



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**PICOBALLOON S VYUŽITÍM LOW-POWER  
BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ**

PICOBALLOON USING LOW-POWER WIRELESS NETWORKS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. MATĚJ KUDERA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. VLADIMÍR JANOUŠEK, Ph.D.**

BRNO 2024

## Zadání diplomové práce



162622

Ústav: Ústav inteligentních systémů (UITS)  
Student: **Kudera Matěj, Bc.**  
Program: Informační technologie a umělá inteligence  
Specializace: Inteligentní zařízení  
Název: **Picoballoon s využitím low-power bezdrátových sítí**  
Kategorie: Softwarové inženýrství  
Akademický rok: 2023/24

### Zadání:

1. Seznamte se s technologií sítí LPWAN a s vhodnými moduly pro bezdrátovou komunikaci, prostudujte nabídku low-power mikrokontrolérů od firmy NXP a vyberte vhodný mikrokontrolér a GPS modul pro aplikaci v PicoBaloonu. Prostudujte možnosti napájení PicoBaloonu a vyberte vhodný způsob s ohledem na výdrž po dobu několika dní.
2. Navrhněte schéma a DPS pro PicoBaloon s ohledem na malé rozměry a maximální přípustnou hmotnost 20 gramů. PicoBaloon musí umožňovat zaznamenávání přibližné polohy a výšky a tyto údaje odesílat prostřednictvím sítě LPWAN. Rovněž navrhněte aplikaci, která bude zpracovávat data přijatá pomocí LPWAN sítě a bude umožňovat vykreslení dráhy letu.
3. Osadte a oživte DPS a implementujte FW do mikrokontroléru, který bude umožňovat záznam a odesílání dat o poloze. Implementujte navrženou aplikaci pro sběr dat a jejich prezentaci.
4. Otestujte funkčnost PicoBaloonu, tím že ho vypustíte a zaznamenáte dráhu letu.

### Literatura:

Dle pokynů vedoucího.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Janoušek Vladimír, doc. Ing., Ph.D.**  
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.  
Datum zadání: 1.11.2023  
Termín pro odevzdání: 31.7.2024  
Datum schválení: 8.7.2024



## Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit malou meteorologickou sondu (PicoBalloon), která bude zaznamenávat svoji polohu a základní meteorologické informace. Tyto získané informace je následně nutné přeposlat uživateli, aby je mohl zhodnotit. Teoretická část této práce popisuje principy, jak tento typ zařízení navrhnu, a technologie, které jsou vhodné pro jeho implementaci. Součástí je také popisy co přesně znamená pojem PicoBalloon, ze kterého jsou následně odvozeny požadavky na tvořený systém. Na základě popsaných technologií a požadavků na tvořený systém byl následně vytvořen návrh, který popisuje, jak toto zařízení implementovat. Výsledkem návrhu je systém o dvou částech. První část je samotná meteorologická sonda, která je implementována na vlastní desce plošných spojů. Sonda je řízena malým mikrokontrolérem a obsahuje komponenty, které jí umožňují provoz na solární energii, určení polohy pomocí GPS, změření meteorologických veličin a získané informace odeslat pomocí bezdrátové technologie. Druhá část systému je internetová aplikace, která odeslaná data načte a zobrazí je uživateli. Závěr této práce obsahuje popis sestavení systému a jeho následné otestování.

## Abstract

Aim of this master thesis was to create a small meteorological probe (PicoBalloon) which can record its position and basic meteorological information. Information recorded by this probe has to be transmitted to the user so it can be evaluated. Theoretical portion of this work describes how to create this type of device and which technologies can be used for its implementation. Next, information describing what exactly PicoBalloon is are presented, which are then used to form requirements for this system. Based on described technologies and system requirements final system design was created. Created system consists of two parts. First part is the probe itself which is created on its own piece of printed circuit board. Probe is controlled by a small microcontroller and consists of components that can generate power with a small solar panel, determine its position with GPS, record meteorological information and send recorded information to the user with wireless technology. Second part of the created system is a web application which presents recorded data to the user. At the end of this thesis physical creation and testing of this system is described.

## Klíčová slova

PicoBalloon, návrh DPS, mikrokontrolér, IoT zařízení, autonomní systémy, bezdrátová komunikace, Sigfox, LoRa, LoRaWAN, družicové komunikační systémy, Iridium, Argos, družicové polohové systémy, GPS, Galileo, GLONASS, Troposféra, environmentální limity zařízení

## Keywords

PicoBalloon, PCB creation, microcontroller, IoT device, autonomous systems, wireless communication, Sigfox, LoRa, LoRaWAN, satellite communication systems, Iridium, Argos, satellite navigation, GPS, Galileo, GLONASS, Troposphere, environmental limits of device

## Citace

KUDERA, Matěj. *Picoballoon s využitím low-power bezdrátových sítí*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír Janoušek, Ph.D.

# Picobaloon s využitím low-power bezdrátových sítí

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Vladimíra Janouška, Ph.D. Další informace mi poskytl Marek Vitula z firmy NXP Semiconductors. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Matěj Kudara  
24. července 2024

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladimíru Janouškovi, Ph.D. a konzultantovi z firmy NXP Semiconductors Marku Vitulovi za odbornou pomoc a cenné rady, které mi pomohly při řešení této práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Internet of things</b>	<b>4</b>
2.1	Historie IoT zařízení . . . . .	5
2.2	Aplikace IoT zařízení . . . . .	7
2.3	Struktura IoT zařízení . . . . .	8
2.4	Architektura IoT systémů . . . . .	9
2.5	Podpůrné technologie důležité pro tvorbu IoT zařízení . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Energy harvesting</b>	<b>13</b>
3.1	Běžná struktura Energy harvesteru . . . . .	14
3.2	Zdroje energie Energy harvesterů . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Bezdrátová komunikace s dlouhým dosahem pro malá zařízení</b>	<b>16</b>
4.1	Sigfox . . . . .	17
4.2	The Things Network . . . . .	18
4.3	Iridium . . . . .	20
4.4	Argos . . . . .	21
4.5	Swarm . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Družicové polohové systémy</b>	<b>25</b>
5.1	Princip fungování družicových polohových systémů . . . . .	26
5.2	Struktura družicových polohových systémů . . . . .	27
5.3	Přehled globálních družicových polohových systémů . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Návrh desek plošných spojů</b>	<b>30</b>
6.1	Výroba desek plošných spojů . . . . .	31
6.2	Typy desek plošných spojů . . . . .	31
6.3	Typy součástek pro desky plošných spojů . . . . .	32
<b>7</b>	<b>PicoBaloon</b>	<b>33</b>
7.1	Historie PicoBaloonů . . . . .	33
7.2	Komerční použití PicoBaloonů . . . . .	34
7.3	Soutěže s PicoBaloony . . . . .	36
<b>8</b>	<b>Specifikace tvořeného PicoBaloonu</b>	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>Návrh struktury systému</b>	<b>40</b>
9.1	Struktura PicoBaloonu . . . . .	40

9.2	Struktura webové aplikace . . . . .	43
<b>10</b>	<b>Výběr komponent pro PicoBaloou</b>	<b>45</b>
10.1	Generování elektrické energie . . . . .	45
10.2	Uložení elektrické energie . . . . .	47
10.3	Upravení napájecího napětí na konstantní hodnotu . . . . .	48
10.4	Mikrokontrolér . . . . .	49
10.5	Senzory . . . . .	49
10.6	Komunikační moduly . . . . .	51
10.7	Cena za hlavní komponenty . . . . .	53
<b>11</b>	<b>Fyzické zařízení PicoBaloou</b>	<b>54</b>
11.1	Tvorba schémat zapojení . . . . .	54
11.2	Tvorba desek plošných spojů . . . . .	61
11.3	Objednání desek a komponent PicoBaloou . . . . .	66
11.4	Sestavení zařízení PicoBaloou . . . . .	68
<b>12</b>	<b>Ovládací firmware PicoBaloou</b>	<b>70</b>
12.1	Výběr hardwaru pro testování . . . . .	70
12.2	Již dostupný software . . . . .	71
12.3	Funkčnost ovládacího firmwaru . . . . .	72
12.4	Měření spotřeby primárních částí PicoBaloou . . . . .	76
<b>13</b>	<b>Aplikace pro zobrazení získaných dat z PicoBaloou</b>	<b>78</b>
13.1	Získání dat z komunikačních sítí . . . . .	78
13.2	Databáze pro uložení dat z PicoBaloou . . . . .	79
13.3	Webová aplikace pro zobrazení dat . . . . .	80
13.4	Zprovoznění webové aplikace . . . . .	82
<b>14</b>	<b>Testování PicoBaloou a výsledné zhodnocení</b>	<b>83</b>
14.1	Testování funkčnosti zařízení během jeho sestavování . . . . .	83
14.2	Testování PicoBaloou na zemi . . . . .	86
14.3	Testovací vypuštění PicoBaloou přivázaného k zemi . . . . .	90
14.4	Finální vypuštění PicoBaloou . . . . .	93
14.5	Vylepšení PicoBaloou a zobrazovací aplikace . . . . .	96
<b>15</b>	<b>Závěr</b>	<b>97</b>
	<b>Literatura</b>	<b>98</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého paměťového média</b>	<b>102</b>
<b>B</b>	<b>Komponenty potřebné k sestavení zařízení PicoBaloou</b>	<b>103</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Nedílnou součástí každodenního života jsou aktuální a přesné meteorologické informace, které jsou využívány jak obyčejnými lidmi, tak i důležitými institucemi, které řeší například bezpečnost letecké a lodní dopravy. Za účelem získání kvalitních informací, které se následně používají v meteorologických modelech, se dnes používá velké množství zařízení, jako jsou například družice, pozemní stanice nebo meteorologické sondy. Meteorologické sondy jsou nedílnou součástí meteorologie, protože během jejich výstupu shromažďují informace z různých vrstev atmosféry, které jsou nezbytné pro kvalitní předpověď. Problém s meteorologickými sondami je dnes takový, že jsou většinou určeny pro jedno použití, takže až dosáhnou maximální výšky, ve které praskne jejich balón, zřítí se k zemi a tam většinou zůstávají. Tato nevýhoda meteorologických sond je ještě znásobena tím, že v některých oblastech, kde je potřeba přesné informace, jsou meteorologické sondy posílány velice frekventovaně (třeba i každý den). Pokrok technologií umožňuje tento problém alespoň trochu řešit tvorbou malých meteorologických balónů (PicoBaloony), které jsou stále k jednomu použití, avšak jsou menší než dnes běžně používané meteorologické sondy (250 - 500g), takže se méně znečišťuje prostředí a plýtvá materiálem.

Z tohoto důvodu se tato práce zabývá tvorbou malé testovací meteorologické sondy, která bude mít maximálně 20 g a bude měřit pár meteorologických veličin spolu s polohou, kde byly tyto hodnoty naměřeny. Tato meteorologická sonda bude implementována na vlastní desce plošných spojů a bude ovládána malým mikrokontrolérem. Další komponenty, přítomny na desce sondy, budou umožňovat napájení zařízení, změření potřebných hodnot a jejich následné odeslání přes bezdrátovou technologii s dlouhým dosahem a malou spotřebou energie pro přenos. Tyto hodnoty budou následně zobrazeny uživateli přes webovou aplikaci, ve které se zobrazí, kde se sonda nachází a jaké hodnoty změnila.

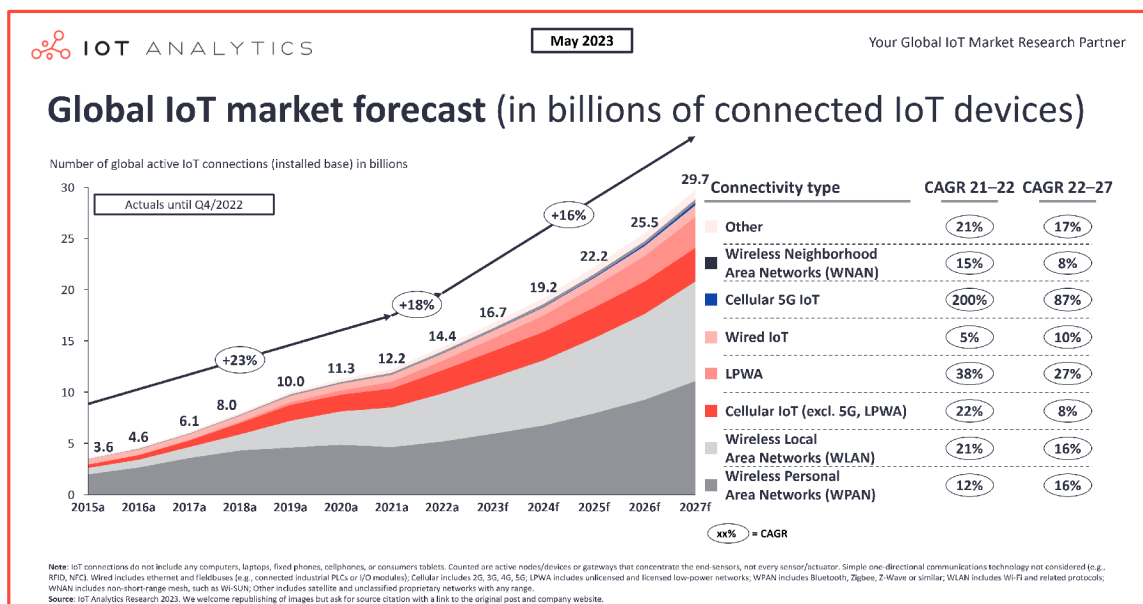
Poté, co bude sonda vytvořena, bude otestována jejím vypuštěním na heliovém balónku a budou zhodnoceny informace, které vysílá.

## Kapitola 2

# Internet of things

Pojem Internet of things (IoT) [13] [24] je poměrně obsáhlý, avšak primárně slouží k označení zařízení, která jsou vybavena nějakými senzory a konektivitou, která jim umožňuje komunikovat s dalšími zařízeními. Do tohoto pojmu náleží velký počet zařízení s poměrně rozdílnými vlastnostmi. IoT zařízení je například chytrý telefon, který obsahuje rozsáhlé uživatelské rozhraní, velkou skupinu senzorů a robustní operační systém. Naproti tomu IoT zařízení je i senzor vlhkosti půdy umístěný v květináči ovládaný jednoduchým mikrokontrolérem, který jednou za hodinu pošle naměřenou hodnotu na nějaký server pro další zpracování. Další příklady IoT zařízení jsou uvedeny dále v textu.

Tvorba IoT zařízení zahrnuje celou škálu technologií, mezi které patří například tvorba vestavěných zařízení, návrh senzorů, strojové učení nebo i drátové a bezdrátové komunikace. Rozsáhlý vývoj v těchto technologiích a technologiích jim příslušných, pozorovaný během posledního desetiletí měl za následek masivní nárůst IoT zařízení [36]. Počet IoT zařízení připojených k internetu je vyobrazen na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Graf zobrazující počet IoT zařízení připojených k internetu do roku 2023. Další roky jsou predikce.<sup>2</sup>

Název Internet of things může být závadějící, protože IoT zařízení nemusí být nutně připojeno k internetu, ale může to být i jiná síť, která dovoluje komunikaci mezi IoT zařízeními. Příkladem takovýchto sítí může být LoRaWAN<sup>3</sup> nebo Sigfox<sup>4</sup>. Tyto sítě jsou popsány dále. Často však platí, že i ostatní sítě pro IoT zařízení jsou připojeny k internetu a tím pádem dokáží zprostředkovat komunikaci mezi jejich IoT zařízeními a zařízeními na internetu.

## 2.1 Historie IoT zařízení

Koncept zařízení, která shromažďují nějaké informace a sdílí je ostatním zařízením, byl diskutován už v roce 1982. V tomto roce byl vytvořen prodejní automat na nápoje Coca-Cola na univerzitě Carnegieho–Mellonových (obrázek 2.2), který dokázal přes síť ARPANET sdělovat uživatelům, kolik má v sobě nápojů, a zda jsou vychlazené [15]. Samotný koncept "Internet of things" se prvně objevil v roce 1985 v řeči Petera T. Lewise, který tvrdil, že Internet of things je integrace lidí, procesů a technologií skrze propojitelná zařízení a senzory, které umožňují vzdálené monitorování, kontrolu stavu, manipulaci a vyhodnocení trendů těchto zařízení. Tento pojem byl následně ještě v roce 1994 zkonkretizován Reza Rajim v časopise IEEE Spectrum<sup>5</sup> jako přesun malých datových paketů do velké řady uzlů za účelem integrace a automatizace všeho, od domácích spotřebičů po celé továrny. Už v této době se tedy očekávalo, že se bude jednat primárně o menší zařízení s menším výkonem, která slouží k monitorování stavu v jejich okolí.



Obrázek 2.2: Upravený automat na Coca Colu z roku 1982, který je považovaný za první IoT zařízení.<sup>7</sup>

<sup>2</sup>Převzato z: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>

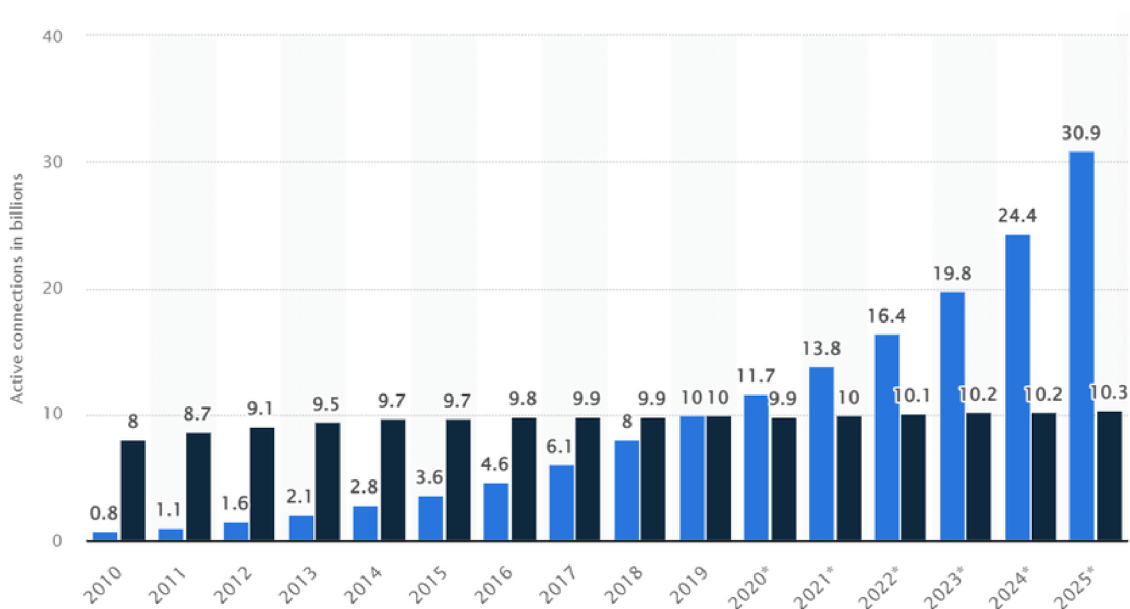
<sup>3</sup><https://lora-alliance.org/>

<sup>4</sup><https://www.sigfox.com/>

<sup>5</sup><https://spectrum.ieee.org/>

Pojem IoT začal být populární kolem roku 1999, kdy výzkumná skupina AUTO-ID<sup>8</sup> na univerzitě MIT (Massachusetts Institute of Technology) představila použití RFID technologie pro komunikaci objektů s lidmi a objekty mezi sebou. Víze tohoto projektu byla taková, že pokud by se objekty a i lidé začali označovat RFID identifikátory, tak by bylo možné provádět pokročilé spravování a inventarizaci všech objektů, což by vedlo ke zlepšení efektivnosti logistiky a možnosti provádět analýzy o pohybu jednotlivých osob.

Vývoj IoT zařízení si od roku 1999 držel svoji popularitu a postupně pokračoval dále. Od roku 2000 přispěl vývoji IoT zařízení rozmach bezdrátových komunikačních protokolů s malou spotřebou. V této době to byly primárně protokoly WiFi a Bluetooth, které umožnily tvorbu mobilních IoT zařízení a také umístění IoT zařízení na místa bez možnosti drátového připojení. Dále pak od roku 2010 přispěl k vývoji IoT zařízení rozmach chytrých domácností a Průmyslu 4.0, který zajistil pokročilejší standardizaci a větší integraci IoT zařízení do každodenního života lidí. Nejnovější trend ve vývoji IoT zařízení míří na použití umělých neuronových sítí v IoT zařízeních. Integrace umělých neuronových sítí umožňuje provádět pokročilé rozhodování přímo na samotného IoT zařízení.



Obrázek 2.3: Graf zobrazující podíl aktivních IoT a ostatních zařízení připojených k internetu do roku 2020. Data od roku 2020 do 2025 jsou predikce.<sup>10</sup>

Už v roce 2004 bylo predikováno, že nová éra informačních technologií bude dominována IoT zařízeními a že počet IoT zařízení výrazně předčí všechny ostatní zařízení. Dnes je tento trend možné potvrdit (obrázek 2.3), protože v roce 2020 počet IoT zařízení připojených k internetu přesáhl počet ostatních zařízení připojených k internetu.

<sup>7</sup>Převzato z: <https://www.ravepubs.com/internet-things-openers/>

<sup>8</sup><https://autoid.mit.edu/>

<sup>10</sup>Převzato z: [https://www.researchgate.net/figure/IoT-and-non-IoT-connections-worldwide\\_fig1\\_362032874](https://www.researchgate.net/figure/IoT-and-non-IoT-connections-worldwide_fig1_362032874)



## 2.2 Aplikace IoT zařízení

Využití IoT zařízení je dnes poměrně rozsáhlé a jsou přítomné ve velkém počtu oborů [35] [38]. Velkému rozšíření IoT zařízení nahrává i to, že to jsou většinou malá zařízení s malým procesním výkonem a malou spotřebou a je tak možné je použít téměř všude.

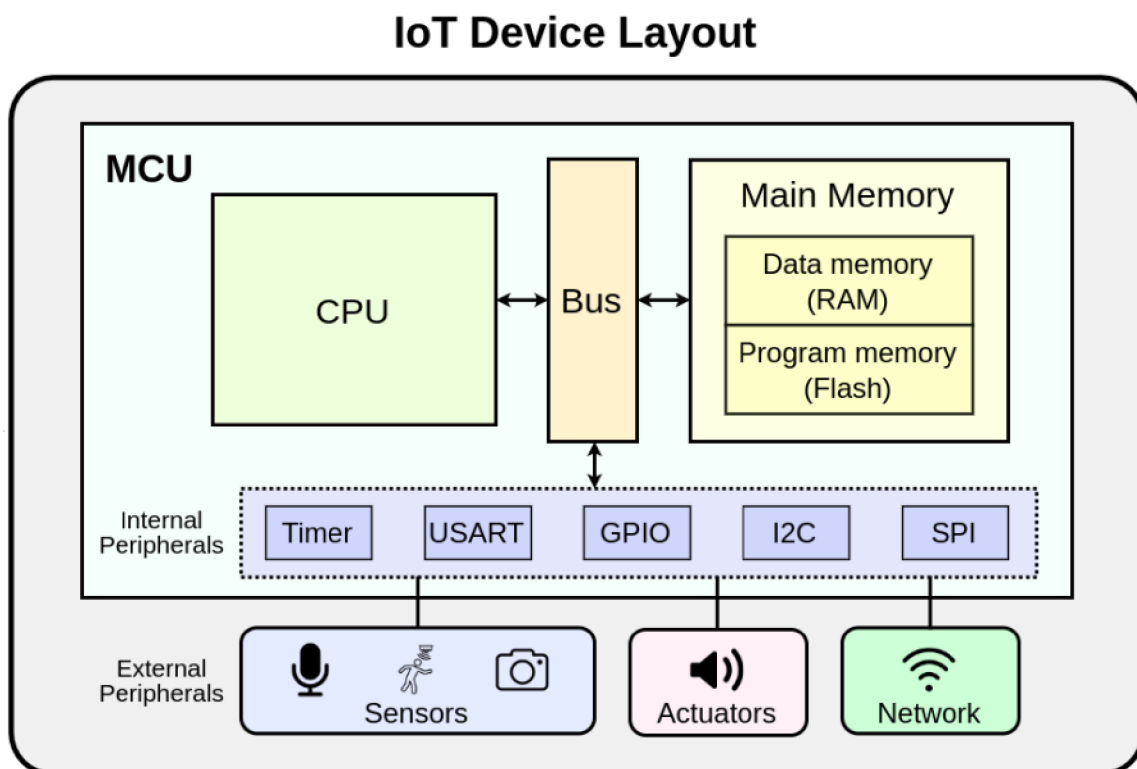
Dnes se použití IoT zařízení běžně rozděluje do pěti odvětví:

- **Spotřebitelská IoT:** Velké zastoupení IoT zařízení je dnes ve spotřebitelské oblasti, která zahrnuje všední zařízení, které si člověk kupuje za účelem zpříjemnění jeho života (například domácí automatizace nebo nositelná zařízení).
- **Podnikové IoT:** Podnikové IoT "Enterprise IoT" označuje použití IoT zařízení v prostředí podniků a jejich organizace. Cílem těchto IoT zařízení je primárně umožnit provozování nových služeb a zdokonalení procesu již stávajících služeb (například chytré budovy nebo chytrá zdravotní péče).
- **Průmyslové IoT:** Průmyslové IoT "Industrial IoT" je podobné podnikovému IoT s tím rozdílem, že se zaměřuje na proces výroby produktů ve společnosti. Tato oblast IoT se také pojmenovává Průmysl 4.0 a slouží k vylepšení výrobních procesů a jejich efektivity (například optimalizace dodavatelského řetězce nebo prediktivní údržba).
- **Infrastrukturní IoT:** Infrastrukturní IoT je dnes jednou z dominantních aplikací IoT zařízení a slouží k monitorování a řízení městské a venkovské infrastruktury a také pro monitorování samotného životního prostředí. Městská a venkovská infrastruktura zahrnuje věci jako mosty, silnice, železniční tratě, elektrárny a tak dále (například chytrá města nebo chytré elektrické sítě).
- **Vojenské IoT:** Stejně jako je tomu v civilních odvětvích tak i v armádě zažívá IoT velký rozmach. V armádě se využívá názvu "Internet of Military Things" a jeho primární využití je podobné jako u obyčejného IoT. Vojenské IoT slouží k propojení vojenského vybavení, zařízení a systémů za účelem vylepšení vojenských schopností, efektivnosti a situačního povědomí jednotlivých vojáků a vojenského vybavení (například autonomní bojové systémy nebo cvičení a simulace).

Výpis zde uvedených využití popisuje primárně známější příklady využití IoT zařízení, je tedy jasné, že IoT zařízení lze nalézt i na jiných místech. V budoucnu, s dalším rozvojem IoT technologií, je jasné, že tato zařízení bude možné pozorovat i v dalších, možná zatím neexistujících odvětvích.

## 2.3 Struktura IoT zařízení

Už ze samotného popisu IoT zařízení, uvedeného na začátku této kapitoly, lze vyvodit, že v těchto zařízeních budou přítomny senzory a komunikační modul, který zprostředkovává komunikaci s ostatními zařízeními [17] [7]. Přítomnost jednotlivých komponent v IoT zařízení závisí na konkrétní aplikaci, pro kterou je IoT zařízení konstruováno, lze však pozorovat jistou strukturu, která se běžně objevuje u většiny vytvořených IoT zařízení. Ukázková struktura IoT zařízení je zobrazena na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Diagram popisující typickou strukturu IoT zařízení. Na obrázku se konkrétně jedná o kameru zabezpečovacího systému.<sup>12</sup>

IoT zařízení se obecně skládá z:

- **Senzory:** senzory slouží pro shromažďování informací o stavu a prostředí, ve kterém se zařízení nachází. Konkrétní senzory, které IoT zařízení obsahuje, závisí na konkrétní aplikaci. Zařízení může obsahovat například senzor teploty, vlhkosti nebo zrychlení.
- **Akční členy:** akční členy umožňují interakci IoT zařízení s okolním prostředím. Příkladem mohou být motory, serva nebo relé.
- **Uživatelské rozhraní:** pokud IoT zařízení potřebuje komunikovat s člověkem, může obsahovat nějakou formu uživatelského rozhraní. Uživatelská rozhraní používaná na IoT zařízeních mohou mít rozdílnou formu komplexity, a to od obyčejného tlačítka (například na sluchátkách) až po display s klávesnicí (například starší telefony).

<sup>12</sup>Převzato z: <https://arxiv.org/pdf/2309.03574.pdf>

- **Mikrokontrolér:** mikrokontrolér je mozek IoT zařízení a řídí celou jeho funkčnost. IoT zařízení mohou obsahovat celou řadu mikrokontrolérů, a to od jednoduchých 8bit až po několikajádrové ARM<sup>13</sup> mikrokontroléry s vestavěnými akcelerátory. Jaký mikrokontrolér je pro IoT zařízení použit, závisí na parametrech konkrétní aplikace (například spotřeba, výkon, paměť atd.). Přídavná zařízení (senzory a další moduly) jsou k mikrokontroléru IoT zařízení připojena většinou pomocí nějakého standardního drátového komunikačního rozhraní na krátkou vzdálenost. Pro komunikaci mikrokontroléru s jeho periferiemi lze použít například komunikační rozhraní jako jsou Serial Peripheral Interface (SPI), Inter-Integrated Circuit (I2C) nebo Universal asynchronous receiver-transmitter (UART). Jednoduché periferie lze připojit i pomocí běžné funkčnosti (analogové nebo digitální) vstupně výstupních pinů mikrokontrolérů.
- **Komunikační modul:** každé IoT zařízení potřebuje komunikační modul, který mu umožní komunikovat s ostatními zařízeními. IoT zařízení může být připojeno drátově (například Ethernet, RS-485 nebo CAN-BUS) nebo bezdrátově (například WiFi, Bluetooth nebo NB-IoT).
- **Zdroj napájení:** IoT zařízení mohou být napájena z elektrické sítě, ale častěji bývají napájena z baterie. Napájení z baterie bývá nezbytné například z důvodu, že zařízení musí být přenosné (mobilní telefon) nebo je umístěno na místě bez praktického přístupu k elektrické síti (venkovní senzor teploty).

Výběr komponent pro IoT zařízení není triviálním procesem a má dopad na parametry jako jsou efektivnost, spolehlivost nebo bezpečnost celého zařízení a systému.

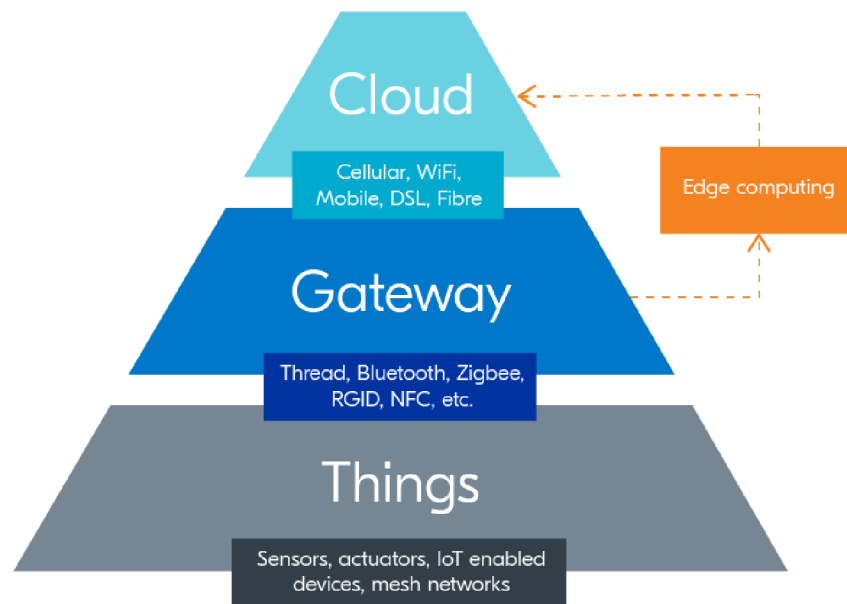
## 2.4 Architektura IoT systémů

Vývoj IoT zařízení během posledních desetiletí zajistil také vznik standardních schémat, které popisují, jak běžně vypadají systémy, které data z IoT zařízení zpracovávají [22] [37]. U většiny IoT systémů se lze setkat s obecným rozdělením, které IoT systémy rozděluje na samotné IoT zařízení, která shromažďují data, případně i interagují s okolním prostředím, a na aplikace, které přijímají data od IoT zařízení a zpracovávají je. Z implementace IoT systémů, které byly během historie IoT zařízení pozorovány, vznikl obecný předpis, který rozděluje architekturu IoT systémů do tří vrstev s tím, že očekává, že IoT zařízení budou připojena k internetu, protože zpracování dat od IoT zařízení se běžně provádí v cloudu. Struktura typického IoT systému, který se běžně používá, je zobrazena na obrázku 2.5.

---

<sup>13</sup><https://www.arm.com/>

<sup>14</sup>Převzato z: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/iot-wireless-architecture>



Obrázek 2.5: Schéma popisující běžnou architekturu IoT systémů.<sup>14</sup>

Podrobnější popis jednotlivých vrstev je následující:

- **Vrstva zařízení:** nejnižší vrstva IoT systému popisuje samotná IoT zařízení. Zabývá se primárně o to, jaké senzory a komunikační rozhraní IoT zařízení v systému používají. Na této úrovni se běžně pokročilé zpracování získaných dat neřeší a zařízení primárně jen odesílá naměřená data a vyhodnocení se provádí až na vyšších vrstvách. Jsou však výjimky, jako jsou kamery s detekcí osob ve videu, u kterých se provádí zpracování pomocí neuronové sítě přímo na zařízení. Tomuto způsobu zpracování dat, kdy jsou data zpracovávána mimo centrální část systému (primárně cloud), se říká "Edge computing" a slouží primárně k tomu, aby se snížil počet přenášených dat a zlepšila odezva systému.
- **Vrstva připojovacích brán:** je běžné, že IoT zařízení s malým výpočetním výkonem nemají komunikační modul pro internet a místo toho komunikují přes jiný nenáročný drátový (například RS-485 nebo CAN-BUS) či bezdrátový (například Bluetooth nebo LoRa) protokol. Pro tato zařízení jsou pak potřeba připojovací brány, které umožní jejich napojení na internet. Napojení na internet je pro velké množství IoT zařízení nezbytné, protože zpracování jejich dat se provádí velmi často v cloudu. Připojovací brány slouží primárně k zprostředkování komunikace mezi IoT zařízeními a řídicím systémem, pokud by však bylo potřeba, tak i zde lze využít výpočetního výkonu samotné připojovací brány a provádět zde zpracování dat od senzorů, a tím snížit počet přenášených dat a zlepšit odezvu systému.
- **Cloudová vrstva:** pojem cloudová vrstva v IoT systému běžně označuje řídicí aplikaci, která zpracovává data od IoT zařízení a na základě zpracovaných dat může provádět jistá rozhodnutí. Aplikace pro zpracování dat od IoT zařízení se běžně skládá z různých algoritmů a databáze, která uchovává důležité informace. Řídicí aplikace IoT systému je běžně provozována na cloudu (důvod pro název této vrstvy) a tedy po-

skytuje výhody jako je jednoduchá škálovatelnost, nepřetržitý provoz nebo možnost nasazení systému v decentralizované podobě.

Zde prezentované rozdělení nemusí být platné pro všechny implementace a závisí na konkrétním systému.

