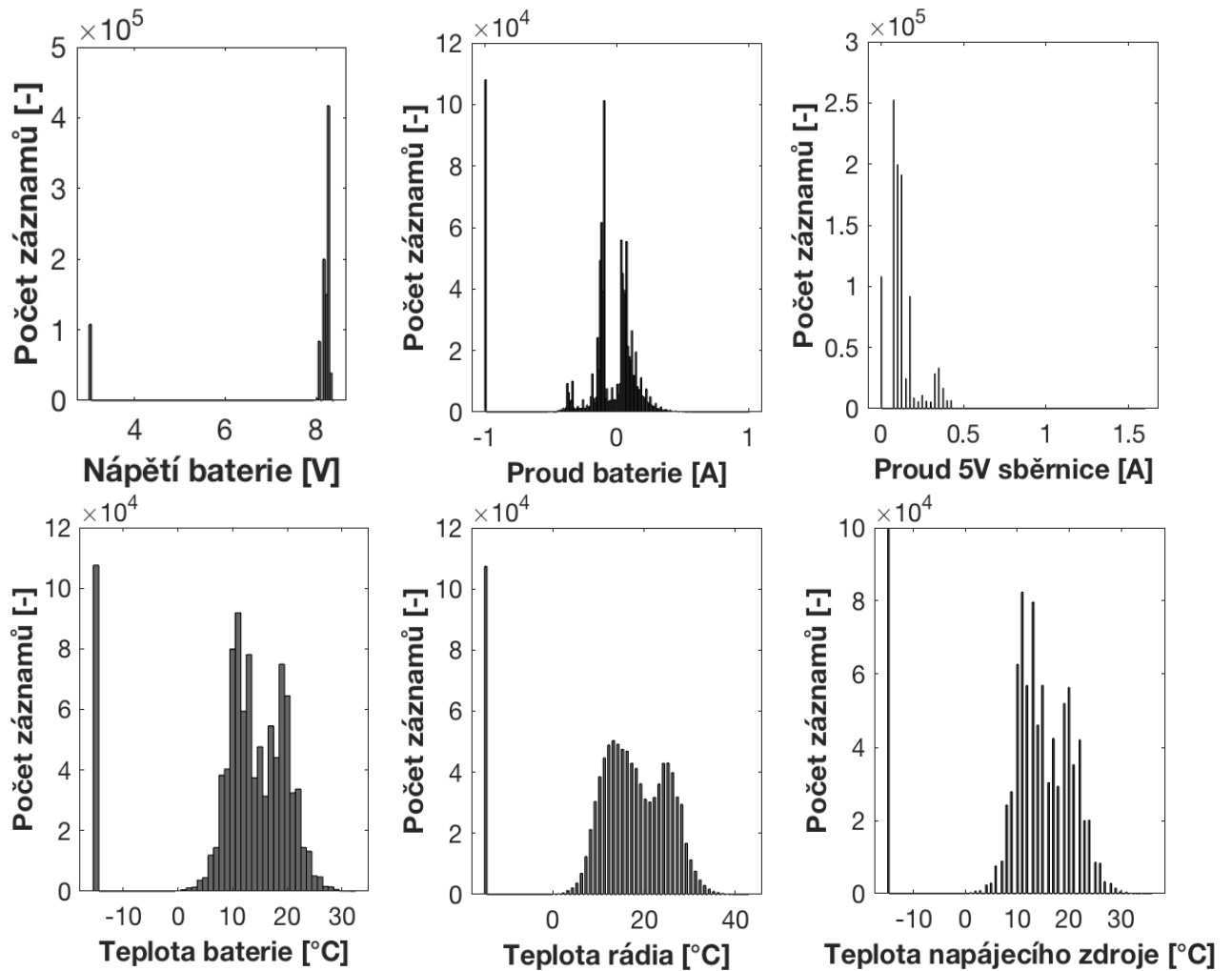
Především byla obnovena chronologie měření. Na začátku mise, během prvních dvou dní ve vesmíru, byl na palubě satelitu nastaven rok 2036 (viz. obr. 6). Později byla provedena synchronizace data a času s pozemní stanicí. Data z prvních dvou dní měření mise bylo nutné před dalším zpracováním korigovat, aby chronologicky odpovídala skutečné době její změření.

← T →			chunk	time ▲ 1 Time and date of measurement	vbat Battery voltage	
<input type="checkbox"/>	Upravit	Kopírovat	Odstranit	3260	2036-02-08 17:41:19	8.25
<input type="checkbox"/>	Upravit	Kopírovat	Odstranit	3259	2036-02-08 17:40:19	8.15
<input type="checkbox"/>	Upravit	Kopírovat	Odstranit	3258	2036-02-08 17:39:19	8.25
<input type="checkbox"/>	Upravit	Kopírovat	Odstranit	3257	2036-02-08 17:38:19	8.2

Obr. 6: Wod2

Další úpravou bylo nahrazení dat, která posílal satelit v době, kdy docházelo k resetu palubního počítače. Pro každý parametr byla nastavená taková hodnota, která se výrazně lišila od očekávaného intervalu naměřených hodnot (viz. obr. 7). Cílem této korekce bylo nahradit chybějící úseky tak, aby doplnily průběh a neovlivnily další výpočty a analýzu. Naměřené teploty mají setrvačnost a pravidelnou periodicitu. Nahrazení bylo provedeno nalezením poslední hodnoty před a první hodnoty po chybějícím úseku a proložením lineární posloupností. Napětí baterie se také skokově příliš nemění, proto byla udělána náhrada průměrem několika hodnot (bylo zvoleno 4) před a po chybějícím intervalu. Proud na 5V sběrnici se může skokově měnit, a proto se průměr počítal z většího počtu hodnot před a po chybějícím interval (bylo zvoleno 10). Nejobtížnější bylo nahradit chybějící hodnoty u proudu baterie, obzvlášť pokud reset nastal v době, kdy satelit zaletěl do stínu nebo z něj vyletěl a tím se změnila polarita proudu. Proto bylo nutné jednoznačně

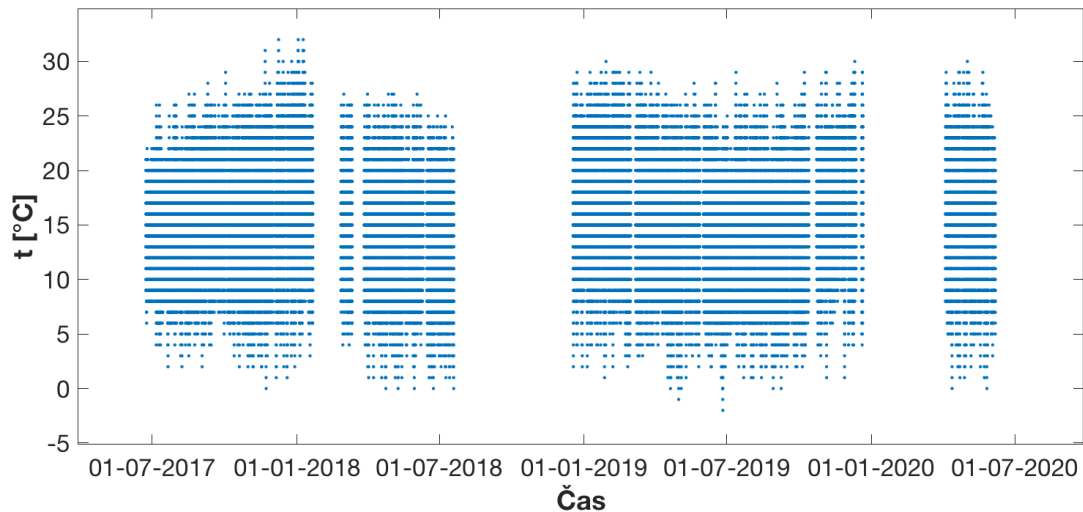
určit okamžiky doby letu ve stínu, kdy baterie nemohla být nabíjena. Let na osvětlené straně Země není také proudově jednoznačný. V závislosti na natočení satelitu ke Slunci a na okamžité spotřebě satelitu může být proud ze solárních panelů dostatečný k pokrytí spotřeby a může tak i nabíjet baterii, anebo nestačit k pokrytí spotřeby a pak je baterie vybíjena, aby dodala chybějící proud.



Obr. 7: Histogramy nezpracovaných dat

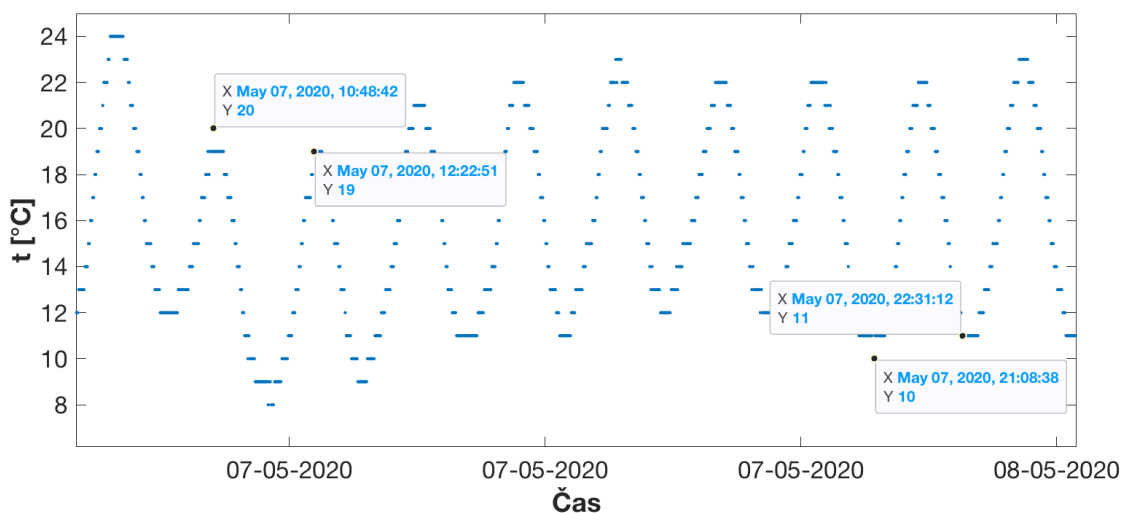
2.1. Teplota baterie

Výsledná podoba průběhu teploty baterie, která byla získána po všech úpravách, je zobrazena na obrázku 8. Za celou dobu mise byla zaznamenána minimální teplota $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, a maximální $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 8: Průběh okamžitých hodnot teploty baterie během celé mise po úpravách

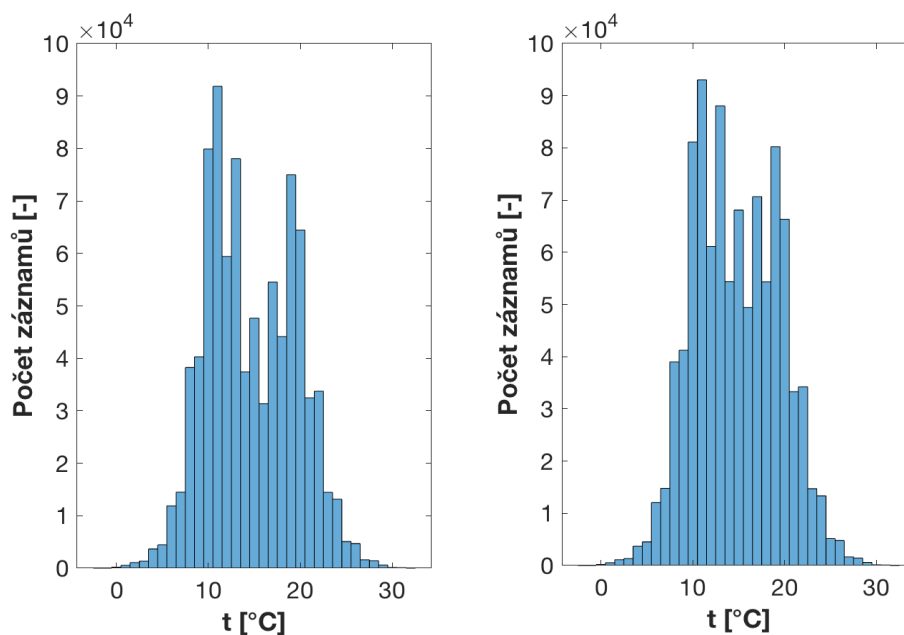
Pravidelná periodicitu průběhu, které je možné si všimnout z obrázku 9, je spojena s pohybem satelitu okolo Země. Oběžná dráha družice je synchronizována se Sluncem, proto se jedná o heliosynchronní dráhu. To znamená, že *satelit prochází nad určeným místem povrchu Země vždy ve stejném slunečním čase.*^[9] Jedna perioda znázorňuje jeden oběh, který trvá 94 minut a 42 sekund.^[8] Je zřejmé, že s tím, jak satelit letí na osvětlené straně Země, dopadá intenzita slunečního záření 1350 W/m^2 a satelit se ohřívá. Naopak během průletu stínem dochází k tepelné výměně mezi satelitem, Zemí a volným vesmírem a tak dojde k poklesu jeho teploty.



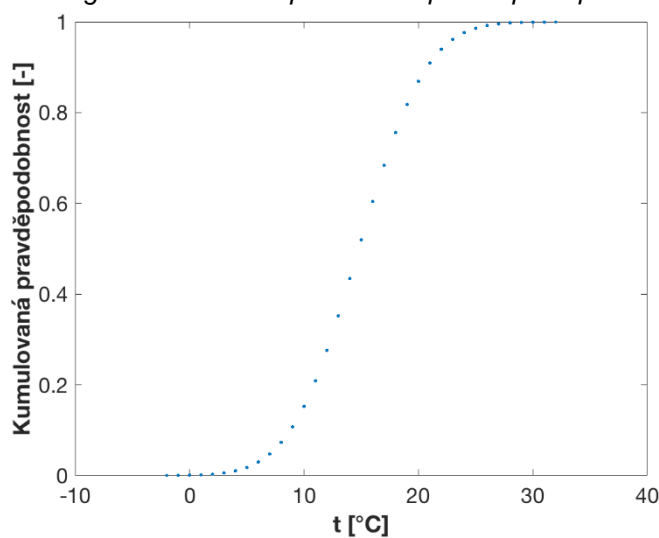
Obr. 9: Průběh teploty baterie během několika dní

Histogramy na obrázku 10 ukazují rozložení hodnot podle četnosti před a po doplnění chybějících dat. Provedená úprava ovlivnila tvar histogramu nejvíce v intervalu teplot $+13 \text{ °C}$ až $+20 \text{ °C}$, ale výsledná podoba neodpovídá Gaussovu rozložení a modální

hodnota, která se rovná $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je nižší, než průměrná teplota $+14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, zůstala stejnou. Rozdíl činí $3,8^{\circ}\text{C}$.