## 2.5 Podpůrné technologie důležité pro tvorbu IoT zařízení

Vznik dnešních IoT zařízení, jako jsou například chytré telefony, vyžadoval vývoj a zdokonalení celé řady technologií. Technologie potřebné pro tvorbu moderních IoT zařízení lze pro zjednodušení rozdělit do dvou kategorií, a to obecně tvorba hardwaru a komunikační technologie, které umožňují konektivitu IoT zařízení [21]. Dnes je pro IoT zařízení primárně důležitá bezdrátová konektivita. Popis důležitých vlastností z těchto kategorií je uveden v následujících sekcích.

### Dopad vývoje hardwaru na IoT zařízení

Nepřetržitý vývoj hardwaru má za následek, že je dnes možné tvořit IoT zařízení (i obecně další zařízení), která mají malou velikost, přijatelný výkon a malou spotřebu. Do budoucna tedy bude možné vytvářet čím dál modernější a sofistikovanější IoT zařízení. Z pohledu hardwaru jsou pro vývoj IoT zařízení důležité primárně tyto vlastnosti:

- menší rozměry součástek umožňují tvořit menší zařízení,
- vyšší výkon mikrokontrolérů umožňuje tvorbu sofistikovanějších zařízení,
- nižší spotřeba umožňuje provozovat IoT zařízení na bateriích a u jednoduchých senzorů může být životnost na baterii i několik let,
- nové součástky jsou často odolnější a spolehlivější a dovolují tedy IoT zařízení fungovat i v náročnějších podmínkách a s menší poruchovostí,
- nové mikrokontroléry obsahují zabezpečovací prvky jako je šifrování, čímž poskytují větší ochranu před možnými útoky na samotné zařízení a data, které zařízení posílá nebo přijímá.

Jak lze zde pozorovat, tak vývoj hardwaru měl velký dopad na vývoj IoT zařízení, lze tedy očekávat, že to bude primární komponenta i ve vývoji budoucích IoT zařízení.

### Dopad vývoje různých způsobů konektivity na IoT zařízení

Konektivita slouží IoT zařízením pro komunikaci s ostatními zařízeními a jak už bylo zmíněno, tak pro IoT zařízení je primárně důležitá bezdrátová konektivita. Bezdrátová konektivita je pro IoT zařízení důležitá, protože velké množství IoT zařízení je mobilních nebo jsou umístěna na takových místech, kde by pro ně drátové připojení nebylo výhodné či vůbec možné (například senzor vlhkosti půdy na poli). Konektivitu IoT zařízení lze obecně rozdělit do následujících kategorií:

- **Drátové připojení:** drátové připojení se pro IoT zařízení příliš nepoužívá, protože vyžaduje přivedení kabelů, což nemusí být možné. U některých zařízení může být naopak kabelové připojení preferováno, protože zařízení může vyžadovat stabilní spojení



s malou latencí a velkou přenosovou kapacitou. Do IoT zařízení, pro které je preferováno kabelové připojení, by bylo možné zařadit monitorovací kamery. Pro drátové připojení IoT zařízení se primárně používá Ethernet napojen pomocí kroucené dvoulinky, optiky nebo i kabelů pro rozvod elektrické energie (Powerline Communication). Lze se také setkat i s připojením přes USB, RS-485 nebo CAN-BUS.

- **Bezdrátové připojení s krátkým dosahem:** bezdrátové technologie s krátkým dosahem slouží pro připojení IoT zařízení, která jsou v malé vzdálenosti od sebe. Obecně lze technologie patřící do této kategorie zařadit do sítí WLAN a typicky mají dosah od desítek po malé stovky metrů. Do této kategorie bezdrátových technologií patří například WiFi, Bluetooth, Zigbee nebo Z-Wave.
- **Bezdrátové připojení s dlouhým dosahem:** technologie pro bezdrátovou komunikaci s dlouhým dosahem lze klasifikovat jako síť WWAN. Tuto kategorii lze ještě dále rozdělit na pozemní síť a síť satelitní. Pozemní síť poskytuje dosah od jednotek po desítky kilometrů. Známé technologie pro pozemní komunikaci jsou například LoRaWAN a Sigfox, řadí se sem však i technologie nabízené mobilními operátory jako je 4G, 5G nebo NB-IoT. Satelitní systémy pro IoT komunikaci umožňují konektivitu téměř kdekoli na světě a lze tedy pomocí nich monitorovat například zvířata a životní prostředí v neobydlených oblastech. Do satelitních systémů pro IoT konektivitu patří například Argos<sup>15</sup> nebo Iridium<sup>16</sup>.

Budoucí vývoj konektivity pro IoT zařízení spočívá primárně ve vývoji sofistikovanějších komunikačních protokolů, které budou mít vlastnosti přizpůsobené pro konkrétní použití. Ohled se bude brát stejně jako dnes na parametry, jako jsou efektivnost, škálovatelnost, dosah nebo spolehlivost přenosu.

Kromě prezentovaných technologií v předchozích sekcích začíná být pro IoT zařízení důležitá i další technologie, a to umělé neuronové sítě. Umělé neuronové sítě je možné použít pro sofistikované vyhodnocení dat od IoT zařízení a na základě získaných dat provádět určitá rozhodnutí. Umělá neuronová síť může být nasazena v cloudu nebo přímo na samotném IoT zařízení, což je umožněno díky existenci dostatečně výkonného hardwaru, který lze umístit i do IoT zařízení. Možnost umístění umělé neuronové sítě do IoT zařízení je výhodné hlavně díky možnosti provádět sofistikované vyhodnocení dat ze senzorů přímo na samotném zařízení, což snižuje nároky na přenášená data a zlepšuje latenci systému.

---

<sup>15</sup><https://www.argos-system.org/>

<sup>16</sup><https://www.iridium.com/>

## Kapitola 3

# Energy harvesting

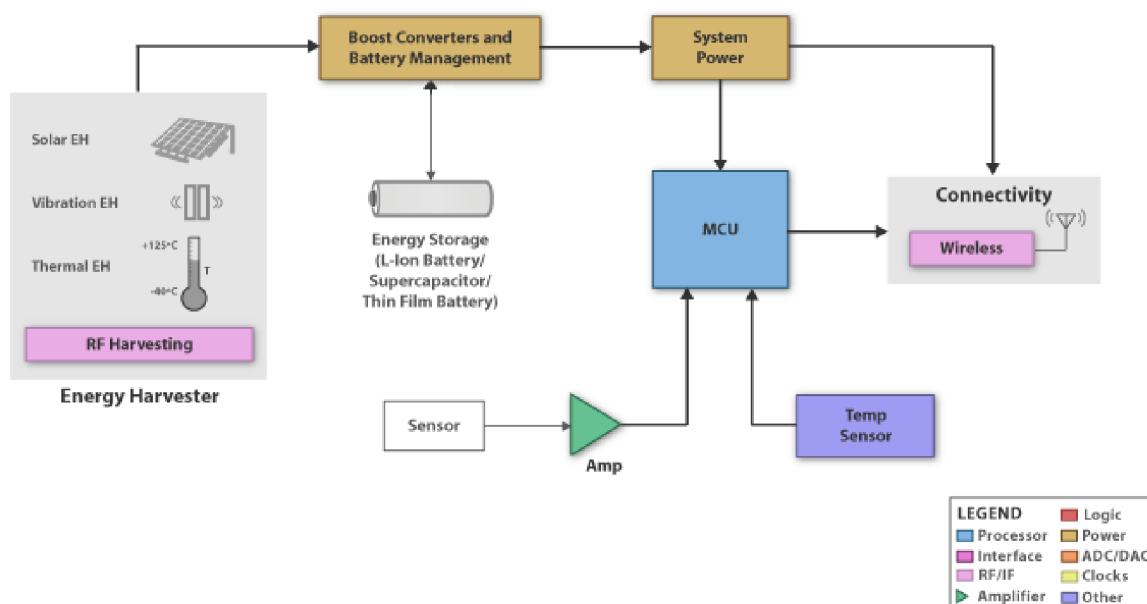
Energy harvesting je proces, který popisuje způsoby extrakce energie z prostředí[14][19]. Pro extrahování energie se používají například zdroje, jako je solární energie, tepelná energie, kinetická energie nebo větrná energie. Pojem Energy harvesting je většinou spojován s výrobou energie pro malá elektronická zařízení, jako jsou nositelná zařízení nebo senzory v senzorových sítích. Stejně principy je však možné použít i pro generování většího množství energie, kterou lze poté použít v rozvodné síti (například solární farmy nebo větrné farmy). V typických aplikacích Energy harvesting se očekává, že generátor energie bude malý, aby jej bylo možné implementovat do konkrétního malého zařízení, což pak znamená, že generuje malé množství energie. Kolik energie Energy harvester generuje, záleží na velikosti samotného generátoru, principu, který se používá k získání energie a vlastnostech prostředí, ve kterém je Energy harvester umístěn. Typické hodnoty, které lze očekávat u Energy harvesterů generujících energii z pohybu, jsou jednotky  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$  u zařízení umístěných na lidech a stovky  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$  u zařízení umístěných na industriálních strojích. Energie produkovaná Energy harvesterem může být jediný zdroj, co zařízení napájí, anebo může sloužit pro prodloužení intervalu, než je zařízení nutné nabít.

Hlavní motivací za vývojem Energy harvesterů je možnost provozovat malá zařízení, jako jsou senzory v senzorických sítích nebo mobilní zařízení bez nutnosti je nabíjet, nebo je nutnost nabíjení snížena na nižší frekvenci. U mobilních/nositelných zařízení používaných lidmi je takto zajištěna větší pohodlnost používání, naproti tomu například u senzorů v senzorických sítích může být takto odstraněna jakákoliv nutnost údržby a je tedy možné senzory umístit na místa, kde je přístup člověka omezen a zařízení tam mohou pracovat téměř nekonečně dlouho bez jakéhokoliv zásahu (například monitorování neobydlených území). Použití Energy harvesteru v zařízení je také výhodné z pohledu ekologického dopadu, protože umožňují do zařízení umístit menší baterie nebo standardní baterie nahradit jinou formou úložiště, jako může být například superkondenzátor.

Co se týče industriálního použití, tak zde je Energy harvesting také velice důležitý, protože umožňuje generování velkého množství elektrické energie z obnovitelných zdrojů, kterou lze následně použít v elektrické rozvodné síti. Tímto je tedy redukována nutnost generovat elektrickou energii neekologickými způsoby, jako jsou fosilní paliva. Energy harvesting také umožňuje redukovat ztráty nastávající při rozvodu elektrické energie rozvodnou sítí. Toto je možné díky tomu, že je jednoduché postavit malé elektrárny na obnovitelné zdroje, které slouží jen pro napájení malé oblasti.

### 3.1 Běžná struktura Energy harvestoru

Díky tomu, že Energy harvestory používané pro malá zařízení většinou generují malé množství energie, tak u většiny zařízení není možné, aby je Energy harvester napájel přímo. Princip funkčnosti zařízení s Energy harvestory tedy většinou vypadá tak, že Energy harvester akumuluje energii do nějakého úložiště a až je jí dostatek, tak zařízení provede svoji činnost (například změření teploty a její odeslání). Ukázka struktury senzoru s Energy harvestorem je zobrazena na obrázku 3.1. Když zařízení nemá dostatek energie, je v režimu spánku.



Obrázek 3.1: Ukázka typické struktury IoT zařízení s Energy harvestorem.<sup>1</sup>

Struktura Energy harvestoru je běžně rozdělena na tři části, které zajišťují získání energie, její ukládání a nakonec její úpravu pro použití ve zbytku zařízení. Podrobnější popis struktury Energy harvestoru je obsažen v následujících bodech:

- **Získání energie:** Část získávání energie řeší, jak už název napovídá, převod nějaké okolní energie na jinou použitelnější formu energie, téměř ve všech případech je to energie elektrická, kterou je následně možné použít v zařízení. Energy harvestory mohou získávat energii z mnoha zdrojů, často se využívá například solární energie, tepelné energie nebo vibrace. To, kolik energie dokáže Energy harvester vyrobit, záleží na zdroji energie, prostředí, ve kterém je zařízení umístěno a velikosti plochy, která je použita k převodu energie.
- **Ukládání energie:** Elektrická energie získávaná z prvku, který převádí okolní energii na energii elektrickou může být ukládána do kondenzátorů, superkondenzátorů nebo baterií. To, jakou formu úložiště zvolit, závisí na požadavcích jako jsou kapacita, velikost, hmotnost, životnost, rychlost samovybíjení nebo maximální vybíjecí proud. Například baterie mají malou úroveň samovybíjení a dobré kapacity, ale jejich nevýhodou je omezená životnost a malé vybíjecí proudy. Naproti tomu kondenzátory jsou jejich přesný opak. To, jaké úložiště energie zvolit, závisí tedy na konkrétní aplikaci.

<sup>1</sup>Převzato z: <https://www.electronicproducts.com/energy-harvesting-block-diagram/>



- **Příprava výstupu:** Poslední část Energy harvestoru řeší úpravu energie uložené baterii, kde cílem je ji upravit tak, aby ji bylo možné použít zbytkem zařízení. Zde se používají například různé Buck-Boost měniče, které generují jedno stabilní výstupní napětí.

Struktura Energy harvestoru je obecně navržena tak, aby efektivně získávala okolní energii, tu ukládala a připravila pro použití v zařízení. Konkrétní prvky použité v Energy harvestoru vždy závisí na konkrétní aplikaci.

## 3.2 Zdroje energie Energy harvestorů

Existuje mnoho zdrojů energie v zemském prostředí, které je možné použít pro proces Energy harvesting, ne všechny zdroje energie lze však zvětšit pro industriální použití. Zdroje energie Energy harvestorů lze obecně rozdělit do následujících kategorií:

- **Solární energie:** Solární energii lze díky fotovoltaickému jevu přímo převést na elektrickou energii, kterou lze následně využít k napájení nejrůznějších zařízení. Solární energie se používá například pro napájení některých kalkulaček, hodinek nebo venkovních senzorů.
- **Tepelná energie:** Termoelektrické generátory (TEGy) dokáží generovat elektrickou energii z rozdílu teploty. Princip, který se zde využívá se konkrétně nazývá Seebeckův nebo Termoelektrický jev. Čím větší je teplotní rozdíl, tím více energie termoelektrický generátor generuje. Tento způsob generování elektrické energie lze využít například pro senzory, které jsou připojeny ke strojům nebo u zařízení umístěných na lidském těle.
- **Kinetická energie:** Energií z pohybu, například větru, vody nebo člověka, lze také použít pro napájení nejrůznějších zařízení. Kinetická energie bývá na elektrickou energii většinou převáděna elektrickým generátorem. Tohoto principu se používá spíše již u větších zařízení.
- **Energie elektromagnetických vln:** Elektromagnetické vlny generované Wi-Fi vysílači, telefonními systémy a dalšími bezdrátovými komunikačními systémy mohou být využity pro generování elektrické energie. Příkladem je například Recténa, což je speciální anténa, která generuje stejnosměrné napětí z přijatého elektromagnetického záření. Výhoda tohoto způsobu je, že díky rozšířenosti bezdrátových komunikačních systémů lze různá bezdrátová vysílání zachytit na velkém množství míst na světě.
- **Mechanická deformace:** Energií pro provoz malých zařízení lze také získat z piezoelektrických materiálů, které generují napětí, když jsou nějak deformovány. Díky těmto materiálům je tedy možné generovat energii z vibrací (například pohyb člověka, provoz stroje) nebo ze stlačování tohoto prvku (například umístění senzoru pod silnici).

Budoucnost Energy harvesting je důležitá pro snížení potřeby tradičních baterií a možnosti provozu zařízení bez jakéhokoli zásahu člověka na špatně dostupných lokalitách. Budoucí vývoj Energy harvestorů se tedy bude zabývat výrobou čím dál efektivnějších Energy harvestorů za čím dál nižší ceny.

## Kapitola 4

# Bezdrátová komunikace s dlouhým dosahem pro malá zařízení

Bezdrátová komunikace [23] umožňuje přenos informací mezi dvěma a více body bez nutnosti fyzických kabelových spojení. Tato forma komunikace je často využívána u zařízení, ke kterým není jednoduché přivést kabelové spojení (například zařízení umístěna v přírodě) a také u mobilních zařízení, kde by kabelová forma komunikace nedovolovala jejich pohodlné používání. Bezdrátový přenos informací lze zajistit několika způsoby, mezi které se řadí optický, sonický nebo rádiový přenos. Ve většině případů se pro bezdrátovou komunikaci využívá rádiového přenosu, a to z důvodu, že poskytuje dobrou propustnost signálu objekty a má dobrý dosah. Konkrétní parametry rádiového přenosu však závisí na použité frekvenci, vysílacím výkonu a použitých anténách. Zařízení v bezdrátové komunikaci lze rozdělit na vysílače a přijímače, vysílače generují elektromagnetický signál, který se přenáší prostorem a přijímače tento signál přijímají a dále zpracovávají. Obecně toto rozdělení nebývá pevné a zařízení se přepínají mezi těmito rolami, jak potřebují.

Bezdrátová komunikace je také často využívána v IoT zařízeních, kde může sloužit pro připojení senzorů, připojení zařízení do internetu nebo pro připojení zařízení k nějaké komunikační síti s větším dosahem [16]. Bezdrátové komunikační sítě s větším dosahem jsou důležité pro zařízení, která jsou umístěna na hůře dostupných místech, ale stále musí být schopna odesílat a přijímat různé informace (například různá monitorovací zařízení). Bezdrátové komunikační sítě s větším dosahem lze rozdělit na dva typy, na pozemní a satelitní. Pozemní sítě využívají stanice umístěné na zemi, které zprostředkovávají komunikaci se zařízeními. Tyto pozemní stanice bývají často umístěny kolem obydlených oblastí v rozvinutých zemích a je tedy nutné si ověřit, zda je oblast, kde je zařízení potřeba provozovat, v pokrytí konkrétní sítě. Zástupci bezdrátových komunikačních sítí s dlouhým dosahem, kteří používají pozemní stanice jsou například Sigfox nebo The Things Network. Oproti pozemním systémům, satelitní komunikační systémy umožňují komunikaci i se zařízeními daleko od obydlených oblastí. Díky satelitním komunikačním systémům je možné provozovat i zařízení jako jsou různé mořské a oceánské sondy. I u satelitních systémů je však potřeba ověřit si jejich pokrytí. Některé systémy totiž nejsou implementovány pro plné pokrytí zemského povrchu nebo jsou implementovány tak, že satelit je na konkrétním místě dostupný jen během určité denní doby. Mezi satelitní systémy, které lze použít pro IoT zařízení, se řadí například Iridium, Argos nebo Swarm. Podrobný popis těchto systémů je obsažen v dalších sekcích.

## 4.1 Sigfox

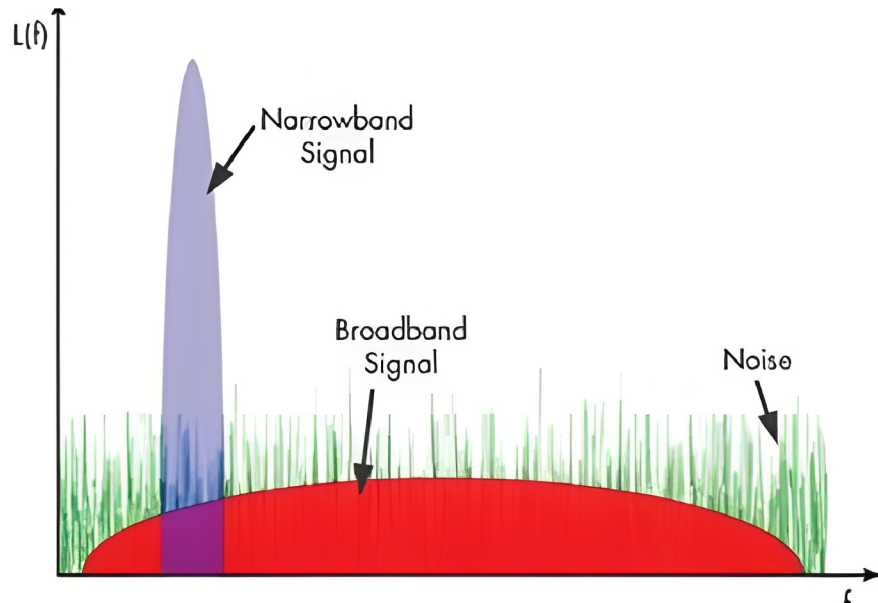
Sigfox je bezdrátová komunikační síť s dlouhým dosahem a malou spotřebou, která byla vyvinuta francouzskou společností se stejným jménem[9][28]. Tato síť byla navržena primárně pro použití IoT zařízeními a je dostupná ve velkém počtu států po celém světě<sup>1</sup>. Samotná společnost Sigfox provozuje svoji bezdrátovou síť jen v některých státech, provoz sítě v ostatních státech je zajištěn pomocí partnerských společností. Síť Sigfox operuje na principu předplatného, kde uživatel platí za počet zařízení, která provozuje, a za množství dat, která zařízení přijímají a odesílají. Pokud chce uživatel provozovat zařízení na území, kde není dostupná síť Sigfox, tak je mu umožněno volně si vybudovat svoji vlastní část sítě. Toto je umožněno díky Sigfox branám, které Sigfox prodává. Tyto brány se připojují k internetu a umožňují přijímání a odesílání Sigfox zpráv v jejich okolí.

Síť Sigfox je v různých částech světa provozována na různých frekvencích, v Evropě je to 868 MHz a v Americe 902 MHz. Z tohoto důvodu je nutné správně vybrat potřebný Sigfox modul dle lokace zařízení. Pokud je potřeba, aby jedno zařízení fungovalo v různých částech světa, musí podporovat všechny potřebné frekvence a být schopné mezi nimi správně vybrat podle aktuální lokace. Frekvence používané Sigfox sítí spadají do takzvaného ISM pásma, což je bezlicenční pásmo pro volné využití aplikacemi spadajícími do odvětví průmyslu, vědy a medicíny. Vysílání v tomto pásmu má avšak jednu nevýhodu, zařízení musí dodržovat regionální pravidla, která nařizují maximální dovolený časový limit po, který může zařízení vysílat. V Evropě je toto omezení 1 % času během 24 h, z tohoto důvodu je tedy tato síť vhodná pro aplikace, které nevyžadují velmi mnoho datových přenosů. Pro přenos dat používá síť Sigfox technologii, která se nazývá Ultra Narrow Band (úzkopásmový signál). Ukázka Ultra Narrow Band signálu je zobrazena na obrázku 4.1. Výhodou této technologie je, že dokáže poslat signál na velkou vzdálenost a přitom nespotřebuje velké množství energie. Dobrá je i odolnost této technologie vůči rušení. Nevýhoda Ultra Narrow Band signálu je, že jeho přenosová rychlost není příliš velká, to však nevádí u většiny IoT zařízení, protože IoT zařízení běžně nepotřebují velké přenosové rychlosti (senzory atd.). Typická přenosová rychlost sítě Sigfox je mezi 100 - 600 bit/s, konkrétní dosažitelná rychlost závisí na parametrech, jako je vzdálenost přenosu, struktura prostředí, kde se vysílá a velikost přítomného rušení. Síť Sigfox má hvězdicový charakter, což znamená, že všechna komunikace musí jít přes centrální prvek sítě v dané oblasti (Sigfox brána), není tedy možné, aby dvě zařízení komunikovala přímo mezi sebou. Maximální možná komunikační vzdálenost Sigfox zařízení závisí na parametrech prostředí, dle oficiálních stránek Sigfoxu by to mělo být přibližně kolem 10 km v městech a kolem 40 km na venkově.

---

<sup>1</sup><https://www.sigfox.com/coverage/>

<sup>3</sup>Převzato z: <https://enless-wireless.com/en/sigfox-network-technological-developments-iot/>



Obrázek 4.1: Ukázka podoby úzkopásmového signálu proti širokopásmovému signálu ve frekvenčním grafu.<sup>3</sup>

V posledních letech se společnost Sigfox potýkala s finančními problémy kvůli rychlému rozvoji konkurence, velkým investicím do infrastruktury a pomalé adopci technologie. Z tohoto důvodu roku 2022 vyhlásila bankrot a byla odkoupena singapurskou společností UnaBiz, která technologii Sigfox dále provozuje. S problémy se potýkal i český provozovatel sítě Sigfox SimpleCell, který v roce 2023 přestal platit za provoz svých bran a dne 21.4.2023 byla síť v česku odpojena[20]. V období psaní této práce síť Sigfox v Česku stále nefunguje a není jasné, zda se někdy obnoví.

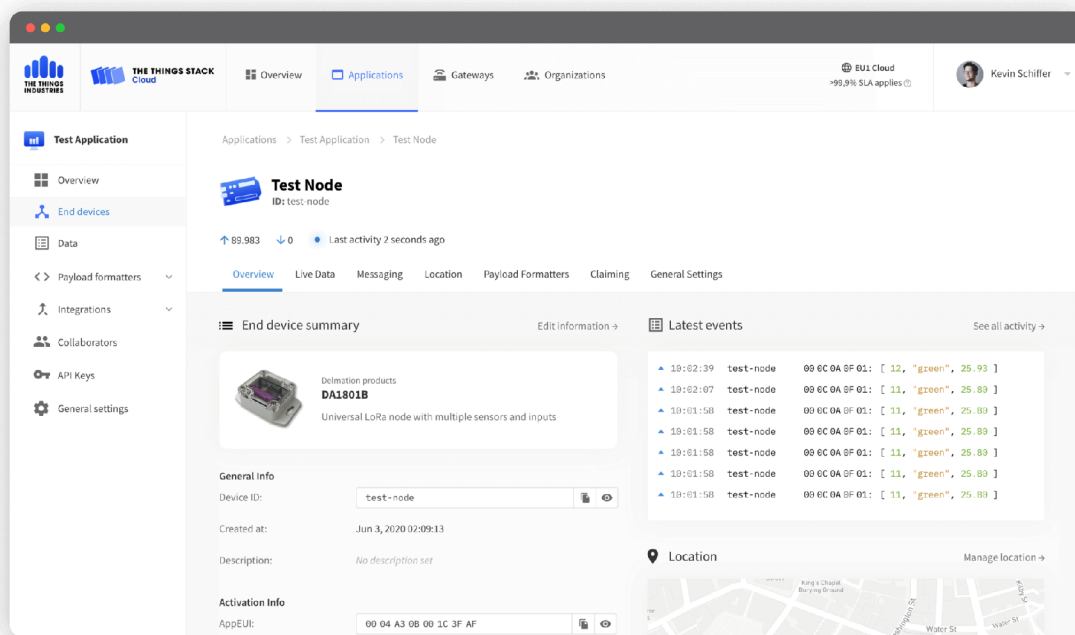
## 4.2 The Things Network

The Things Network (TTN) je open-source bezdrátová komunikační síť, jejíž primárním účelem je zprostředkovat komunikaci IoT zařízením[11][31][12]. Díky tomu, že TTN je open-source, je možné, aby kdokoli implementoval infrastrukturu této sítě. Tato otevřenost zajišťuje, že TTN brány se dnes nachází ve velkém množství obydlených oblastí rozvinutějších částí světa a není tedy problém provozovat zařízení s připojením do této sítě na velkém počtu míst na světě<sup>4</sup>. TTN brány jsou připojeny do internetu a komunikují s TTN servery, na kterých mohou uživatelé ovládat komunikaci s jejich zařízeními. Ukázka internetového rozhraní sítě TTN je zobrazena na obrázku 4.2. Používání TTN sítě je zadarmo pro uživatele s malým počtem zařízení a malým objemem přenášených dat, pro použití industriálnějšího charakteru je síť placená a cena závisí na počtu zařízení, objemu přenášených dat a dalších podpůrných službách.

Síť TTN je provozována v různých částech světa na různých frekvencích. Například v Evropě je to 868 MHz, v Americe 915 MHz, v Indii 865 MHz a v Asii 923 MHz. Při tvorbě zařízení používajícího TTN síť je tedy nutné dát pozor na volbu správného modulu dle

<sup>4</sup><https://www.thethingsnetwork.org/map>

<sup>5</sup>Převzato z: <https://www.thethingsindustries.com/>



Obrázek 4.2: Ukázka webového rozhraní sítě TTN.<sup>5</sup>

konkrétní lokace, pokud má zařízení fungovat ve více regionech, je nutné pro tuto činnost zařízení správně přizpůsobit. Frekvence využívané TTN sítě spadají do bezlicenčního ISM pásma, stejně jako Sigfox, a tedy i u této sítě platí regionální omezení, která specifikují maximální povolený časový interval, během kterého může zařízení vysílat. Tato omezení jsou typicky určována v procentech za 1 hodinu nebo 24 hodin. Fungování TTN sítě a samotný bezdrátový přenos dat je postaven na dvou technologiích, které se nazývají LoRa a LoRaWAN. LoRa je proprietární rádiová komunikační technika, která využívá k modulaci signálu techniku rozprostřeného spektra. Technika rozprostřeného spektra konkrétně použitá v LoRa technologii se jmenuje Chirp spread spectrum. Komunikační technika LoRa je uzpůsobena pro komunikaci na dlouhou vzdálenost a na to, aby měla malé energetické nároky. Tato komunikační technika byla vytvořena francouzskou společností Cycleo, která byla později odkoupena společností Semtech. Dnes je společnost Semtech hlavní výrobce čipů podporujících komunikační techniku LoRa a je také zakládajícím členem LoRa aliance, která se stará o budoucí vývoj této komunikační techniky. LoRaWAN je pak standard, který popisuje komunikační protokoly a systémovou architekturu, kterou lze využít pro vytvoření komunikační sítě na komunikační technice LoRa. Budoucí vývoj LoRaWAN standardu je také řešen LoRa aliancí. Obecně lze tedy říci, že LoRa zajišťuje fyzickou a LoRaWAN síťovou vrstvu TTN sítě. Síť TTN funguje na hvězdicové topologii a není tedy možné, aby mezi sebou dvě zařízení komunikovala napřímo, veškerá komunikace vždy musí procházet přes TTN bránu v dané oblasti.

Maximální komunikační vzdálenost je na stránkách TTN sítě uvedena jako 5 - 15 km, kde 5 km by mělo být dosažitelných ve městech a 15 km na venkově. Přenosová rychlost této sítě by se měla pohybovat mezi 0.3 - 27 kbit/s. Komunikační vzdálenost TTN zařízení i jeho přenosová rychlost závisí na parametrech prostředí, ve kterém komunikace probíhá a také



na konkrétním nastavení komunikace. V LoRa komunikační technice je možné přizpůsobit přenos pro konkrétní aplikaci volbou několika parametrů. Tyto parametry jsou:

- **Šířka přenosového pásma:** volba šířky přenosového pásma poskytuje možnost si vybrat mezi větší rychlostí přenosu nebo větší citlivostí na straně přijímače. Větší citlivost na straně přijímače ovlivňuje, jaká může být minimální síla signálu, aby ji dokázal přijímač ještě správně rozkódovat. Nastavení komunikace pro větší citlivost tedy poskytuje větší odolnost proti rušení a také větší dosah komunikace.
- **Kanálové kódování:** volba kanálového kódování umožňuje vybrat úroveň zabezpečení posílané zprávy před možným poškozením během bezdrátového přenosu vlivem okolního rušení. Kanálové kódování vkládá do posílaných zpráv spolu s datovými bity i takzvané paritní bity, pomocí kterých lze opravit špatně přenesené bity ve zprávě. Čím robustnější kanálové kódování, tím více chyb lze ve zprávě opravit, avšak robustnější kanálové kódování vyžadují přenos více paritních bytů spolu s datovými bity, což ovlivňuje výslednou rychlost přenosu. Tento parametr tedy umožňuje volbu mezi rychlostí přenosu a odolností posílané zprávy vůči chybám. Nastavení tohoto parametru se projeví i na výsledném dosahu komunikace.
- **Spreading faktor:** spreading faktor, nebo jiným názvem Chirp rate, ovlivňuje, rozšíření šířka pásma signálu ve frekvenční doméně. Čím větší spreading faktor je vybrán, tím pomaleji se zpráva přenáší, ale zlepšuje se citlivost přijímače. Tento parametr tedy umožňuje výběr mezi rychlostí přenosu a citlivostí na straně přijímače, která ovlivňuje maximální potřebnou hodnotu rušení pro zabránění přenosu a maximální dosah komunikace.

Volba těchto parametrů závisí také na specifikaci TTN sítě, protože ne všechny možné kombinace hodnot těchto parametrů jsou validní pro použití v TTN síti. Bližší informace lze najít v dokumentaci TTN sítě. Na těchto parametrech lze také vidět, že zařízení v TTN síti lze nastavit dle požadavků konkrétní aplikace na větší přenosové rychlosti (zařízení musí být blízko brány a v okolí musí být malé rušení) nebo větší dosah komunikace a odolnost proti rušení. Pomocí těchto parametrů je tedy možné zvolit potřebný poměr mezi přenosovou rychlostí a odolností proti rušení (dosahem) pro konkrétní zařízení. Je potřeba brát ohled i na skutečnost, že pomalejší přenosové rychlosti mají za následek delší čas než se potřebná data přenesou a tedy i více spotřebované energie, což může být problém u některých zařízení poháněných bateriemi.

### 4.3 Iridium

Iridium je satelitní komunikační síť, která byla vytvořena společností Iridium Communications Inc. (dříve Iridium SSC) v roce 1998[25][2]. Primárním účel této sítě je poskytování hlasové a datové komunikace kdekoli na světě. Jméno této sítě bylo vybráno na základně prvních plánů, které očekávaly 77 satelitů (protonové číslo Iridia) pro poskytnutí globálního pokrytí s dostupností 100 % času. Nakonec se ukázalo, že pro implementaci sítě stačí jen 66 satelitů, avšak jméno této sítě se již nezměnilo. 66 satelitů zajišťujících provoz Iridium sítě je pro zajištění nepřetržitého pokrytí rozmístěno do 6 polárních orbit (v každé orbitě je tedy přítomno 11 satelitů) s výškou 781 km.

Výška oběžných drah Iridium satelitů řadí tyto satelity do skupiny satelitů s takzvanou nízkou oběžnou dráhou (LEO - Low Earth Orbit). Tato oběžná dráha byla zvolena z důvodu

nízké latence spojení a malé spotřebě energie nutné pro komunikaci pozemního zařízení se satelitem. Nevýhoda použití nízké oběžné dráhy je však v tom, že je potřeba velký počet satelitů pro zajištění nepřetržitého globálního pokrytí. Dále je také nutné zajistit robustní předávání aktivní komunikace (třeba hovor) mezi jednotlivými satelity, protože jeden satelit je viditelný na konkrétním místě typicky jen po dobu několika minut (orbitální perioda Iridium satelitu je přibližně 100 minut).

Iridium satelity komunikují s pozemními zařízeními v pásmu 1616 - 1626.5 MHz, kvůli této vysoké frekvenci je nutné, aby mezi satelitem a zařízením byla přímá viditelnost, protože vysoké frekvence mají špatnou průchodnost objekty. Navázání spojení mezi dvěma zařízeními v Iridium síti má dvě podoby. Pokud se jedná o přímé spojení mezi dvěma zařízeními, například hovor mezi dvěma Iridium telefony, tak spojení je poskládáno jen pomocí satelitů. Iridium satelit může navázat až 4 mezisatelitní spoje, které mu umožňují komunikovat se satelity, které jsou přímo před ním a za ním na stejné oběžné dráze a se satelity přímo napravo a nalevo od něj (nejbližší satelit v oběžné dráze napravo a nejbližší satelit v oběžné dráze napravo od konkrétního satelitu). Každý satelit tedy může komunikovat se čtyřmi nejbližšími satelity, kde každý satelit je na jinou stranu od konkrétního satelitu. Takto mezi všemi satelity vzniká struktura podobná mřížce, ve které se za pomoci dynamického směřování hledá nejvýhodnější cesta jak přenést data mezi komunikujícími zařízeními. Pokud zařízení potřebuje komunikovat s internetem nebo potřebuje navázat hovor do pozemní telefonní sítě, tak komunikace probíhá tak, že se zprávy směřují mezi satelitem který aktuálně komunikuje s Iridium zařízením a nejbližším satelitem který má v dosahu pozemní komunikační stanici. Pozemní stanice jsou umístěné na různých místech na světě a slouží jako brány mezi satelitní sítí a různými pozemními sítěmi jako je internet nebo mobilní síť.

Iridium síť během své existence prošla již dvěma generacemi. První generace, také známá jako Iridium 1, byla v provozu od roku 1998 a sloužila pro poskytování hovorů a jednoduchých datových služeb, jako je SMS nebo email. Tato síť bez velkých technických změn fungovala až do roku 2017, kdy se na oběžnou dráhu začali vynášet satelity pro novou síť nazvanou Iridium NEXT. Satelity z této nové sítě jsou kompatibilní s původní sítí, avšak navíc jsou vybaveny technologií pro poskytování satelitního internetu s rychlostí až 704 kbit/s. Tento satelitní internet je určen pro loďní, letecké, státních a IoT aplikace. Dnes již téměř všechny původní satelity jsou nahrazeny satelity z Iridium NEXT sítě.

Cena použití Iridium sítě závisí na parametrech, jako je množství přenesených dat, frekvence komunikace, vyžadované pokrytí nebo požadované služby. Například použití malého IoT modulu, jako je Rock Seven, stojí od 0.1 \$ po 0.2 \$ (dle balíčku) za 50 přenesených bajtů plus fixní měsíční poplatek 17 \$<sup>6</sup>.

## 4.4 Argos

Satelitní systém Argos byl vytvořen ve spolupráci mezi francouzským Národním centrem kosmického výzkumu (CNES), americkým Národním úřadem pro oceán a atmosféru (NOAA) a americkým Národním úřadem pro letectví a vesmír (NASA). Argos byl uveden do provozu v roce 1978 a slouží pro účely monitorování životního prostředí[8][32]. Satelity používané v síti Argos nejsou určeny jen k provozování této sítě. Síť Argos je provozována na satelitech, které obsahují přístroje určené k monitorování životního prostředí a hardware pro komunikační síť je jen součástí těchto satelitů. Dnes je v provozu 7 satelitů umístěných

---

<sup>6</sup><https://www.groundcontrol.com/en/product/rockblock-9603-compact-plug-and-play-satellite-transmitter/>

na polárních orbitách s výškami 650 - 850 km, které obsahují hardware pro komunikační síť Argos. Tyto satelity byly vytvořeny jednotlivými partnery projektu a pokrývají celé území Země. Malý počet satelitů má však za následek, že pro konkrétní místo na světě je dostupný komunikační satelit jen během nějakého časového období. Při běžném provozu lze očekávat, že satelit pro komunikaci bude dostupný po dobu několika minut jednou za několik hodin. Díky polárním orbitám satelitů mají však výhodu zařízení, která jsou blíže pólům, protože zde je dostupnost satelitů vyšší. Čas, kdy je komunikace možná, jde předpovídat dle lokace zařízení, času a údajích o orbitách satelitů.

Satelitní systém Argos je složen ze tří částí:

- **Satelity:** Argos nabízí obousměrnou komunikaci mezi satelity a Argos zařízeními, primárně se však využívá komunikace od zařízení k satelitům protože většina Argos zařízení jsou senzory, co zaznamenávají data a posílají je dále na zpracování. Zprávy v opačném směru komunikace, od satelitů k Argos zařízením, většinou představují řídicí zprávy od systémů, do kterých patří konkrétní zařízení. Výměna zpráv mezi pozemní částí Argos systému a samotnými satelity probíhá přes pozemní stanice. Argos nepodporuje přímou komunikaci mezi jednotlivými satelity a tedy když satelit přijme nějakou zprávu od Argos zařízení, tak ji hned přeposílá nejbližší pozemní stanici. Pokud není žádná pozemní stanice v dosahu, tak je zpráva uložena na satelitu a odeslána hned, jak je pozemní stanice v dosahu.
- **Pozemní stanice:** pozemní stanice slouží pro komunikaci se satelity. Dnes je po Zemi rozmístěno skoro 60 pozemních stanic, které jsou napojeny k internetu, přes který komunikují s řídicími centry Argos systému.
- **Centra pro zpracování dat:** data od jednotlivých Argos zařízení jsou shromažďována v datových centrech, kde jsou dále zpracována pro budoucí použití. Data přenášená Argos sítí typicky představují informace od senzorů, které shromažďují data pro výzkumy v oblasti životního prostředí. Data od jiných aplikací mohou být jen uložena a následně zpracovávána externí aplikací. Mezi úkony těchto center se řadí také generování dat pro posílání Argos zařízením a kontrola stavu samotných satelitů.

Systém Argos používá frekvenci 401 MHz pro odesílání dat z Argos zařízení na satelity (uplink) a frekvenci 466 MHz pro odesílání zpráv ze satelitů na Argos zařízení (downlink). Identifikace jednotlivých zařízení v Argos systému je provedena pomocí 28 bitového identifikátoru, podle kterého je zařízení adresováno. V systému Argos si lze také vybrat z několika módů a formátů, které upravují parametry přenosu jako je velikost posílané zprávy a rychlost přenosu. Takto lze posílání zpráv nastavit tak, aby co nejvíce vyhovovalo konkrétní aplikaci. Podporované možnosti nastavení Argos vysílače jsou zobrazeny v tabulce 4.1.



Formát zprávy	Mód	Rychlost (bit/s)	Min délka (bit)	Max délka (bit)
A2	ARGOS-2	400	52	276
A3	ARGOS-3	400	52	276
ZE	ARGOS-3	400	28	28
A3 HD	ARGOS-3	4800	60	4636
A4 HD	ARGOS-4	4800	992	4960
A4 MD	ARGOS-4	1200	480	960
A4 VLD	ARGOS-4	200	28	84

Tabulka 4.1: Tabulka možných nastavení Argos vysílače.

Přístup k datům od Argos zařízení se provádí přes webové stránky Argos systému. Na těchto stránkách lze pomocí identifikátoru zařízení zobrazit informace, které zařízení odeslalo a zobrazit jeho přibližnou polohu, kterou umí Argos systém vypočítat z Dopplerova jevu. Ukázka webového rozhraní Argos systému je zobrazena na obrázku 4.3.

The screenshot shows the ArgosWeb interface in a browser. The search criteria section includes a dropdown for 'By platform ID number(s)', a search input field with '20', and radio buttons for 'Loc and collect' (selected) and 'Loc only, class'. The time frame is set to 'For last days and hours'. Below the search criteria, there is an 'Export' button and a table of data. The table has columns: axis, Semi-minor axis, Ellipse orientat..., GDOP, Raw data, FICTELEM, LATITUDE, LONGITUDE, SOUTH, and WEST. The data rows show various satellite parameters, with some values obscured by black boxes. At the bottom, there is a pagination bar showing 'Page 1 of 3' and 'Displaying 1 - 100 of 268'.

Obrázek 4.3: Ukázka webového rozhraní sítě Argos.<sup>7</sup>

Aktuálně je satelitní systém Argos dostupný jen pro aplikace určené k monitorování životního prostředí. V roce 2019 byl provoz tohoto systému svěřen společnosti Kinéis, která má v plánu během let 2023 a 2024 vyslat na orbitu 25 nanosatelitů určených k rozšíření této sítě. Díky těmto novým satelitům by se interval kdy není dostupný žádný komunikační

<sup>7</sup>Převzato z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/argos-artic-r2-satellite-communication-guide/all>

satelit měl snížit na maximálně 10 - 15 min. Po vypuštění těchto satelitů má společnost Kinéis také v plánu umožnit přístup k této síti aplikacím ze sféry námořnictví a IoT.

Cena použití Argos systému závisí na parametrech, jako je množství přenesených dat, frekvence komunikace nebo požadované služby. Výsledná cena je však stanovena individuálně. Dle příkladu nalezeného na internetu by se cena za odeslání 46 360 bajtů za den mohla pohybovat kolem 87 \$ za měsíc<sup>8</sup>.

## 4.5 Swarm

Satelitní systém Swarm je poměrně nový satelitní komunikační systém, který je určen pro IoT zařízení[5][10]. Tento systém byl uveden do provozu v roce 2021 se 71 aktivními satelity a dnes poskytuje nepřetržité globální pokrytí s přibližně 150 satelity. Satelity Swarm sítě jsou umístěny na polárních orbitách s výškami 450 - 550 km. Oproti ostatním satelitním systémům se Swarm odlišuje tím, že pro provoz své sítě používá velice malé satelity, které se řadí do třídy CubeSat satelitů. Tato třída satelitů je charakteristická tím, že satelity do ní spadající by měli mít velikost maximálně 113 x 100 x 100 mm a váhu do 1.33 kg. Díky těmto satelitům byla cena vytvoření sítě menší než u ostatních sítí s velkými satelity a tento fakt je promítnut i do ceny použití sítě. Tato satelitní síť byla vytvořena společností Swarm Technologies, Inc., a v roce 2021 byla odkoupena společností SpaceX.

Síť Swarm poskytuje obousměrnou komunikaci mezi Swarm zařízeními a satelity, komunikace od zařízení k satelitu (uplink) je provozována na frekvenci 139 MHz a komunikace od satelitu k zařízení (downlink) na frekvenci 149 MHz. Maximální dosažitelná přenosová rychlost je dle stránek Swarm sítě 1 kbit/s. Připojení zařízení do sítě je zajištěno pomocí malého modemu určeného pro integraci do IoT zařízení. Tento modul lze zakoupit přímo na webových stránkách sítě. Síť Swarm nepoužívá mezisatelitní spoje, a tedy data přijatá od zařízení jsou přeposílány pozemním stanicím ke zpracování. Pokud satelit nemá žádnou pozemní stanici v dosahu, data uloží a přepoše je pozemní stanici hned jak to bude možné. Pozemní stanice Swarm sítě jsou připojeny k internetu, a zprostředkovávají komunikaci s řídicím softwarem této sítě. Řídicí software zajišťující funkčnost Swarm sítě se nazývá Swarm Hive a funguje na službě AWS od Amazonu.

Cena použití Swarm systému závisí na parametrech, jako je množství přenesených dat, frekvence komunikace nebo požadované služby. Nejlevnější balíček, který lze koupit, stojí 5 \$ a umožňuje přenesení 750 paketů za měsíc, kde maximální velikost paketu je 192 bajtů. Swarm umožňuje koupit až 4 tyto základní balíčky a spojit je dohromady.

Zde prezentované technologie pro komunikaci s dlouhým dosahem a malou spotřebou nejsou všechny technologie, které existují, a lze samozřejmě najít i jiné. Kterou bezdrátovou komunikační technologii s dlouhým dosahem a malou spotřebou je vhodné využít, závisí jako vždy na konkrétním zařízení/systém.

---

<sup>8</sup><https://learn.sparkfun.com/tutorials/argos-artic-r2-satellite-communication-guide/all>

## Kapitola 5

# Družicové polohové systémy

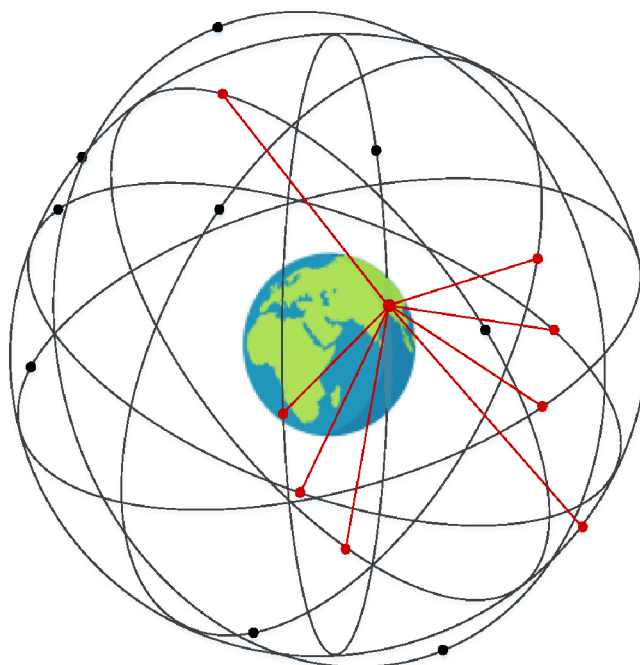
Družicové polohové systémy jsou systémy, které umožňují zařízením určit jejich aktuální polohu na zemském povrchu a jeho okolí[41]. V těchto systémech se využívá satelitů k periodickému vysílání rádiových zpráv, ze kterých zařízení, která tyto zprávy umí přijmout, dokáží vypočítat svoji polohu. Poloha vypočítaná přijímačem družicového polohového systému bývá uživateli (případně dalšímu zařízení) prezentována v podobě zeměpisné šířky, zeměpisné délky a nadmořské výšky. Kromě pozičních informací lze pomocí těchto systémů také vypočítat aktuální čas. Téměř všechny družicové polohové systémy vysílají dva typy navigačních zpráv, jeden je pro běžné uživatele a druhý je pro vojenské či jiné speciální účely. Využití běžných navigačních zpráv je zadarmo a uživateli pro jejich využití stačí mít jen kompatibilní přijímač, naproti tomu druhý typ zpráv je dostupný jen pro konkrétní aplikace, primárně vojenské, a uživatelé musí mít speciální zařízení a povolení od provozovatele systému, aby je mohli používat. Hlavním rozdílem v těchto dvou navigačních zprávách je, s jakou přesností lze aktuální polohu a čas vypočítat. Pro obyčejné uživatele je přesnost těchto systémů přibližně v jednotkách metrů, ve speciálních a vojenských aplikacích lze pak polohu vypočítat přibližně s přesností na desítky centimetrů. Výhodou družicových polohových systémů je to, že je lze využít bez připojení k jakékoliv datové či mobilní síti, což umožňuje jejich využití i v odlehlých oblastech. Dostupnost těchto systémů závisí tedy jen na dostupnosti satelitů na konkrétním místě. I když internet není nutný pro provoz přijímacího zařízení, tak jeho dostupnost může být použita ke zlepšení vlastností satelitních polohových systémů. Když má zařízení k dispozici internet, tak lze například rychleji provést první určení polohy, poté co je přijímač zapnut, a nebo je možné průběžně stahovat informace pomocí kterých lze zpřesnit vypočítanou polohu.

Dnes existují dva typy družicových polohových systémů, které se dle pokrytí planety rozdělují na globální a regionální. Jak už z jejich názvů vyplývá, tak globální družicové navigační systémy (GNSS) jsou dostupné na celé planetě, naproti tomu regionální systémy slouží jen pro pokrytí konkrétní oblasti. U globálních systémů je pokrytí planety zajištěno 24 - 30 satelity umístěnými na střední oběžné dráze, takzvané medium Earth orbit (MEO). Výška oběžných drah těchto satelitů je přibližně 20 000 km a perioda oběhu je kolem 12 hodin. Naproti tomu lokální družicové navigační systémy používají satelity umístěné na geosynchronních orbitách. Tato orbita se vyznačuje tím, že satelit je neustále viditelný nad konkrétní oblastí planety. Výška orbit satelitů v regionálních navigačních systémech je přibližně 36 000 km a perioda oběhu je 24 hodin (synchronizovaná s otáčením Země). Mezi globální družicové navigační systémy patří GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou. Regionální družicové navigační systémy jsou pak NavIC a QZSS.

Aplikací, kde lze družicové navigační systémy využít, je velký počet napříč různými odvětvími. Družicové navigační systémy se využívají například pro určení polohy nějakého předmětu (například lodě, letadla nebo zboží při přepravě), člověka (například záchrana osob) či bodu. Lze je také využít k navigaci mezi dvěma body a nebo k synchronizaci času.

## 5.1 Princip fungování družicových polohových systémů

Pro určení pozice přijímače se dnes ve všech běžných družicových polohových systémech používá **trilaterace**. Výpočet pozice pomocí trilaterace je založen na získání informace o vzdálenosti přijímače od viditelných satelitů (to mohou být klidně všechny u regionálního navigačního systému). Ze znalosti vzdálenosti přijímače od viditelných satelitů a pozice viditelných satelitů lze následně dopočítat pozici zařízení. Obrázek zobrazující satelity, které zařízení používá k výpočtu své polohy, a vzdálenost od nich je zobrazena na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Obrázek popisující fungování družicových polohových systémů. Zvýrazněna je vzdálenost mezi viditelnými satelity a zařízením.<sup>2</sup>

Pro výpočet polohy zařízení jsou standardně potřeba 4 satelity, je však možné použít jen 3 satelity, pokud je přibližně známa nějaká komponenta pozice zařízení. Příkladem může být pozice lodi, u které je známo, že se nachází ve výšce 0 metrů nad mořem. Pokud je viditelných více satelitů než je minimální počet nutný pro výpočet polohy, tak se informace využijí k zpřesnění výpočtu. Při výpočtu pozice zařízení je také důležitá pozice satelitů. Pro trilateraci by bylo nejvýhodnější, aby satelity byly rovnoměrně rozmístěny kolem zařízení ze všech stran. Toto však v realitě není možné. To, že zařízení přijímá signál z viditelných satelitů znamená, že satelity, které jsou použity pro výpočet pozice, jsou vždy směrem nahoru od zařízení. Výsledná vypočítaná pozice má tedy vždy horší přesnost pro vypočtenou

<sup>2</sup>Převzato z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/500>

nadmořskou výšku než zeměpisnou šířku a délku. V družicových navigačních systémech se uvádí, že vypočítaná výška má obecně dvakrát horší přesnost než zeměpisná šířka a délka. Někdy také může nastat, že jsou satelity v nevhodné pozici i pro výpočet zeměpisné šířky a délky. Z pohledu zařízení to znamená, že jsou satelity blízko u sebe. Poté mají horší přesnost i tyto údaje. Obecně přesnost družicových polohových systémů závisí na celé řadě parametrů, přesnost ovlivňuje například chyba v hodinách satelitů, chyba v reportované pozici satelitů, zpoždění signálu v atmosféře, vícecestné šíření signálu nebo rušení na frekvenci používané družicovým polohovým systémem.

Z pohledu implementace družicových polohových systémů lze navigační zprávu rozdělit na tři části. Každý satelit ve svých navigačních zprávách vysílá aktuální čas, svoji oběžnou dráhu a přibližnou informaci o tom, kde se nachází ostatní satelity. Z těchto informací se následně matematicky vypočítá čas kdy zařízení zprávu přijalo a pozice satelitu, když zprávu odeslal. Vypočítané pozice satelitů a doba letu zpráv lze následně využít k určení vzdálenosti zařízení od těchto satelitů. To, v jakém souřadnicovém systému se provádí výpočet pozice satelitů a následně zařízení, závisí na implementaci systému. GPS používá například světově uznávaný geodetický standard WGS-84.

Výpočet pozice zařízení z vypočítaných pozic satelitů a vzdáleností se následně provádí pomocí koulí. Tento výpočet funguje tak, že se vytvoří koule, které mají střed v jednotlivých pozicích satelitů a poloměr dle vypočítané vzdálenosti. Zařízení se pak nachází v místě, kde se tyto koule protínají.

## 5.2 Struktura družicových polohových systémů

Moderní družicové polohové systémy se skládají ze tří segmentů. Tyto segmenty obsahují uživatele systému, satelity a infrastrukturu, která udržují systém v provozuschopném stavu. Popis těchto segmentů je přítomen v následujících odrážkách:

- **Uživatelský segment:** do uživatelského segmentu patří všechny přijímače signálů družicových polohových systémů. S uživateli družicových polohových systémů se lze setkat ve velkém počtu odvětví, příkladem může být zemědělství, logistika i různé vojenské aplikace.
- **Vesmírný segment:** vesmírný segment družicových polohových systémů se zajímá o samotné satelity. Do tohoto segmentu patří všechno vybavení, které je na satelitu umístěno jako jsou antény, atomové hodiny, trysky atd.
- **Kontrolní segment:** kontrolní segment družicových polohových systémů se zabývá veškerým pozemním vybavením, které je nutné pro provoz systémů. Do tohoto segmentu patří věci, jako jsou pozemní antény nebo řídicí a monitorovací centra. Úkolem tohoto segmentu je monitorovat věci, jako je funkčnost satelitů a jejich orbity a na základě těchto informací případně provést potřebné korekce.

Správné fungování těchto tří segmentů umožňuje poskytovat polohové a časové informace pro širokou škálu aplikací, které využívá mnoho lidí a zařízení při různých činnostech.

### 5.3 Přehled globálních družicových polohových systémů

V době psání této práce jsou v provozu celkem 4 globální družicové polohové systémy, které se liší svými provozovateli, přesností, detaily implementace a zamýšleným použitím. Popis těchto systémů je rozepsán v následujících odrážkách:

- **GPS (Global Positioning System):** GPS je nejstarší globální družicový polohový systém, který je stále v provozu. Byl vytvořen Spojenými státy americkými a je v provozu od roku 1993. Aktuálně obsahuje 32 satelitů, které obíhají Zemi ve výšce 20 180 km. Tento systém byl vybudován primárně pro vojenské účely, ale obsahuje i implementaci pro civilní použití. Implementaci pro civilní účely může používat kdokoli a je zadarmo, ale poskytuje horší přesnost než implementace pro vojenské účely. Vojenská implementace poskytuje polohové údaje s přesností na desítky centimetrů, zatímco civilní implementace dosahuje přesnosti na jednotky metrů. Díky tomu, že tento systém byl zamýšlen primárně pro vojenské účely a i jeho civilní implementace mohla být teoreticky využita armádami jiných států, tak tento systém umožňoval úmyslné zhoršení přesnosti i kompletní vypnutí ve zvolených oblastech. Této funkčnosti GPS systému se říká "Selective Availability". Od roku 2000 se tato funkčnost přestala využívat, protože si ostatní světové velmoci začaly tvořit také své vlastní navigační systémy. Jedna nevýhoda GPS systému je, že byl optimalizován pro využití v oblastech s velkou hustotou osídlení, a tedy oběžné dráhy satelitů mají horší parametry pro místa se zeměpisnou šířkou větší než 55°. Nad touto zeměpisnou šířkou je tedy přesnost systému horší.
- **GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema):** GLONASS je globální družicový polohový systém, který byl vytvořen Ruskou federací a funguje od roku 1995. Využívá celkem 24 satelitů na oběžných drahách s výškou 19 130 km. Tento systém byl také primárně vytvořen pro vojenské účely, ale stejně jako GPS poskytuje dvě implementace, vojenskou a civilní. Přesnost těchto implementací by měla být přibližně stejná jak u systému GPS.
- **Galileo:** Galileo je globální družicový polohový systém vybudovaný Evropskou unií. Tento systém byl uveden do provozu v roce 2016 a obsahuje 23 satelitů na oběžných drahách s výškou 23 222 km. Oproti ostatním globálním družicovým polohovým systémům tento systém nebyl vytvořen primárně pro vojenské účely, ale pro účely civilní. Stejně jako ostatní systémy však podporuje dvě implementace, jednu s větší a druhou s menší přesností. Implementace s menší přesností je dostupná zadarmo pro všechny uživatele, naproti tomu implementace s větší přesností je dostupná jen pro autorizované státní orgány. Spolu s přesností má autorizovaná implementace Galileo systému také lepší ochranu proti rušení. Přesnost veřejné implementace systému Galileo by měla být 0.2 metru, zatímco u autorizované implementace by měla dosahovat 0.01 metru.
- **BDS (BeiDou Navigation Satellite System):** BeiDou je globální družicový polohový systém, který byl vytvořen Čínskou lidovou republikou. Tento systém byl prvně uveden do provozu v roce 2012 jako regionální systém pro Čínu a okolní státy. V následujících letech byl však systém rozšiřován a v roce 2020 začal poskytovat globální pokrytí. Tento systém zahrnuje celkem 30 satelitů na třech různých orbitách: 24 satelitů na střední zemské orbitě poskytuje globální pokrytí, 3 satelity na geosynchronní

orbítě pokrývají území Asie a Pacifiku a zbývající 3 satelity na geostacionární orbítě pokrývají území Číny. I tento systém podporuje dvě implementace, které se liší v přesnosti. Implementace pro veřejné použití má přesnost 3.6 m a implementace pro vojenské použití má přesnost 0.1 m.

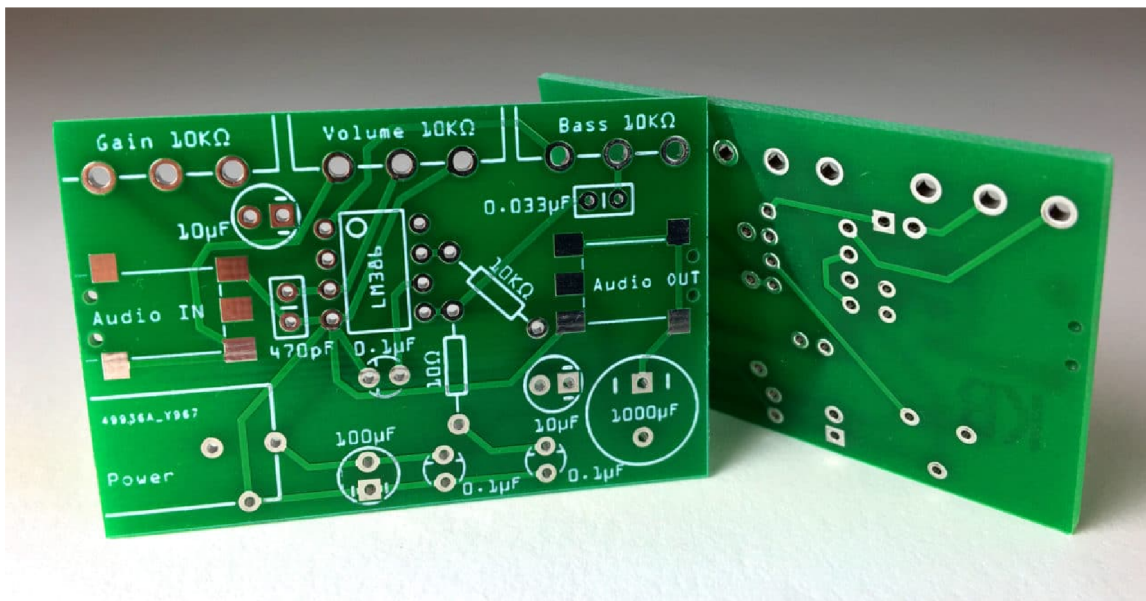
Uživatelé družicových polohových systémů nejsou limitováni jen na využívání jednoho konkrétního systému. Standardizace a vzájemné dohody mezi provozovateli jednotlivých systémů umožnily vyvinout veřejnou implementaci těchto systémů do podoby, ve které může přijímač použít pro výpočet své polohy data ze satelitů z různých systémů. Tímto spojením je zaručen větší počet viditelných satelitů, z nichž si zařízení může vybrat ty s nejlepší polohou pro výpočet své vlastní pozice. Pokud není přesnost veřejné implementace družicových polohových systémů dostatečná, lze použít augmentační metody, které dokáží vypočítanou polohu zpřesnit. Příkladem je diferenciální GPS, která dokáže zpřesnit vypočítanou polohu z veřejné implementace až na úroveň vojenské implementace.



## Kapitola 6

# Návrh desek plošných spojů

Deska plošných spojů (DPS), v angličtině Printed Circuit Board (PCB), je základní stavební komponenta, která se dnes používá k výrobě elektroniky[33][40]. Z fyzického hlediska je deska plošných spojů konkrétně nevodivý kus materiálu, většinou ve tvaru obdélníku, obsahující vodivé trasy, které slouží k propojení elektronických součástek, které se na desku mají umístit. Konkrétní deska je navržena pro konkrétní součástky a cílem je vždy propojit součástky tak, aby prováděly nějakou konkrétní činnost, například funkčnost MP3 přehrávače. Ukázkový vzhled desky plošných spojů je zobrazen na obrázku. 6.1.



Obrázek 6.1: Ukázka jednoduché desky plošných spojů bez osazených součástek.<sup>1</sup>

Vývoj desek plošných spojů a výběr konkrétních parametrů jejich jednotlivých součástí se dnes běžně provádí pomocí CAD programů (Computer-Aided Design).. V těchto programech lze vytvořit schéma tvořených obvodů a následně z těchto schémat vytvořit desku, která se má vyrobit. Tyto programy podstatně zjednodušují návrh elektronických zařízení, protože často obsahují velké množství podrobně popsanych součástek (symboly pro schémata i fyzické podoby) a při tvoření schémat a desek kontrolují, zda člověk neudělal chybu

<sup>1</sup>Převzato z: <https://www.circuitbasics.com/make-custom-pcb/>



(vytvoření zkratu, odstupy vodivých cest atd.). Mezi známé programy používané pro návrh elektronických zařízení patří například Altium Designer, KiCad a EAGLE.

## 6.1 Výroba desek plošných spojů

První metody pro tvorbu desek plošných spojů se začaly objevovat na počátku 20. století. Nejprve se experimentovalo s napařováním vodivých fólií na desky z nevodivého materiálu. Poté byly testovány různé chemické metody, pomocí kterých se vodiče připevňovaly na nevodivé materiály. Dnes se pro výrobu desek plošných spojů používá fotolitografie, díky které lze tvořit velice jemné geometrické obrazce z vodivého materiálu. Před vznikem desek plošných spojů se elektronická zařízení tvořila tím, že se natahovaly jednotlivé vodiče mezi součástkami zařízení. To však bylo velice nepraktické při vývoji velkého počtu zařízení a mohly tak jednoduše nastat chyby při výrobě. Naproti tomu výroba desek plošných spojů lze provádět stroji ve velkém množství, což velice přispělo k rozvoji elektronických zařízení. Dnes je výroba desek plošných spojů automatizována s tím, že i samotné nanesení součástek je u většiny vyráběných desek automatizováno.

## 6.2 Typy desek plošných spojů

Dnes existuje několik typů desek plošných spojů, které lze rozdělit podle počtu vodivých vrstev a samotného fyzického provedení:

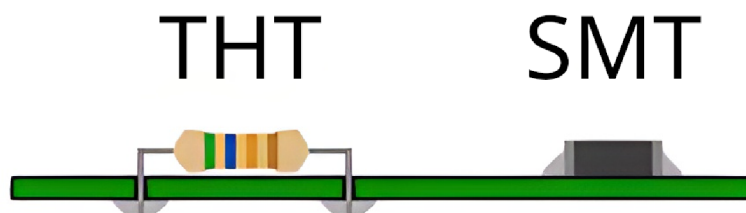
- **Jednostranné desky:** jednostranné desky jsou nejjednodušší typ desek plošných spojů, který má vodivé spoje na jedné straně nevodivého materiálu. Tento typ desky lze využít na velice jednoduché zařízení, kde není potřeba velký počet spojů a komponent. Výhoda tohoto typu desky je při automatickém osazování, protože jsou součástky umístěny jen z jedné strany, takže není potřeba desku nijak otáčet.
- **Oboustranné desky:** oboustranné desky jsou desky plošných spojů, které mají vodivé spoje na obou stranách nevodivého materiálu. Propojení spojů mezi oběma stranami desky se provádí přes provrtané a následně pokovené dírky. Tento typ desek je dnes velice oblíbený a používá se pro většinu jednodušších zařízení. Pokud jsou součástky umístěny na obou stranách desky, tak je potřeba při automatizovaném osazování zajistit otočení desky a uchycení součástek, aby nevypadly před tím, než jsou zapájeny. K tomu se často používá lepidlo. Tomuto problému při automatizovaném osazování se často vyhýbá tím, že druhá strana desky je použita jen pro navedení některých spojů mezi součástkami a zbytek napojení a umístění součástek je provedeno na přední straně desky.
- **Vícevrstvé desky:** vícevrstvé desky plošných spojů se používají v zařízeních, která vyžadují složité propojení součástek a specifické vlastnosti, jako je například lepší ochrana proti rušení. Tyto desky se skládají z více vodivých a nevodivých vrstev, které jsou nakonec slisovány k sobě (vodivý materiál, nevodivý materiál, vodivý materiál, nevodivý materiál atd.). Dnes se lze běžně setkat s deskami, které mají více než 4 vodivé vrstvy. Výhodou těchto desek je také vysoká integrace součástek, ale díky tomu, že některé vodivé vrstvy nejsou viditelné, nastává problém při hledání chyb a následných opravách zařízení. Známým zástupcem tohoto typu desky je například základní deska počítače.

- **Flexibilní desky:** většina desek plošných spojů má pevný formát, lze se však také setkat s deskami flexibilními. Tyto desky mohou sloužit k propojení několika pevných desek nebo rovnou nahrazovat pevné desky plošných spojů v zařízeních, kde je jejich flexibilita výhodná. Výhoda těchto desek je nižší hmotnost, větší odolnost vůči otřesům a větší přizpůsobitelnost tvaru výsledného zařízení. Tyto desky lze najít například v některých nositelných zařízeních.

Výběr konkrétního typu desky závisí vždy na požadavcích výsledného zařízení.

### 6.3 Typy součástek pro desky plošných spojů

Při návrhu desek plošných spojů lze využít dvou typů součástek. Jeden typ součástek používá drátové vývody pro připevnění k desce (Through-hole technology - THT) a druhý typ součástek se připevňuje na odhalené plošky vodičích cest (Surface-mount technology - SMT)[39]. Ukázka těchto druhů součástek je zobrazena na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Porovnání součástek s drátovými vývody (THT) a součástek s povrchovou montáží (SMT).<sup>3</sup>

Velké množství součástek se dnes prodává v obou těchto variantách, takže výběr vhodného typu součástky závisí primárně na aplikaci. Ve většině zařízení se dnes převážně používají SMT součástky, protože umožňují vysokou integraci a jejich osazení je jednodušší díky automatizovaným strojům. Naproti tomu THT součástky se využívají často k prototypování, protože se s nimi jednodušeji manipuluje. Ve finálních výrobcích se THT technologie používá například pro těžší součástky, protože vodiče poskytují lepší uchycení součástky k desce a také pro součástky, přes které má procházet větší proud, protože větší velikost THT součástek poskytuje lepší odvod tepla.

Dále lze u THT i SMT řešit jejich velikost nebo typ pouzdra. U některých SMD součástek, například čipů, určuje typ pouzdra (např. BGA nebo QFP) jak výslednou velikost součástky, tak umístění jednotlivých vývodů. Výběr konkrétního pouzdra a velikosti součástky ovlivňuje parametry jako odvod tepla a obtížnost pájení součástky na desku.

<sup>3</sup>Převzato z: <https://www.luisllamas.es/ventajas-y-y-desventajas-de-componentes-pth-frente-a-smd/>

# Kapitola 7

## PicoBaloony

Názvem PicoBaloony se dnes obecně označují malé atmosférické sondy, které zaznamenávají různé atmosférické veličiny a ty následně bezdrátově odesílají k budoucímu zpracování. Tyto sondy jsou většinou spojovány s vědeckou a meteorologickou činností, lze se však setkat i se sondami sestavenými pro jiné účely (například amatérské soutěže). Hlavním rozdílem PicoBaloony proti běžným atmosférickým sondám je jejich malá velikost a hmotnost. Konkrétní omezení na velikost a hmotnost těchto sond neexistují, lze se však dočíst že by jejich hmotnost měla být maximálně několik desítek gramů. PicoBaloony operují ve výškách od jednotek po malé desítky kilometrů a jsou vytvořeny tak, aby se vznášely v určité výšce a byly následně náhodně unášeny větrnými porывy. Nosný balón PicoBaloony bývá většinou naplněn héliem nebo vodíkem.