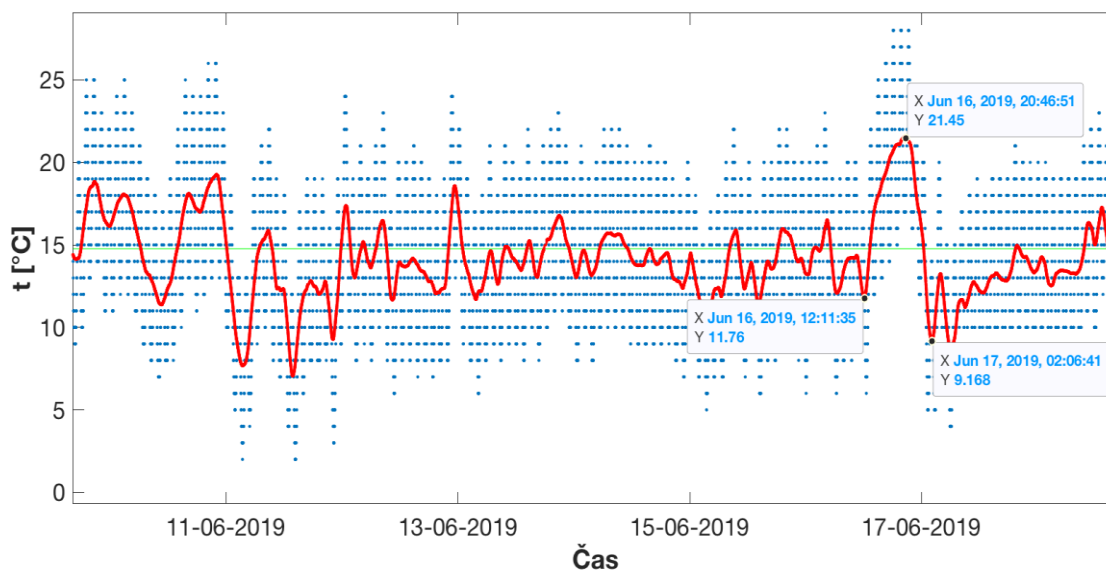
Obr. 10: Histogram rozložení teplot baterie před a po doplnění chybějících dat



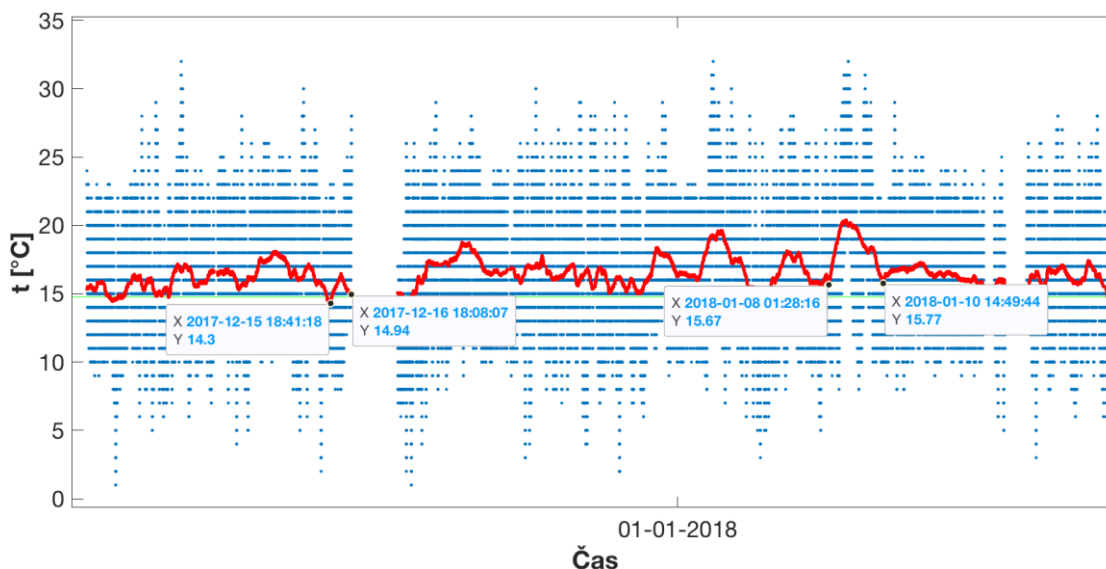
Obr. 11: Distribuční funkce teploty baterie

Pro lepší přehled je na obrázku 11 zobrazena distribuční funkce, která znázorňuje, s jakou procentuální četností byla teplota baterie menší než hodnota na ose x. V 90% měření (od 5% do 95% v grafu) bylo rozpětí teplot na baterii od $+7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. K extrémnímu přehřátí ani ochlazení často nedošlo, což je velmi podstatným faktorem pro správnou a spolehlivou funkčnost baterie. Velké změny teploty by mohly snížit kapacitu baterie a tím i její výkon a životnost.

Na obrázcích 12, 13 a 14 jsou znázorněny spolu s průběhem okamžitých hodnot i spočítané plovoucí průměry s hodnot odpovídajících délce zvoleného plovoucího okna. Z grafu na obrázku 12, který zobrazuje data naměřená během kratšího období, je vidět odlišnost každého cyklu v hodnotě maximální a minimální teploty. Během jednoho dne může dojít jak k menšímu tak i k většímu kolísání extrémů. Takové chování není pravidelné ani periodické, takže tyto výchyly jsou způsobené vnitřními procesy (změny příkonu) nebo změnami v atmosféře.



Obr. 12: Okamžité hodnoty teploty baterie včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 obletu)

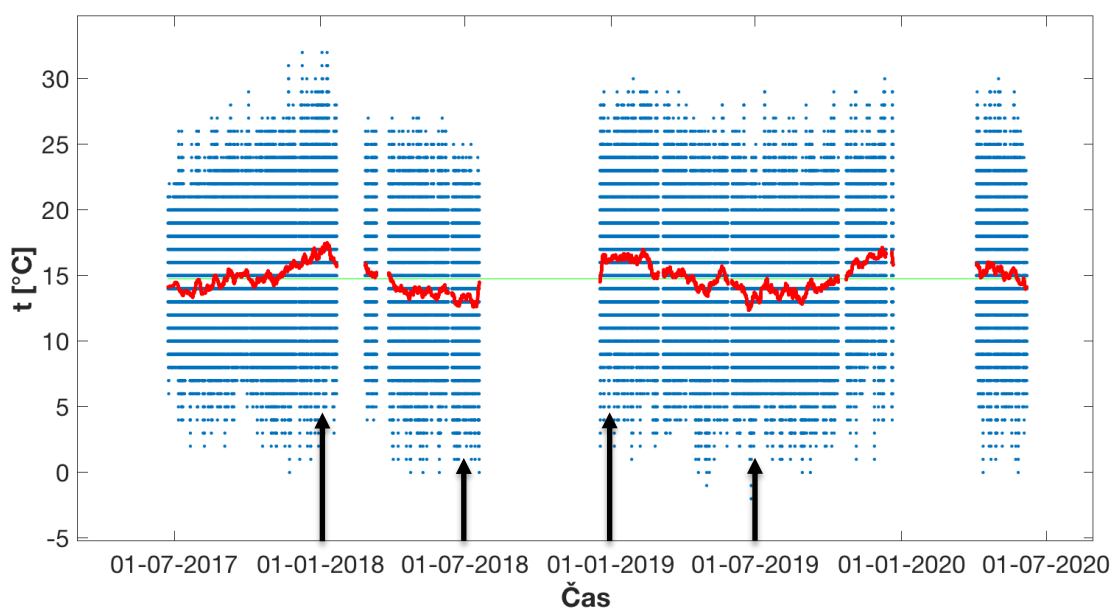


Obr. 13: Okamžité hodnoty teploty baterie včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 dne)

Na obrázku 13 plovoucí průměr odpovídá době letu 24 hodin. Za 1 den satelit stačí udělat přibližně 15 oběhů a objevit se 2 krát ve stejné poloze vůči Zemi. Proto průběh

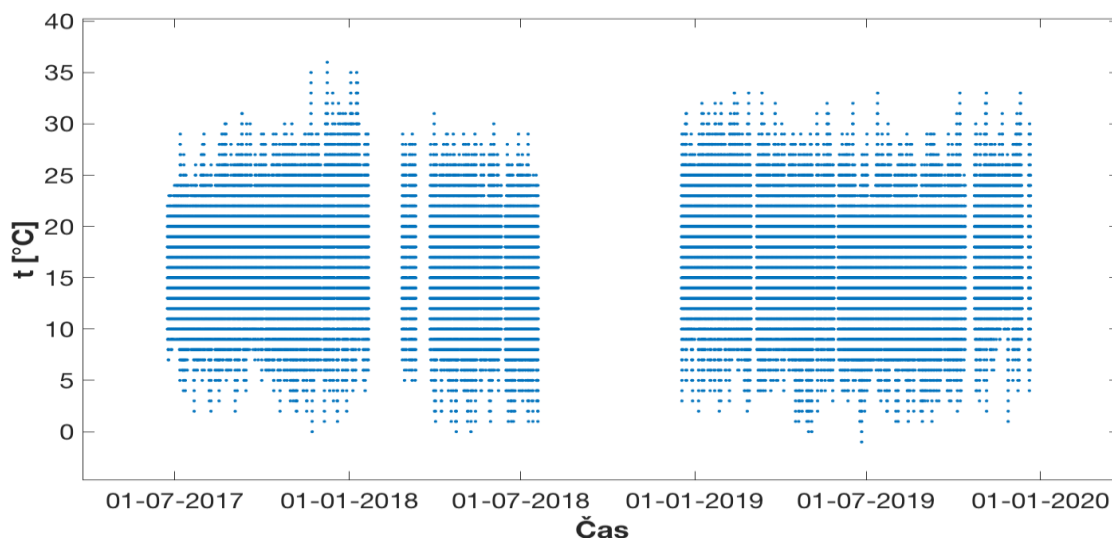
průměru má nižší amplitudu, neboť se stále mění počasí v atmosféře, které má velký vliv na míru tepelné výměny mezi satelitem a Zemí (viz kapitola 2.7).

Průměr teploty z hodnot naměřených během 1 týdne, prokazuje další důležitou souvislost (viz. obr. 14). Je vidět pravidelnost změny teploty se změnou ročního období. Od července do ledna průměrná teplota postupně stoupá, a pak od ledna do července postupně klesá. Taková periodicitu souvisí s eliptičností dráhy Země kolem Slunce, kdy je Země nejbližší Slunci 3. ledna a 4. července nejdále.



Obr. 14: Okamžité hodnoty teploty baterie včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 týdne)

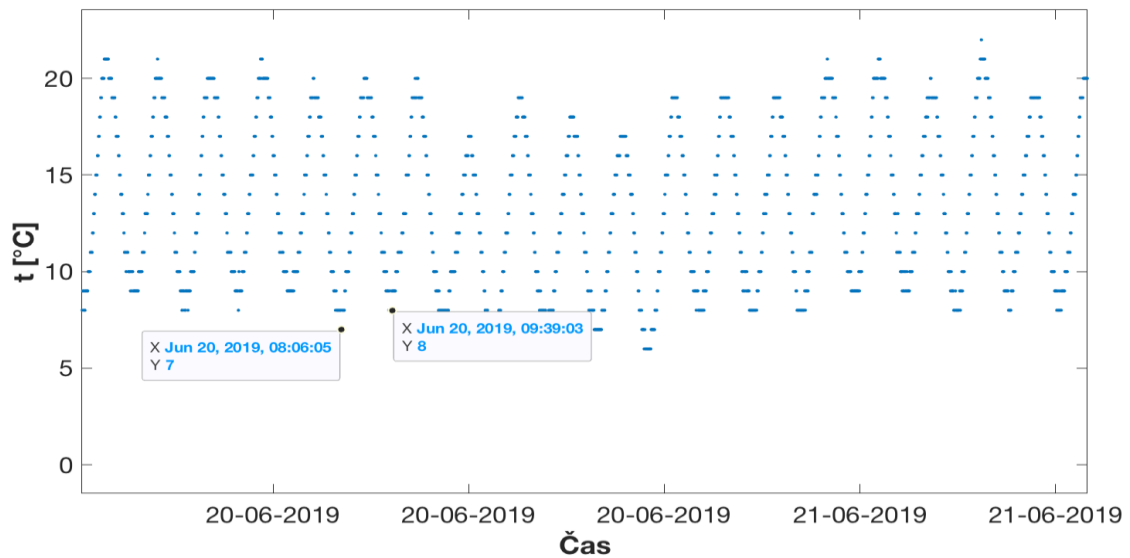
2.2. Teplota napájecího systému



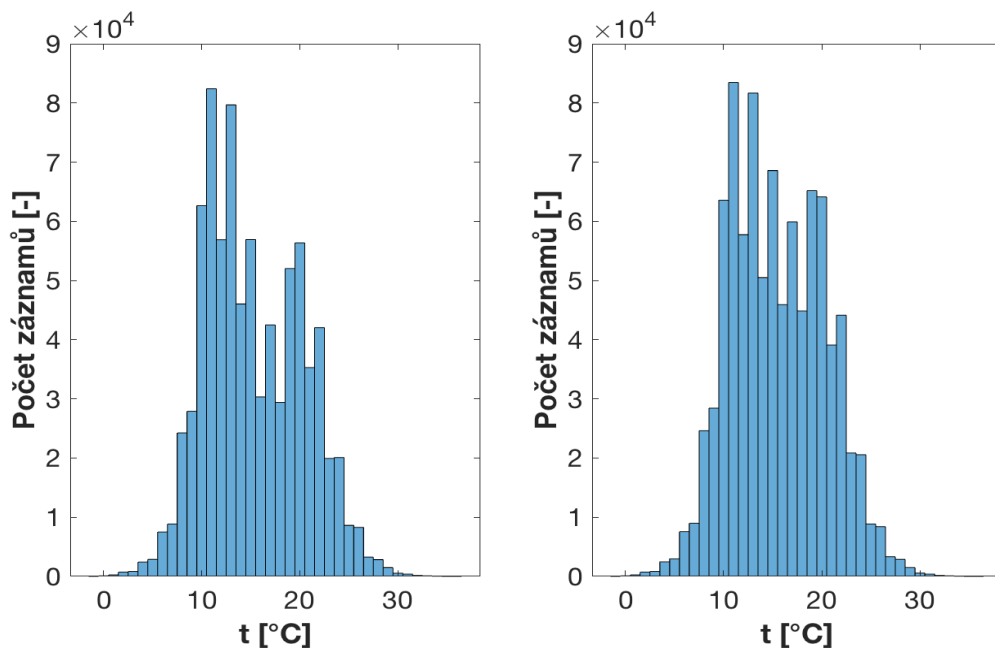
Obr. 15: Průběh okamžitých hodnot teploty napájecího zdroje během celé mise po úpravách

Průběh teploty napájecího zdroje, který byl získán po všech úpravách, je zobrazen na obrázku 15. Je hodně podobný průběhu teploty baterie. Minimální naměřená teplota je -2°C , maximální $+36^{\circ}\text{C}$, takže jde o trochu větší rozsah teplot, než u baterie.