### 7.1 Historie PicoBaloony

Historie vývoje PicoBaloony se dá obecně spojit s rozvojem elektroniky a čím dál větším zájmem o atmosférická data. Meteorologie je obor, který má největší zájem o atmosférická data, a proto se vývoj PicoBaloony řeší především v tomto sektoru. Pro poskytování přesných předpovědí počasí je nezbytné pravidelně sbírat údaje z různých částí atmosféry, přičemž k tomu primárně slouží meteorologické sondy[29]. V některých obydlených oblastech, kde jsou požadavky na přesnost velké, se mohou vysílat meteorologické sondy i několikrát za den. Meteorologické sondy jsou obecně jen k jednomu použití a fungují tak, že během stoupání měří různé veličiny a až dosáhnou maximální výšky, tak jejich nosný balón praskne a zařízení se zřítí k zemi. Standardní meteorologická sonda, které se dnes používá je Vaisala RS41 (obrázek 7.1). Tato sonda má rozměry 272 x 63 x 46 mm a hmotnost 109 g[1]. Náhoda současných sond za PicoBaloony, které váží pouze několik desítek gramů, tedy představuje výhodné řešení z hlediska nákladů na výrobu a minimalizace odpadu.

---

<sup>1</sup>Převzato z: <https://www.meteopress.cz/vysvetleni/ve-tri-rano-na-kole-aneb-jak-se-lovi-meteorologicka-sonda/>





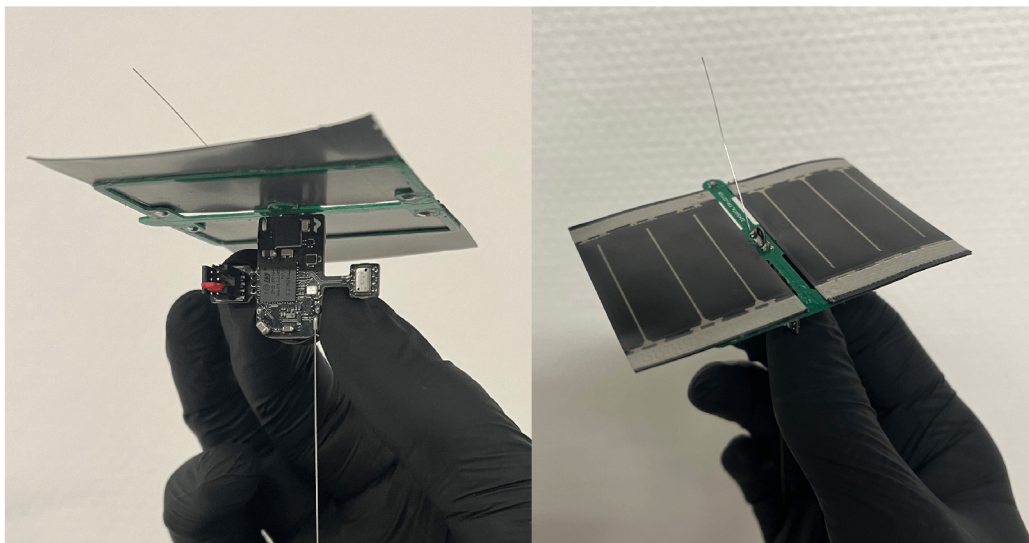
Obrázek 7.1: Meteorologická sonda Vaisala RS41.<sup>1</sup>

Na rozdíl od běžných meteorologických sond mají PicoBaloony výhodu v tom, že nejsou navrženy tak, aby se zřítily po dosažení své maximální výšky. PicoBaloony bývají navrženy tak, aby vystoupaly do nějaké výšky, v ní zůstaly a dále byly náhodně unášeny poryvy větru. Při použití nějakého pozičního systému (například GPS) lze tedy určit, kde PicoBalloon data naměřil, a takto sbírat užitečná data, dokud zařízení nepřestane fungovat. To, jak dlouho bude zařízení fungovat, může záviset na kapacitě baterie. Dnes je však běžné, že se k PicoBaloonům přidělávají také malé solární panely které zaručí že je zařízení během dne nabíjeno. Hlavními důvody, proč PicoBalloon přestane fungovat, jsou obvykle omezená odolnost elektronických komponentů a samotného balonu, který elektroniku nese.

## 7.2 Komerční použití PicoBaloonů

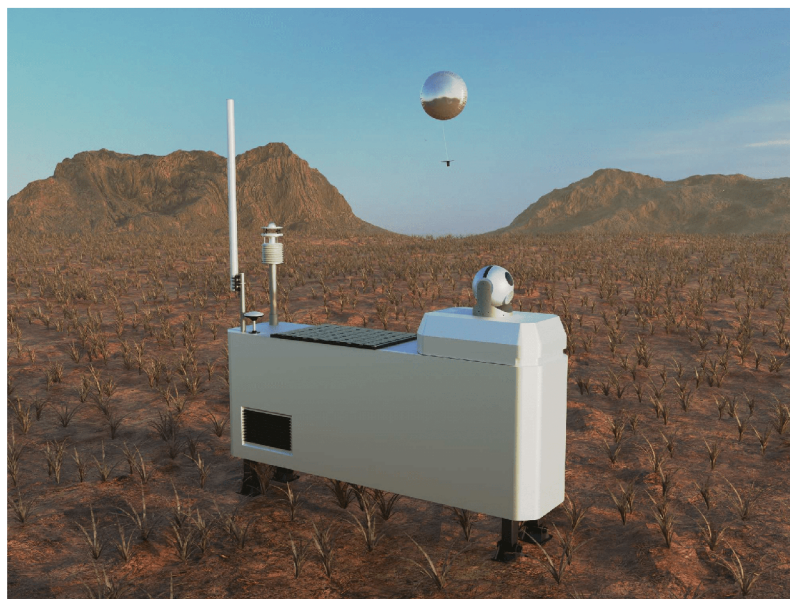
Vývojem PicoBaloonů pro meteorologické účely se zabývá konkrétně jedna slovenská firma s názvem Project PicoBalloon (<https://www.picoballoon.org/>). Zařízení této firmy zatím není k dispozici na trhu, ale plánuje se, že bude vážit 6 gramů, zaznamenávat 23 různých veličin, operovat ve výškách od 6 do 18 km, být napájeno solárními panely a data odesílat prostřednictvím technologie LoRaWAN. Prvotní verze zařízení tvořeného touto firmou je zobrazena na obrázku 7.2.

<sup>2</sup>Převzato z: <https://www.tindie.com/products/thepicoballoon/ferdinand-1020-ultralight-stratospheric-probe/>



Obrázek 7.2: PicoBaloony tvořený firmou Project PicoBaloony.<sup>2</sup>

Cílem této slovenské společnosti je udělat kompletní systém pro používání PicoBaloony. Z tohoto důvodu tvoří i automatizovaný vypouštěč PicoBaloony (obrázek 7.3) a webové rozhraní, na kterém lze sledovat, kde se jednotlivé PicoBaloony právě nachází (obrázek 7.4).

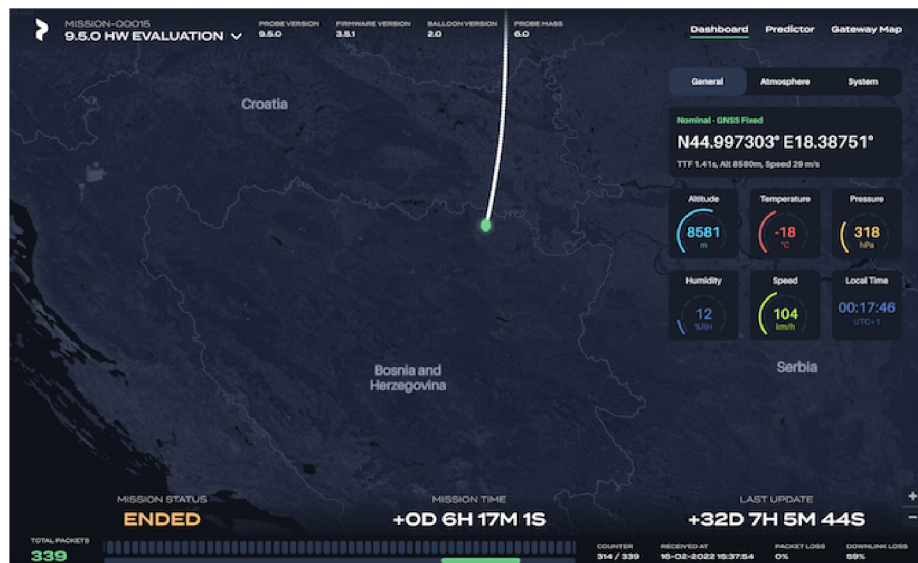


Obrázek 7.3: Automatizovaná vypouštěcí stanice PicoBaloony tvořená firmou Project PicoBaloony.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup>Převzato z: <https://www.picoballoon.org/technology>





Obrázek 7.4: Webové rozhraní pro sledování PicoBaloony tvořeno firmou Project PicoBaloony.<sup>6</sup>

### 7.3 Soutěže s PicoBaloony

S PicoBaloony se lze dále setkat na různých soutěžích, na kterých si lidé mohou vyzkoušet vytvořit svůj vlastní PicoBaloony. Jedna z těchto soutěží se nazývá PicoBaloony Challenge<sup>[6]</sup>. Tato soutěž probíhá na brněnské hvězdárně a soutěží se v ní o to, komu PicoBaloony vydrží ve vzduchu nejdéle. Soutěž PicoBaloony Challenge probíhá již několik let a většinou se uskutečňuje v červenci (v roce 2023 a 2024 se však soutěž neuskutečnila). Záběr z této soutěže je vyobrazen na obrázku 7.5.



Obrázek 7.5: Obrázek ze soutěže PicoBaloony Challenge na Brněnské hvězdárně.<sup>7</sup>

<sup>6</sup>Převzato z: <https://www.picoballoon.org/technology>

<sup>7</sup>Převzato z: <https://www.hvezdarna.cz/novinky/soutez-picoballoon-challenge-2022-startuje/>



Pravidla této soutěže jsou jednoduchá, účastníci si vytvoří vlastní zařízení o hmotnosti maximálně 20 g, které musí minimálně zaznamenávat svoji přibližnou výšku a tu společně s dalšími volitelnými informacemi bezdrátově odesílat. Výběr konkrétní bezdrátové technologie závisí na rozhodnutí konstruktéra, ale musí být vždy v souladu s telekomunikačními předpisy jednotlivých zemí světa. Je totiž možné že PicoBalloon bude poryvy větru zanesen kamkoliv na světě. Čas provozu PicoBalloonu, který rozhoduje o vítězi soutěže, se počítá od vypuštění po přijetí poslední zprávy. PicoBalloon je považován za ztracený, pokud nebyla přijata žádná zpráva po dobu 240 hodin (10 dní).

V roce 2022 se soutěž konala 2. července a účastnilo se jí devět týmů. Osmi týmům se podařilo PicoBalloon vypustit a nejlepším týmům vydržely PicoBalloon ve vzduchu po dobu několika dní. Výsledky pěti nejlepších týmů jsou zobrazeny v tabulce 7.1.

Pořadí	Tým	Poslední kontakt (UTC)	Doba letu
1.	BASA	8.7.2022 10:16	6d 0h 59m
2.	Project PicoBalloon	7.7.2022 5:04	4d 19h 19m
3.	HinataProbe	6.7.2022 23:51	4d 14h 49m
4.	Gde sonda?	6.7.2022 5:49	3d 20h 57m
5.	SP9UOB	4.7.2022 15:20	2d 6h 47m

Tabulka 7.1: Tabulka výsledků pěti nejlepších týmů soutěže PicoBalloon Challenge z roku 2022.<sup>9</sup>

Nejlepší výsledek v této soutěži se povedl polskému týmu v roce 2020 s PicoBalloonem SP9UOB, který vydržel ve vzduchu 40 dní 12 hodin 52 minut[30].

<sup>9</sup>Převzato z: <https://www.hvezdarna.cz/novinky/picoballoon-challenge-2022-zna-sve-viteze/>

## Kapitola 8

# Specifikace tvořeného PicoBaloonu

Cílem této práce je vytvořit PicoBaloon, který je podobný specifikací PicoBaloonům ze soutěže PicoBalloon Challenge a zároveň splňuje další rozšiřující požadavky. V zadání této práce jsou konkrétně specifikovány tyto požadavky:

- tvořený PicoBaloon musí vážit maximálně 20 g,
- PicoBaloon musí být schopný zaznamenávat svoji přibližnou výšku a polohu pomocí GPS modulu,
- zaznamenaná data musí PicoBaloon odeslat ke zpracování pomocí low-power bezdrátové sítě,
- tvořený PicoBaloon by měl obsahovat způsob napájení, který zaručí jeho provoz alespoň po dobu několika dní,
- PicoBaloon musí využít ke svému provozu low-power mikrokontrolér od společnosti NXP,
- realizace PicoBaloonu má být provedena na desce plošných spojů, která se má specificky pro tuto práci vytvořit,
- má být vytvořena aplikace, která dokáže data odeslaná z PicoBaloonu a jeho trasu přehledně zobrazit.

Výsledný PicoBaloon je primárně tvořen pro demonstraci komponent společnosti NXP, která se na jeho vývoji podílela. Cílem je tedy využít co nejvíce komponent od této společnosti (kde to bude možné) a otestovat jejich funkčnost pro tuto aplikaci.

Na základě zadání této práce, nastudovaných informací o PicoBaloonech a nastudovaných technologiích byla vytvořena podrobná specifikace, která obsahuje všechny požadavky na finální PicoBalloon, jenž bude v této práci vyvinut:

- hmotnost tvořeného zařízení musí být maximálně 20 g,
- předpokládaná výška nad hladinou moře, ve které bude PicoBalloon provozován je 10 km,
- zařízení musí být schopné provozu v teplotách až - 50 °C (přibližná minimální teplota ve výšce 10 km nad hladinou moře[34]),
- PicoBalloon bude obsahovat komponenty, které budou schopny zaznamenávat polohu, výšku, teplotu, atmosférický tlak a relativní vlhkost vzduchu během jeho provozu.
- zařízení bude obsahovat baterii, která má malou hmotnost, dobrou kapacitu a je schopná provozu v malých teplotách,
- baterie PicoBaloonu bude dobíjena solárním panelem,
- pro odesílání dat z PicoBaloonu bude použita low-power bezdrátová síť, která je dostupná na většině zemského povrchu, má malý komunikační modul a její využití spotřebovává málo energie,
- PicoBalloon by měl odesílat naměřená data alespoň jednou za hodinu,
- data z PicoBaloonu odeslaná prostřednictvím low-power bezdrátové sítě budou zobrazována ve webové aplikaci. Ta bude obsahovat interaktivní mapu s trasou PicoBaloonu a grafy znázorňujícími jednotlivé naměřené hodnoty v čase.

Od této práce se očekává, že vytvořený PicoBalloon bude zprovozněn a následně otestován jeho vypuštěním. Výsledky letu PicoBaloonu budou zhodnoceny a bude posouzeno, jak dobře vypuštěný PicoBalloon fungoval.

## Kapitola 9

# Návrh struktury systému

V této kapitole je popsáno, jak na základě specifikace systému a studia dostupných technologií byly specifikovány jednotlivé části hardwaru PicoBaloonu a softwaru pro přidruženou zobrazovací aplikaci. Části systému byly voleny tak, aby efektivně splňovaly všechny stanovené požadavky, a aby bylo možné je jednoduše implementovat. Jednoduchá implementace zaručuje, že na výsledném systému půjde efektivně pracovat a bude jej možné do budoucna rozumně upravovat pro případná další využití. Následující text je rozdělen na dvě části, kde první z nich popisuje součásti samotného zařízení PicoBaloonu, a druhá část popisuje strukturu aplikace pro zobrazení přijatých dat.

### 9.1 Struktura PicoBaloonu

Od PicoBaloonu se očekává, že bude schopný autonomního fungování. Logika fungování PicoBaloonu zahrnuje shromažďování a ukládání energie potřebné pro napájení zařízení, měření požadovaných veličin a následné odesílání těchto údajů pro další zpracování. Z tohoto popisu je zřejmé, že PicoBaloon půjde rozdělit obecně do těchto částí, které budou dohromady umožňovat funkčnost finálního zařízení. Rozdělení hardwaru PicoBaloonu na dílčí části i s popisem výběru zvolených implementačních technologií (kde je tento popis aplikovatelný) je přítomen v následujících odrážkách:

- **Generování elektrické energie:** PicoBaloon bude obsahovat solární panel, který bude generovat elektrickou energii ze slunečního svitu. Vygenerovaná energie bude následně efektivně ukládána do baterie. Zde je důležité, aby komponenty použité ke generování elektrické energie měly co nejmenší ztráty a dokázaly co nejvíce vygenerované energie uložit do vybrané baterie.
- **Baterie:** pro PicoBaloon je vhodné použít takovou baterii, která má malou velikost, velkou kapacitu, malé samovybíjení, dokáže poskytnout velké množství energie v jednom okamžiku pro odeslání dat rádiovým modulem (C rating<sup>1</sup>) a dokáže fungovat v nízkých teplotách. Na základě zde vyjmenovaných požadavků vychází nejlépe superkondenzátory [3]. Superkondenzátory mají dobrou odolnost vůči malým teplotám (dokáží fungovat i v - 40 °C), dokáží poskytnout hodně energie v jednom okamžiku a také mají dobrou životnost. Jejich nevýhoda je vyšší cena, malá kapacita a velké samovybíjení (závisí na konkrétním superkondenzátoru). Primárním důvodem proč,

---

<sup>1</sup><https://www.power-sonic.com/wp-content/uploads/2021/02/What-is-a-battery-C-rating.pdf>

není výhodné použít běžné prvky pro uložení elektrické energie, jako jsou Lithium-iontové a Lithium-polymerové baterie, je jejich špatná odolnost proti nízkým teplotám (menší kapacita při nižších teplotách a nemožnost nabít baterii, když je teplota pod 0 °C). Z tohoto důvodu by bylo nutné použít tepelnou izolaci na baterii, která by měla za následek větší hmotnost zařízení. Pokud by hardware PicoBaloonu obsahoval tepelnou izolaci, bylo by výhodné použít lithium-polymerovou baterii. Ta dokáže v jednom okamžiku také poskytnout velké množství energie (i když ne tolik jako superkondenzátor), přičemž nabízí vysokou kapacitu a nízké samovybíjení.

- **Příprava elektrické energie pro použití zbytkem systému:** napětí na baterii bude závislé na aktuálním stavu nabití, aby bylo možné energii z tohoto prvku využít dalšími komponentami, je nutné toto napětí upravit na hodnotu, kterou zbylé komponenty zařízení vyžadují pro svůj provoz. Bylo rozhodnuto provozovat zařízení na 3.3 V, a to z důvodu, že na této hodnotě pracuje velké množství dnes používaných digitálních zařízení[18]. Pro tuto část systému jsou potřeba komponenty, které efektivně převedou napětí baterie na 3.3 V, které využije zbytek systému. Napětí na baterii může být menší nebo větší než 3.3 V, z tohoto důvodu je nutné vybrat komponentu, která s těmito hodnotami dokáže pracovat.
- **Ovládací prvek zařízení:** zajištění logiky fungování PicoBaloonu bude mít na starost mikrokontrolér. Mikrokontroléry zajišťují funkčnost velkého množství IoT zařízení a běžný mikrokontrolér bude také dostatečný pro implementaci PicoBaloonu. Logika ovládání PicoBaloonu se skládá primárně z toho, že mikrokontrolér přečte data ze senzorů, připraví je pro odeslání, odešle je pomocí komunikačního modulu a následně bude spát do doby, než bude čas pro zopakování již specifikované funkčnosti. Na mikrokontrolér, který lze použít pro PicoBaloon se kladou nároky, jako je malá spotřeba, malá velikost, rozumná velikost RAM paměti, rozumná velikost paměti pro program, možnost usnutí na určitou dobu a dostatečný počet pinů a komunikačních rozhraní (SPI, I2C atd.) pro připojení všech periférií. Díky tomu, že tato práce je tvořena ve spolupráci s firmou NXP, která tvoří své mikrokontroléry, použije se mikrokontrolér od této společnosti.
- **Senzory:** PicoBaloon dle specifikace potřebuje senzory, které jsou schopné zaznamenávat polohu, výšku, teplotu, atmosférický tlak a relativní vlhkost vzduchu. Z tohoto důvodu bude použit GNSS modul, který získá aktuální polohu a výšku zařízení a pro zbylé hodnoty budou použity příslušné senzory, které jsou schopné měřit danou veličinu. Pro použité senzory (moduly) je důležité, aby měly malou velikost a spotřebu, dále pak musí mít komunikační rozhraní, pomocí kterého se připojují k mikrokontroléru (SPI, I2C atd.). Pro senzory, které se použijí, není nutná extrémně velká přesnost, protože by to znamenalo větší počet bitů, které je nutné odeslat, následkem by byla větší spotřeba energie a větší pravděpodobnost špatného přenesení dat. Pro účely této práce by u většiny měřených hodnot kromě zeměpisné šířky, zeměpisné délky, atmosférického tlaku, napětí solárního panelu a napětí baterie stačila přesnost jen na celé číslo, ale díky velkému maximálnímu limitu posílaných zpráv u vybraných komunikačních sítí bylo rozhodnuto, že není problém odeslat i hodnoty, kde není potřeba velká přesnost s přesností na dvě desetinná místa. Takto je možné dále provést rozsáhlejší zhodnocení naměřených dat a třeba i otestovat rozptyl v měřených datech.
- **Modul pro odeslání dat:** pro PicoBaloon je důležité použít komunikační modul, který má malou spotřebu, malou velikost a síť, se kterou modul komunikuje, by měla

mít co největší pokrytí zemského povrchu. Možné je využít dva, v principu rozdílné, způsoby komunikace, které si navzájem vykrývají svoje výhody a nevýhody. Konkrétně to jsou satelitní a pozemní komunikační sítě. Pro účely této práce jsem se rozhodl vytvořit dvě zařízení, kde každé demonstruje jeden typ komunikační sítě. Konkrétně byly vybrány komunikační sítě The Things Network (TTN) a Argos. TTN je pozemní síť, která používá LoRaWAN technologii pro své fungování a Argos je síť satelitní. Výhoda TTN sítě je její dobré pokrytí zemského povrchu (převážně obydlené oblasti v rozvinutých zemích<sup>2</sup>), odeslání dat přes tuto síť spotřebovává málo energie a malí uživatelé nemusí platit za její používání. Nevýhodou této sítě je, že používá rozdílné frekvence v různých regionech, rozdíl mezi těmito frekvencemi není tak velký a mělo by být možné komunikovat jedním modulem ve všech regionech<sup>3</sup>. Pro vybraný modul je však také potřeba vybrat anténu, která dokáže na potřebných frekvencích pracovat<sup>4</sup>. Další nevýhodou sítě LoRaWAN je, že neposkytuje komunikaci v neobydlených oblastech a její komunikační dosah je jen několik desítek kilometrů během nejlepších podmínek (přímá viditelnost a málo rušení). Naproti tomu síť Argos umožňuje komunikaci na celém zemském povrchu a využívá pro vysílání jen jednu frekvenci. Její nevýhodou je větší spotřeba elektrické energie pro komunikaci a vysoká cena (cena modulů i samotná komunikace).

Od komponent použitých pro jednotlivé části hardwaru PicoBaloonu se očekává, že budou malé, lehké a budou vyžadovat malé množství energie pro provoz. Tím bude zaručeno, že bude možné vyrobit co nejmenší zařízení s co nejmenší spotřebou. Malá velikost zařízení spolu s lehkými komponentami je důležitá pro splnění požadavku na maximální možnou dovolenou hmotnost a malá spotřeba je pak důležitá proto, aby bylo možné zvolit co nejmenší baterii, která dokáže zařízení napájet co nejdéle během doby, kdy solární panel nevyrábí novou energii. Dále se pak od všech komponent očekává dobrá odolnost vůči nízkým teplotám, které mohou v provozní výšce zařízení nastat.

Finální zařízení PicoBaloonu bude mít podobu desky plošných spojů, která bude osazená z obou stran s co největší hustotou komponent, aby se zajistila co nejmenší velikost a hmotnost samotné desky plošných spojů. K této desce bude efektivně připevněn solární panel, antény pro GNSS modul a komunikační modul sítě TTN nebo Argos. Zařízení bude také obsahovat montážní díry, které půjde použít k zavěšení zařízení provázky pod heliový balónek určený pro uskutečnění letu zařízení. Výsledný PicoBalloon bude mít podobu dle náčrtu na obrázku 9.1.

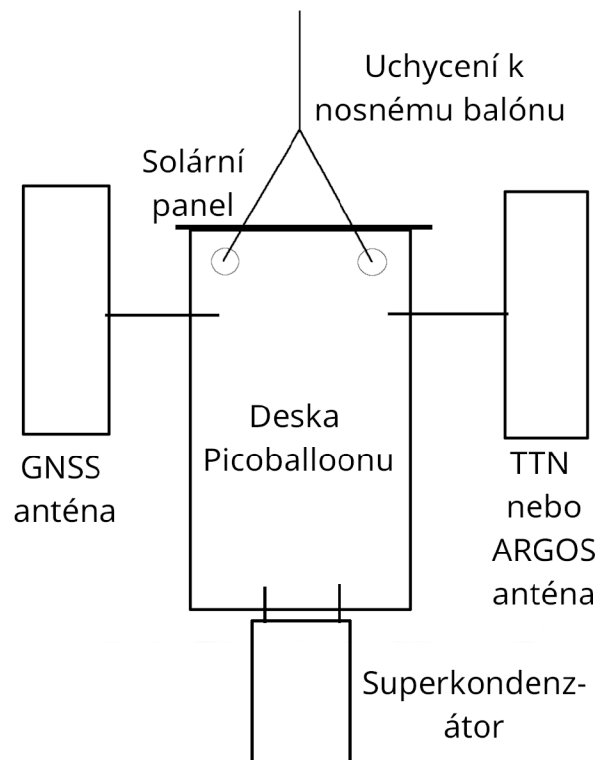
---

<sup>2</sup><https://ttnmapper.org/heatmap/>

<sup>3</sup><https://meshtastic.discourse.group/t/accidentally-bought-868-mhz-t-beam-need-915-mhz/4419>

<sup>4</sup><https://electronics.stackexchange.com/questions/644333/are-868-mhz-and-915-mhz-antennas-interchangeable>





Obrázek 9.1: Náčrt výsledné struktury zařízení PicoBalloonu.

Díky tomu, že zařízení bude pracovat ve venkovním prostředí a nebude umístěno v žádné krabici (z důvodu hmotnostní limitace), je nutné zajistit odolnost zařízení proti vlhkosti. Odolnost proti vlhkosti bude zajištěna potažením samotné desky plošných spojů ochranným lakem.

## 9.2 Struktura webové aplikace

Přidružená webová aplikace k zařízení PicoBalloonu bude sloužit k získání hodnot posílaných PicoBalloonem z komunikačních sítí. Tyto údaje pak uloží do databáze a umožní jejich přehledné zobrazení uživateli. Z tohoto popisu je vidět, že aplikace by se měla skládat z těchto vyjmenovaných částí. Podrobnější popis jednotlivých částí aplikace je uveden v následujících odrážkách:

- **Získání dat:** aplikace bude získávat data ze serverů konkrétní komunikační sítě. Jak síť TTN, tak i síť Argos nabízí nějakou formu API, které lze využít pro přístup k datům, které PicoBalloon posílá. Pro TTN je to konkrétně MQTT<sup>5</sup> a pro Argos je to SOAP<sup>6</sup>. Funkčnost této části aplikace bude, že se přes API získají nová data, která PicoBalloon poslal a připraví se pro uložení do databáze.
- **Uložení dat do databáze:** v databázi budou uložena data, která PicoBalloon během svého letu poslaly a byly zaznamenány použitou komunikační sítí. Data, která

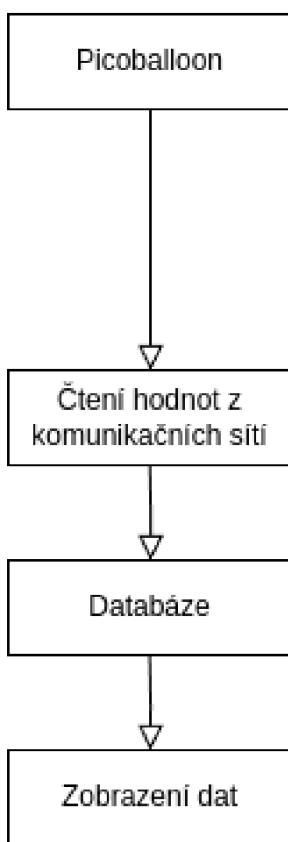
<sup>5</sup><https://www.thethingsnetwork.org/docs/applications/mqtt/api/>

<sup>6</sup><https://www.argos-system.org/products/available-argos-options/>

je potřeba o PicoBaloonech uložit nejsou nijak složitá a bude stačit jednoduchá databáze s jednou tabulkou, do které se uloží název PicoBaloonu, ke kterému data patří, odeslaná data a čas, kdy byly data přijata komunikační sítí.

- **Zobrazení dat uživateli:** data z databáze budou uživatelům zobrazena webovými stránkami. Webová stránka umožní výběr PicoBaloonu, pro který se mají data zobrazit a následně zobrazí jeho trasu spolu s přenesenými daty na mapě. Pro lepší přehlednost naměřených veličin PicoBaloonem bude webová stránka také umožňovat zobrazení dat v grafech.

Zde prezentované rozdělení aplikace (zobrazeno také na obrázku 9.2) je výhodné z toho důvodu, že pokud by bylo potřeba určitou část této aplikace nahradit, stačí jen upravit konkrétní část aplikace. Tím je umožněna úprava jednotlivých částí aplikace na jiné technologie a případně i změna pro použití v jiných aplikacích.



Obrázek 9.2: Náčrt výsledné struktury tvořeného systému pro PicoBaloony.

Při implementaci této části je také dobré brát ohled na to, aby webová aplikace byla implementována formou, která lze spustit na jakémkoli počítači. Takto je tedy umožněno, aby ji uživatel hostoval na jakémkoli počítači, klidně i u sebe doma. Díky této implementaci není potřeba řešit placený hosting, pokud ho uživatel nepotřebuje.

## Kapitola 10

# Výběr komponent pro PicoBaloon

Obsahem této kapitoly je popis výběru konkrétních komponent, které byly díky svým parametrům zvoleny jako vhodné pro použití na zařízení PicoBaloonu. Komponenty byly vybírány tak, aby splňovaly veškerou funkčnost zařízení a zároveň, jak již bylo zmíněno, měly malou velikost, hmotnost a spotřebu. Popis výběru komponent obsažený v následujícím textu je rozdělen stejně jako tomu bylo v předchozí kapitole (kapitola 9), která popisuje návrh podoby zařízení, na sekce, které se věnují konkrétní logické části zařízení.

### 10.1 Generování elektrické energie

Jak bylo zmíněno, tak energie pro napájení PicoBaloonu bude dodávána ze solárního panelu. Je tedy potřeba vybrat takový solární panel, který poskytuje dostatečné množství energie, je lehký a zároveň dokáže operovat ve venkovním prostředí. Výběr solárního panelu, který bude použit, byl proveden tak, že byly porovnány solární panely dostupné na stránkách velkých prodejců elektrických součástek (Mouser<sup>1</sup> a Digikey<sup>2</sup>) a byl vybrán ten, který má vhodné, již zmíněné parametry. Pro účely této práce byl konkrétně vybrán monokrystalický solární panel SM111K04L od společnosti ANYSOLAR Ltd (obrázek 10.1). Tento solární panel má pevný formát, rozhodnutí vybrat pevný solární panel proti flexibilnímu bylo učiněno hlavně z důvodu, že pevné solární panely generují víc energie při menší velikosti panelu<sup>3</sup> a menší panel je jednodušší upevnit k zařízení. Nevýhoda použití většího solárního panelu u tohoto typu zařízení je v tom, že vítr může se zařízením s větším panelem více pohazovat a zvětšuje se šance, že se hardware PicoBaloonu uvolní od nosného balónku. Tento solární panel dokáže operovat v teplotách od - 40 do 90 °C , má hmotnost 2.5 g, malé rozměry (43.0 x 14.0 x 2.0 mm) a poskytuje za nejlepších podmínek až 98 mW při napětí 2.2 V.

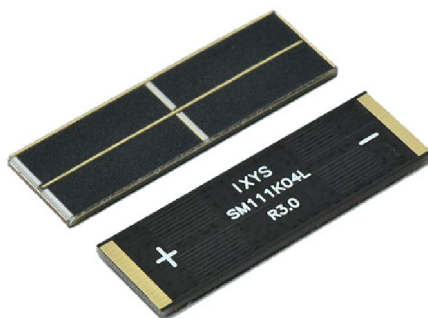
---

<sup>1</sup><https://cz.mouser.com/>

<sup>2</sup><https://www.digikey.cz/>

<sup>3</sup><https://glydesolar.com/flexible-solar-panels-vs-rigid/>

<sup>4</sup>Převzato z: <https://www.digikey.cz/en/products/detail/anysolar-ltd/SM111K04L/9990435>



Obrázek 10.1: Solární panel SM111K04L od firmy ANYSOLAR Ltd.<sup>4</sup>

Energie, kterou panel poskytuje, by měla pro účely zařízení tohoto typu být dostatečná, pokud se vezme v potaz, že zařízení bude pracovat po dobu několika sekund jednou za delší časový interval a proud, který by zařízení mohlo spotřebovat, by se měl pohybovat v řádu malých stovek mA při napětí 3.3 V (u následujících hodnot odběru proudu se automaticky myslí napájecí napětí 3.3 V, pokud není uvedeno jinak). Zde odhadovaný odběr elektrického proudu je reprezentován z většinové části jen rádiovým komunikačním modulem, co se týče mikrokontroléru a senzorů, tak jejich odběr by se měl pohybovat jen kolem 10 - 20 mA. Na základě zde prezentovaných hodnot lze dopočítat pomocí vzorečku pro elektrickou práci, že pokud by solární panel generoval 50 % svého maximálního možného výkonu (solární panel nikdy negeneruje udávanou hodnotu z laboratorních testů díky neideálnímu úhlu ke slunci, mrakům atd.) a proud spotřebovávaný zařízením by byl 300 mA (proud spotřebovávaný rádiovým modulem by neměl přesáhnout tuto hodnotu u vybraných technologií) po dobu 3 s, tak množství této energie solární panel vygeneruje přibližně během 1 minuty, což je více než dostatečné. Výpočet je zobrazen v následující rovnici 10.1.

$$\begin{aligned}
 Pz &= Uz * Iz * tz = 3.3[V] * 0.3[A] * 3[s] = 2.97J \\
 ts &= Ps / (Us * Is) = 2.97[J] / (2.23[V] * 0.02195[A]) = 60.676s
 \end{aligned}
 \tag{10.1}$$

Pz -> Elektrická práce potřebná pro odeslání dat  
 Uz -> Napájecí napětí zařízení  
 Iz -> Proud spotřebovávaný zařízením  
 tz -> Čas potřebný pro odeslání dat  
 Ps -> Elektrická práce vygenerovaná solárním panelem  
 Us -> Napětí na solárním panelu, převzato z datového listu  
 Is -> Proud generovaný solárním panelem snížený o 50 %, převzato z datového listu solárního panelu  
 ts -> Čas potřebný pro vygenerování potřebné elektrické práce

Konkrétní teoretická maximální spotřeba k relevantním komponentám bude dále popsána v této kapitole. Více informací o tomto solární panelu lze získat z jeho katalogového listu<sup>5</sup>.