Pravidelná periodičita průběhu teploty je i tady důsledkem synchronizace oběžné dráhy družice se Sluncem (viz. obr. 16). Zase se jedná o periodu 94 minut a 42 sekund, během které část cesty satelit letí na osvětlené straně Země a druhou část ve stínu.^[8]



Obr. 16: Průběh teploty napájecího zdroje během několika dní

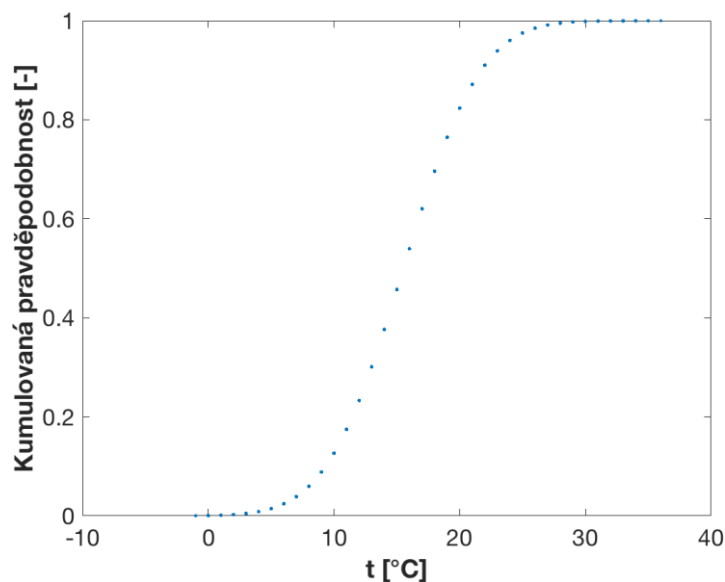


Obr. 17: Histogram rozložení teplot napájecího zdroje před a po doplnění chybějících dat

Podle tvaru histogramu na obrázku 17, větší rozsah hodnot neměl velký vliv na

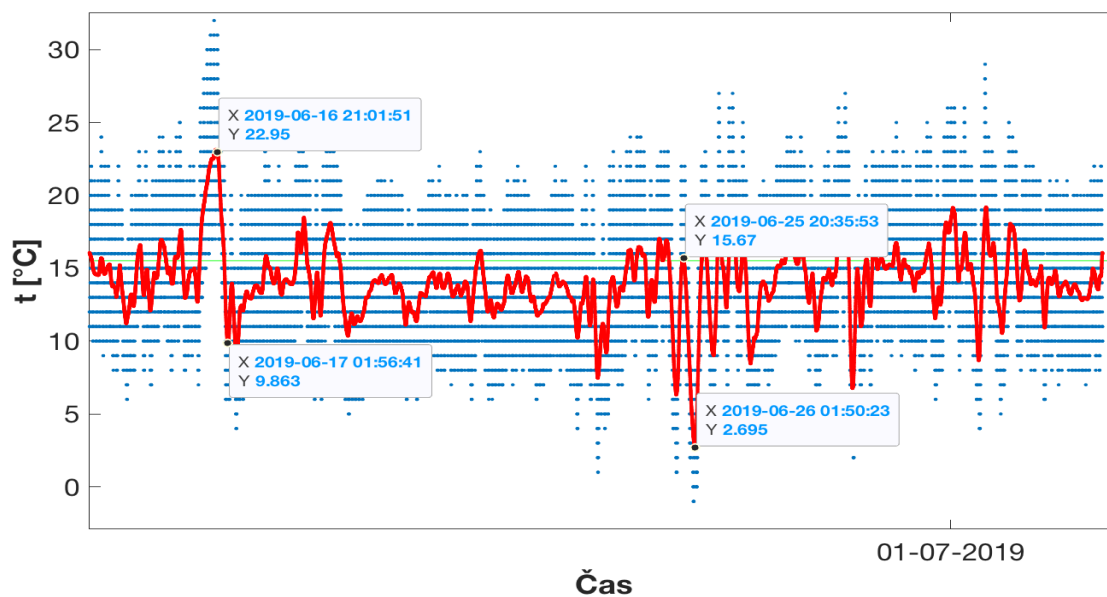
rozložení četnosti teplot. Modální hodnotou je i zde $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrná teplota se ale zvětšila na $+15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, takže jde o větší rozdíl $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Z distribuční funkce na obrázku 18 se dá určit rozpětí teplot na napájecím zdroji v 90% měření od $+7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



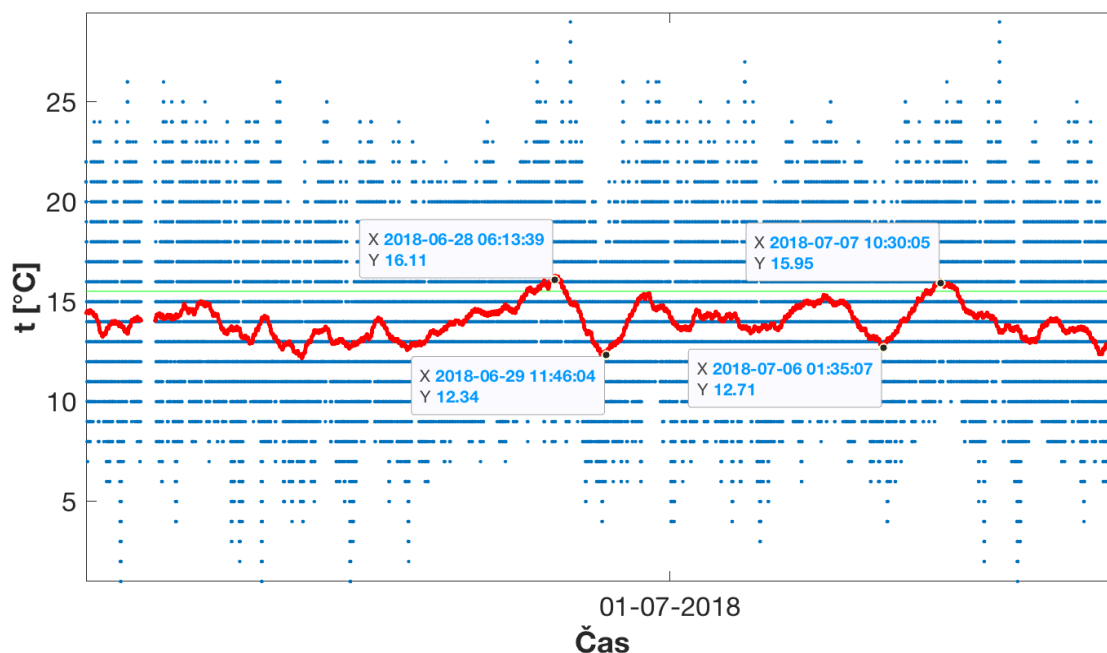
Obr. 18: Distribuční funkce teploty napájecího zdroje

Dalším krokem je opět prozkoumat průběh vypočtených průměrných tepot, které by mohly dát najevo nějaké závislosti nebo zajímavosti. Z obrázku 19 je vidět, že se tepelná bilance u napájecího zdroje může měnit stejně rychle a nepravidelně jako u baterie.



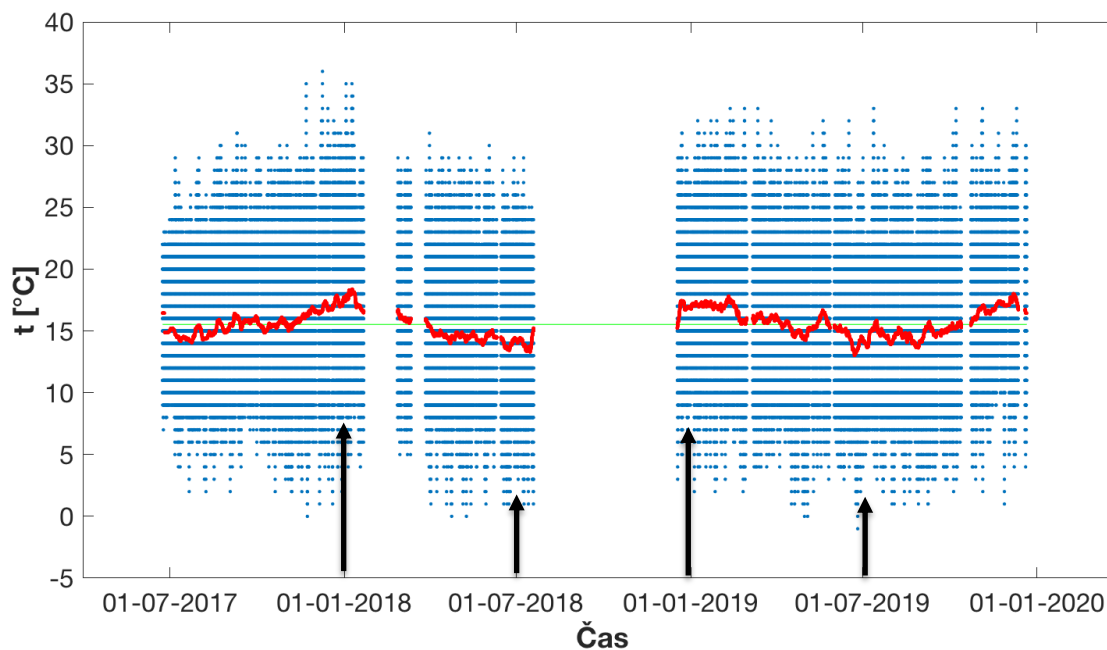
Obr. 19: Okamžité hodnoty teploty napájecího zdroje včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 obletu)

Průměr z hodnot naměřených během 1 dne na napájecím zdroji je podobný průběhu baterie.



Obr. 20: Okamžité hodnoty teploty napájecího zdroje včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 den)

Z průběhu teploty na obrázku 21 je také vidět pravidelnost ve změně tepelné bilance podle změny ročního období.

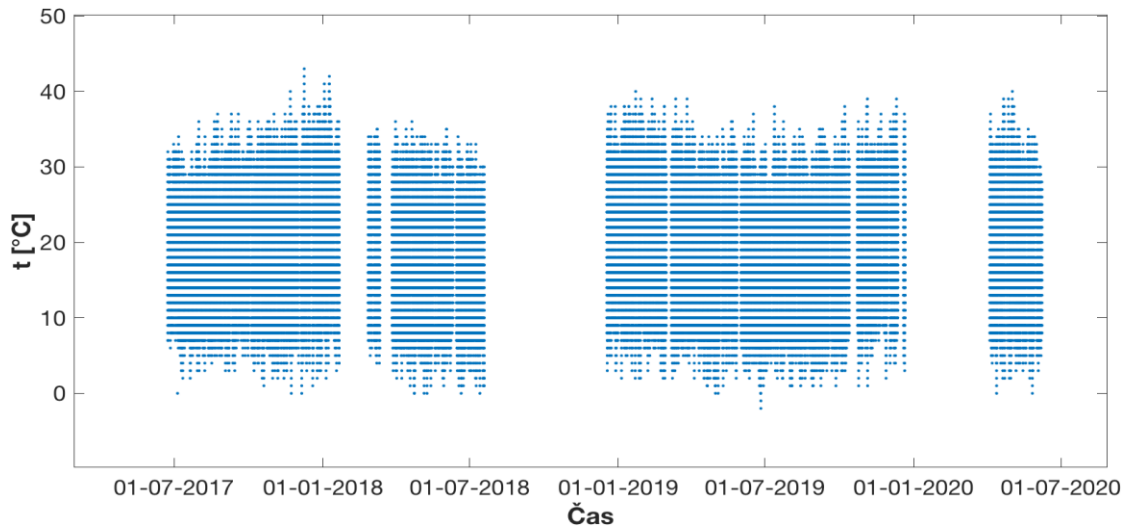


Obr. 21: Okamžité hodnoty teploty napájecího zdroje včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 týdne)

2.3. Teplota rádia

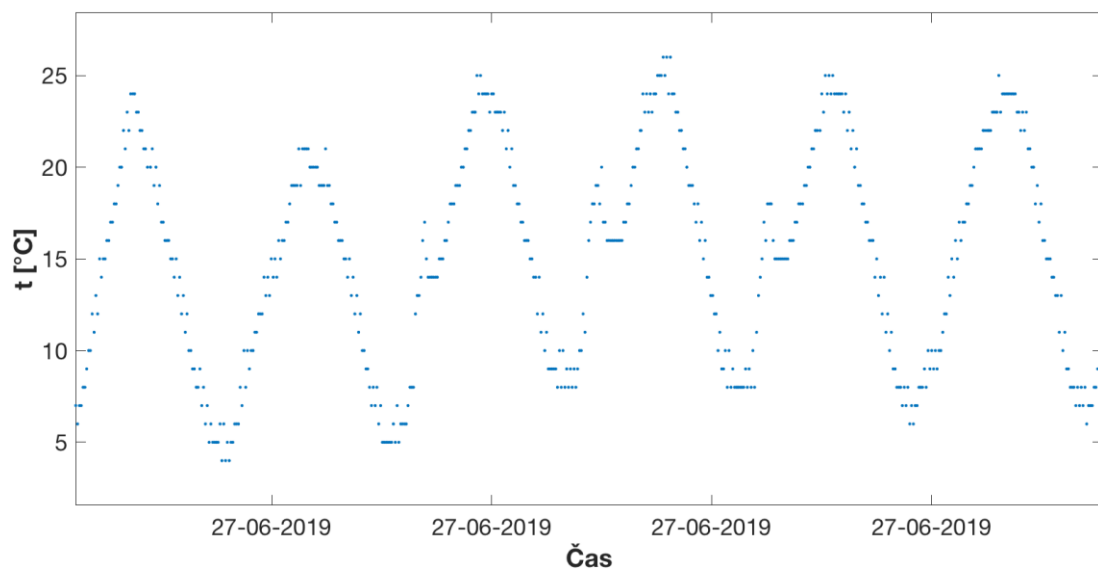
Průběh okamžitých hodnot teploty rádia na obrázku 22 na první pohled vypadá

úplně stejně, jako v předchozích podkapitolách, kde se probíraly teploty na baterie a na napájecím zdroji. Teplota se pohybuje v mezích od $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+43\text{ }^{\circ}\text{C}$. To je první odlišnost, neboť jde o větší teplotní interval než u baterie nebo napájecího zdroje.



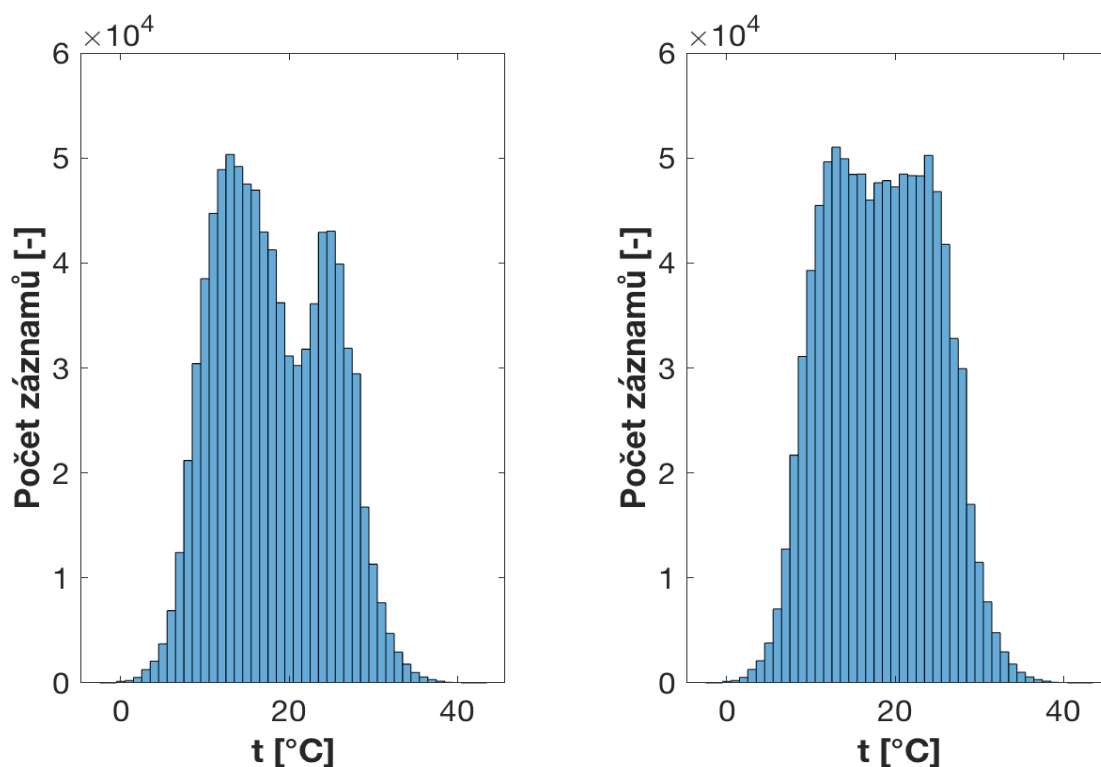
Obr. 22: Průběh okamžitých hodnot teploty rádia během cele mise po úpravách

Bližší pohled na obrázku 23 odhaluje další odlišnost. Čas od času dochází ke vzniku lokálních špiček a to vždycky 3 přelety po sobě. Takové špičky vznikají 5-6 krát denně během letu jak ve stínu, tak i na osvětlené straně. K takové náhlé změně dochází vlivem vnitřních změn (viz kapitola 2.4).



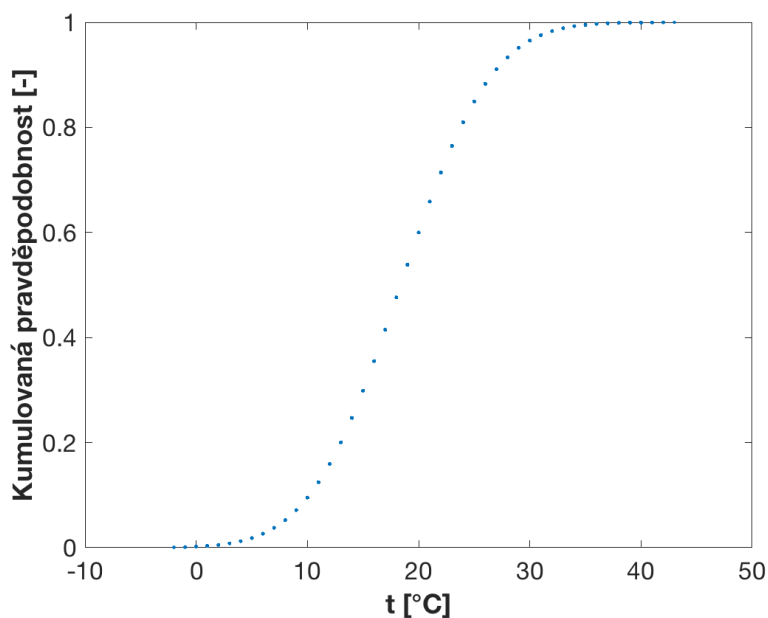
Obr. 23: Průběh teploty rádia během několika hodin

Rozložení teplot u rádia se po úpravě nejvíce podobá Gaussovu rozložení (viz. obr. 24). Nejčastěji během mise byla naměřená teplota $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$, střední hodnota se rovná $18,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 24: Histogram rozložení teplot rádia před a po doplnění chybějících dat

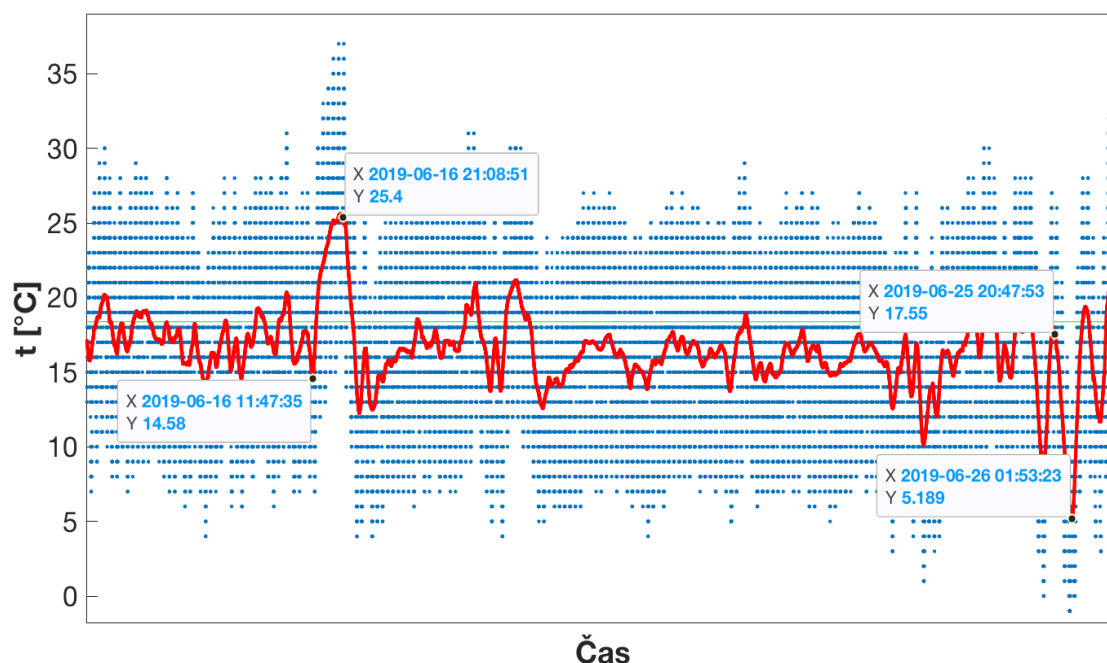
Z distribuční funkce na obrázku 25 vyplívá, že v 90% měření teplota kolísala od +8 °C do +29 °C.



Obr. 25: Distribuční funkce teploty rádia

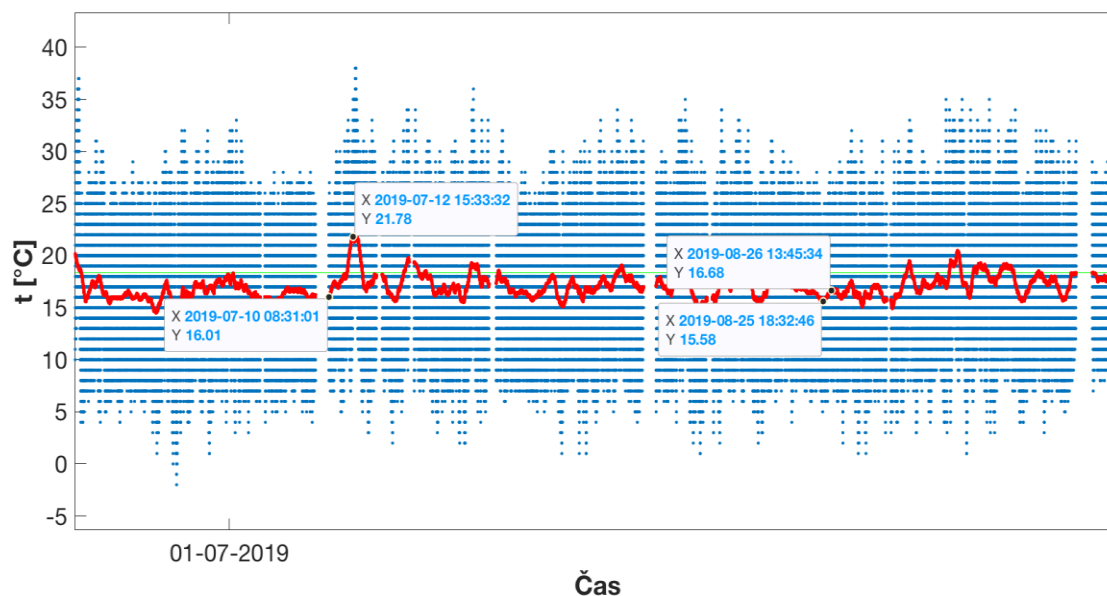
Co se týče vypočteného krátkodobého průměru teplot rádia, zobrazeného na obrázku 26, tak prokazuje stejnou závislost teploty na poloze satelitu vůči slunci jako napájecí zdroj a baterie. Rozdíl ale spočívá v okamžiku maximální nebo minimální

výchyly, které jsou označené na obrázku 27. U baterie dne 16.06.2019 došlo k maximálnímu ohřátí v 20:46, u napájecího zdroje v 21:01 a u rádia v 21:08. Časové posuny vzniku tepelných špiček jsou dány tepelnou vodivostí a tepelnými mosty mezi subsystemy satelitu.

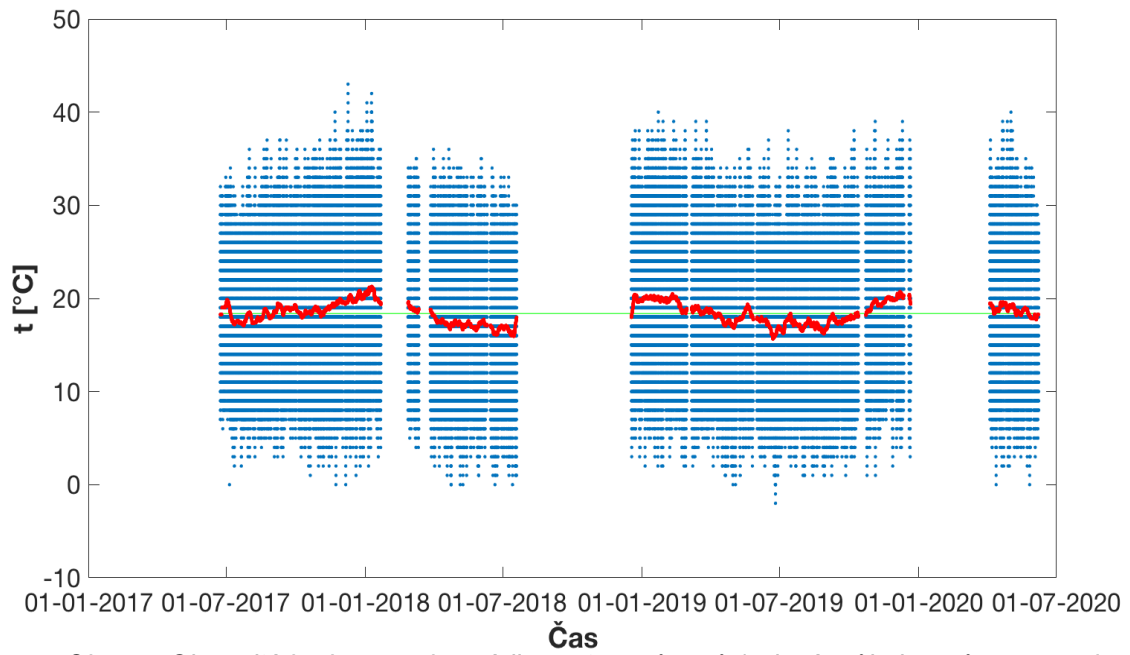


Obr. 26: Okamžité hodnoty teploty rádia včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 obletu)

Průměry, odpovídající delšímu plavoucímu oknu se také neliší svou podobou od průběhu u jiných subsystemů, ale mohou se lišit amplitudou (viz. obr. 27, obr. 28).



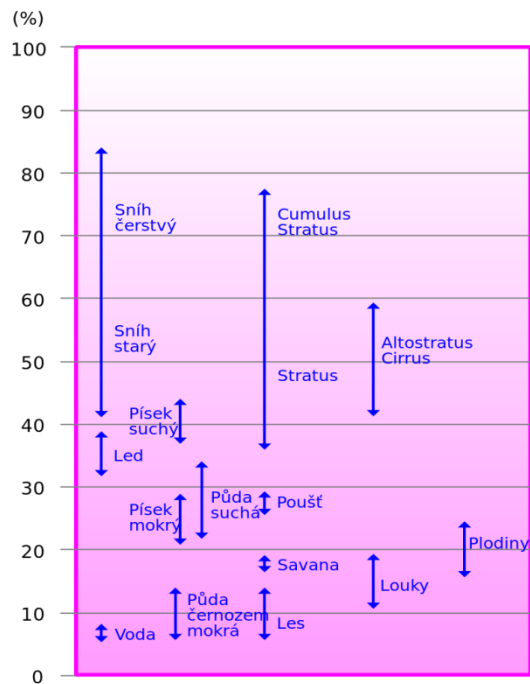
Obr. 27: Okamžité hodnoty teploty rádia včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červený průběh - průměr z hodnot naměřených během 1 dne)



Obr. 28: Okamžité hodnoty teploty rádia včetně průměrů (zelený průběh - průměr za celou dobu mise, červenou - průměr z hodnot naměřených během 1 týdne)

2.4. Tepelná rovnováha kosmických těles ve vesmíru

Hlavními faktory, které určují tepelnou rovnováhu kosmických těles pohybujících se na nízké oběžné dráze Země (160 až 2000 km), jsou jeho poloha vůči Slunci, přímé a odražené sluneční záření ze zemského povrchu, uvolňování tepelné energie během provozu palubních zařízení a radiace.^[10]

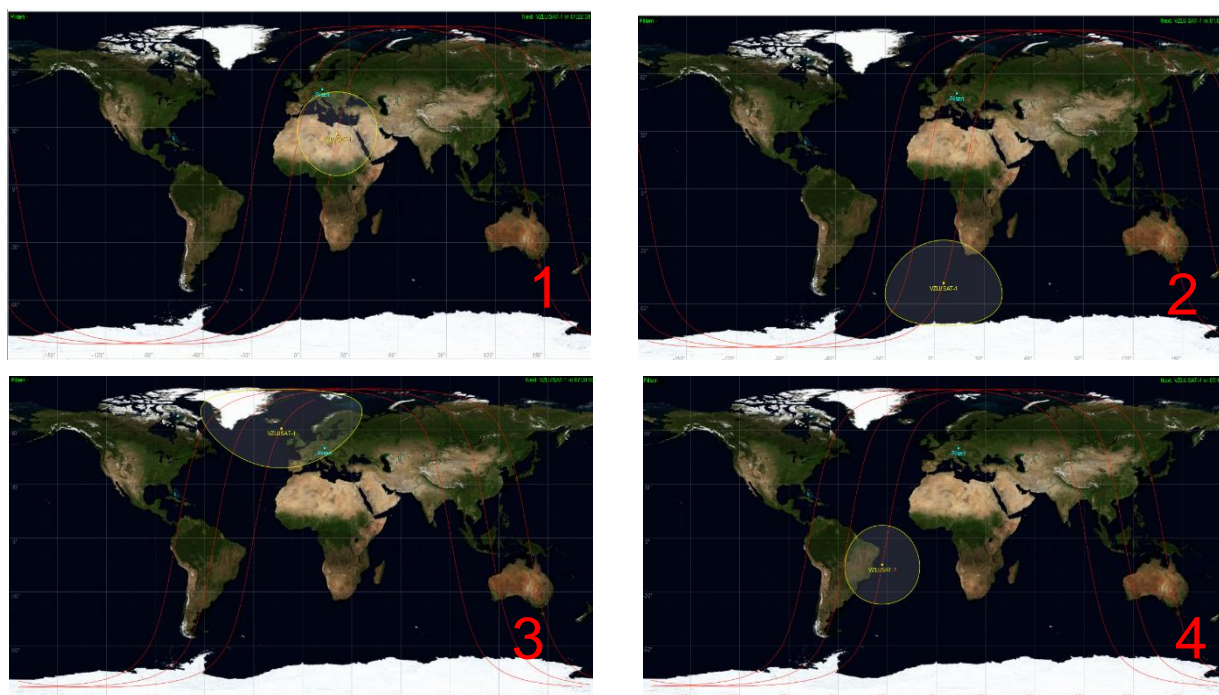


Obr. 29: Odrazivost různých typů povrchů a oblak na Zemi, údaj v procentech.^[11]