Poté, co solární panel vygeneruje elektrickou energii, je potřeba ji efektivně ukládat do baterie. K tomuto účelu byl zvolen čip BQ25504RGTR od společnosti Texas Instruments. Tento čip byl vybrán na základě článku popisujícího realizaci Energy harvesteru, který je inspirací pro výslednou použitou implementaci [27]. Čip BQ25504RGTR funguje de facto jako nabíječka, která dokáže brát energii z generátoru elektrické energie, který ji produkuje v malém množství a ukládá ji do baterie. Výhodou tohoto čipu je, že dokáže pracovat s různými generátory elektrické energie (TEGy, solární panely atd.) i s různými bateriemi (Li-ion, Li-pol, superkondenzátory atd.). Dále tento čip nabízí možnost nastavení maximálního napětí, po kterém se baterie přestane nabíjet, minimálního napětí, při kterém čip přestane poskytovat energii z baterie dalším komponentám a "OK" napětí, při jehož překročení vysílá čip logickou jedničku na svém pinu, která může být použita pro aktivování další součástky. Tato vysoká univerzálnost čipu je výhodná pro možné úpravy zařízení na jiné baterie nebo i jiné možnosti napájení. Více informací o tomto čipu jsou k dispozici v jeho katalogovém listu<sup>6</sup>.

## 10.2 Uložení elektrické energie

Energie vygenerovaná solárním panelem bude pomocí nabíječky ukládána do superkondenzátoru, ze kterého bude napájen zbytek zařízení. Při výběru konkrétního superkondenzátoru bylo důležité vybrat superkondenzátor s dostatečnou kapacitou, malou velikostí a hmotností. Na základě těchto parametrů byla prohledávána nabídka superkondenzátorů na stránce Mouser a byl vybrán superkondenzátor MAL222551013E3 od společnosti Vishay. Tento superkondenzátor má kapacitu 10 F (tolerance -20 až +50 %), velikost 32 x 10.5 mm (délka a průměr), hmotnost 3.5 g a jeho maximální napětí je 2.7 V. Maximální napětí pro superkondenzátor bylo vybráno tak, aby splňovalo přípustné hodnoty pro nabíječku a bylo o něco větší než je maximální napětí solárního panelu. To umožňuje nabíjet superkondenzátor přímo solárním panelem bez jeho poškození, pokud by byla tato funkčnost potřeba, avšak tento způsob nabíjení nevyužívá veškerou energii ze solárního panelu, protože superkondenzátor se nabíjí jenom, pokud je napětí na superkondenzátoru menší než to, co vychází ze solárního panelu. Co se týče kapacity superkondenzátoru tak 10 F při 2.7 V je více než dostatečných, protože energie uložená v superkondenzátoru při plném nabití je přibližně 36.45 J<sup>7</sup>. Pokud se vezme, že zařízení spotřebovává přibližně 300 mA pro dobu 3 s při odesílání dat, data odešle jednou za hodinu a zbytek času spí (odběr proudu během spánku by se mohl pohybovat kolem 0.1 mA), tak celé zařízení za jednu hodinu provozu spotřebuje přibližně 4.157 J. Výpočet této hodnoty je zobrazen rovnicí 10.2.

---

<sup>5</sup><https://waf-e.dubudisk.com/anysolar.dubuplus.com/techsupport@anysolar.biz/018Adzo/DubuDisk/www/Gen2/SM111K04L%20DATA%20SHEET%20202007.pdf/>

<sup>6</sup>[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf?ts=1714397877688&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25504](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf?ts=1714397877688&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25504)

<sup>7</sup><https://www.omnicalculator.com/physics/capacitor-energy>

$$\begin{aligned}
P_z &= U_z * I_z * t_z = 3.3[V] * 0.3[A] * 3[s] = 2.97J \\
P_s &= U_z * I_s * t_s = 3.3[V] * 0.0001[A] * 3597[s] = 1.187J \\
P_c &= P_z + P_s = 2.97[J] + 1.187[J] = 4.157J
\end{aligned}
\tag{10.2}$$

$P_z$  -> Elektrická práce potřebná pro odeslání dat  
 $U_z$  -> Napájecí napětí zařízení  
 $I_z$  -> Proud spotřebovávaný zařízením při odesílání dat  
 $t_z$  -> Čas potřebný pro odeslání dat  
 $P_s$  -> Elektrická práce potřebná pro spánek zařízení  
 $I_s$  -> Proud spotřebovávaný zařízením při spánku  
 $t_s$  -> Čas spánku zařízení  
 $P_c$  -> Elektrická práce spotřebovaná zařízením za hodinu

Tento údaj udává, že by zařízení mohlo fungovat až 8 h bez slunečního svitu. S touto kapacitou by tedy zařízení mělo zvládnout fungovat i během noci, záleží však na tom, kde se zařízení nachází, ročním obdobím a mracích. Více informací o superkondenzátoru lze najít v jeho katalogovém listu<sup>8</sup>.

Pokud by PicoBaloon obsahoval tepelnou izolaci nebo by zařízení bylo použito pro jiný účel, lze použít i Li-Pol baterii. Příkladem může být baterie od společnosti GeB s kapacitou 110 mAh<sup>9</sup>. Tato baterie má velikost 16 x 30 x 3 mm, hmotnost 4 g a nominální napětí 3.7 V. Výhodou této baterie je množství uchované energie, která je proti použitému superkondenzátoru přibližně 40x větší (použitý superkondenzátor má přibližně 36 J a baterie přibližně 1440 J energie), což by umožnilo mnohem delší provoz zařízení bez solárního panelu. Nevýhodou této baterie je její malá odolnost proti nízkým teplotám. Dále také Li-pol baterii nelze napájet přímo ze solárního panelu a je vždy nutné použít nabíjecí čip.

### 10.3 Upravení napájecího napětí na konstantní hodnotu

Napětí prvku, ve kterém je uložena elektrická energie, se mění v závislosti na tom, jak je nabitý či vybitý, což je problém, protože zbylé komponenty zařízení vyžadují stabilní napájecí napětí pro své fungování. Z tohoto důvodu je potřeba výstupní napětí prvku, ve kterém je uložena elektrická energie, upravit na konkrétní hodnotu, která může být použita pro napájení zbylých komponent zařízení. Napětí, které zbylé komponenty zařízení vyžadují, je 3.3 V. K tomuto účelu byl zvolen čip TPS61200DRC od společnosti Texas Instruments, který byl vybrán na základě článku použitým pro studium nabíjení superkondenzátorů [4]. Tento čip má vysokou efektivitu, jeho vstupní napětí může být od 300 mV do 5.5 V, má volitelné výstupní napětí od 1.8 do 5.5 V, dokáže měnit jak větší napětí na menší, tak i menší na větší (Buck-boost) a má maximální výstupní proud 1.35 A. Výhodou tohoto čipu je, že dokáže spolupracovat s různými bateriemi a jeho minimální vstupní napětí 300 mV je výhodné pro superkondenzátor, protože dokáže využít většinu jeho uložené energie. Možnost volby výstupního napětí může být také výhodná při budoucí upravě zařízení, pro kterou by byla potřeba jiná hodnota napájecího napětí pro zbylé prvky zařízení (třeba 1.8 V). Více informací o tomto čipu nalezneme v jeho katalogovém listu<sup>10</sup>.

<sup>8</sup><https://www.vishay.com/docs/28449/225ed1c-r-enycap.pdf>

<sup>9</sup><https://www.laskakit.cz/geb-lipol-baterie-301630-110mah-3-7v-jst-ph-2-0/>

<sup>10</sup>[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61200.pdf?ts=1714390152720&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61200.pdf?ts=1714390152720&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)



## 10.4 Mikrokontrolér

Z důvodu, že tato práce byla tvořena ve spolupráci se společností NXP, tak musel být použit mikrokontrolér od této společnosti. Konkrétně byl vybrán mikrokontrolér K32L2B31VFT0A, který byl doporučen konzultantem ze společnosti NXP pro tuto práci. Tento mikrokontrolér může pracovat maximálně na rychlosti 48 MHz, má 256 kB paměti pro program, 32 kB RAM paměti, 36 vstupně výstupních pinů pro obecné použití, 5 časovačů a moduly, které nabízí komunikaci přes rozhraní I2C, SPI, UART a USB. Podstatnými parametry tohoto mikrokontroléru jsou jeho malá velikost (7 x 7 mm), obsáhlé vstupně výstupní rozhraní, velká paměť pro program, do které je možné načíst i obsáhlejší kód a uzpůsobení pro provoz s malou spotřebou. Pro dosažení co nejmenší spotřeby tento mikrokontrolér nabízí Very-low-power run mód, ve kterém pracuje na rychlosti 2 MHz a spotřebovává přibližně 200  $\mu\text{A}$  při 3.3 V (v této hodnotě není započítána spotřeba interních modulů mikrokontroléru, jako je SPI, UART atd.). Dále pak během doby, co zařízení čeká na čas, než má znovu odeslat měřené informace, lze mikrokontrolér přepnout do Very-low-leakage stop módu, ve kterém bere přibližně 1.5  $\mu\text{A}$  při 3.3 V. To, jak dlouho má být mikrokontrolér v Very-low-leakage stop módu, lze ovládat interním časovačem, který zařízení vzbudí, až dopočítá do nastavené hodnoty. Více informací o tomto čipu lze získat z jeho katalogového listu<sup>11</sup>.

## 10.5 Senzory

Na základně specifikace tohoto zařízení byly vybrány následující čipy, které dokáží získat aktuální polohu zařízení za pomoci GNSS systémů a změřit aktuální tlak, relativní vlhkost a teplotu. Jedná se konkrétně o čipy MAX-M10S, SHT40 a MPL3115A2. Dalšími důležitými parametry pro výběr těchto čipů byla také existence vývojových desek a ovládacího kódu pro platformu Arduino<sup>12</sup>. Takto je možné otestovat funkčnost komponent a využít již existující kód pro tvorbu výsledného firmwaru zařízení PicoBaloonu.

Modul MAX-M10S-00B od společnosti U-blox slouží k získání polohy za pomoci GNSS systémů (obrázek 10.2). Tento modul byl nalezen při prohledávání článků o GNSS modulech s malou spotřebou<sup>13</sup> a následně byl zvolen pro tuto aplikaci díky jeho malé velikosti (10.1 x 9.7 x 2.5 mm), hmotnosti (0.5 g), podpoře více navigačních systémů a malé spotřebě (proud 11.5 mA na 3 V napájecím napětí při získávání polohy). Tento modul dokáže používat signály ze všech dnes primárně používaných satelitních navigačních systémů (GPS, Galileo, GLONASS a BeiDou), což zaručuje velkou dostupnost satelitů pro přesný a rychlý výpočet aktuální polohy. Doba, za kterou by měl modul vypočítat aktuální polohu po studeném startu, je přibližně 27 s, tento čas lze však zlepšit pomocí takzvaného teplého startu. Při tomto typu startu se udržuje RAM paměť tohoto čipu v provozu (spotřeba přibližně 28  $\mu\text{A}$  na 3.3 V) a již dříve vypočtené údaje o orbitách satelitů lze pak znova využít pro další výpočet polohy. Rychlost získání polohy během teplého startu je přibližně 1 s u tohoto modulu. Nevýhodou tohoto modulu je jeho vyšší cena. Tento modul lze propojit s mikrokontrolérem pomocí I2C nebo UART rozhraní. Více informací o tomto čipu lze nalézt v jeho katalogovém listu<sup>14</sup>.

<sup>11</sup><https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/K32L2B3x-1670176.pdf>

<sup>12</sup><https://www.arduino.cc/>

<sup>13</sup><https://www.u-blox.com/en/u-blox-m10-ultra-low-power-platform>

<sup>14</sup>[https://cz.mouser.com/datasheet/2/1025/MAX\\_M10S\\_DataSheet\\_UBX\\_20035208-3180723.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/1025/MAX_M10S_DataSheet_UBX_20035208-3180723.pdf)



Obrázek 10.2: GNSS modul MAX-M10S-00B od společnosti U-blox.<sup>15</sup>

Pro fungování tohoto modulu je nutné připojení antény, která bude signály od GNSS satelitů přijímat. K tomuto účelu byla vybrána anténa od společnosti Molex (obrázek 10.3), která byla nalezena na stránkách Mouser. Tato anténa, která je optimalizovaná pro GNSS frekvence, byla vybrána díky její malé velikosti (40.4 x 15.4 mm), malé hmotnosti (0.5 g) a flexibilnímu provedení. Anténa se připojuje pomocí U.FL konektoru, který je také výhodný díky malé velikosti a hmotnosti. Malá hmotnost antény, flexibilní provedení a relativní pevnost U.FL konektoru je také výhodná protože pro anténu není potřeba tvořit žádnou uchycovací konstrukci. Více informací o anténě lze najít na stránce prodejce<sup>16</sup>.



Obrázek 10.3: Anténa pro GNSS modul od společnosti Molex.<sup>17</sup>

<sup>15</sup>Převzato z: [https://cz.mouser.com/ProductDetail/u-blox/MAX-M10S-00B?qs=A6e0%252BMLsxnTOPfQYPb7LLQ%3D%3D&mgh=1&utm\\_id=20232119985&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwrcKxBhBMEiwAIVF8rK7Ch2vxFxcLI-ddT0mgIifPnV9WqljypWkgDGNY7sQKJNPHOB9gYRoC9XwQAvD\\_BwE](https://cz.mouser.com/ProductDetail/u-blox/MAX-M10S-00B?qs=A6e0%252BMLsxnTOPfQYPb7LLQ%3D%3D&mgh=1&utm_id=20232119985&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwrcKxBhBMEiwAIVF8rK7Ch2vxFxcLI-ddT0mgIifPnV9WqljypWkgDGNY7sQKJNPHOB9gYRoC9XwQAvD_BwE)

<sup>16</sup><https://cz.mouser.com/ProductDetail/538-206560-0050>

<sup>17</sup>Převzato z: <https://nl.farnell.com/en-NL/molex/206560-0050/gnss-antenna-1-599-1-605ghz-1/dp/3498941>

Senzor SHT40I-AD1B-R2 od společnosti Sensirion umožňuje měřit relativní vlhkost vzduchu a teplotu. Tento senzor byl nalezen při prohledávání malých senzorů vlhkosti pro Arduino<sup>18</sup>. Přednosti tohoto senzoru jsou jeho velikost (1.2 x 1.5 mm), přesnost (16 bitů), rozsah měření (- 40 do 125 °C) a spotřeba (proud 350  $\mu$ A při 3.3 V během měření). Senzor komunikuje s mikrokontrolérem pomocí I2C rozhraní. Tento senzor lze koupit i ve variantě s ochrannou membránou (SHT40I-AD1F-R2), která umožňuje fungování i v horších podmínkách s velkým počtem částic ve vzduchu. Více informací o tomto senzoru lze získat z jeho katalogového listu<sup>19</sup>.

Poslední senzor na zařízení PicoBaloonu je senzor MPL3115A2ST1 od společnosti NXP, který měří teplotu a absolutní tlak vzduchu. Tento senzor byl nalezen při prohledávání produktů od společnosti NXP a byl vybrán primárně z toho důvodu, že má dobré parametry a že je vyráběn společností NXP, se kterou byla tato práce tvořena. Přednostmi tohoto senzoru jsou jeho dobrý měřicí rozsah (20 až 110 kPa, - 40 až 85 °C), přesnost (20 bitů - tlak, 12 bitů - teplota), spotřeba (proud 40  $\mu$ A při 3.3 V) a rozsáhlá funkčnost (interní přepočítání tlaku na výšku nebo programovatelná přerušení). Senzor komunikuje s mikrokontrolérem pomocí I2C rozhraní. Více informací o tomto senzoru lze získat z jeho katalogového listu<sup>20</sup>.

## 10.6 Komunikační moduly

Pro verzi zařízení s TTN sítí byl vybrán komunikační modul LoRa1276-868 od společnosti NiceRF (obrázek 10.4), který byl objeven při studiu dostupných modulů pro platformu Arduino. Tento modul je malý (17 x 17.3 mm), lehký (0.5 g), poskytuje dobrý vysílací výkon a používá čip od společnosti Semtech, která je primárním výrobcem LoRa komunikačních čipů. Konkrétně byla zvolena verze modulu pro frekvenci 868 MHz, což je frekvence, která se používá v Evropě, kde se tento modul bude testovat. Tento modul je schopen vysílat až výkonem 20 dBm (proud 120 mA při 3.3 V), ale regulace TTN sítě udávají maximální povolený výkon jen 14 dBm (proud 44 mA při 3.3 V). Z tohoto důvodu bude tento modul používán jen na povoleném vysílacím výkonu. Tento modul komunikuje s mikrokontrolérem přes SPI rozhraní. Více informací o tomto modulu lze získat na stránce výrobce<sup>21</sup>. Stejně jako GNSS modul, tak i tento modul potřebuje anténu k tomu, aby mohl vysílat. Pro účely této práce byla vybrána, stejně jako u GNSS modulu, anténa od společnosti Molex. Tato anténa má stejnou podobu jak anténa u GNSS modulu a liší se jen velikostí. Velikost této antény je 87.4 x 12.4 mm a její hmotnost je 0.7 g. Více informací o této anténě lze získat na stránce prodejce<sup>22</sup>.

---

<sup>18</sup><https://rphishop.cz/adafruit/4624-adafruit-sensirion-sht40-senzor-teploty-a-vlhkosti-stemma-qtqwiic.html>

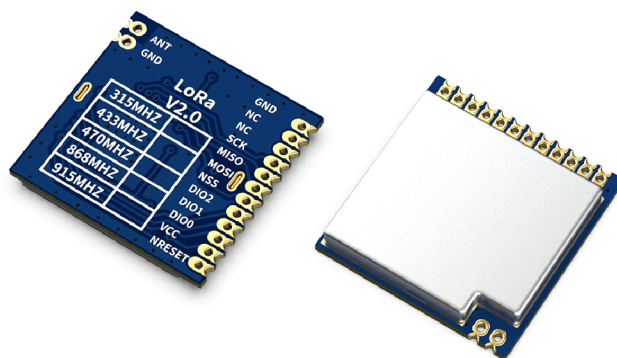
<sup>19</sup>[https://cz.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion\\_Datasheet\\_SHT4xI\\_Digital-3305842.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion_Datasheet_SHT4xI_Digital-3305842.pdf)

<sup>20</sup><https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/MPL3115A2S-3103208.pdf>

<sup>21</sup><https://www.nicerf.com/lora-module/sx1276-lora-module-lora1276-1.html>

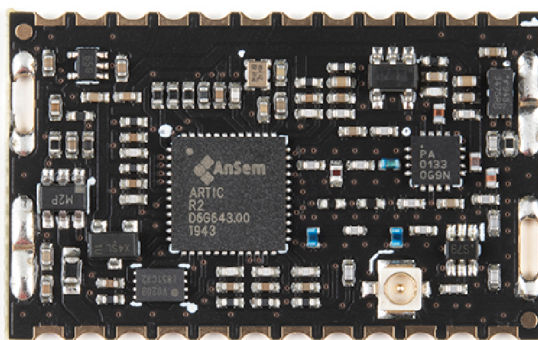
<sup>22</sup><https://cz.mouser.com/ProductDetail/538-206764-0050>

<sup>23</sup>Převzato z: <https://www.nicerf.com/lora-module/sx1276-lora-module-lora1276-1.html>



Obrázek 10.4: Modul LoRa1276-868 pro komunikační síť TTN od společnosti NiceRF.<sup>23</sup>

Pro Argos verzi tohoto zařízení byl vybrán modul SparkFun IOTA od společnosti SparkFun Electronics (obrázek 10.5), který byl objeven při studiu článku o satelitních komunikačních technologiích na stránce SparkFun Electronics<sup>24</sup>. Tento modul má malou velikost (33 x 20 mm), hmotnost (3 g) a dobrý vysílací výkon (až 26 dBm). Proud spotřebovávaný tímto modulem při plném vysílacím výkonu 26 dBm, je přibližně 246 mA při napájecím napětí 3.3 V. Tento modul však umožňuje i snížit vysílací výkon na 21 dBm, při kterém spotřebovává přibližně 185 mA při napájecím napětí 3.3 V. Redukovaný vysílací výkon lze využít v oblastech bez velkého rádiového šumu a tím ušetřit energii. Pro PicoBaloon lze tento redukovaný vysílací výkon použít, protože zařízení se bude nacházet ve výšce kolem 11 km, kde se rádiové rušení, přítomné ve městech, již nevyskytuje. Tento modul komunikuje s mikrokontrolérem přes SPI rozhraní. Více informací o tomto modulu lze získat na stránce výrobce<sup>25</sup>.



Obrázek 10.5: Modul SparkFun IOTA pro komunikační síť Argos od společnosti SparkFun Electronics.<sup>27</sup>

<sup>24</sup><https://learn.sparkfun.com/tutorials/argos-artic-r2-satellite-communication-guide>

<sup>25</sup>[https://www.sparkfun.com/products/17984?\\_ga=2.57584810.1282404974.1714486445-](https://www.sparkfun.com/products/17984?_ga=2.57584810.1282404974.1714486445-566272601.1707215879)

566272601.1707215879

<sup>27</sup>Převzato z: [https://www.sparkfun.com/products/17984?\\_ga=2.57584810.1282404974.1714486445-](https://www.sparkfun.com/products/17984?_ga=2.57584810.1282404974.1714486445-566272601.1707215879)  
566272601.1707215879

Pro Argos modul byla vybrána anténa dle doporučení výrobce modulu. Doporučená anténa má podobu kabelu, je dlouhá 183 mm a váží 0.4 g. Více informací o této anténě lze najít na stránce prodejce<sup>28</sup>.

## 10.7 Cena za hlavní komponenty

Na základě zde prezentovaných komponent lze spočítat, jaká bude cena za tyto základní součástky, ze kterých se bude zařízení PicoBaloonu skládat. Soupis cen jednotlivých součástí rozdělený na verzi desky pro síť TTN a Argos je zobrazen v tabulce 10.1.

TTN	Cena v Kč bez DPH	Prodejce
Solární panel SM111K04L	109	Digi-Key
Nabíječka BQ25504RGTR	91	Mouser Electronics
Superkondenzátor MAL222551013E3	82	Mouser Electronics
Měnič napětí TPS61200DRCT	62	Mouser Electronics
Mikrokontrolér K32L2B31VFT0A	143	Mouser Electronics
GNSS modul MAX-M10S-00B	469	Mouser Electronics
Anténa GNSS modulu	68	Mouser Electronics
Senzor SHT40-AD1B-R2	57	Mouser Electronics
Senzor MPL3115A2ST1	168	Mouser Electronics
TTN modul LoRa1276-868	329	LaskaKit
Anténa TTN modulu	84	Mouser Electronics
Argos		
Solární panel SM111K04L	109	Digi-Key
Nabíječka BQ25504RGTR	91	Mouser Electronics
Superkondenzátor MAL222551013E3	82	Mouser Electronics
Měnič napětí TPS61200DRCT	62	Mouser Electronics
Mikrokontrolér K32L2B31VFT0A	143	Mouser Electronics
GNSS modul MAX-M10S-00B	469	Mouser Electronics
Anténa GNSS modulu	68	Mouser Electronics
Senzor SHT40-AD1B-R2	57	Mouser Electronics
Senzor MPL3115A2ST1	168	Mouser Electronics
Argos modul SparkFun IOTA	4707	SparkFun Electronics
Anténa Argos modulu	234	SparkFun Electronics

Tabulka 10.1: Cena základních komponent PicoBaloonu pro verze se sítí TTN a Argos. Ceny platné k 30.04.2024

Po porovnání prezentovaných cen je zřejmé, že cena za základní komponenty pro PicoBaloon s TTN modulem (1662 Kč bez DPH) je podstatně menší než za verzi s Argos modulem (6190 Kč bez DPH) a to z důvodu ceny samotného komunikačního modulu.

<sup>28</sup><https://www.sparkfun.com/products/17523>



# Kapitola 11

## Fyzické zařízení PicoBaloonu

V této kapitole je popsáno, jakým stylem bylo postupováno při návrh obou verzí desek PicoBaloonu. Při návrhu byl kladen důraz hlavně na malou velikost desek, která se projeví i na jejich hmotnosti a na vytvoření co nejefektivnější implementaci Energy harvesting, který samotnou desku napájí. Text v této kapitole je rozdělen do několika částí, ve kterých je postupně popsána tvorba schémat zapojení, tvorba samotných desek plošných spojů a finální výroba desek, u které je popsána i cena za celé zařízení. Tvorba schémat zapojení i desek plošných spojů byla provedena v programu KiCad<sup>1</sup>, který byl zvolen z důvodu, že je zdarma a obsahuje všechny potřebné nástroje pro návrh obyčejných i sofistikovanějších desek plošných spojů.

### 11.1 Tvorba schémat zapojení

Schémat obou variant PicoBaloonu byla vytvořena dle doporučení uvedených v jejich katalogových listech, ve kterých je popsáno, co přesně se má s čím spojit a jaké další přídatné komponenty je potřeba pro provoz daného čipu použít. Z tohoto důvodu tedy není nutné důkladně popisovat podrobné zapojení komponent, místo toho zde budou popsány jen hlavní části zapojení.

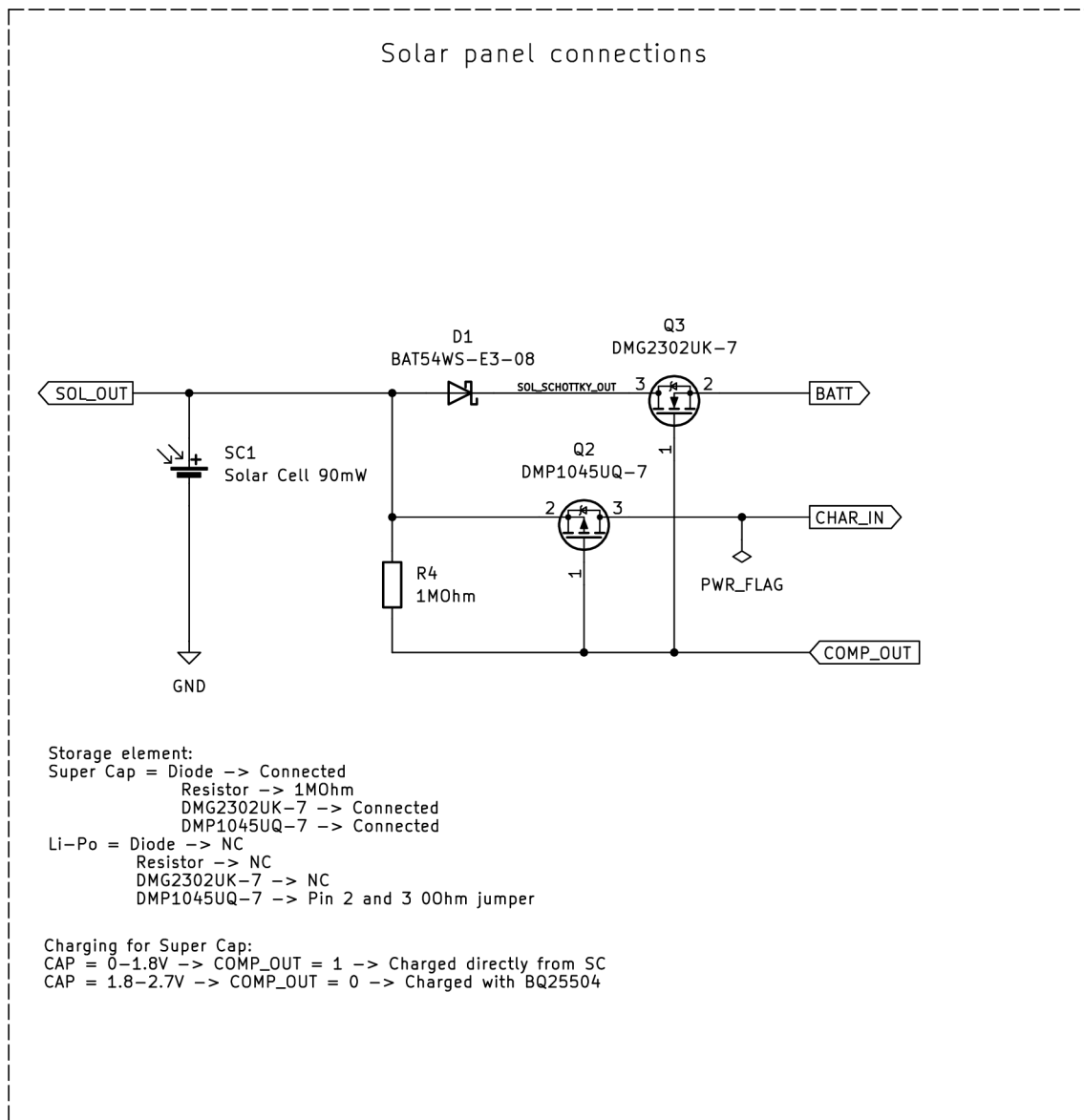
#### Generování a příprava elektrické energie pro použití zařízením

Při tvorbě obvodů pro Energy harvesting se solárním panelem a superkondenzátorem bylo vycházeno ze článků nalezených k této problematice [26][27]. Obsahem těchto článků je již vytvořené a otestované zapojení, které bylo s malými změnami použito i pro zařízení PicoBaloonu. V těchto článcích je uvedeno, že nabíječka může mít problém s nabíjením superkondenzátoru, pokud je úplně vybitý a pokud začne nabíjet, tak používá do napětí přibližně 1.5 V velice malý nabíjecí proud, kvůli kterému trvá nabíjení velice dlouho. Z tohoto důvodu je v těchto dokumentech popsána robustnější verze nabíjení superkondenzátoru, při které se za pomoci tranzistorů a komparátoru rozdělí nabíjení na dvě fáze podle toho, jaké napětí je na superkondenzátoru. Prezentovaný způsob zapojení funguje tak, že nabíjí superkondenzátor přímo ze solárního panelu, pokud je jeho napětí menší než 1.8 V a když toho napětí dosáhne, tak se superkondenzátor nabíjí již za pomoci nabíječky. Tento způsob byl také implementován v zařízení PicoBaloonu. Při tomto zapojení je použit komparátor, jehož výstup má otevřený kolektor, což je nutné z toho důvodu, že komparátor

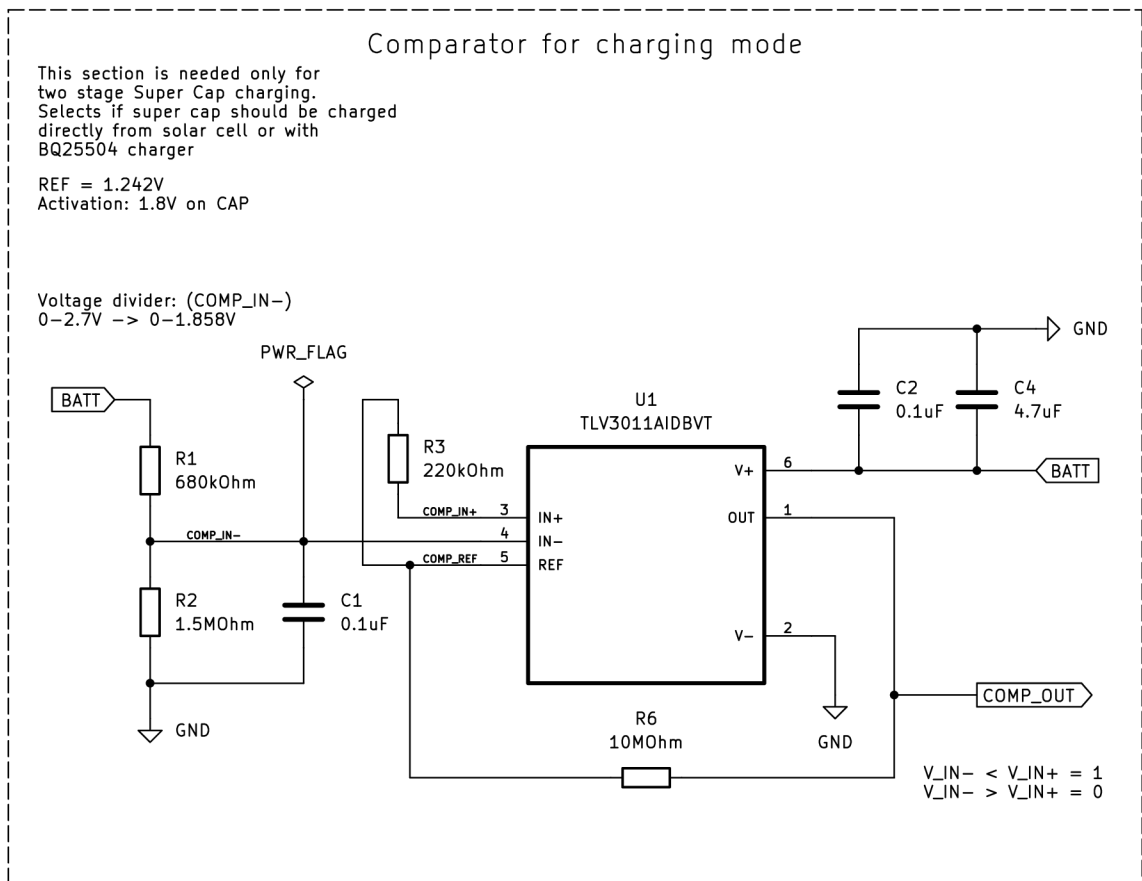
---

<sup>1</sup><https://www.kicad.org/>

funguje od napětí 1.8 V a tedy při přímém nabíjení je tranzistor Q3 (N-kanál) otevřen a Q2 (P-kanál) zavřen přes napětí na rezistoru R4. Po dosažení napětí 1.8 V na superkondenzátoru se aktivuje komparátor a přepne tranzistory pro nabíjení pomocí nabíječky. Schéma tranzistorů a komparátoru je zobrazeno na obrázcích 11.1 a 11.2.

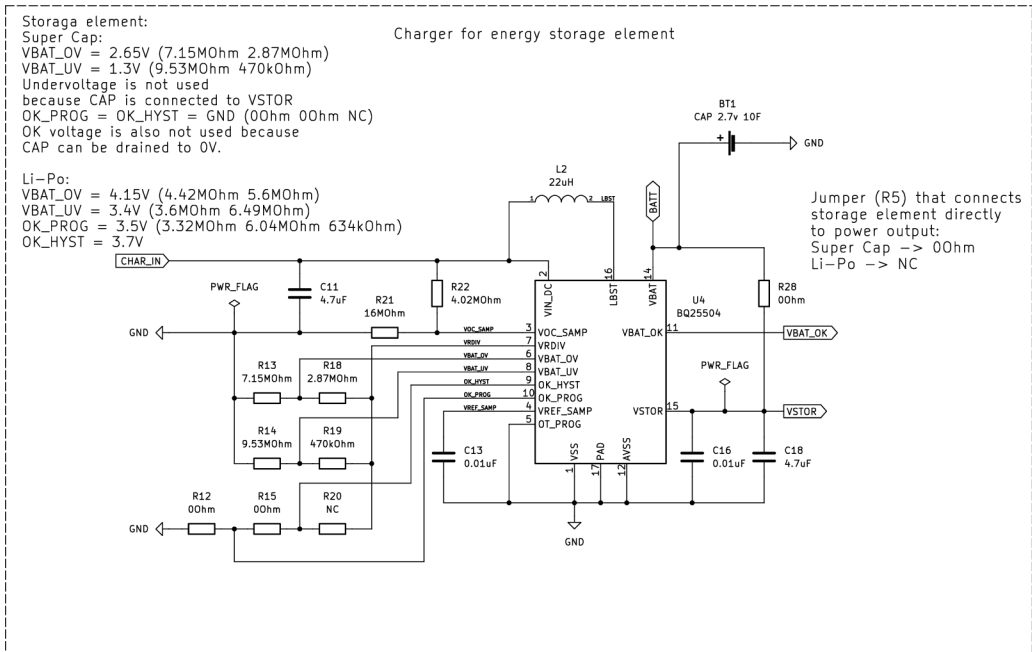


Obrázek 11.1: Schéma zapojení tranzistorů přepínajících nabíjecí mód zařízení.