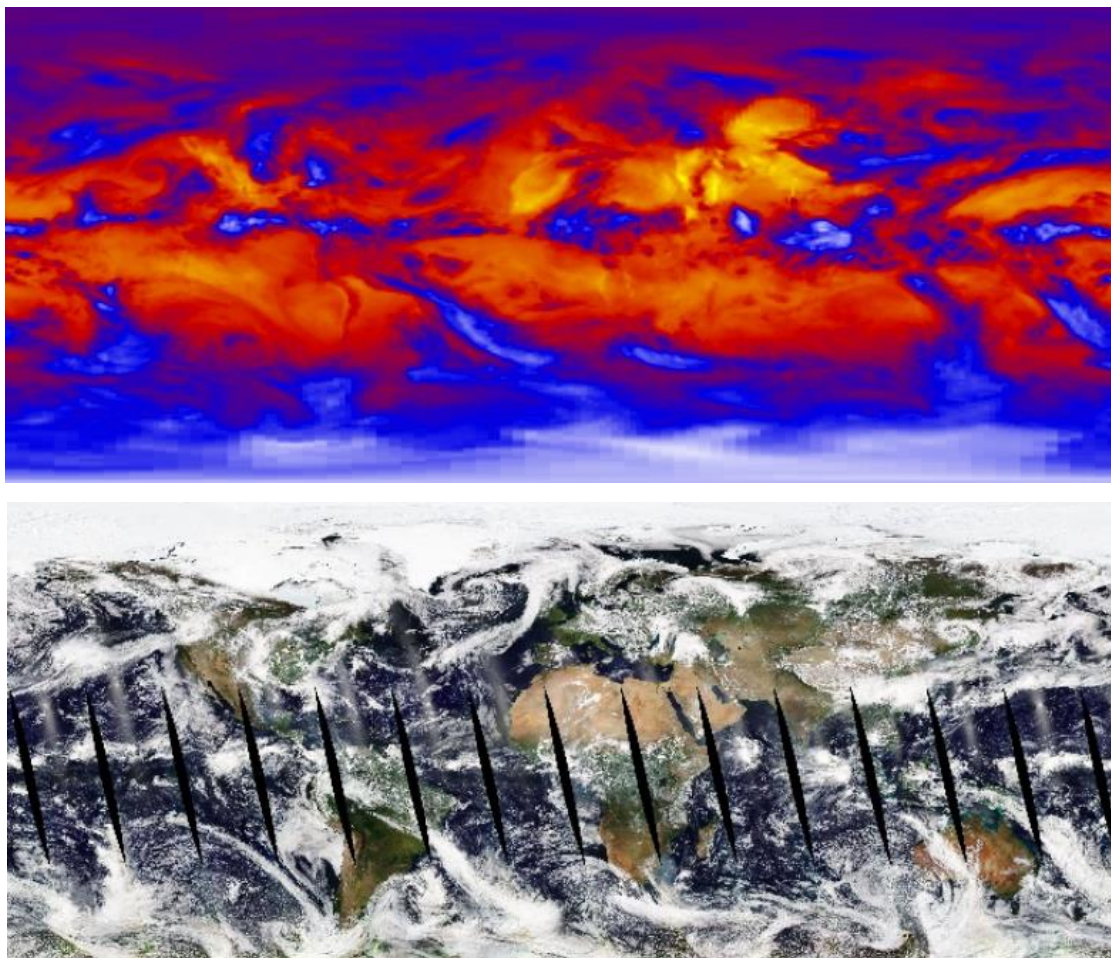
Proměnná, která popisuje schopnost těles odrážet sluneční paprsky, se nazývá albedo a udává se v procentech. *“Jde o poměr odraženého elektromagnetického záření ku množství dopadajícího záření”*.^[11] Hodnota této veličiny je podmíněna povrchem, od kterého se paprsek odráží, změnou ročního období a s tím související změnou počasí v atmosféře.

V předchozích podkapitolách, které byly věnovány rozboru naměřených teplot různých subsystémů, bylo mnohokrát zmíněno o souvislosti míry ohřátí s polohou vůči Slunci. Vznik většího, nepravidelného kolísání dat (viz. obr. 19, Obr. 26) je důsledkem jiných vnějších faktorů v atmosféře.

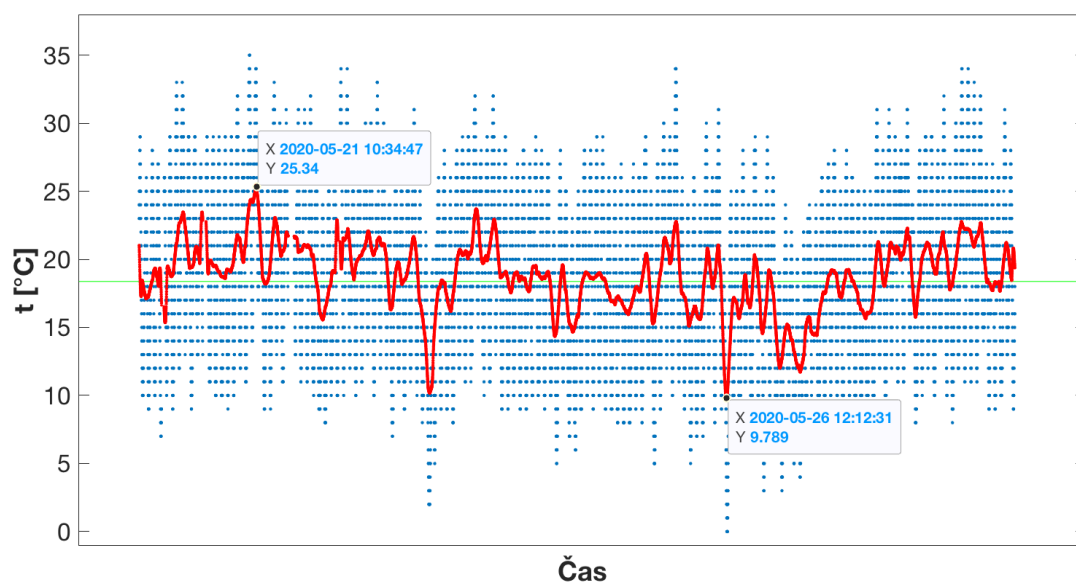
Zkontrolováním polohy satelitu pomocí TLE souborů, což jsou Kepleriánské efemeridy, ze kterých se dá poloha satelitu spočítat do budoucna i zpětně v čase, bylo zjištěno, že většinu cesty satelit udělal nad vodní hladinou (viz. obr. 30). Povrch vody má nízké albedo, takže téměř veškeré teplo vyzařované satelitem by mělo být pohlceno oceánem a tak zůstat v atmosféře. Zabránit tomu by mohly mraky, proto bylo zkontrolováno i počasí, a žádné velké zatažení oblohy se na cestě satelitu neukázalo (viz. obr. 31). Proto dne 25.05.2020 došlo k největšímu poklesu teploty v době od 21.05.2020 do 29.05.2020. (viz. obr. 32).



Obr. 30: Poloha satelitu dne 26.5.2020 mezi 8 a 14 hodinou



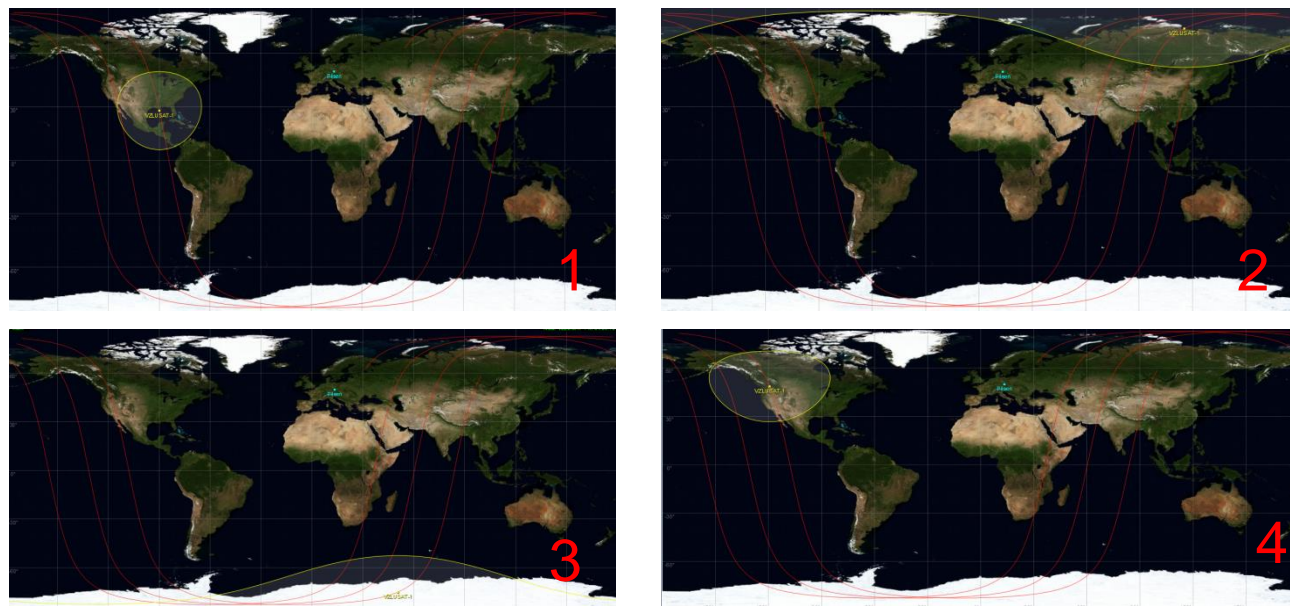
Obr. 31: 26.5.2020: horní snímek je celkové odchozí tepelné záření od povrchu Země, dolní obrázek - počasí v atmosféře^[12]



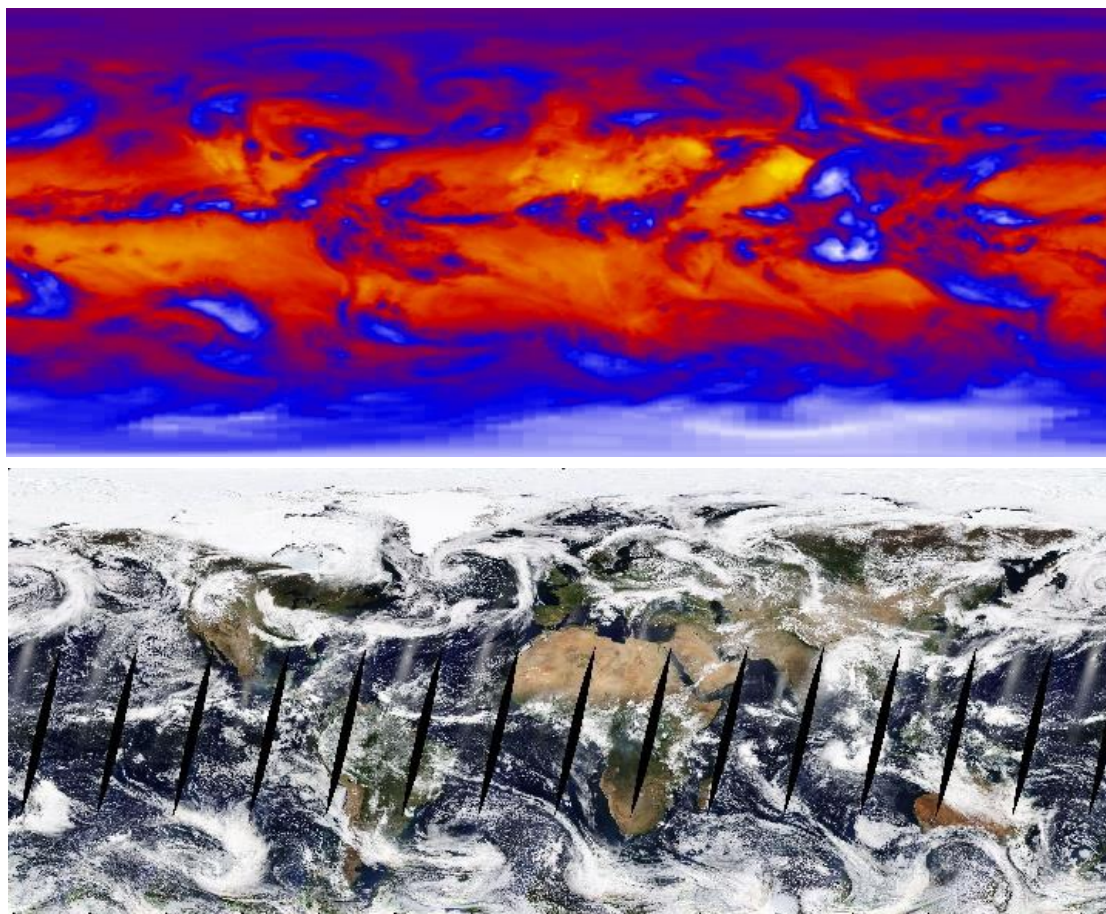
Obr. 32: Okamžité hodnoty teploty rádia včetně průměrů během období 21.05.2020 - 29.05.2020.

Opačný jev byl zaznamenán dne 21.5.2020, kdy mezi 4 až 11 hodinou satelit udělal

většinu cesty nad pevninou, kde byla zaznamenána i větší oblačnost, a proto došlo k menší tepelné výměně a proto se satelit zůstal více ohřátý (viz. obr. 33, Obr. 34)

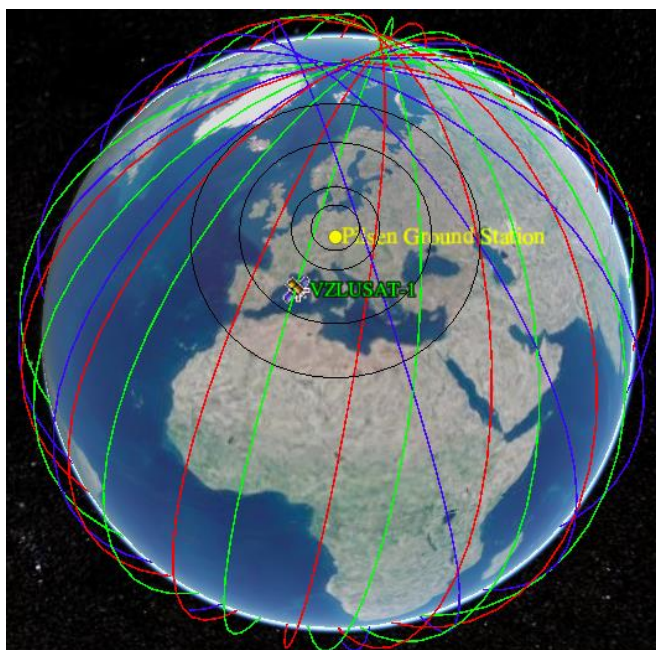


Obr. 33: Poloha satelitu dne 21.5.2020 mezi 4 a 11 hodinou



Obr. 34: 21.5.2020: horní snímek je celkové odchozí tepelné záření od povrchu Země, dolní obrázek - počasí v atmosféře^[12]

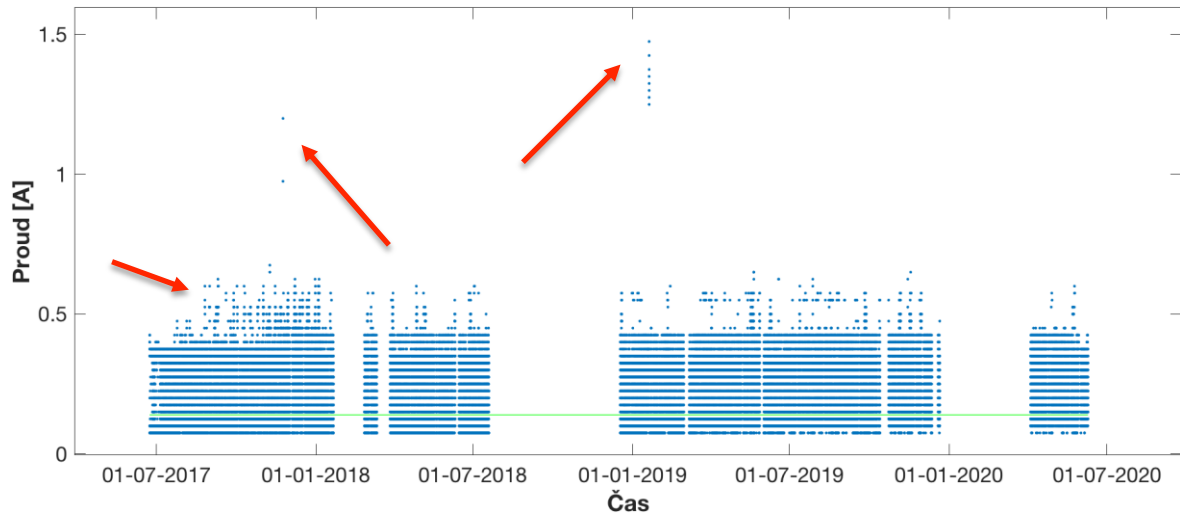
Příčinou vzniku krátkodobých teplotních špiček u rádia nebude spočívat ve změně počasí nebo intenzity radiačního záření ve vesmíru. Jde o vnitřní změnu, jako například začátek vysílání dat během kontaktu s pozemní stanicí, ke které dojde, až se satelit objeví ve vzdálenosti, která je na obrázku 35 omezena kružnicí. Zelená trajektorie, která patří satelitu VZLUSAT-1, prochází touto kružnicí 3 krát za sebou. Kontrolou polohy satelitu v době, kdy došlo k výrazným teplotním změnám, se potvrdil předpoklad, že se navázal kontakt s pozemní stanicí. V té době rádio komunikuje intenzivněji, má větší odběr a začne se rychleji ohřívat vlastní zvýšenou spotřebou. Jakmile odběr klesne po skončení kontaktu, vrací se teplotní křivka do původního stavu daného cyklováním letu ve stínu nebo na osvětlené straně.



Obr. 35: Satelit dne 17.06.2020 v 9:14

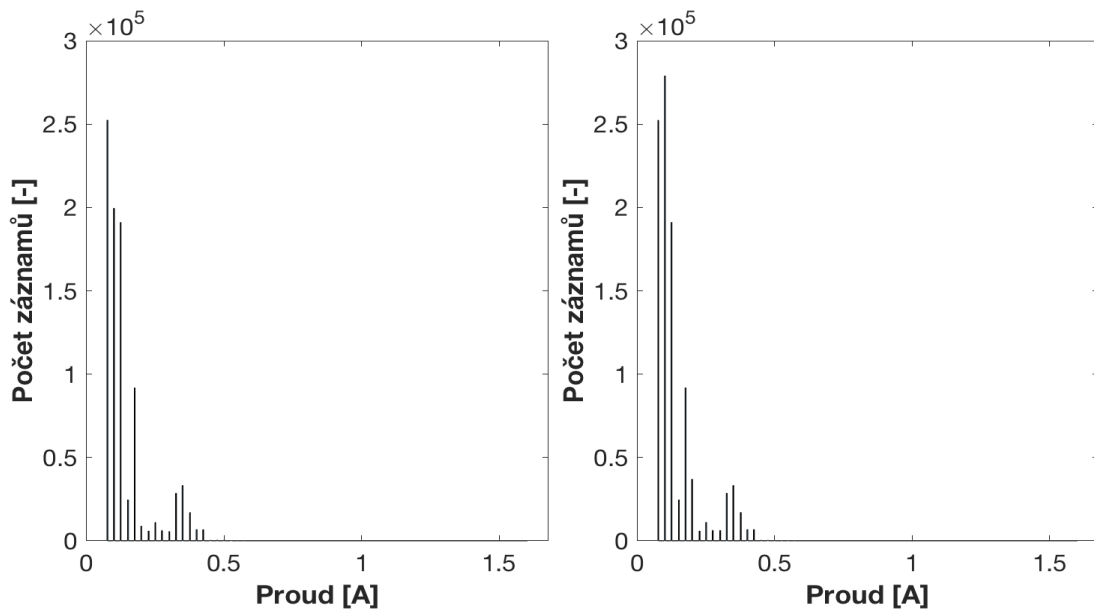
2.5. Proud na 5V sběrnici

Na obrázku 36 jsou znázorněny okamžité hodnoty proudu na 5V sběrnici. Proud kolísá v intervalu od 75 mA do 1.6 A, a průměrná hodnota se rovná 139,5 mA. Jde o docela velký rozdíl mezi maximální a průměrnou hodnotou. Taková výchylka je způsobená extrémně velkými odběry, které jsou označené na obrázku 36 šipkou. Je vidět, že tak velké odběry nejsou pravidelné, takže jde o specifický faktor, který má vliv na chování systému.



Obr. 36: Průběh okamžitých hodnot proudu na 5V sběrnici během celé mise po úpravách (zelený průběh – průměr za celou dobu mise)

Také se dá všimnout, že během prvních několika měsíců od zahájení mise došlo k postupnému nárůstu odběru. Souviselo to s tím, jak se postupně rozbíhaly jednotlivé subsystemy. Tak docházelo k zvýšení vlastní spotřeby satelitu. Později docházelo k náhlému neperiodickému stoupaní proudu, které bylo vyvoláno spouštěním vždycky omezeného počtu experimentů, aby nedošlo k přetížení systému.



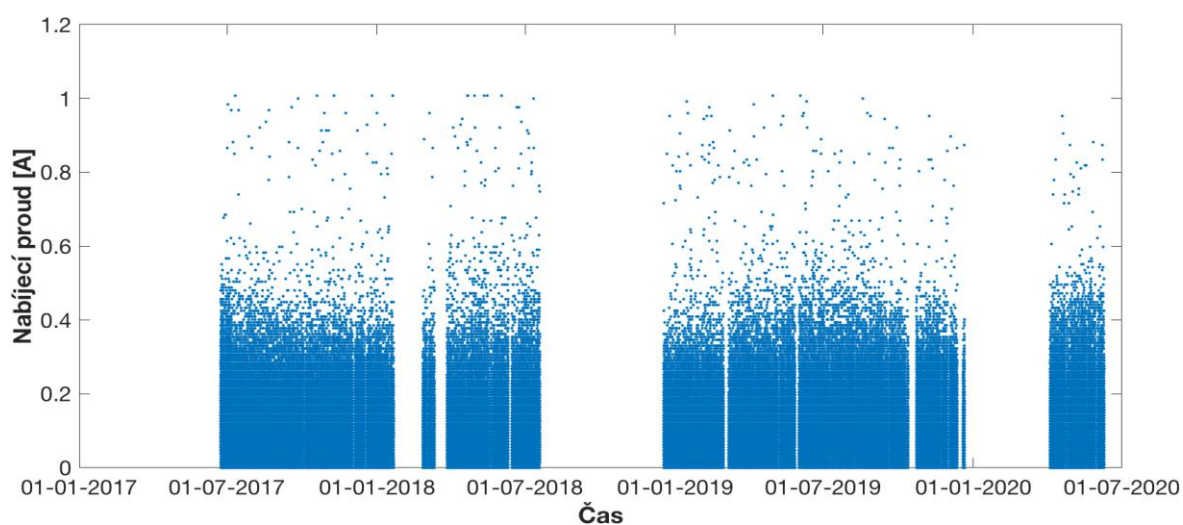
Obr. 37: Histogram rozložení proudu 5V sběrnici před a po doplnění chybějících dat

Doplnění chybějících dat nepatrně ovlivnilo rozložení hodnot, změnila se modální hodnota. Před úpravou, byla nejčastěji naměřena minimální velikost proudu 75 mA, po úpravě se zvětšil počet hodnoty 100 mA (viz. obr. 37). Celkově se z histogramu dá posoudit, že k většímu proudovému odběru docházelo málokdy. Výsledek neodpovídá Gaussovu rozložení.

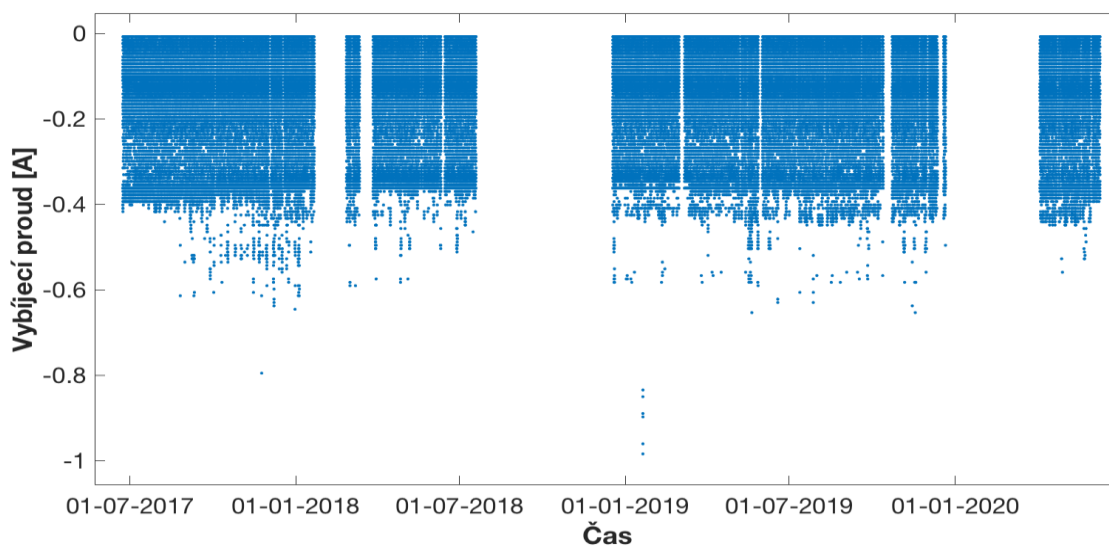
2.6. Proud baterie

Celkový průběh proudu baterie po úpravách byl rozdělen na dva oddělené: jeden znázorňuje nabíjecí proud (viz. obr. 38), ten druhý je věnován vybíjecímu proudu (viz. obr. 39).

Nabíjení a vybíjení netrvá stejně dlouho, protože nabíjení baterie satelitu může probíhat jenom v době letu na osvětlené straně, ve které se on nachází delší dobu, než ve stínu (viz. obr. 43). Z obrázku 41, na kterém je zobrazena základní perioda je vidět, že doba nabíjení je 59-60 minut, a doba vybíjení 34-35 minut (viz. obr. 42).



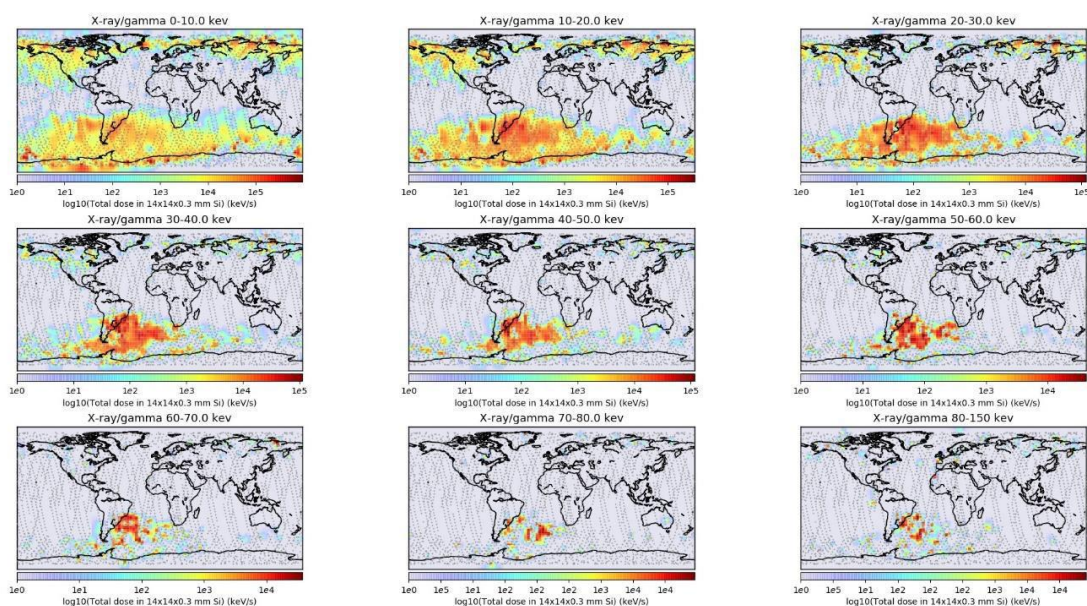
Obr. 38: Průběh okamžitých hodnot nabíjecího proudu baterie během celé mise po úpravách



Obr. 39: Průběh okamžitých hodnot vybíjecího proudu baterie během celé mise po úpravách

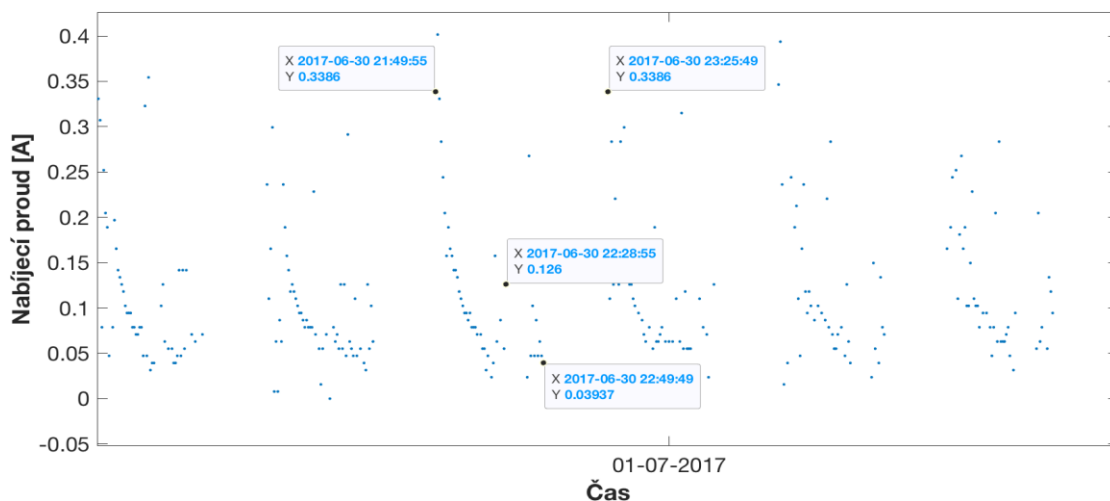
V době, kdy na 5V sběrnici došlo k zvýšení odběru (viz. obr. 36), u baterie došlo k náhlému nárůstu vybíjecího proudu. Zkontrolováním záznamu o aktivitě experimentů bylo zjištěno, že žádný z nich v té době neprobíhal. Tím se vylučuje první předpoklad, že došlo k přetížení systému. Také nedošlo k velké změně teploty na žádném ze sledovaných systémů a tím se vylučuje i teplotní účinek. Posledním předpokladem je, že došlo k chybě měření vlivem radioaktivního záření (viz. obr. 40). Dne 20.01.2019 v 4:32, kdy došlo ke krátkodobému zvýšení spotřeby, satelit prolétal nad západním pobřežím Severní Ameriky.