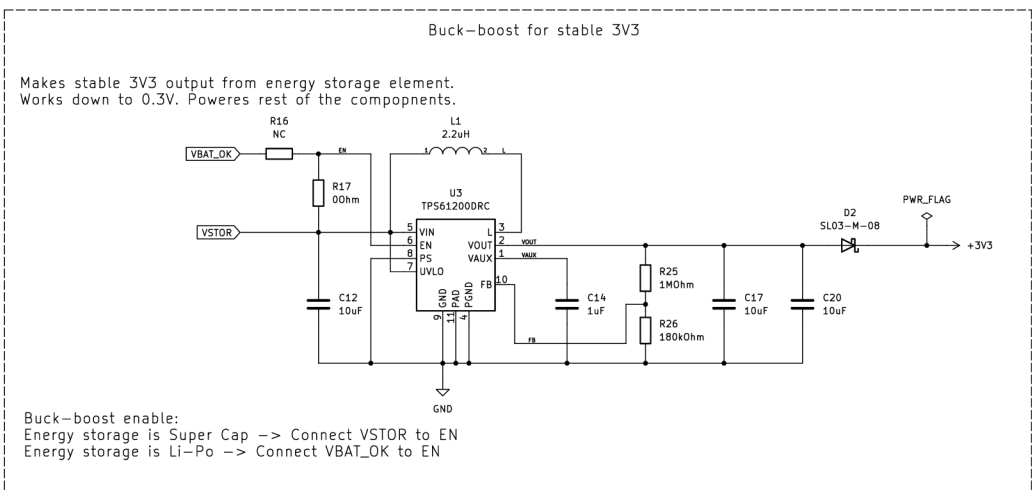


Obrázek 11.2: Schéma zapojení komparátoru přepínajícího tranzistory nabíjecího módu.

Co se týče zapojení samotné nabíječky a měniče napětí, který tvoří stabilních 3.3 V, tak ty byly zapojeny převážně dle jejich katalogových listů. Jedinou zajímavostí je zde použití 0 ohmový rezistoru R28, který připojuje výstup superkondenzátoru přímo na výstup nabíjecího čipu. Tento nabíjecí čip totiž obsahuje nastavení minimálního napětí, při kterém se má výstup baterie odpojit od zbytku zařízení, a to jde nastavit nejméně na 1.3 V, avšak zde se počítá s tím, že superkondenzátor bude možné kompletně vybit. Co se týče dalších nastavení tohoto čipu, které podporuje, tak maximální napětí je nastaveno na 2.65 V a "OK" výstup, který lze použít pro aktivaci nějaké další součástky, zde není nastaven. "OK" výstup lze využít například při použití Li-Pol baterie, u které může aktivovat měnič napětí, který generuje 3.3 V při adekvátní hodnotě napětí baterie. Schéma zapojení těchto dvou čipů je zobrazeno na obrázcích 11.3 a 11.4.



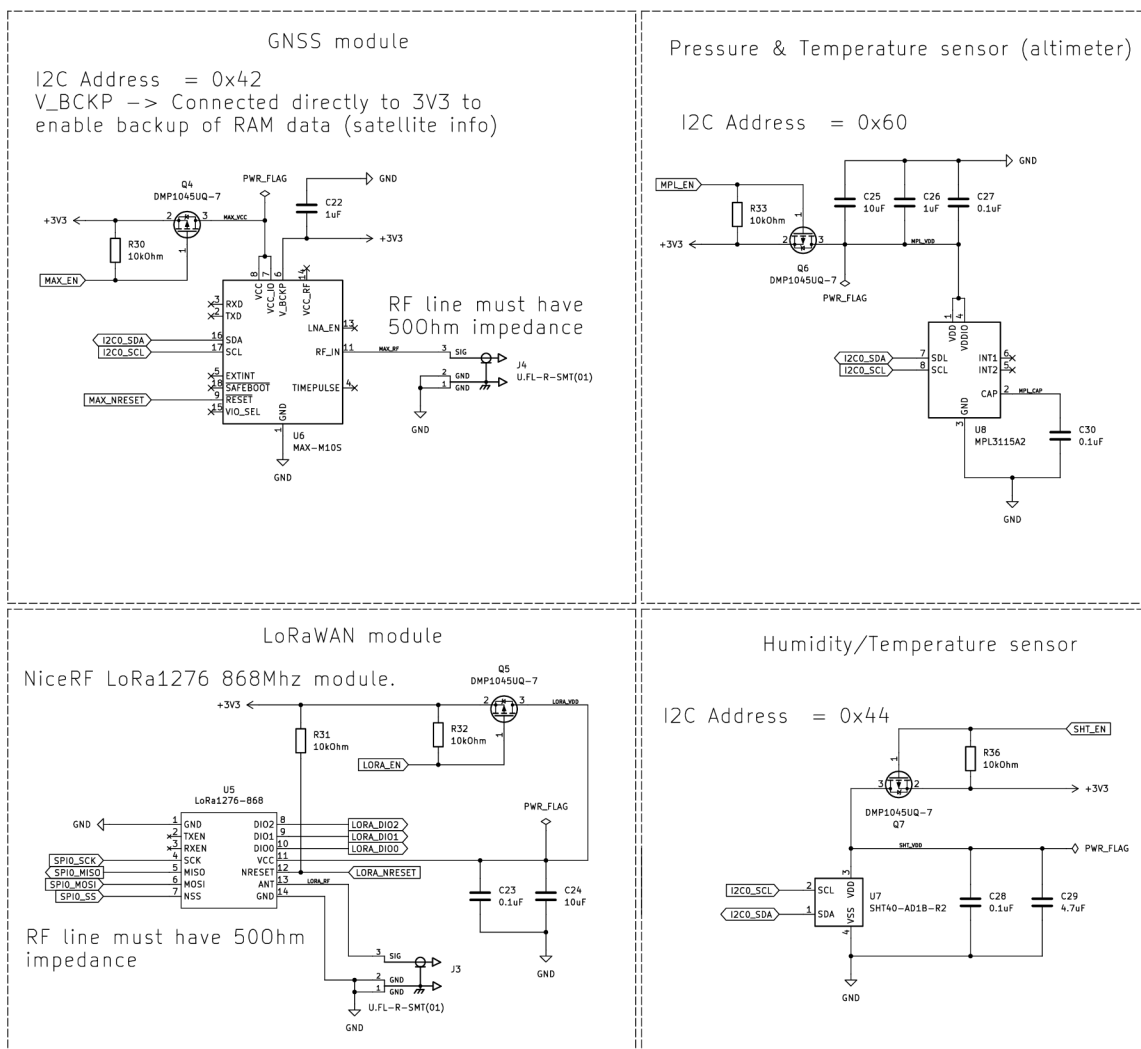
Obrázek 11.3: Schéma zapojení nabíječky BQ25504.



Obrázek 11.4: Schéma zapojení napětového měniče TPS61200DRC.

## Senzory a moduly zařízení

Za účelem snížení spotřeby zařízení během režimu spánku byly napájecí linky jednotlivých senzorů a modulů zařízení PicoBaloonu navrženy s použitím odpojovacího tranzistoru. Tyto odpojovací tranzistory ovládá mikrokontrolér a může odpojit či připojit napájení konkrétního čipu podle toho, jestli potřebuje, aby fungoval či ne. U GNSS modulu je odpojování napájení trochu pozměněno a to, že zálohovací pin, který ponechává zapnutou RAM paměť, ve které jsou uloženy informace o již použitých satelitech, není nikdy odpojován od napájení. Takto je možné při dalším získávání polohy informace z RAM paměti použít, a tak rychleji získat "fix"aktuální polohy (hot start). Při následné tvorbě desky je také nutné brát ohled na to, že radiové linky od komunikačního a GNSS modulu je nutné vytvořit s impedancí 50 ohmů, aby přenos signálu byl korektní (specifikováno v datových listech výrobců modulů). Tato problematika je blíže popsána v sekci popisující výrobu desek plošných spojů. Schéma zapojení senzorů a modulů pro TTN verzi PicoBaloonu je zobrazen na obrázku 11.5.



Obrázek 11.5: Schéma zapojení modulů a senzorů s odpojovacími tranzistory pro TTN verzi PicoBaloonu.



## Mikrokontrolér

Mikrokontrolér K32L2B31VFT0A lze naprogramovat pomocí SWD rozhraní. Piny tohoto rozhraní spolu s Low Power UARTem, který lze využít pro ladící zprávy, byly vyvedeny na jehličkový konektor, pomocí kterého se může uživatel k zařízení připojit. Tento konektor byl vybrán pro jeho malý rozměr a malou hmotnost výsledné implementace na desce. Konektor na desce zařízení má jen podobu odhalených vodičích plošek, ke kterým se připojuje protikus konektoru s vodivými jehličkami. Jediná nevýhoda tohoto konektoru je v ceně samotného protikusu, který lze z Digi-Key získat za 849 Kč bez DPH<sup>2</sup> (cena platná k 30.4.2024).

Pro určení aktuálního stavu nabití baterie, ve které je uložena energie generovaná solárním panelem a napětí na solárním panelu, které určuje, zda se aktuálně nějaká energie generuje, byly k mikrokontroléru napojeny vodiče s těmito napětími a je možné je přečíst přes analogově digitální převodník mikrokontroléru. Analogově digitální převodník mikrokontroléru pracuje s referenčním napětím 3.3 V, což je v pořádku pro superkondenzátor i solární panel. Pokud by byl využit jiný typ baterie s větším napětím než 3.3 V (například Li-Pol baterie), je nutné napětí upravit do rozmezí 0 až 3.3 V. Za účelem umožnění této eventuality obsahuje schéma zařízení PicoBaloonu napěťový dělič, kterým je možné vstupní napětí analogově digitální převodník upravit. Obě napěťové měřicí linky také obsahují RC články pro vyhlazení čteného napětí. Dále linka od solárního panelu obsahuje odpojovací tranzistor jako je tomu u senzorů a modulů zařízení PicoBaloonu. Odpojovací tranzistor byl použit z důvodu, aby do pinu mikrokontroléru nevcházelo napětí, pokud je mikrokontrolér vypnutý z důvodu nedostatku energie v baterii. Napětí na pinu mikrokontroléru, pokud je mikrokontrolér vypnutý, může mít za následek neočekávané chování mikrokontroléru a je tedy lepší se této možnosti vyvarovat.

Co se týče připojení modulů a senzorů k mikrokontroléru, tak ty jsou připojeny pomocí příslušných vstupně výstupních pinů, které mají potřebnou funkčnost. Schéma zapojení mikrokontroléru lze vidět na obrázku 11.6.

## Testovací piny

Pro účely testování byly na zařízení PicoBaloonu vytvořeny dvě testovací lišty, ke kterým jsou napojeny všechny používané signály mezi mikrokontrolérem a připojenými senzory a moduly. Za pomoci těchto lišt je možné na zařízení odladit případné problémy v komunikaci mezi těmito komponentami. Lišty také obsahují připojení pro 3.3 V a zemní pinu, díky kterým je možné zařízení napájet z externího zdroje, při kterém solární panel a baterie může být odpojována. Pro jednoduché připojení testovacích výstupů k externím zařízením (například logický analyzátor nebo zdroj) jsou tyto lišty navrženy pro standardní Dupont kolíkové lišty s roztečí 2.54 mm, které jsou dostupné na velkém množství zařízení a lze je použít i na nepájivých polích. Poté, co je zařízení otestováno, se tyto lišty ze zařízení odpájejí, aby nepřidávaly zařízení PicoBaloonu zbytečnou hmotnost navíc.

## Testovací "jumpery"

Zařízení PicoBaloonu obsahuje dva jumpery (odhalené plošky, které fungují jako tlačítko po spojení vodivým prvkem, například pinzetou), pomocí kterých je možné zařízení resetovat a vzbudit z režimu spánku dříve než doběhne časovač. Tato funkčnost je výhodná pro testování.

<sup>2</sup><https://www.digikkey.cz/en/products/detail/tag-connect-11c/TC2050-IDC-NL/2605367>



## 11.2 Tvorba desek plošných spojů

Stejně jako tomu bylo u tvorby schématu, tak i při tvorbě desek plošných spojů pro zařízení PicoBaloonu bylo postupováno podle doporučení v katalogových listech jednotlivých komponent. Některé katalogové listy obsahují jen textovou podobu doporučení, ve které je uvedeno, jak by zapojení mělo vypadat. U některých komponent lze však přímo najít obrázek doporučeného zapojení komponenty na desku. Díky tomu, že podoba zapojení jednotlivých komponent je primárně jen aplikování doporučení od výrobců použitých čipů, tak není potřeba dopodrobna podobu jednotlivých zapojení na desce popisovat. Místo toho budou v následujícím textu popsány věci, jako je nastavení omezení, výběr velikosti propojovacích linek, velikost prokůvů, popis vrstev desek plošných spojů a výpočet očekávané hmotnosti.

Předtím, než se začnou tvořit desky plošných spojů, je potřeba v programu, kde jsou desky navrhovány, nastavit různá omezení a parametry. Omezení při tvorbě desek plošných spojů jsou závislé jak na elektrických zákonech, které určují jak blízko mohou být dva vodiče od sebe tak i na možnostech výrobce, u kterého se pak deska nechá vytvořit. Pro účely této práce byla zvolena společnost PCBWay<sup>3</sup>, která nabízí rychlou výrobu desek plošných spojů za rozumné ceny. Po tom, co je zvolený konkrétní výrobce, je potřeba si přečíst jeho výrobní omezení a ta aplikovat na navrhovanou desku. Pro výrobce PCBWay je možné tyto údaje najít na jeho webové stránce pod názvem PCB Capabilities<sup>4</sup>. Protože u desek plošných spojů za levnou cenu jsou vždy restriktivnější výrobní možnosti výrobce, tak zde není potřeba řešit fyzická omezení na blízkost vodičů. Dále je potřeba vybrat materiál, tloušťku desek, počet vrstev a tloušťku vrstev. Pro účely této práce byl zvolen standardní materiál FR-4, který se používá pro většinu desek. Byla vybrána tloušťka desky 1.2 mm, která zaručí rozumnou pevnost a zároveň menší hmotnost oproti standardní tloušťce 1.6 mm. Dále bylo zvoleno, že desky budou mít 4 vrstvy z důvodu, aby deska mohla mít zemnicí a napájecí vrstvu, která při správném použití redukuje vznik rušení. Desky se 4 vrstvami jsou také výhodné z důvodu, že nabízí lepší možnosti, jak navést vodivé trasy, a tím snížit velikost desky. Tloušťka vrstev byla ponechána standardních 0.035 mm (1 oz). Tato hodnota je dostačující, protože větší tloušťky vrstev jsou nutné primárně u aplikací, kde je potřeba řešit velké proudy. V zařízení PicoBaloonu bude maximální proud jen v řádech malých stovek mA.

Co se týče tloušťky vodivých tras a prokůvů, tak pro napájecí trasy byla zvolena šířka 0.25 mm s prokovy s průměrem 0.8 mm a pro signálové trasy šířka 0.16 mm s prokovy s průměrem 0.6 mm. Parametry napájecích tras jsou výchozím nastavením v programu KiCad a parametry signálových tras byly vybrány dle omezení minimální tloušťky tras výrobce desek. Omezení, kolik proudu lze trasou s danou tloušťkou a prokovem s daným průměrem vést, lze vypočítat přímo v programu KiCad. Při spočítání tohoto limitu pro trasu s šířkou 0.25 mm je výsledek přibližně 0.88 A pro venkovní vrstvu a přibližně 0.44 A pro vnitřní vrstvu. Co se týče prokovu s průměrem 0.8 mm a dírou 0.4 mm, tak jím lze vést až 3 A. Na základě těchto vypočítaných hodnot je zřejmé, že použité nastavení vodivých tras u tohoto zařízení je více než dostatečné.

Poslední věcí, kterou u zařízení bylo nutné vyřešit, je propojení konektorů antén s moduly. Pro rádiové linky je nutné dodržet určitou impedanci a odstínit je, aby z nich nemohlo unikat rušení. Všechny rádiové linky dle katalogových listů jednotlivých modulů mají mít impedanci 50 ohmů a přímo na vrstvě pod rádiovou linkou musí být rozlita zem. Konkrétní

<sup>3</sup><https://www.pcbway.com/>

<sup>4</sup><https://www.pcbway.com/capabilities.html>

impedance na trase desky plošných spojů se dosáhne tak, že se vypočítá její požadovaná šířka na základě její tloušťky a tloušťky nevodivého materiálu mezi vrstvou, kde je rádiová trasa a vrstvou pod ní, kde je rozlité zem. Program KiCad přímo nabízí kalkulačku k tomuto účelu a z parametrů, které byly nastaveny pro desky PicoBaloonu bylo vypočteno, že by šířka rádiových linek měla být přibližně 0.24 mm. Tato hodnota byla tedy použita. Pro účely ochrany proti rušení se používají prokovy, které se rovnoměrně rozmístí podél trasy radiové linky a fungují jako vlnovod. Takto rozmístěné prokovy by měly zabránit nechtěnému šíření rádiové vlny mimo konkrétní rádiovou linku. Při koupi desek, které mají impedanční přizpůsobení, je nutné výrobcí specifikovat, že musí dodržet konkrétní tloušťky jednotlivých vodivých i nevodivých vrstev, jinak radiová linka nemusí fungovat. U výrobce PCBWay lze kontrolu impedance zaškrtnout v pokročilých možnostech při objednávání.

Na základě specifikovaného nastavení a katalogových listů jednotlivých součástek byly vytvořeny dvě čtyřvrstvé desky, kde každá deska patří k jedné variantě PicoBaloonu. Desky mají součástky z obou stran a jejich vrstvy jsou rozděleny následovně:

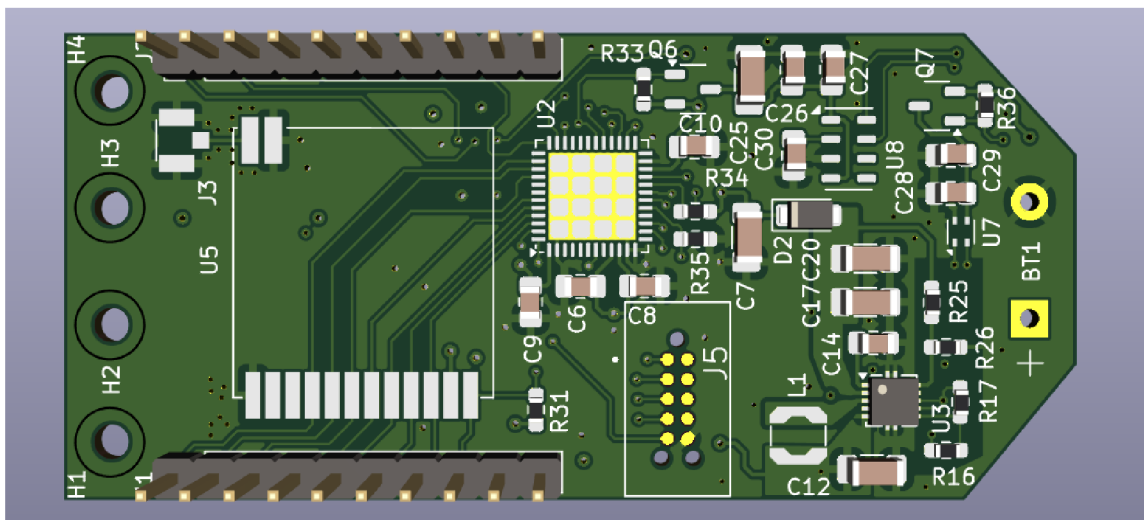
- **L1:** první vrstva obsahuje signály a napájecí trasy, zbytek vrstvy je vyplněn zemí z důvodu zlepšení odolnosti proti rušení (horní vrstva),
- **L2:** druhá vrstva obsahuje zemnicí plochu,
- **L3:** třetí vrstva obsahuje z většiny napájecí plochu 3.3 V, jsou zde dále natažené i nějaké signály a zem pod rádiovou linkou,
- **L4:** čtvrtá vrstva obsahuje stejně jako vrstva první, signály, napájecí trasy a zbytek vrstvy je vyplněn zemí (spodní vrstva).

Součástky na deskách byly umístěny tak, aby na sebe spoje mezi jednotlivými součástkami co nejlépe navazovaly a aby celková plocha desky zabrala co nejméně místa. Co se týče footprintů (místo, kam se součástka na desku plošných spojů pájí) jednotlivých součástek na desce plošných spojů, tak většina z nich je přímo obsažena v programu KiCad, některé footprinty byly staženy ze stránky SnapEDA<sup>5</sup> a ty, které se nepodařilo najít byly vytvořeny ručně.

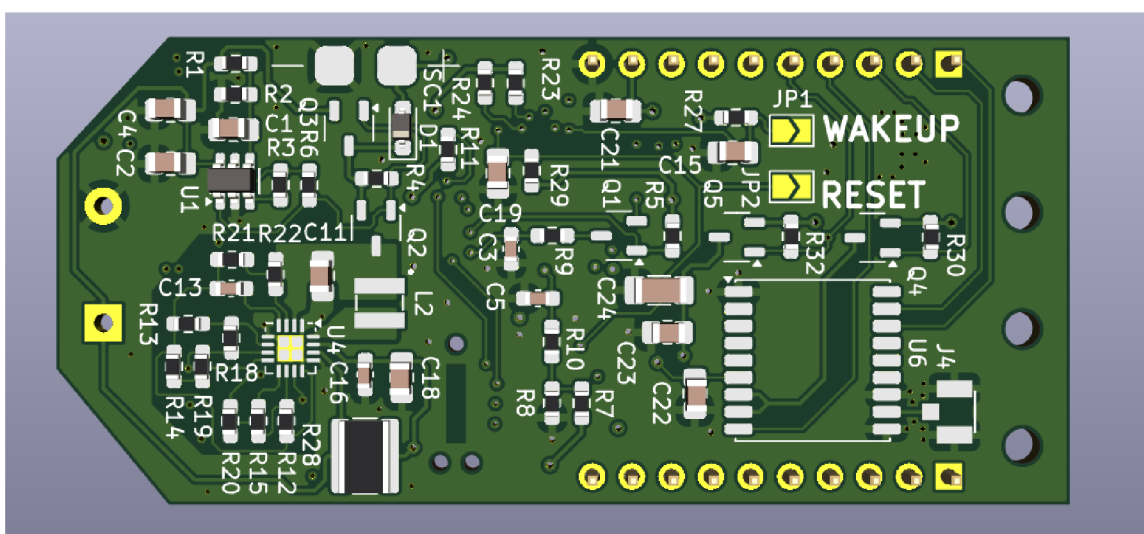
---

<sup>5</sup><https://www.snapeda.com/home/>

Desku zařízení PicoBaloonu pro síť TTN se podařilo umístit na plochu 65 x 30 mm. Vizualizace této desky z programu KiCad je zobrazena na obrázcích 11.7 a 11.8.



Obrázek 11.7: Vizualizace horní strany desky plošných spojů pro PicoBaloon s modulem pro síť TTN.



Obrázek 11.8: Vizualizace spodní strany desky plošných spojů pro PicoBaloon s modulem pro síť TTN.

Na základě velikosti desky a údajích o tloušťce vrstev lze vypočítat, že při běžné hmotnosti mědi = 8.23 g/cm<sup>3</sup> a běžné hmotnosti materiálu FR-4 = 1.9 g/cm<sup>3</sup> by při 90 % obsazení mědi na vrstvě měla deska vážit přibližně 6 g<sup>6</sup>. Výpočet je proveden přes jednoduchý vzorec hmotnosti na objem látky a je zobrazen v rovnici 11.1.

<sup>6</sup><https://pcdandf.com/pcdesign/index.php/current-issue/243-flexperts/10228-the-flexperts-1508>



$$\begin{aligned}
m_{cu} &= (x * y * z_{cu}) * P_{cu} * p * N \\
&= (6.5[cm] * 3[cm] * 0.0035[cm]) * 8.23[g/cm^3] * 0.9 * 4 = 2.022g \\
m_{fr} &= (x * y * (z_{br} - N * z_{cu})) * P_{fr} \\
&= (6.5[cm] * 3[cm] * (0.12[cm] - 4 * 0.0035[cm])) * 1.9[g/cm^3] = 3.927g \\
m_{br} &= m_{cu} + m_{fr} = 2.022[g] + 3.927[g] = 5.949g
\end{aligned}
\tag{11.1}$$

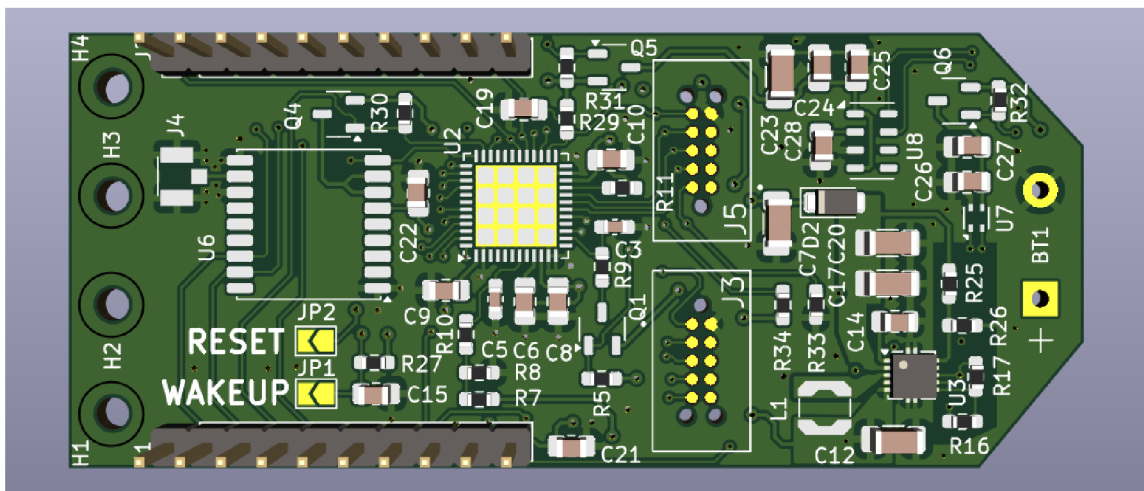
x -> Délka desky plošných spojů  
y -> Šířka desky plošných spojů  
zbr -> Tloušťka desky plošných spojů  
zcu -> Tloušťka měděné vrstvy  
Pcu -> Hustota mědi  
Pfr -> Hustota materiálu FR-4  
p -> Obsazení měděné vrstvy  
N -> Počet měděných vrstev  
m<sub>cu</sub> -> Hmotnost měděných vrstev  
m<sub>fr</sub> -> Hmotnost materiálu FR-4 na desce  
m<sub>br</sub> -> Hmotnost desky plošných spojů

Z této vypočtené hmotnosti desky plošných spojů a hmotnosti velkých komponent na ni přítomných lze určit, že hmotnost celé této verze PicoBaloonu bude více než 14.2 g (rozpis hmotnosti jednotlivých primárních komponent zařízení PicoBaloonu je obsažen v tabulce 11.1).

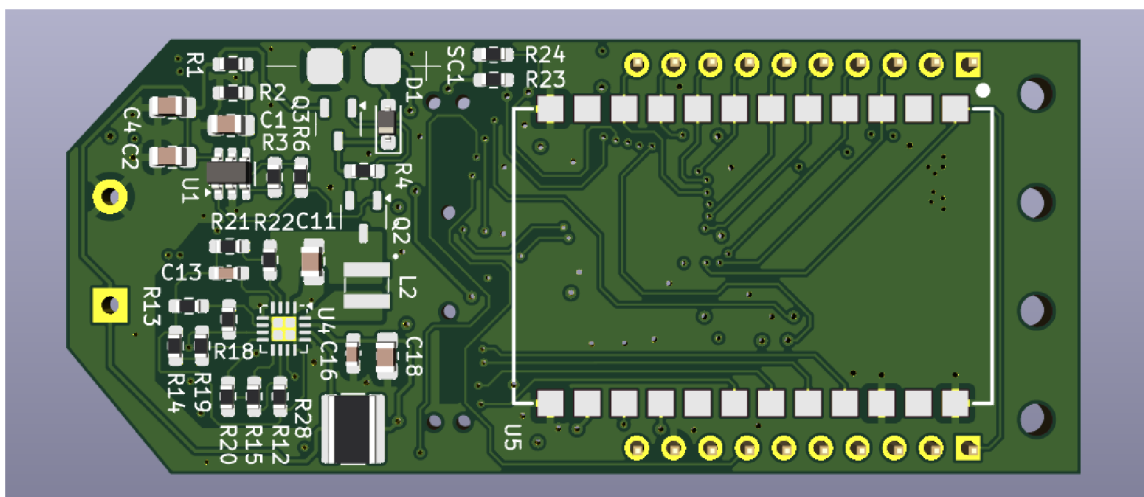
	Hmotnost v gramech
Deska	6
Solární panel SM111K04L	2.5
Superkondenzátor MAL222551013E3	3.5
GNSS modul MAX-M10S-00B	0.5
Anténa GNSS modulu	0.5
TTN modul LoRa1276-868	0.5
Anténa TTN modulu	0.7

Tabulka 11.1: Hmotnost jednotlivých velkých komponent a desky pro PicoBaloon s modulem pro síť TTN.

Druhou desku zařízení PicoBaloonu pro síť Argos se podařilo umístit na plochu 70 x 30 mm. Vizualizace této desky z programu KiCad je zobrazena na obrázcích 11.9 a 11.10.



Obrázek 11.9: Vizualizace horní strany desky plošných spojů pro PicoBaloon s modulem pro síť Argos.



Obrázek 11.10: Vizualizace spodní strany desky plošných spojů pro PicoBaloon s modulem pro síť Argos.

Na základě velikosti desky a údajích o tloušťce vrstev lze vypočítat, stejně jako u desky PicoBaloonu pro síť TTN, že by deska měla mít hmotnost přibližně 6.4 g. Výpočet je zobrazen v rovnici 11.2.

$$\begin{aligned}
m_{cu} &= (x * y * z_{cu}) * P_{cu} * p * N \\
&= (7[cm] * 3[cm] * 0.0035[cm]) * 8.23[g/cm^3] * 0.9 * 4 = 2.178g \\
m_{fr} &= (x * y * (z_{br} - N * z_{cu})) * P_{fr} \\
&= (7[cm] * 3[cm] * (0.12[cm] - 4 * 0.0035[cm])) * 1.9[g/cm^3] = 4.229g \\
m_{br} &= m_{cu} + m_{fr} = 2.178[g] + 4.229[g] = 6.4g
\end{aligned}
\tag{11.2}$$

x -> Délka desky plošných spojů  
y -> Šířka desky plošných spojů  
z<sub>br</sub> -> Tloušťka desky plošných spojů  
z<sub>cu</sub> -> Tloušťka měděné vrstvy  
P<sub>cu</sub> -> Hustota mědi  
P<sub>fr</sub> -> Hustota materiálu FR-4  
p -> Obsazení měděné vrstvy  
N -> Počet měděných vrstev  
m<sub>cu</sub> -> Hmotnost měděných vrstev  
m<sub>fr</sub> -> Hmotnost materiálu FR-4 na desce  
m<sub>br</sub> -> Hmotnost desky plošných spojů

Z této vypočtené hmotnosti desky plošných spojů a hmotnosti velkých komponent na ni přítomných lze určit, že hmotnost celé této verze PicoBaloonu bude více než 16.8 g (rozpis hmotnosti jednotlivých primárních komponent zařízení PicoBaloonu je obsažen v tabulce 11.2).

	Hmotnost v gramech
Deska	6.4
Solární panel SM111K04L	2.5
Superkondenzátor MAL222551013E3	3.5
GNSS modul MAX-M10S-00B	0.5
Anténa GNSS modulu	0.5
Argos modul SparkFun IOTA	3
Anténa Argos modulu	0.4

Tabulka 11.2: Hmotnost jednotlivých velkých komponent a desky pro PicoBaloon s modulem pro síť Argos.

Desky si je možné podrobněji prohlédnout při otevření KiCad projektu na doprovodném datovém médiu k této práci (příloha A).

### 11.3 Objednání desek a komponent PicoBaloonu

Poté, co byly desky navrženy, je možné je objednat od zvoleného výrobce. Jak bylo uvedeno výše, pro tuto práci byl zvolen konkrétně výrobce PCBWay. Při objednávání jakékoliv desky plošných spojů je potřeba vygenerovat takzvané Gerber soubory. Gerber soubory jsou dnes de facto standardem pro popis podoby desek plošných spojů, na základě kterých jsou desky plošných spojů vyráběny. Popis, jak vygenerovat Gerber soubory pro výrobce PCBWay

v návrhovém programu KiCad, lze nalézt na webových stránkách PCBWay<sup>7</sup>. Již vygenerované Gerber soubory pro obě verze zařízení PicoBaloonu lze také nalézt na přiloženém datovém médiu ve složkách příslušícím konkrétní verzi desky PicoBaloonu (příloha A).

Na základě vygenerovaných Gerber souborů lze objednat desky plošných spojů na stránce PCBWay Quick Order<sup>8</sup>. Zde je potřeba nahrát vygenerované Gerber soubory zkomprimované do souboru ZIP a vybrat potřebná nastavení pro výrobu. Pro účely této práce byly objednány desky s parametry specifikovanými v tabulce 11.3.

Parametr	Zvolená možnost
Počet vrstev	4
Materiál	FR-4
FR4-TG	TG 150-160
Tloušťka	1.2 mm
Minimální tloušťka a prostor mezi vodiči	5/5 mil
Minimální tloušťka díry	0.25 mm
Barva pájecí masky	černá
Barva popisků	bílá
Boční konektor	ne
Materiál vodivých plošek	Imerzní zlato (ENIG)
Tloušťka imerzního zlata	1 U"
Prokovy (Via process)	Tenting vias (prokovy jsou zalité pájecí maskou)
Tloušťka mědi:	1 oz
Tloušťka mědi ve vnitřních vrstvách	1 oz
Pokročilé možnosti	Impedanční kontrola

Tabulka 11.3: Nastavení objednávky desek plošných spojů u výrobce PCBWay.

Parametry, jako je barva popisků a barva pájecí masky, lze zvolit dle vlastního uvážení při objednávání nových desek pro zařízení PicoBaloonu. Černá barva pájecí masky je však preferována, protože dopadající slunce ohřeje desku na vyšší teplotu, což je výhodné pro zajištění lepších provozních podmínek při nízkých teplotách ve výšce kolem 10 km. Možné je také vyměnit materiál vodivých plošek za jiný. Imerzní zlato (ENIG) má dobré vlastnosti pro pájení a je odolné vůči korozi, avšak jeho nevýhodou je vyšší cena. Pokud by bylo vyžadováno, aby nově vyrobené desky byly levnější, je možné použít například materiál HASL s olovem, který má obecně o něco horší vlastnosti. Na základě zde vybraného nastavení pro výrobu desek plošných spojů PicoBaloonu vychází cena jedné desky přibližně na 492 Kč s DPH (cena platná k 16.4.2024).

Dále bylo potřeba objednat součástky pro navržené desky. Cena všech součástek a desek plošných spojů pro obě verze PicoBaloonu spolu s názvem obchodu, kde byla konkrétní věc zakoupena, je uvedena ve dvou tabulkách v příloze této práce. Tabulka B.1 obsahuje ceny pro zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť TTN a tabulka B.2 obsahuje ceny pro zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť Argos.