Poloha satelitu v době zvýšení odběru nevyklučovala radiální událost. Zpětným dohledáním v letním deníku bylo zjištěno, že se satelit v dané době naházel v tak zvané *Commissioning* fázi, kdy se snažil opět o uvolňování antén. Uvolňovací mechanismus spotřeboval vysoké hodnoty proudu aby došlo ke spolehlivému přepálení uvolňovacích mechanismů.

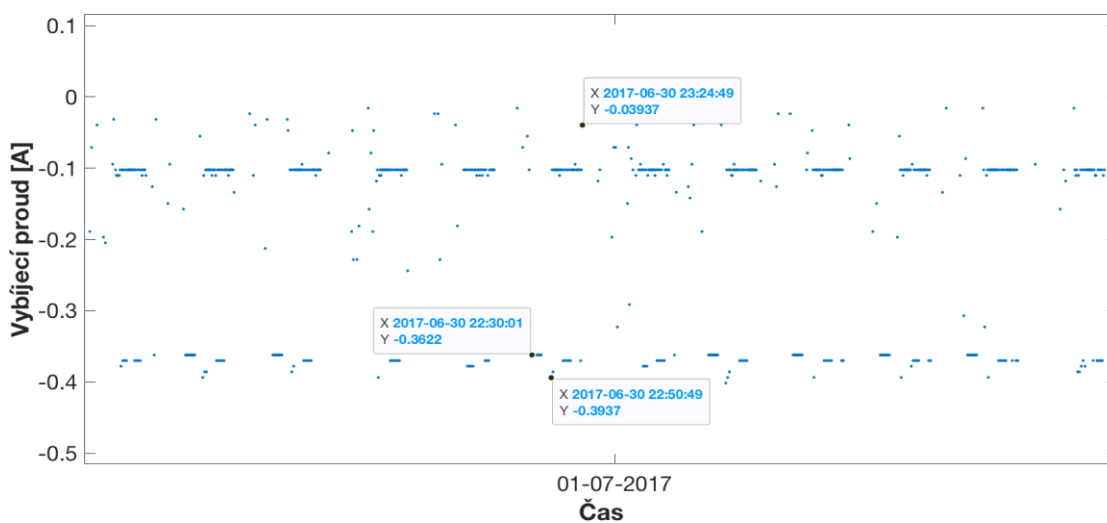


Obr. 40: Záznam intenzity radiálního záření satelitem VZLUSAT-1^[13]

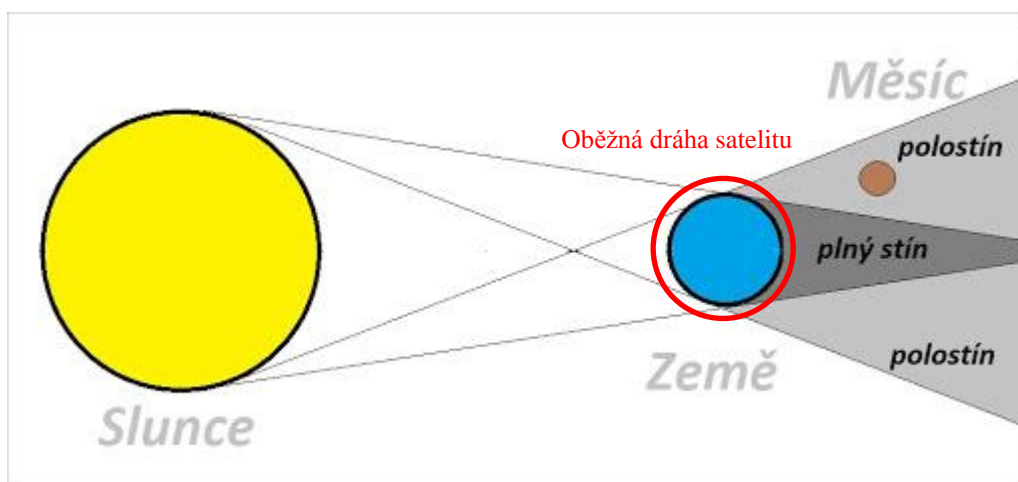
Občas se stalo, že i během letu na osvětlené straně došlo k náhlé změně polarity proudu. Taková změna souvisí s tím, jak je natočen satelit vůči Slunci. Jsou-li solární panely, které zásobují subsystemy energií, skryté před slunečním zářením a spotřeba systémů je velká, dojde k vybíjení baterie. Jakmile se satelit otočí do “správné” polohy, změní se polarita proudu a bude se pokračovat v nabíjecím cyklu (viz. obr. 41, Obr. 42).



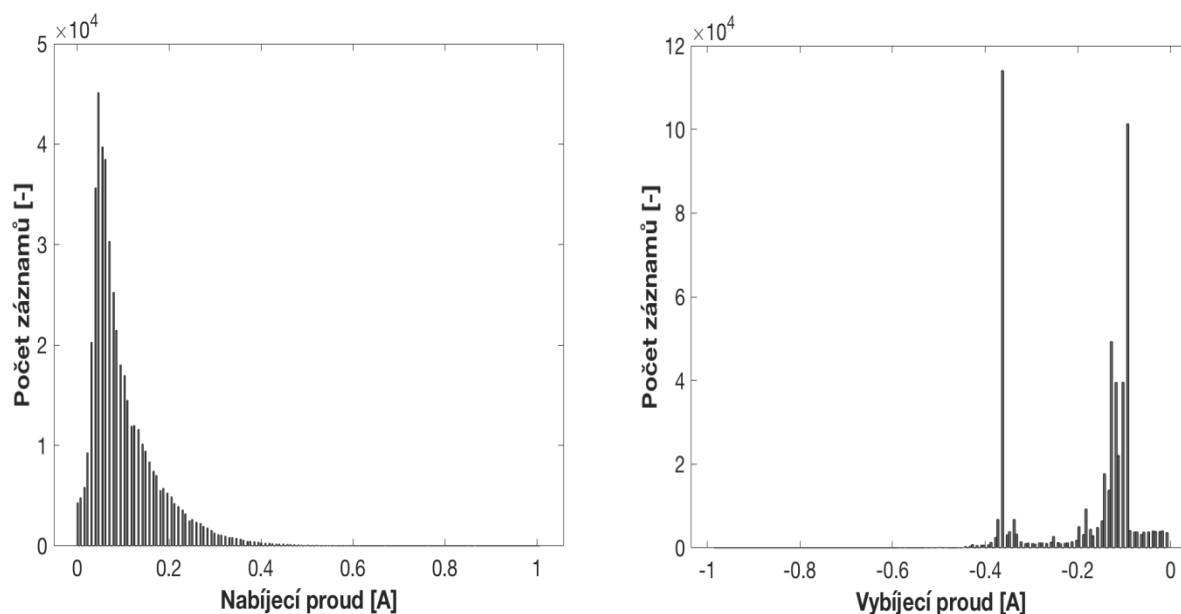
Obr. 41: Průběh nabíjecího proudu během několika hodin



Obr. 42: Průběh vybíjecího proudu během několika hodin



Obr. 43: Demonstrace poměru doby na osvětlené straně a ve stínu

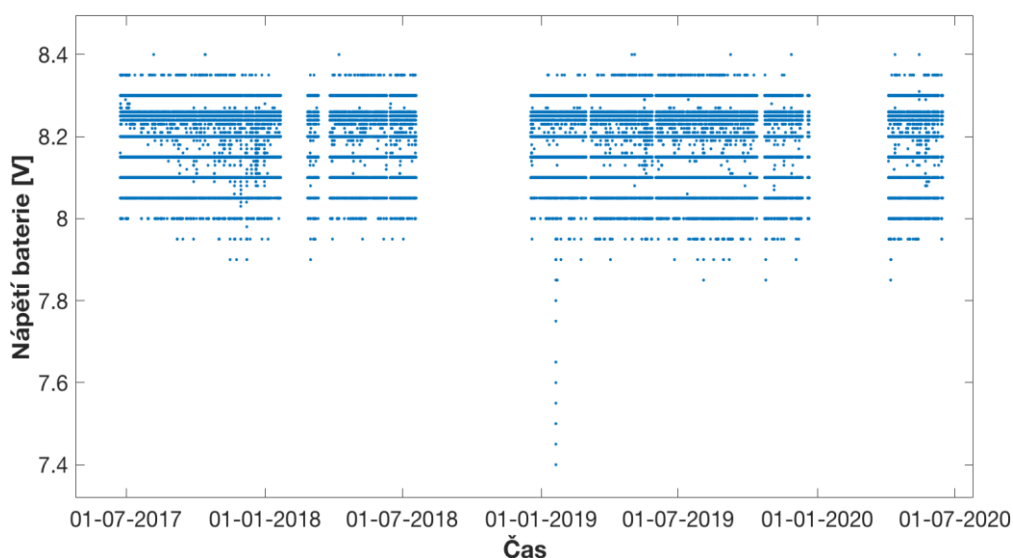


Obr. 44: Histogram rozložení hodnot proudu baterie

Rozložení hodnot proudu baterie také neodpovídá Gaussovu rozložení. Modální hodnota nabíjecího proudu je 47,2 mA , modální hodnota vybíjecího proudu je -362,2 mA .

2.7. Napětí baterie

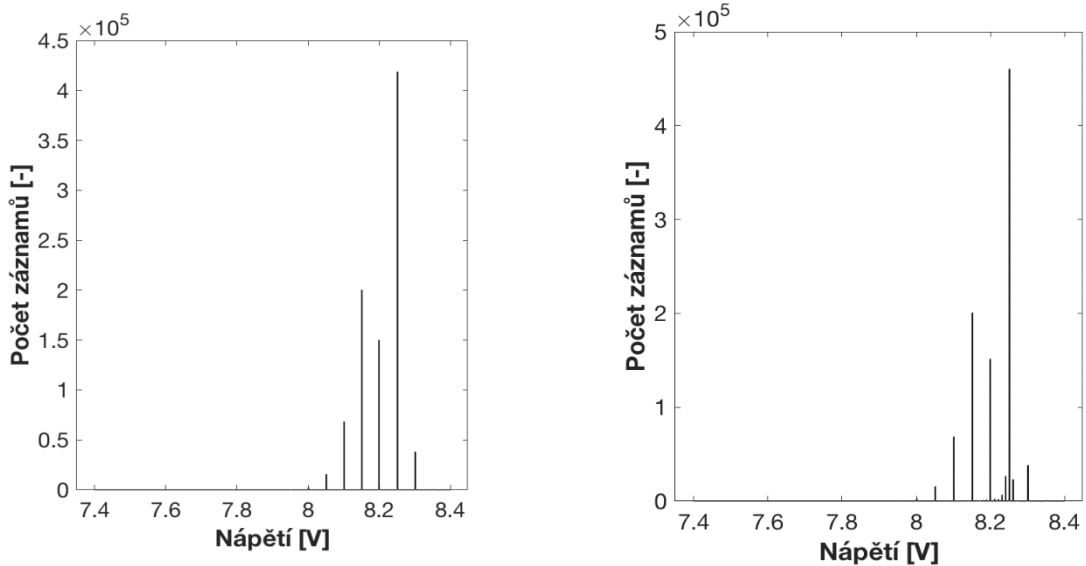
Výsledný průběh okamžitých hodnot napětí baterie je znázorněn na obrázku 45. Z něj je vidět, že minimální naměřená hodnota se rovná 7,4 V, a maximální 8,4V. Zvýšení vybíjecího proudu, o kterém se mluvilo v předchozí podkapitole, způsobilo větší vybití a tím i pokles napětí na 7,4 V.



Obr. 45: Průběh okamžitých hodnot napětí baterie během celé mise po úpravách

Modální hodnota je 8,25 V, střední se rovná 8,2 V. Rozložení hodnot napětí neodpovídá Gaussovu rozložení. Baterie satelitu je tvořena sériovým řazením 2 Li-ion

článků, s uvedených průběhu napětí tedy vyplývá, že nedocházelo k příliš velkému vybíjení těchto baterií. Baterie je svojí kapacitou naddimenzována aby se mělkými vybíjecími cykly prodloužila její životnost.



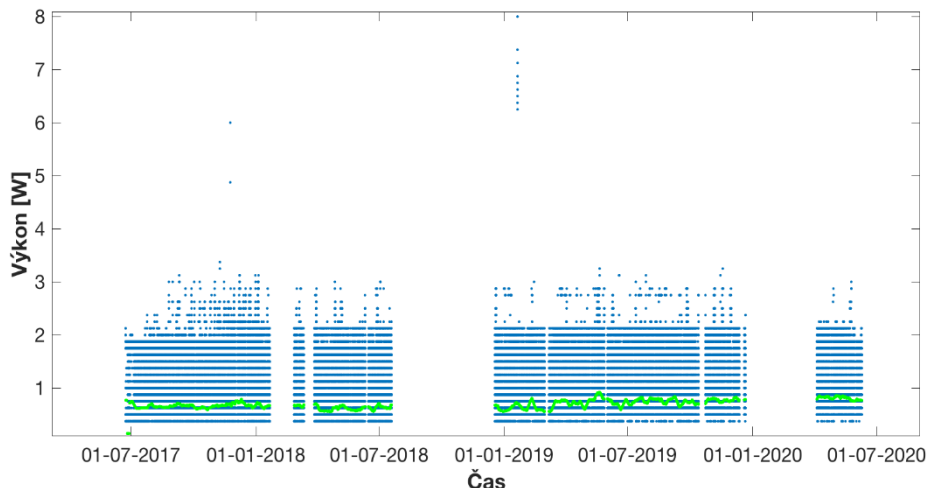
Obr. 46: Histogram rozložení hodnot napětí baterie

3. Rozbor dodatečně vypočtených údajů

Dodatečné výpočty, kterým je věnována tato kapitola, pomohou posoudit stav a funkčnost subsystémů satelitu a udělat dlouhodobou predikci. Destruktivní změny mohou být způsobené intenzivním radiačním zářením a velkou zátěží systémů probíhajícími experimenty během mise.

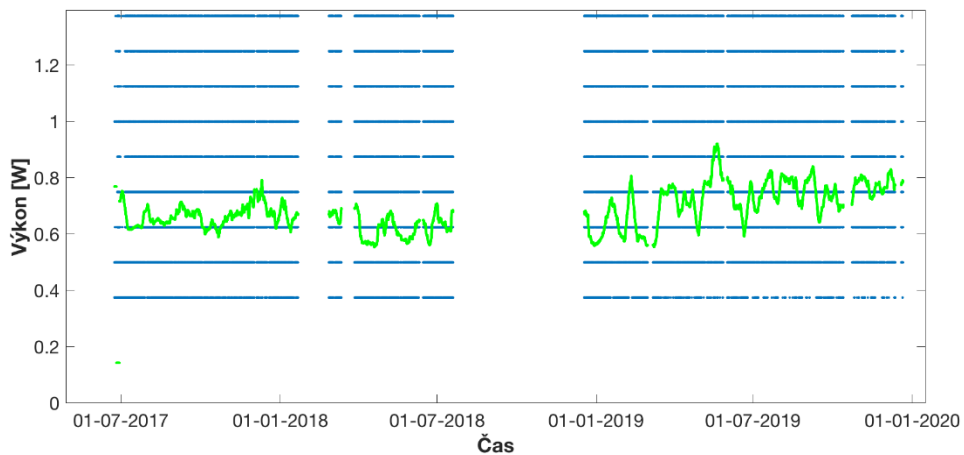
3.1. 5V sběrnice

U 5V sběrnice se bude řešit hlavně příkon, výpočtem kterého se dá zjistit, jestli nedochází k nárůstu klidové spotřeby obvodů.



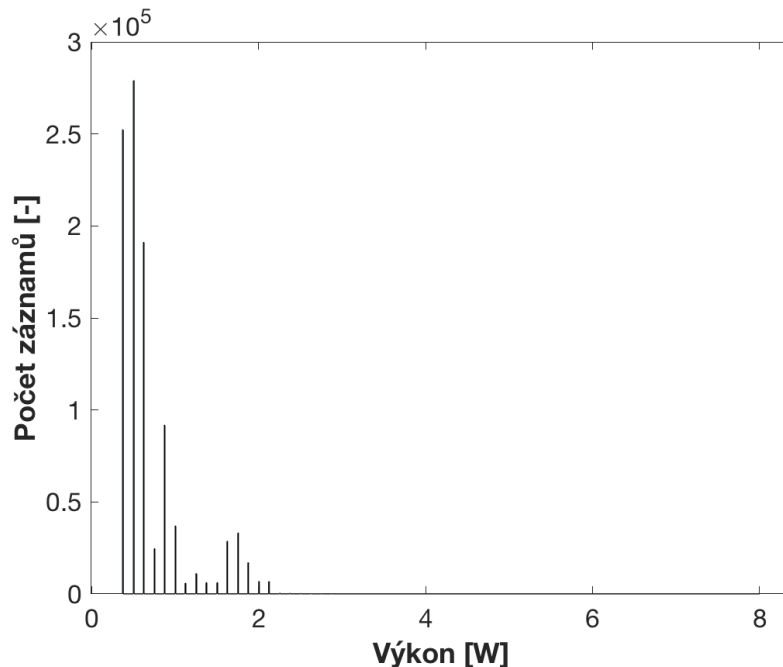
Obr. 47: Spočítaný příkon na 5V sběrnici během celé mise včetně průměru

Ani hodnoty výkonu, ani následně vypočtený dlouhodobý průměr neprokazují výraznou změnu v chování systému od začátku mise (viz. obr. 47). V první polovině roku 2019 ale došlo k většímu kolísání hodnot v porovnání s dřívějším a pozdějším obdobím měření (viz. obr. 48). V této druhé půlce běhu mise ten narůst je dán zvětšením četnosti měření, protože se podařilo optimalizovat souběh experimentů a datovou propustnost komunikačního spoje.



Obr. 48: Bližší pohled na změnu příkonu v první polovině roku 2019

Střední hodnota příkonu je a v provozu je od 23.06.2017 26186 hodin, jeho spotřeba je 18,3 kWh.



Obr. 49: Histogram rozložení hodnot výkonu

3.2. Baterie

Při výběru baterií pro satelitní misi je důležité zajistit, aby odolaly nepřátelskému

prostředí setkávané ve vesmíru a dokázaly pracovat v nepřetržitém procesu nabíjení a vybíjení.

Kapacita, která se jeví jako jeden z nejdůležitějších parametrů, je ovlivněná různými faktory: teplotou, nabíjecím/vybíjecím proudem, hloubkou vybíjecího cyklu (jak moc byla baterie vybita) - čím je menší, tím méně energie je schopna dodat do systému. Tento parametr se dá zkontrolovat výpočtem poměru vstupního a výstupního náboje. Kvůli velmi hrubému vzorkování (po 1 minutě) nebylo možné dostat uspokojivý výsledek, který by mohl správně demonstrovat případné destruktivní změny v stavu baterie.

4. ZÁVĚR

Cílem této odborné práce bylo provést analýzu telemetrických dat, které byly zaznamenané satelitem VZLUSAT-1 během mise, která pokračuje do dnes. Veškerá informace se ukládá do databázi na základě požadavku, určených mezinárodním projektem QB50, součástí kterého je tato nanodružice.

K dispozici jsou naměřené po minutě hodnoty napětí a proudu baterie, proudu na 5V sběrnice, teploty rádia, napájecího systému a baterie. Doba vzorkování není zcela optimální pro provedení detailní a přesné analýzy, přesto ve vykreslených průbězích okamžitých hodnot každého ze zmíněných parametrů se prokázaly zajímavé souvislosti.

Tepelnou bilanci těles, které se pohybují na nízké oběžné dráze, ovlivňuje spousta různých faktorů. Periodická podoba průběhu okamžitých hodnot teploty je způsobená tím, jak satelit obíhá okolo Země. Jeden oblet trvá 94 minut a 42 sekund. Z toho část cesty je na osvětlené straně, kde dochází k ohřátí satelitu přímým slunečním zářením. Pak cesta pokračuje ve stínu, kde se satelit ochlazuje infračerveným vyzařováním a celkovou tepelnou bilanci se Zemi a okolním vesmírem. Výpočtem plovoucího průměru z hodnot, naměřených během 1 periody, se ukázalo, že množství tepla dodaného Sluncem a vyzařovaného satelitem není pokaždé stejné, a že během několika hodin může dojít k výraznému stoupaní nebo poklesu teploty. Určujícím faktorem je to, jestli větší část cesty byla nad pevninou nebo nad vodní hladinou a jestli bylo zataženo nebo ne, neboť jde o schopnost různých látek odrážet elektromagnetické záření. Letí-li satelit nad vodou, dochází k většímu ochlazení, je-li zataženo, satelit zůstane více ohřátý. U rádia se prokázal

vliv i vnitřních změn na teplotu. Během letu v dostatečné blízkosti od pozemní stanice docházelo k navázání kontaktu, během kterého satelit posílal informaci. Tím se zvyšovala vlastní spotřeba a docházelo k většímu ohřátí. Po ukončení se teplotní křivka vracela do původního stavu. Změna plovoucího průměru, vypočteného z hodnot naměřených během týdne, souvisela se změnou vzdáleností Země od Slunce kvůli eliptičnosti zemské orbity. Blíže k lednu docházelo k stoupaní teploty nad průměrnou hodnotu za dobu celé mise, kdy je Země nejbližší k Slunci. Naopak, v červenci vzdálenost je větší a proto je menší teplota. U každého ze sledovaných systémů nedošlo k poklesu naměřené teploty pod -2°C , ale maximální hodnoty se lišili (rádio $+43^{\circ}\text{C}$, baterie $+32^{\circ}\text{C}$, napájecí zdroj $+36^{\circ}\text{C}$). Z výsledku je zřejmé, že vnitřní systémy satelitu nejsou vystaveny nijak extrémnímu rozsahu teplot a běžná elektronika v průmyslové třídě je schopná provozu v těchto teplotních rozsazích.

Hodnoty proudu 5V sběrnici neprokázaly tendenci zvýšení vlastní spotřeby subsystémů.

Hodnoty napětí na baterie nevykazují známky hlubokého vybíjení a stav baterie lze ocenit jako dobrý. Bohužel k malé četnosti měření proudu nebylo možné spolehlivě ověřit nábojovou a energetickou účinnost baterie.

5. Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *ČESKÁ TECHNOLOGICKÁ NANODRUŽICE* [online]. Praha: VZLU, 2017 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://vzlusat1.cz/cs/>
- [2] *Přispěvatelé Wikipedie, CubeSat* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 5. 06. 2020, 05:53 UTC, [citováno 16. 06. 2020] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=CubeSat&oldid=18608719>
- [3] *ALDEBARAN BULLETIN* [online]. AGA, 2017, **15**(31) [cit. 2020-06-16]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_31_csf.php
- [4] *ČESKÁ TECHNOLOGICKÁ NANODRUŽICE: MINIATURIZOVANÝ RENTGENOVÝ DALEKOHLED. VZLUSAT-I* [online]. Praha: Výzkumný a zkušební letecký ústav, 2017 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://vzlusat1.cz/cs/miniaturizovany-rentgenovy-dalekohled/>
- [5] *Úklid na oběžné dráze. Satelit poprvé v historii vystřelil síť a zachytil vesmírný odpad. IROZHLAS* [online]. Londýn: Český rozhlas, 2018 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/vesmir/kosmicke-smeti-harpuna-sit-removedebris_1809191902_mat
- [6] T. Scholz *Whole Orbit Data Packet Format*. von Karman Institute for Fluid Dynamics Aeronautics / Aerospace Department. Rev. 4, 23.10.2014.
- [7] MathWorks. Product Documentation. [online]. Poslední změna 10.8.2011. [Cit. 10.8.2011]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.html>
- [8] *Přispěvatelé Wikipedie, VZLUSat-I* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 2. 06. 2019, 06:05 UTC, [citováno 16. 06. 2020] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=VZLUSat-1&oldid=17311185>
- [9] *Přispěvatelé Wikipedie, Heliosynchronní dráha* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 17. 11. 2019, 05:49 UTC, [citováno 17. 06. 2020] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Heliosynchronn%C3%AD_dr%C3%A1ha&oldid=17857619
- [10] *HEGAB, Tamer. Equilibrium Temperature of a Satellite in Low-Earth Orbit. Science and Education of the Bauman MSTU* [online]. 2015, **15**(02) [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.7463/0215.0758801. ISSN 19940408. Dostupné z: <http://technomag.bmstu.ru/doc/758801.html>
- [11] *Přispěvatelé Wikipedie, Albedo* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2018, Datum poslední revize 17. 12. 2018, 18:14 UTC, [citováno 17. 06. 2020] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Albedo&oldid=16787179>
- [12] *NEO* [online]. USA: EOS Project Science Office, 2016 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MYD_143D_RR&year=2020&fbclid=IwAR2Mb72v0WMRJhJa4WVHAJCKxGQ1I5qqJXDOInFWB0UWsHXS0UVLQVanE2
- [13] *VZLUSAT-1 oslavil dva roky v kosmu. Kosmonautix.cz* [online]. ČR: Wolfenstein News, Finance Blog and Fashion Dress, 2019 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.kosmonautix.cz>

Přílohy

Příloha A - Ukázka scriptu pro úpravy dat teploty pro další zpracování

```
% načtení .csv souboru
p = readtable('wod2_tcom.csv');
x4 = datetime(p{:,1});
y4 = str2double(p{:,2});

% korekce datetime
m = min(x4);
t = m - minutes(1:3192);
rok = find(year(x4) == 2036);
x4(rok) = sort(t);
y = y4;

% nalezení polohu chybejícího useku
[a] = find(y4 == -15);
y(a) = NaN;

% doplněné lineární posloupnosti
for i = 1 : length(a)
    if(y4(a(i)-1)~= -15)
        prom1 = y4(a(i)-1);
        index1=a(i);
    end
    if(y4(a(i)+1)~= -15)
        prom2=y4(a(i)+1);
        index2=a(i);

        krok = (prom2 - prom1)/(index2 - index1);
        if(krok ~= 0)
            y4(index1:index2) = (prom1 : krok : prom2);
        else
            y4(index1:index2) = (prom1);
        end
    end
end
end

y4 = round(y4);
```

Příloha B - Výpočty průměrů

% prumer za celou dobu

```
mean1 = nanmean(y4);
```

% prumer za 1 oblet

```
mean2=zeros(1, length(y4)); % alokace promene pro prumer, aby se nealokovala v kazde iteraci cyklu
```

```
mean2(1:47)=nanmean(y4(1:95)); % osetreni prumerovani na zacatku, kdy jeste neni dost hodnot do klouzaveho prumeru
```

```
mean2(length(y4)-47:length(y4))=nanmean(y4(length(y4)-94:length(y4))); % osetreni prumerovani na konci, kdy uz neni dost hodnot do klouzaveho prumeru
```

```
for i=48:length(y4)-48
```

```
    mean2(i)=nanmean(y4(i-47:i+47)); % prumer z 47 hodnot pred az 47 hodnot po aktualnim indexu i
```

```
end;
```

% prumer za 1 den

```
mean3=zeros(1, length(y4)); % alokace promene pro prumer, aby se nealokovala v kazde iteraci cyklu
```

```
mean3(1:721)=nanmean(y4(1:1441)); % osetreni prumerovani na zacatku, kdy jeste neni dost hodnot do klouzaveho prumeru
```

```
mean3(length(y4)-721:length(y4))=nanmean(y4(length(y4)-1440:length(y4))); % osetreni prumerovani na konci, kdy uz neni dost hodnot do klouzaveho prumeru
```

```
for i=722:length(y4)-722
```

```
    mean3(i)=nanmean(y4(i-721:i+721)); % prumer z 721 hodnot pred az 721 hodnot po aktualnim indexu i
```

```
end;
```

% prumer za tyden

```
mean4=zeros(1, length(y4)); % alokace promene pro prumer, aby se nealokovala v kazde iteraci cyklu
```

```
mean4(1:5041)=nanmean(y4(1:10081)); % osetreni prumerovani na zacatku, kdy jeste neni dost hodnot do klouzaveho prumeru
```

```
mean4(length(y4)-5041:length(y4))=nanmean(y4(length(y4)-10080:length(y4))); % osetreni prumerovani na konci, kdy uz neni dost hodnot do klouzaveho prumeru
```

```
for i=5042:length(y4)-5042
```

```
    mean4(i)=nanmean(y4(i-5041:i+5041)); % prumer z 5041 hodnot pred az 5041 hodnot po aktualnim indexu i
```

```
end;
```

Příloha C - Distribuční funkce

```
pd = fitdist(round(y4),'Normal');  
p = cdf(pd,round(y4));  
plot(round(y4),p, 'o')  
xlabel('t [°C]','FontSize',16,'FontWeight','bold')  
ylabel('Kumulovaná pravděpodobnost [-]','FontSize',16,'FontWeight','bold')  
set(gca,'FontSize',16)
```