Cena finálního zařízení PicoBaloonu pro verzi s TTN modulem vychází na 2779 Kč bez DPH a pro verzi s Argos modulem na 7246 Kč bez DPH. Z důvodu vysoké ceny PicoBaloonu s modulem pro síť Argos bylo rozhodnuto, že bude vyrobena jen verze se sítí

<sup>7</sup>[https://www.pcbway.com/blog/PCB\\_Design\\_Tutorial/How\\_to\\_Export\\_Gerber\\_and\\_Production\\_Files\\_in\\_KiCad.html](https://www.pcbway.com/blog/PCB_Design_Tutorial/How_to_Export_Gerber_and_Production_Files_in_KiCad.html)

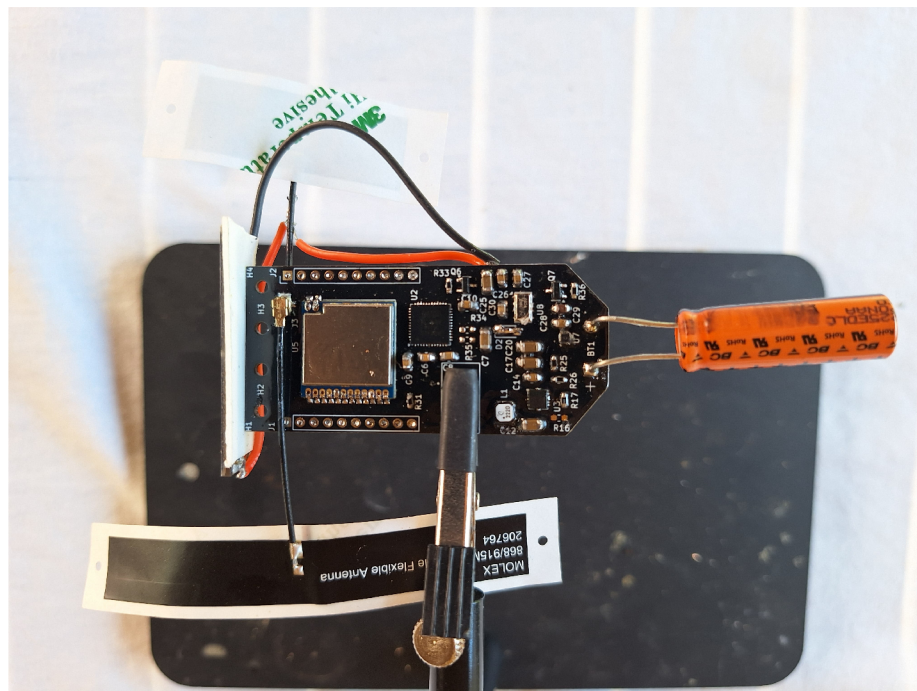
<sup>8</sup><https://www.pcbway.com/QuickOrderOnline.aspx>

TTN. Verze PicoBaloonu pro síť Argos bude tedy jen konceptuální a nebude otestována její funkčnost.

## 11.4 Sestavení zařízení PicoBaloonu

Poté, co byly koupeny všechny komponenty nutné pro sestavení PicoBaloonu s modulem pro TTN síť, bylo toto zařízení sestaveno. Připájení všech komponent bylo provedeno za pomoci obyčejné a horkovzdušné pájecí stanice. Pokud by při replikaci této práce nebylo možné osobní připájení komponent, lze využít služeb nějaké společnosti, která osazení desek provede (tuto službu nabízí i výrobce PCBWay, který byl použit pro výrobu desek plošných spojů<sup>9</sup>). Samotné osazení lze zpříjemnit použitím modulu Interactive HTML BOM<sup>10</sup> pro program KiCad. Tímto modulem je možné vygenerovat webovou stránku, na které je přehledně popsáno, co se má kam připájet. Popis testů, které byly prováděny během sestavování zařízení pro otestování funkčnosti jednotlivých částí desky PicoBaloonu, je přítomen v kapitole 14, která se zabývá testováním zařízení.

Výsledné zařízení, které bylo sestaveno, má celkovou hmotnost 16 g a je zobrazeno na obrázcích 11.11 a 11.12. Solární panel lze k desce PicoBaloonu připevnit například pomocí tavné pistole nebo oboustranné lepicí pásky. Nosný balónek se k zařízení upevňuje pomocí děr v desce plošných spojů. Pokud by byla potřeba vytvořit robustnější uchycení solárního panelu, antén a lanka k nosnému balónku, je možné využít i 3D výtisků, který by bylo možné upevnit do vytvořených montážních děr. Tento způsob však přidá hmotnost navíc.

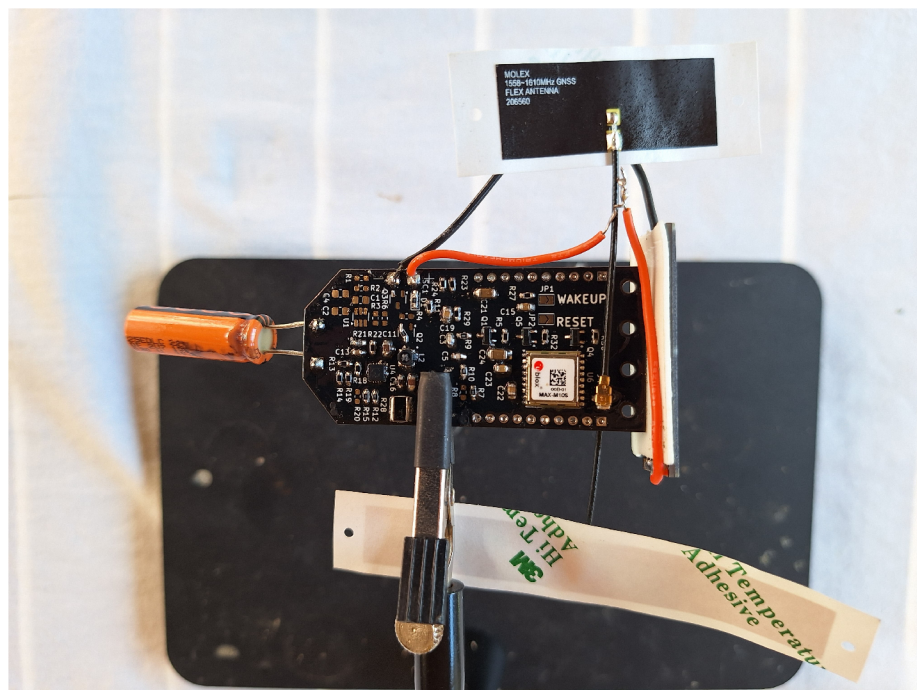


Obrázek 11.11: Sestavené zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť TTN. Přední strana.

<sup>9</sup><https://www.pcbway.com/pcb-assembly.html>

<sup>10</sup><https://github.com/openscopeproject/InteractiveHtmlBom>





Obrázek 11.12: Sestavené zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť TTN. Zadní strana.

Poté, co je deska sestavena, je výhodné ji potříit nevodivým materiálem, který zamezí možným zkratům a korozi způsobené vlhkostí při venkovním použití. K tomuto účelu byl použit sprej PLASTIK 70<sup>11</sup>, který desku pokryje nevodivým akrylátovým povlakem. Výhodou tohoto spreje je také, že umožňuje přepájení součástek i po jeho aplikování. Po přepájení konkrétního místa se však povlak odpaří a je tedy nutné ho na konkrétní místo znovu aplikovat. Před aplikací tohoto laku je také nutné zalepit senzory MPL3115A2ST1 a SHT40-AD1B-R2 jejichž měřící dutinka nesmí být nijak zablokována.

<sup>11</sup>[https://www.laskakit.cz/kontakt-chemie-plastik-70-400ml-ochranny-lak-na-dps/?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjw57exBhAsEiwAaIxaZtr1oRSKkPXRTd7PCyMhxCDued-9VQs10N91xyYUSUkdrZHDSdRX0hoC240QAvd\\_BwE](https://www.laskakit.cz/kontakt-chemie-plastik-70-400ml-ochranny-lak-na-dps/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw57exBhAsEiwAaIxaZtr1oRSKkPXRTd7PCyMhxCDued-9VQs10N91xyYUSUkdrZHDSdRX0hoC240QAvd_BwE)

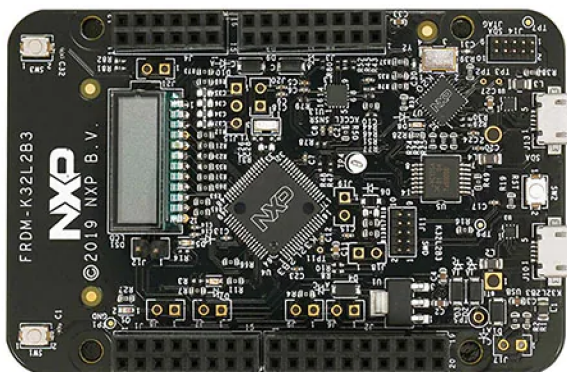
## Kapitola 12

# Ovládací firmware PicoBaloonu

Obsahem této kapitoly je popis postupu při tvorbě firmwaru zařízení PicoBaloonu a co bylo nutné vyřešit pro jeho úspěšné fungování. Následující text je rozdělen do částí, které postupně popisují výběr hardwaru, na kterém byl firmware vyvíjen, dále pak dostupný software, který byl využit k vývoji softwaru, a nakonec je podrobně popsána logika fungování finálního firmwaru.

### 12.1 Výběr hardwaru pro testování

Z důvodu, že firmware pro obě verze zařízení PicoBaloonu byl vyvíjen předtím, než byly vytvořeny samotné desky plošných spojů, bylo nutné k vývoji použít další hardware, na kterém bylo možné firmware testovat. Výhodou vývoje firmwaru na testovacím hardwaru je, že není nutné se starat o to, jestli není chyba na vytvořené desce plošných spojů a dosáhnout tak firmwaru, který bude odladěný a pokud na finálním zařízení nebude fungovat, jedná se tak nejspíše o chybu v hardwaru.



Obrázek 12.1: Vývojová deska FRDM-K32L2B3 pro mikrokontrolér K32L2B3.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Převzato z: <https://www.nxp.com/design/design-center/development-boards-and-designs/general-purpose-mcus/nxp-freedom-development-platform-for-k32-l2b-mcus:FRDM-K32L2B3>

Pro vývoj firmwaru byla použita vývojová deska FRDM-K32L2B3<sup>2</sup> (obrázek 12.1) pro mikrokontrolér K32L2B3 od společnosti NXP. Tato deska používá stejný typ mikrokontroléru jako zařízení PicoBaloonu, ale má jiné pouzdro, které mu dává více vstupně výstupních pinů. Při převádění firmwaru z této vývojové desky na zařízení PicoBaloonu je tedy potřeba dbát na správné namapování použitých pinů.

Pro otestování ovládacího kódu jednotlivých senzorů a modulů byly použity běžně dostupné vývojové desky, které umožňují připojení pomocí Dupont vodičů s roztečí 2.54 mm. Pro senzor SHT40 byla použita konkrétně deska LaskaKit SHT40<sup>3</sup> a pro senzor MPL3115A2 deska Adafruit MPL3115A2<sup>4</sup>. Pro modul MAX-M10S byla použita deska SparkFun GNSS Receiver Breakout - MAX-M10S<sup>5</sup>, ke které byla dokoupena GPS anténa s třímetrovým kabelem<sup>6</sup>. Pro TTN modul se nepodařilo najít běžně prodejnou vývojovou desku, ale podařilo se na stránce GitHub najít navrženou desku plošných spojů, kterou si lze nechat vyrobit a použít k tomuto účelu. Konkrétně se jedná o projekt nicerf-lora od autora fadushin<sup>7</sup>. Jak už bylo zmíněno, modul pro komunikační síť Argos nebyl zakoupen z důvodu vysoké ceny a kód pro tento modul nebylo možné otestovat.

## 12.2 Již dostupný software

Firmware pro zařízení PicoBaloonu nebylo nutné tvořit kompletně od začátku díky existenci volně dostupného softwaru, který bylo možné během implementace použít. Pro mikrokontrolér K32L2B3 bylo možné použít software development kit (SDK) s názvem "K32L2B31xxxxA SDK", který lze stáhnout na stránkách výrobce mikrokontroléru<sup>8</sup>. V tomto SDK lze nalézt ovladače pro jednotlivé komponenty mikrokontroléru napsané v programovacím jazyce C, pomocí kterých lze jednoduše implementovat jejich požadovanou funkčnost. Bez existence těchto ovladačů by bylo nutné všechny komponenty ovládat pomocí zápisu nul a jedniček do jejich ovládacích registrů, což je velice nepraktické. S tímto SDK lze pracovat v integrovaném vývojovém prostředí MCUXpresso, které je vytvořeno společností NXP pro programování jejich mikrokontrolérů. Z tohoto důvodu byl firmware pro zařízení PicoBaloonu vyvíjen v tomto integrovaném vývojovém prostředí.

Kódy pro senzory a moduly zařízení PicoBaloonu lze také dohledat na internetu. Velká část již existujícího kódu pro vývojové desky je vytvořena pro platformu Arduino, která slouží nadšencům do hardwaru, aby si mohli jednoduše vytvořit různá testovací zařízení. Výhodou je, že Arduino používá kód, který je velice podobný programovacímu jazyku C++ a je tedy možné tento software jednoduše upravit pro fungování na mikrokontroléru K32L2B3, který lze také naprogramovat pomocí programovacích jazyků C a C++.

Díky možnosti požit kód pro platformu Arduino na mikrokontroléru K32L2B3 byly vybrány následující Arduino knihovny, které byly upraveny pro použití na mikrokontroléru K32L2B3. Pro senzor SHT40 byla použita knihovna Adafruit SHT4x Library<sup>9</sup> a pro sen-

<sup>2</sup><https://www.nxp.com/design/design-center/development-boards-and-designs/general-purpose-mcus/nxp-freedom-development-platform-for-k32-l2b-mcus:FRDM-K32L2B3>

<sup>3</sup><https://www.laskakit.cz/laskakit-sht40-senzor-teploty-a-vlhkosti-vzduchu/>

<sup>4</sup>[https://rpishop.cz/adafruit/408-mpl3115a2-senzor-tlak-vyska-teplota.html?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjw88yxBhBWEiW7cm6pYlkKwBSeii6160jj3yvyf0XnmIS6S-bgfN0-eBtVMoQCyMFsPanLBoCcm8QAvD\\_BwE](https://rpishop.cz/adafruit/408-mpl3115a2-senzor-tlak-vyska-teplota.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw88yxBhBWEiW7cm6pYlkKwBSeii6160jj3yvyf0XnmIS6S-bgfN0-eBtVMoQCyMFsPanLBoCcm8QAvD_BwE)

<sup>5</sup><https://cz.mouser.com/ProductDetail/SparkFun/GPS-18037?qs=rQFj71Wb1eUM7j00xt1D1A%3D%3D>

<sup>6</sup><https://pajenicko.cz/gps-anteny/gps-antena-1575mhz-28dbi-sma>

<sup>7</sup><https://github.com/fadushin/nicerf-lora>

<sup>8</sup><https://mcuxpresso.nxp.com/en/welcome>

<sup>9</sup><https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/adafruit-sht4x-library/>

zor MPL3115A2 knihovna Adafruit MPL3115A2 Library<sup>10</sup>. Dále pro modul MAX-M10S byla použita knihovna SparkFun u-blox GNSS v3<sup>11</sup>, pro TTN rádiový modul byla použita knihovna MCCI LoRaWAN LMIC library<sup>12</sup> a pro Argos rádiový modul byla použita knihovna SparkFun Argos ARTIC R2 Arduino Library<sup>13</sup>. Zde prezentované knihovny byly pro mikrokontrolér K32L2B3 upraveny a otestovány na již zmíněné vývojové desce FRDM-K32L2B3. Jak již bylo zmíněno tak modul pro komunikační síť Argos nebyl zakoupen a tedy kód pro tento modul nebylo možné otestovat.

Finální funkčnost firmwaru PicoBaloonu byla postavena z výše prezentovaného kódu a je podrobně rozebrána v následující sekci.

## 12.3 Funkčnost ovládacího firmwaru

Firmware pro obě verze zařízení PicoBaloonu byl vyvíjen v integrovaném vývojovém prostředí MCUXpresso, které slouží jako primární vývojový nástroj pro mikrokontroléry od firmy NXP. V tomto vývojovém prostředí je vždy při založení nového projektu potřeba vyřešit výběr požadovaných ovladačů, nastavení překladu, nastavení pinů a nastavení vnitřních modulů mikrokontroléru. Výběr požadovaných ovladačů a nastavení překladu se provádí přímo při založení projektu. Pro nastavení pinů a vnitřních modulů mikrokontroléru slouží nástroje obsažené ve vývojovém prostředí. Tyto nástroje lze použít k automatickému vygenerování nastavovacího kódu pro jednotlivé moduly a piny mikrokontroléru. Podrobný popis o celém nastavení projektu pro konkrétní verzi PicoBaloonu lze nalézt v README dokumentech přiložených v jednotlivých složkách s kódem náležícím k dané verzi PicoBaloonu přítomných na doprovodném datovém médiu (příloha A). Z důvodu přítomnosti tohoto nastavení v README souborech není nutné toto nastavení zde rozepisovat.

Samotný firmware zařízení PicoBaloonu byl inspirován ukázkami kódu z SDK pro mikrokontrolér a ukázkami kódu pro jednotlivé Arduino knihovny, které byly upraveny pro použití v této práci. Obecně lze popsat, že firmware pro zařízení PicoBaloonu funguje jako velká nekonečná smyčka, který vždy udělá potřebné nastavení mikrokontroléru, získá napětí baterie a solárního panelu, získá údaje ze senzorů, připraví data na odeslání a odešle je pomocí konkrétního komunikačního modulu. Tento popis je velice obecný a slouží jen pro představu. Kompletní logika toho, jak firmware PicoBaloonu funguje, je popsán v následujícím textu.

Logika firmwaru PicoBaloonu začíná tím, že se nastaví mikrokontrolér pomocí vygenerovaného kódu z nástrojů vývojového prostředí MCUXpresso. Zde se konkrétně nastaví běh mikrokontroléru do Very-low-power run módu, ve kterém mikrokontrolér spotřebovává malé množství energie a nastaví se potřebné periferie do počátečního nastavení. Dále se přečte napětí na solárním panelu a na baterii. Podle napětí na baterii se pak rozhodne zda má zařízení dostatek energie na získání a odeslání měřených hodnot (pro vybraný superkondenzátor je konkrétně nastavena rozhodovací hodnota na 1.4 V, a je vypočítána na základě spotřeby jednotlivých komponent zařízení). Pokud zařízení nemá dostatek energie, tak se zařízení uspí a čeká specifikovaný interval, než se pokusí data odeslat znovu. Způsob usnutí zařízení a následného probuzení, je popsán dále. V případě, že má zařízení dostatek energie, tak se zapne napájení pro senzory a moduly zařízení PicoBaloonu a chvíli se počká, než se nastartují. Čekání určitý časový interval je zajištěno pomocí jednoho interního časovače mikrokontroléru. Poté, co jsou senzory a moduly zařízení PicoBaloonu nastartovány,

<sup>10</sup><https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/adafruit-mpl3115a2-library/>

<sup>11</sup><https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/sparkfun-u-blox-gnss-v3/>

<sup>12</sup><https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/mcci-lorawan-lmic-library/>

<sup>13</sup><https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/sparkfun-argos-artic-r2-arduino-library/>



se nejprve získají potřebné hodnoty pro odeslání. Ze senzoru SHT40 se získá teplota a relativní vlhkost, dále se ze senzoru MPL3115A2 získá absolutní atmosférický tlak a teplota a nakonec se z GNSS modulu MAX-M10S získá aktuální výška a zeměpisná šířka a délka. Zařízení vždy čeká, než jsou konkrétní data k dispozici, než pokračuje ve vykonávání programu. U senzorů lze počítat že data budou k dispozici téměř okamžitě avšak za špatných podmínek GNSS modul data nemusí poskytnout (při venkovním použití by téměř nikdy nemělo nastat). U GNSS modulu se konkrétně na "fix" polohy čeká maximálně 1 minutu, pokud se nepodaří získat polohu, tak se zařízení uspí a čeká na další čas kdy se má vzbudit. Poté, co jsou z konkrétního senzoru/modulu data přečteny, je jeho napájení opět odpojeno. Jediný rozdíl je u GNSS modulu, u kterého není napájení kompletně odpojeno, ale je ponecháno napájení jeho RAM paměti. Tím je zajištěno, že pokud je modul nastartován během dalších 4 hodin, tak provede takzvaný teplý start, který na základě informací uložených v RAM paměti dokáže vypočítat novou polohu během 1 - 2 s. Při prvním nastartování nebo po době delší než 4 hodiny je potřeba provést takzvaný studený start, při kterém je poloha získána za přibližně 25 s.

Poté, co jsou získána potřebná data, jsou připravena pro odeslání a odeslána konkrétním rádiovým modulem. Pro odeslání jsou data uložena do pole 8 bitových elementů, ve kterém jsou jednotlivé hodnoty uloženy následovně:

- **napětí solárního panelu:** UINT16, hodnota ve voltech s dvěma desetinnými místy je vynásobená stovkou aby měla podobu celého čísla,
- **napětí baterie:** UINT16, hodnota ve voltech s dvěma desetinnými místy je vynásobená stovkou aby měla podobu celého čísla,
- **teplota ze senzoru SHT40:** INT16, hodnota ve stupních Celsia s dvěma desetinnými místy je vynásobená stovkou aby měla podobu celého čísla,
- **relativní vlhkost ze senzoru SHT40:** INT16, hodnota v procentech s dvěma desetinnými místy je vynásobená stovkou aby měla podobu celého čísla,
- **absolutní atmosférický tlak ze senzoru MPL3115A2:** FLOAT, hodnota je uvedena v jednotce hPa a je odeslána v původní podobě získané ze senzoru, přesnost této hodnoty je dle datového listu senzoru 20 bitů,
- **teplota ze senzoru MPL3115A2:** INT16, požadovaný výsledek ve stupních Celsia se získá vydělením odeslané hodnoty stovkou, přesnost této hodnoty je na dvě desetinná místa,
- **zeměpisná šířka:** INT32, hodnota ve stupních je vynásobena číslem 10 000 000 a zaokrouhlena na celé číslo,
- **zeměpisná délka:** INT32, hodnota ve stupních je vynásobena číslem 10 000 000 a zaokrouhlena na celé číslo,
- **nadmořská výška z GNSS modulu:** INT16, výška uvedená v metrech.

Dohromady se tedy odesílá 24 bajtů dat. Teplota je odesílána z obou senzorů naráz z toho důvodu aby bylo možné porovnat, jak se naměřené hodnoty budou od sebe lišit.

Odeslání dat pomocí Argos modulu nebylo otestováno, ale je nastaveno na typ zprávy ARGOS PTT-A3, která dokáže odeslat až 248 bitů. Při tomto typu zprávy je potřeba dát pozor na to, že prvních 8 bitů z poskytnutého datového pole se neodešle (viz. popis funkce

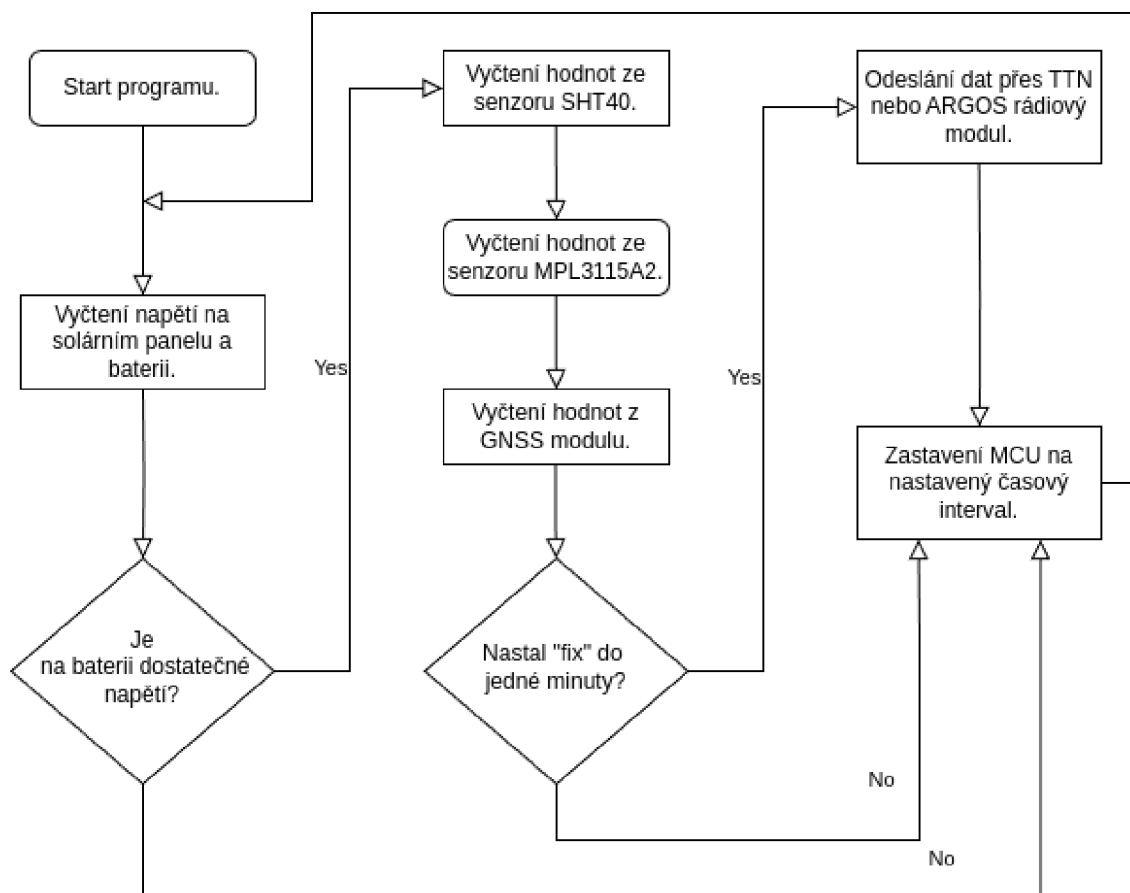


z Arduino Argos knihovny). Proto jsou data ve výsledném datovém poli posunuta a prvních 8 bitů je ponecháno volných.

Při odesílání dat přes TTN modul je nejprve rozhodnuto, v jakém regionu se zařízení nachází. To je provedeno pomocí aktuální zeměpisné šířky a délky, ze kterých se pomocí funkce určující přítomnost bodu v polygonu zjistí, zda je zařízení přítomno v nějakém polygonu, které jsou nastaveny tak, aby pokrývaly konkrétní TTN regiony. Na základě této informace může být dále provedeno odeslání dat v konkrétním regionu. Protože nebylo možné provést test zařízení v jiných regionech než je Evropa, tak funkčnost pro jiné regiony zatím nebyla implementována a odesílání dat bude fungovat jen v tomto regionu. Odeslání dat je konkrétně nastaveno na spreading faktor SF12 (nejlepší pro nejdelší dosah komunikace) a vysílací výkon 14 dBm (maximální povolený vysílací výkon v evropském regionu sítě TTN). Maximální počet bajtů, který na spreading faktoru SF12 lze odeslat je 51. Aby bylo možné použít PicoBaloon na síti TTN, je nutné do firmwaru zařízení PicoBaloonu vložit konkrétní registrační informace, které jsou vygenerovány během zakládání zařízení na síti TTN. Jak správně nastavit zařízení v síti TTN a které informace je potřeba vložit do firmwaru zařízení PicoBaloonu, je popsáno v README dokumentu na doprovodném datovém médiu této práce (příloha A). Konkrétně se jedná o složku s firmwarem pro TTN verzi zařízení PicoBaloonu.

Poté, co jsou data odeslána, vypne se i rádiový modul a zařízení se uspí do doby, než nastane čas pro další odeslání dat. Tato hodnota může být nastavena dle potřeby, avšak jak už bylo dříve popsáno, čím větší frekvence bude nastavena, tím kratší dobu zařízení vydrží bez slunečního svitu. Zařízení je během čekání nastaveno konkrétně do Very-low-leakage stop módu (VLLS1), ve kterém je jádro, většina RAM paměti a většina modulů mikrokontroléru vypnuta a zařízení je vzbuzeno časovačem po uběhnutí nastaveného časového intervalu. Tento mód mikrokontroléru pracuje tak, že mikrokontrolér restartuje při jeho vzbuzení a zařízení začne vykonávat kód znova od začátku. Restart mikrokontroléru má jednu špatnou vlastnost pro firmware TTN verze zařízení PicoBaloonu, ve kterém je potřeba uchovávat číslo odeslané zprávy, aby byla odeslaná data zaznamenána TTN sítí (ochrana sítě proti útokům). Pro tento účel je využita část paměti RAM, která se během tohoto módu udržuje pod napětím a po restartu zařízení je možné poslední číslo odeslané zprávy z ní zpět přečíst a použít ho při odeslání nových dat. Po účely testování obsahuje firmware také přerušování, který je možné využít k okamžitému vzbuzení zařízení (viz "jumpery" na fyzickém zařízení PicoBaloonu).

Funkčnost vytvořeného firmwaru je pro ilustraci zobrazena i na obrázku 12.2.



Obrázek 12.2: Vývojový diagram popisující funkčnost firmwaru PicoBaloonu.

Pokud se firmware zařízení z nějakého důvodu zasekne, je zařízení nastaveno tak, aby se zresetovalo "watchdogem" (modul mikrokontroléru), který restart provede, když mu firmware neprokáže živost po dobu jedné sekundy (zvolání konkrétní funkce). Zde prezentovaný popis je sepsán tak, aby blíže přiblížil logiku fungování zařízení. Pokud je potřeba najít konkrétní informaci o fungování zařízení PicoBaloonu, je nutné nahlédnout do jeho firmwaru na doprovodném datovém médiu [A](#).

## 12.4 Měření spotřeby primárních částí PicoBaloonu

Po zprovoznění ovládacího firmwaru pro zařízení PicoBaloonu na vývojovém hardwaru byly provedeny testy spotřeby. Pomocí těchto testů lze určit, jak přesné byly odhady prezentované v předchozích částech práce a ze změřené spotřeby následně vypočítat očekávanou dobu fungování zařízení na baterii. Díky tomu, že nebylo možné získat komunikační modul pro síť Argos, tak je zde změřena jen spotřeba pro TTN rádiový modul. Všechny následující naměřené hodnoty jsou změřeny při napětí 3.3 V multimetrem Extech MM560A MultiMaster.

Proud procházející mikrokontrolérem na vývojové desce byl měřen přímo na napájecí větvi mikrokontroléru, na kterou se lze napojit pomocí jumperu. Na vývojové desce FRDM-K32L2B3 je to konkrétně jumper J17. Při připojení ampérmetru na tento jumper byl změřen proud 0.8 mA v módu VLPR se zapnutými všemi potřebnými interními periferiemi. V režimu VLSS1 byl pak naměřen proud 21  $\mu$ A. Dále byl změřen proud procházející jednotlivými senzory a moduly připojenými k mikrokontroléru:

- **SHT40:** při získávání hodnot senzorem SHT40 byl naměřen proud 3.5  $\mu$ A na použité vývojové desce. Doba získání dat je méně než 1 s,
- **MPL3115A2:** při získávání hodnot senzorem MPL3115A2 byl naměřen proud 0.7 mA na použité vývojové desce. Doba získání dat je méně než 1 s,
- **MAX-M10S:** při získávání dat o poloze byl naměřen proud 20 mA na použité vývojové desce. Doba získání dat o poloze ve venkovním prostředí s dobrým výhledem na oblohu byla přibližně 30 s. Na vývojové desce s tímto modulem je přítomná i svítivá dioda a malá baterka, lze tedy očekávat, že reálná spotřeba samotného modulu bude o něco menší,
- **LoRa1276-868:** během odesílání dat modulem LoRa1276-868 byl měřen proud 90 mA po dobu 3 s. Naměřená hodnota je dvojnásobně větší než hodnota, která byla získána z datového listu modulu, i přesto tato hodnota není tak vysoká, aby způsobila problém při reálném provozu zařízení.

Jak je z naměřených hodnot vidět, tak spotřeba jednotlivých částí zařízení PicoBaloonu je přibližně taková, jaká byla odhadována. Při použití stejných vzorečků, které již byly použity pro první odhadnutí výdrže zařízení (viz výběr solárního panelu), lze spočítat novou teoretickou dobu výdrže konkrétně pro zařízení PicoBaloonu s TTN modulem. Při tomto výpočtu bude počítáno s dobou získání dat 30 s (studený start GNSS modulu) při odběru 22 mA, dobou odesílání 3 s při odběru 92 mA a zbylý čas bude zařízení spát s odběrem 0.1 mA (hodnoty jsou uměle zvětšeny, aby lépe postihovaly spotřebu dalších fyzických komponent na desce zařízení a efektivitu měniče napětí TPS61200DRCT). Při těchto parametrech, napětí 3.3 V a frekvencí odesílání jednou za hodinu by zařízení během jedné hodiny mělo spotřebovat 4.26591 J. Výpočet je zobrazen v rovnici 12.1.

$$\begin{aligned}P_g &= U * I_g * t_g = 3.3[V] * 0.022[A] * 30[s] = 2.178J \\P_t &= U * I_t * t_t = 3.3[V] * 0.092[A] * 3[s] = 0.9108J \\P_s &= U * I_s * t_s = 3.3[V] * 0.0001[A] * 3567[s] = 1.17711J \\P_c &= P_g + P_t + P_s = 2.178[J] + 0.9108[J] + 1.17711[J] = 4.26591J\end{aligned}\tag{12.1}$$

Pg -> Elektrická práce potřebná pro získání dat  
U -> Napájecí napětí zařízení  
I<sub>g</sub> -> Proud spotřebovávaný zařízením při získávání dat  
t<sub>g</sub> -> Čas potřebný pro získání dat  
P<sub>t</sub> -> Elektrická práce potřebná pro odeslání dat  
I<sub>t</sub> -> Proud spotřebovávaný zařízením při odesílání dat  
t<sub>t</sub> -> Čas potřebný pro odeslání dat  
P<sub>s</sub> -> Elektrická práce potřebná pro spánek zařízení  
I<sub>s</sub> -> Proud spotřebovávaný zařízením při spánku  
t<sub>s</sub> -> Doba spánku zařízení  
P<sub>c</sub> -> Elektrická práce spotřebovaná zařízením za hodinu

Na základě provedeného výpočtu je vidět, že výsledná spotřeba je velice podobná již provedeným teoretickým výpočtům a tedy by zařízení mělo zvládnout fungovat na baterii po dobu přibližně 8 h. Zde vypočítaná doba provozu je stále dobrá, lze také vzít v potaz, že by zařízení po studeném startu GNSS modulu mělo další data o poloze získat rychleji a doba provozu zařízení by se měla ještě prodloužit.

## Kapitola 13

# Aplikace pro zobrazení získaných dat z PicoBaloonu

V této kapitole je popsána webová aplikace určená k zobrazení dat přicházejících z vypuštěných PicoBaloonů, spolu s podpůrnými aplikacemi, které jsou potřeba pro její fungování. V první části této kapitoly je popsána aplikace, která získává data ze serverů použité komunikační sítě a ukládá je do databáze. Další část tohoto textu popisuje podobu databáze, kam se data z PicoBaloonu ukládají. Dále je popsána samotná webová aplikace, která data zobrazuje uživatelům a konec této kapitoly obsahuje popis, jak zde prezentované aplikace zprovoznit. Prezentovaný popis vytvořených aplikací je jen orientační a popisuje jejich základní fungování a podobu. Pokud je potřeba podrobná znalost nějaké funkčnosti těchto aplikací, tak je nutné se podívat do kódu uloženém na doprovodném datovém médiu k této práci. Pokud je nutné dohledat nějaké informace o zprovoznění těchto aplikací, tak ty lze nalézt v README souboru příslušejícímu zde prezentovaným aplikacím na doprovodném datovém médiu k této práci (příloha [A](#)).

### 13.1 Získání dat z komunikačních sítí

Získání dat z použitých komunikačních sítí zajišťuje aplikace napsaná v programovacím jazyce Python. Tato aplikace funguje tak, že se připojí k serverům použitých komunikačních sítí, zde získá všechny nově přijatá data, ta převede z formátu použitého během odeslání do výsledných datových typů odesílaných hodnot (Float, Int atd.) a uloží je do databáze. Z důvodu nesestrojení PicoBaloonu s Argos sítí není kód pro tuto síť součástí finální verze této aplikace. Avšak kvůli úplnosti zde bude popsáno, jakým způsobem by mělo jít data z této sítě získat. Následující text popisuje podrobněji logiku fungování této aplikace.

Získávání dat ze serverů použité komunikační sítě lze implementovat v obou případech pomocí internetového API. U TTN sítě se data získávají konkrétně pomocí MQTT protokolu a u Argos sítě by měla jít tato funkcionalita implementovat pomocí HTTPS SOAP protokolu. Důvodem, proč je nutné implementovat okamžité získávání přijatých dat z těchto komunikačních sítí, je že jsou tato data po určité době mazána. U TTN sítě lze očekávat, že přenesená data budou ztracena za 24 hodin a u Argos sítě je to 20 dní. Pokud by zobrazovací aplikace nepoužívala lokální databázi, už by po této době nebylo možné tato data zobrazit. Popis údajů které jsou nutné pro připojení k TTN sítí z této aplikace, lze nalézt v README souboru na doprovodném datovém médiu této práce (příloha [A](#)).



Poté, co jsou data z komunikační sítě získána, je nutné je připravit pro uložení do databáze. Data jsou nejprve převedena z podoby použité během bezdrátové komunikace do příslušných datových typů (popis, v jakém formátu jsou data přenášena lze nalézt v předchozí kapitole), přidá se k nim aktuální datum a čas, kdy byla data přijata a označení PicoBaloonu, který data odeslal. K hodnotám získaným ze senzorů se také dopočítá odhadovaná výška spočítaná z naměřeného tlaku<sup>1</sup>. Tato hodnota je normálně počítána na samotném senzoru MPL3115A2, avšak díky tomu, že lze spočítat, tak se tato hodnota výpočte až při ukládání do databáze, aby nebylo nutné tuto hodnotu posílat přes komunikační síť. Nakonec je k datům ještě přidána kompletní zpráva získaná z komunikační sítě, která lze použít pro případné ladící účely. Tato data jsou poté uložena do databáze, ze které jsou čteny zobrazovací webovou aplikací. Podrobnější popis databáze pro uložení dat z PicoBaloonu je přítomen v další sekci.

Poslední činností, kterou tato aplikace řeší je aktivní zjišťování nově vytvořených PicoBaloonů v aplikaci TTN sítě (viz. README pro tvorbu PicoBaloonu s TTN sítí). Tímto je zajištěno že data z nově vytvořených PicoBaloonů budou automaticky zaznamenávána a budou se zobrazovat ve webové aplikaci.

## 13.2 Databáze pro uložení dat z PicoBaloonů

Data z PicoBaloonů jsou uložena v jednoduché lokální SQLite databázi, která obsahuje jen jednu tabulku. Podoba této tabulky i s popisky, co které sloupce obsahují, je vyobrazena v tabulce 13.1.

Název sloupce	Datový typ	Popis
id	Integer	Identifikátor záznamu.
dev_addr	Text	Identifikátor PicoBaloonu.
recieved_at	DateTime	Kdy byla zpráva přijata.
solar_panel_voltage	Float	Napětí na solárním panelu. (V)
battery_voltage	Float	Napětí na baterii. (V)
sht40_temperature	Float	Teplota změřená senzorem SHT40. (°C)
sht40_humidity	Float	Relativní vlhkost změřená senzorem SHT40. (%)
mpl3115a2_pressure	Float	Atmosférický tlak změřený senzorem MPL3115A2. (hPa)
mpl3115a2_altitude	Integer	Výška vypočtená ze změřeného tlaku. (m)
mpl3115a2_temperature	Float	Teplota změřená senzorem MPL3115A2. (°C)
gnss_latitude	Float	Zemepisná šířka. (°)
gnss_longitude	Float	Zemepisná délka. (°)
gnss_altitude	Integer	Výška z GNSS modulu. (m)
message_json	Text	Kompletní zpráva z komunikační sítě.

Tabulka 13.1: Popis formátu databáze pro ukládání dat z PicoBaloonů.

<sup>1</sup><https://community.bosch-sensortec.com/t5/Question-and-answers/How-to-calculate-the-altitude-from-the-pressure-sensor-data/qaq-p/5702>

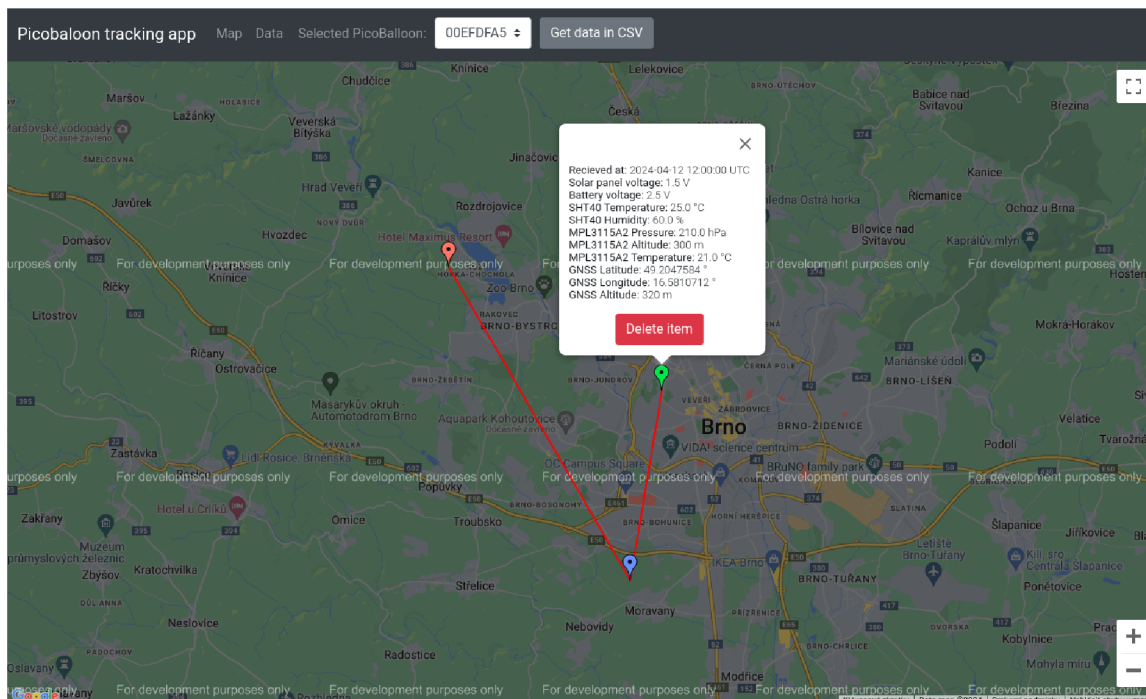
Jak již bylo zmíněno, tato databáze je využívána jak programem, který čte data z komunikačních serverů, tak i webovou aplikací, která data zobrazuje uživatelům. Obě tyto aplikace tedy přistupují k databázi ve stejný čas.

### 13.3 Webová aplikace pro zobrazení dat

Data z PicoBaloonu jsou uživatelům zobrazována pomocí webové aplikace implementované pomocí Flask frameworku pro programovací jazyk Python. Tato aplikace umožňuje zobrazit trasu PicoBaloonu na mapě spolu s přenesenými daty a dále umožňuje zobrazit grafy průběhů naměřených hodnot u prvků, kde to dává smysl. Podrobnější popis funkčnosti této aplikace je obsažen v následujícím textu.

Flask framework je mikro webový framework, který je složen ze skupiny dílčích knihoven, které dohromady poskytují všechny potřebné nástroje pro tvorbu celé škály webových stránek. Tento framework je založen na univerzálním rozhraní Web Server Gateway Interface (WSGI), které poskytuje funkčnost dotaz a odpověď mezi webovým serverem a webovou aplikací. Samotné stránky jsou pak tvořené pomocí šablon, které lze dynamicky upravovat. V tomto frameworku jsou například vytvořeny i webové stránky jako je Pinterest nebo LinkedIn.

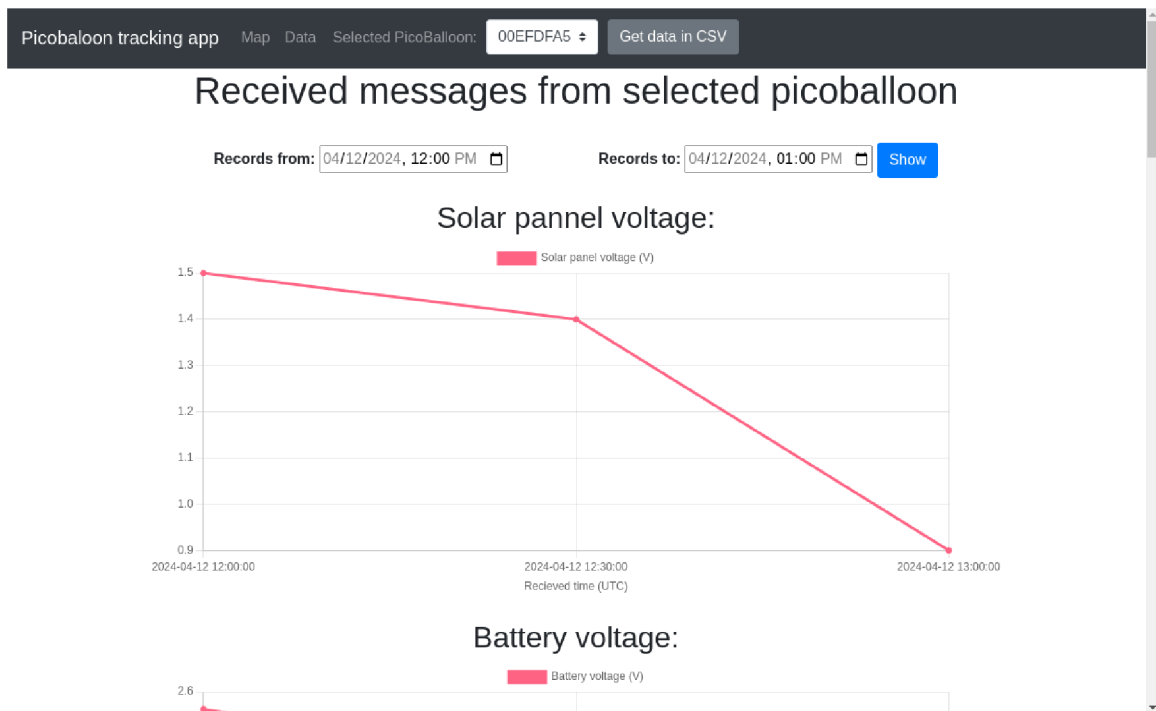
Aplikace zobrazující data z PicoBaloonu je rozdělena na tři obrazovky. První obrazovka očekává, že uživatel vybere PicoBaloon, jehož data se mají zobrazit. Výběr PicoBaloonu je umožněn i na zbylých dvou stránkách, které zobrazují mapu s trasou PicoBaloonu a grafy přenesených hodnot. Tento první výběr je však nutné provést na speciální obrazovce, protože webová aplikace neví, jaký PicoBaloon má zobrazit. Poté, co je vybrán konkrétní PicoBaloon, je uživatel přesměrován na stránku s Google Maps mapou, ve které jsou zobrazeny body, které znázorňují data přijatá z PicoBaloonu. Spojení jednotlivých bodů na mapě pak představuje výslednou trasu PicoBaloonu (viz obrázek 13.1). První bod z této trasy má zelenou barvu, poslední červenou barvu a všechny body mezi nimi mají barvu modrou. Pokud uživatel potřebuje zobrazit, jaká data byla přijata v konkrétním bodě, může kliknout na konkrétní bod z trasy PicoBaloonu. Toto kliknutí vyvolá zobrazení okna, ve kterém jsou tato data zobrazena. Pomocí tohoto zobrazovacího okna je také možné smazat konkrétní záznam pokud by to bylo nutné. Stisknutím tlačítka pro smazání záznamu se zobrazí další okno, ve které je možné definitivně potvrdit smazání konkrétního záznamu. Po provedení smazání záznamu je opět zobrazena stránka s mapou.



Obrázek 13.1: Zobrazení trasy PicoBaloonu ve webové aplikaci na umělých datech.

Okno webové aplikace s grafy obsahuje vytvořené grafy pro relevantní data z PicoBaloonu (viz obrázek 13.2). Tyto grafy zobrazují postup dané veličiny v čase. Veličiny, pro které jsou grafy vytvořeny, jsou konkrétně napětí solárního panelu, napětí baterie, teplota na senzoru SHT40, relativní vlhkost na senzoru SHT40, absolutní atmosférický tlak na senzoru MPL3115A2, nadmořská výška vypočtená z tlaku na senzoru MPL3115A2, teplota na senzoru MPL3115A2 a nadmořská výška poskytnutá modulem MAX-M10S. Po prvotním načtení této stránky jsou zobrazena všechna data z PicoBaloonu, dále je však možné pomocí formuláře zvolit konkrétní časové období, pro které se mají data zobrazit.

Aplikace také umožňuje stáhnout všechna data pro konkrétní PicoBaloon v CSV formátu pro další zpracování. Údaje z databáze pro konkrétní PicoBaloon jsou načítána při každém načtení webové stránky, tímto způsobem je tedy možné testovat přijetí nových dat.



Obrázek 13.2: Zobrazení grafů pro relevantní data z PicoBaloony ve webové aplikaci na umě-  
lých datech.

## 13.4 Zprovoznění webové aplikace

Zde prezentovaná webová aplikace i program, který shromažďuje data z komunikačních sítí, byly navrženy tak, aby je bylo možné spustit na libovolném počítači a tedy nebyly závislé na konkrétním provozovateli hostingu. Při testování této práce byly tyto aplikace zprovozněny na mikropočítači Raspberry Pi. Při replikaci tohoto typu hostingu je potřeba vytvořit vlastní doménu, otevřít potřebné porty na routeru a zaručit nepřetržitý provoz těchto aplikací. Podrobný popis těchto činností pro mikropočítač Raspberry Pi lze nalézt v README souboru, ve složce s kódem pro tyto aplikace, na doprovodném datovém médiu této práce (příloha A).

## Kapitola 14

# Testování PicoBaloonu a výsledné zhodnocení

Obsahem této kapitoly je popis, jak bylo zařízení PicoBaloonu otestováno, a jaké výsledky byly dosaženy. První část tohoto textu obsahuje testování desky během jejího sestavování, dále jsou pak popsány testy celého vytvořeného systému. Celý systém pro zařízení PicoBaloonu byl otestován nejprve na zemi, po provedení těchto testů bylo zařízení vypuštěno na balóncích přivázaných vlascem k zemi a nakonec bylo provedeno konečné vypuštění. Na konci této kapitoly jsou rozepsány dosažené výsledky a možné budoucí vylepšení PicoBaloonu. Uvedené hodnoty napětí a proudu v této kapitole byly změřeny multimetrem Extech MM560A MultiMaster ve všech případech, kde není uvedeno jinak.

### 14.1 Testování funkčnosti zařízení během jeho sestavování

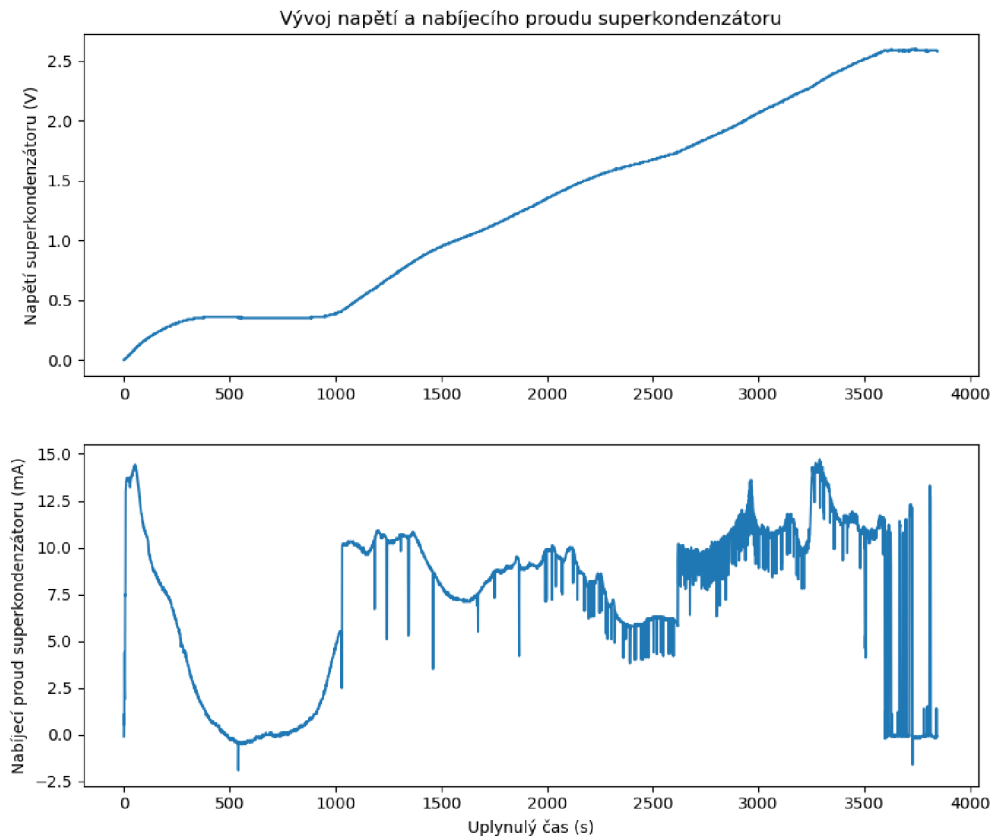
Aby byla otestována funkčnost jednotlivých částí desky zařízení PicoBaloonu, byly rovnou během osazování prováděny základní testy. Tímto testováním je možné odhalit případné nefunkční součástky a předejít tak zdlouhavějšímu opravování při kompletně sestaveném zařízení.

Osazování desky bylo započato od obvodů potřebných k Energy harvesting a úpravě napájecího napětí na 3.3 V. Po připájení součástek z této části zařízení bylo otestováno, že superkondenzátor je nabíjen při napětí 0 - 1.8 V přímo ze solárního panelu a při napětí 1.8 - 2.7 V přes nabíječku. Co se týče měniče napětí, který produkuje stabilních 3.3 V, tak ten funguje od vstupního napětí přibližně 0.4 V. V této části testování bylo také ze zajímavosti otestováno, jak se bude chovat nabíjení superkondenzátoru jen přes nabíječku. Zde nastalo příjemné zjištění, že nabíječka nabíjí plným výkonem již od nulového napětí superkondenzátoru. Z tohoto důvodu bylo nakonec rozhodnuto, že nejlepší bude odstranit komparátor a přepínací tranzistory, a tím zajistit i lepší spotřebu zařízení. Pro připojení výstupu solárního panelu k nabíječce byl při odstranění tranzistorů použit 0 ohmový rezistor připájený mezi ploškami 2 a 3 pro tranzistor Q2. Pro zbylé testy zařízení se tedy bude uvažovat toto zapojení.

Na tomto nabíjecím zapojení bylo dále otestováno, za jak dlouho se dokáže reálně nabít použitý superkondenzátor. Test byl proveden v místě Hrušovany u Brna, 27.6.2024 v 10 h a bylo převážně oblačné počasí. Výsledky tohoto testu jsou zobrazeny na obrázku 14.1. Obrázek zobrazuje grafy pro napětí na superkondenzátoru a nabíjecí proud změřený obou-



směrným proudovým snímačem INA219<sup>1</sup>, který byl připojen k desce Arduino UNO R4 WiFi .



Obrázek 14.1: Graf napětí a nabíjecího proudu superkondenzátoru během testu nabíjení.

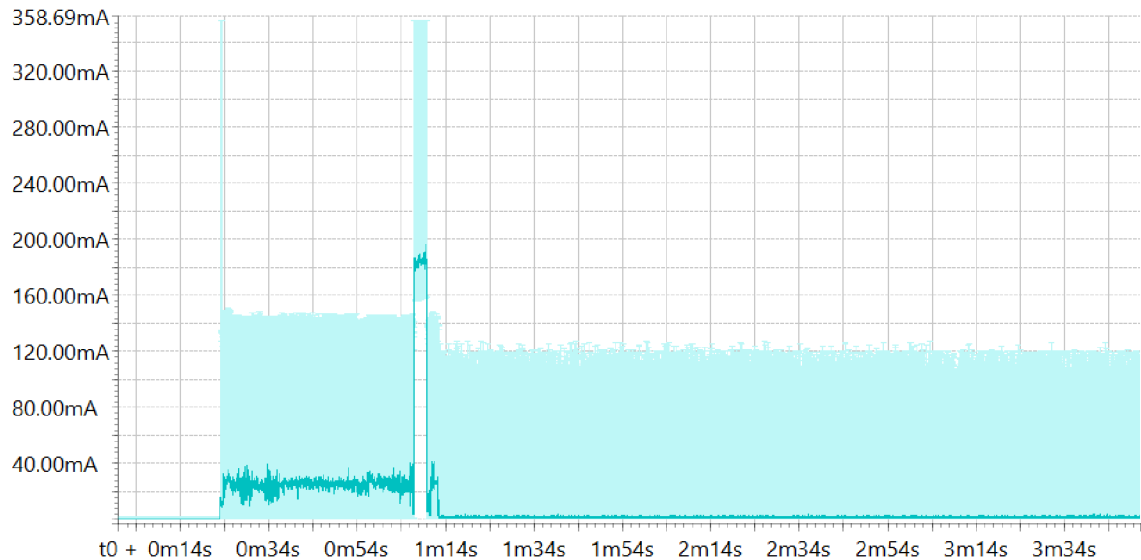
Na základě zde změřených hodnot je vidět, že rychlost nabíjení je více než dostatečná a že solární panel generuje dostatečné množství energie i při oblačném počasí.

Poté, co bylo otestováno napájení desky zařízení PicoBaloonu, byla otestována funkčnost jednotlivých senzorů a modulů zařízení. Funkčnost těchto čipů byla otestována za pomoci vývojové desky FRDM-K32L2B3, která se k zařízení PicoBaloonu připojila pomocí testovacích pinů. Napájení senzorů bylo provedeno přes testovací piny, na které byl napojen 3.3 V zdroj. Všechny tyto čipy se podařilo úspěšně zprovoznit a i jejich odběr proudu byl přibližně takový, jaký byl očekáván. U modulu MAX-M10S byl změřen proud přibližně 13 mA a u modulu LoRa1276-868 proud přibližně 62 mA.

<sup>1</sup><https://dratek.cz/arduino/1437-ina219-proudovy-snimac-obousmerny.html>

Nakonec byl na desku zařízení PicoBaloonu připájen mikrokontrolér se všemi potřebnými přídatnými součástkami. Pro naprogramování mikrokontroléru byl použit programátor J-Link LITE FSL<sup>2</sup>. Výsledné zařízení po naprogramování fungovalo dle očekávání.

Na takto sestaveném zařízení bylo následně provedeno měření odběru přímo na výstupu superkondenzátoru při jeho nabití na 2.5 V. Pro toto měření byla použita deska MCU-Link Pro<sup>3</sup> od společnosti NXP a výsledek tohoto měření je zobrazen na obrázku 14.2.



Obrázek 14.2: Spotřebovávaný proud zařízením PicoBaloonu přímo ze superkondenzátoru při jeho nabití na 2.5 V.

Prvních přibližně 20 sekund tohoto grafu zobrazuje odběr proudu při rozpojené větvi 3.3 V, takže výstup měniče TPS61200DRC není k ničemu připojen. V tomto stavu má zařízení odběr 100  $\mu$ A při napětí 2.5 V na superkondenzátoru (pro jednoduchost je s touto hodnotou počítáno při celém testu, i když napětí na superkondenzátoru během tohoto testu pokleslo). Při sepnutí napájecí linky zařízení odebírá přibližně 25 mA po dobu 30 s. Během této doby zařízení provádí fix své polohy (studený start). Dále pak jsou naměřena data odeslána, což trvá přibližně 3 sekundy, a proudový odběr zařízení při této činnosti je přibližně 180 mA. Poté, co zařízení dokončí svou činnost, se uspí a čeká na další časové okno, kdy má odeslat nová data. Během této fáze, kdy zařízení spí a čeká na odeslání nových dat, byl naměřen proudový odběr přibližně 0.8 mA. Zde naměřené hodnoty jsou o něco větší než bylo očekáváno a je tedy jasné, že zařízení vydrží o něco kratší dobu v provozu na baterii, než bylo plánováno. Tento výsledek je zčásti způsoben tím, že měnič TPS61200DRC má nižší efektivitu při malém odběru proudu (přibližně 50 %) a také nejspíše tím, že některé součástky použité na desce PicoBaloonu mají o něco větší spotřebu, než bylo očekáváno. Při tomto měření byl proveden studený start GNSS modulu, při kterém je vidět, že doba provedení prvního fixu polohy trvá přibližně 30 sekund, při odesílání již několikáté zprávy v pořadí se tato hodnota zmenšila na přibližně 10 sekund.

<sup>2</sup><https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/models/other-j-links/j-link-oem-versions/>

<sup>3</sup><https://www.nxp.com/design/design-center/software/development-software/mcuxpresso-software-and-tools-/mcu-link-pro-debug-probe:MCU-LINK-PRO>

Z těchto naměřených hodnot lze spočítat použitými vzorečky, že zařízení při odeslání jedné zprávy za hodinu spotřebuje přibližně 9.67616 J a v reálném použití by mělo vydržet přibližně 3.68 h při provozu z baterie. Výpočet těchto hodnot je rozepsán rovnicí 14.1.

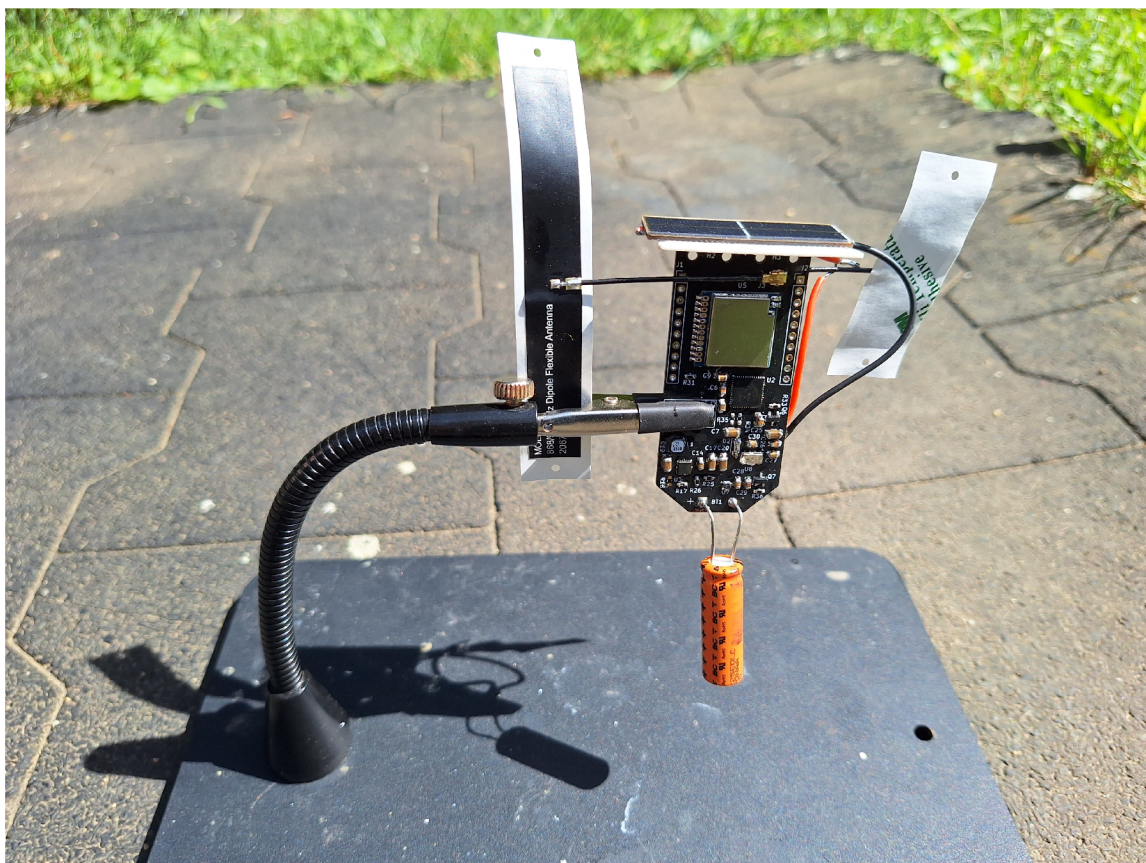
$$\begin{aligned}
 P_g &= U * I_g * t_g = 2.6[V] * 0.025[A] * 20[s] = 1.3J \\
 P_t &= U * I_t * t_t = 2.6[V] * 0.180[A] * 3[s] = 0.936J \\
 P_s &= U * I_s * t_s = 2.6[V] * 0.0008[A] * 3577[s] = 7.44016J \\
 P_c &= P_g + P_t + P_s = 1.3[J] + 0.936[J] + 7.44016[J] = 9.67616J \\
 t_f &= P_{cap}/P_c = 35.65[J]/9.67616[J] = 3.68h
 \end{aligned}
 \tag{14.1}$$

$P_g$  -> Elektrická práce potřebná pro získání polohy  
 $U$  -> Napětí na superkondenzátoru  
 $I_g$  -> Proud spotřebovávaný zařízením při získávání polohy  
 $t_g$  -> Čas potřebný pro získání polohy (průměr studeného a teplého startu)  
 $P_t$  -> Elektrická práce potřebná pro odeslání dat  
 $I_t$  -> Proud spotřebovávaný zařízením při odesílání dat  
 $t_t$  -> Čas potřebný pro odeslání dat  
 $P_s$  -> Elektrická práce potřebná pro spánek zařízení  
 $I_s$  -> Proud spotřebovávaný zařízením při spánku  
 $t_s$  -> Doba spánku zařízení  
 $P_c$  -> Elektrická práce spotřebovaná zařízením za hodinu  
 $P_{cap}$  -> Elektrická práce uložená v superkondenzátoru ponížena o 0.8 J, které nejde využít, protože měnič napětí funguje od 0.4 V  
 $t_f$  -> Očekávaný čas fungování zařízení

Pokud by bylo potřeba dosáhnout větší výdrže zařízení čistě na baterii, tak by bylo nutné použít větší superkondenzátor. Použit jde například superkondenzátor MAL222551003E3, který je od stejného výrobce jak použitý superkondenzátor, ale má dvojnásobnou kapacitu (20 F). Tento superkondenzátor váží 6 g, což je o 2.5 g více než použitý superkondenzátor, ale u TTN verze zařízení PicoBaloonu by pořád výsledná váha byla v limitu 20 g. Co se týče celé funkčnosti zařízení, tak funguje, jak bylo očekáváno, a další část testování se bude zabývat testováním zařízení během delšího časového období ve venkovním prostředí.

## 14.2 Testování PicoBaloonu na zemi

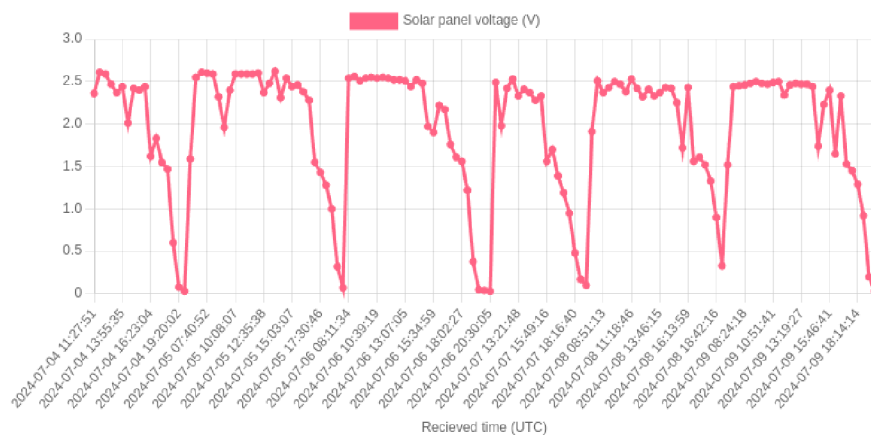
Po kompletním sestavení zařízení a ověření jeho funkčnosti následovaly další testy zaměřené na ověření reálné výdrže zařízení a jeho fungování během delšího časového období. Při této části testování bylo konkrétně zařízení umístěno na zahradě v Hrušovanech u Brna s volným výhledem na oblohu po dobu šesti dní (4.7.2024 - 9.7.2024). Umístění zařízení PicoBaloonu při tomto testu je vidět na obrázku 14.3. Při tomto testu bylo první polovinu dní převážně slunečno, další dny už bylo i zataženo a někdy i přšelo. Interval odesílání měřených hodnot byl nastaven na 30 min. Tato hodnota bylo navržena konzultantem ze společnosti NXP, který se na tomto projektu podílel. Dle jeho slov je lepší odesílat větší množství dat, a pro testování tohoto zařízení nevádí, pokud nebude během větší části noci nic posílat.



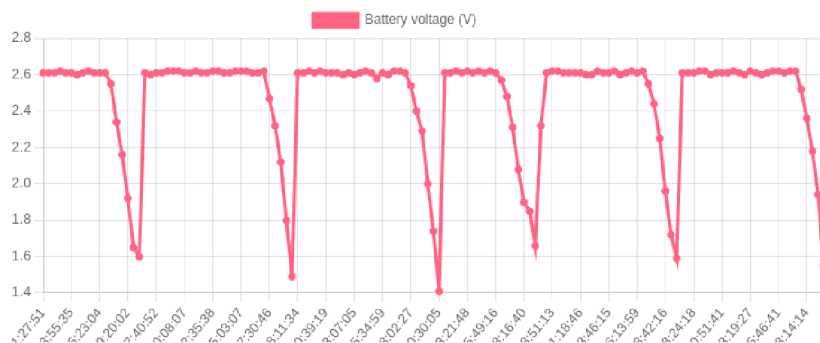
Obrázek 14.3: Umístění zařízení PicoBaloonu při testech na zemi. Zařízení je umístěno mezi domy s převážně volným výhledem na oblohu.

Během tohoto testu zařízení fungovalo tak, jak bylo očekáváno. Ráno, když vysvitlo slunce, se zařízení nabilo a odesílalo hodnoty do doby, než se vybilo. Při nastavení odesílání dvou zpráv za hodinu zařízení vydrželo fungovat přibližně 3 hodiny od doby, co začalo napětí na superkondenzátoru klesat. Je zřejmé, že solární panel ještě chvíli generoval malé množství energie, protože slunce zapadá postupně. Tato generovaná hodnota však již nebyla dostatečná pro nabíjení superkondenzátoru. Změřená doba výdrže zařízení je dostatečná a je také v souladu s již dříve vypočítanou teoretickou dobou výdrže založenou na změřených hodnotách spotřeby. Hodnoty naměřené na superkondenzátoru a solárním panelu během tohoto testu uložené ve webové aplikaci jsou zobrazeny na obrázku 14.4.





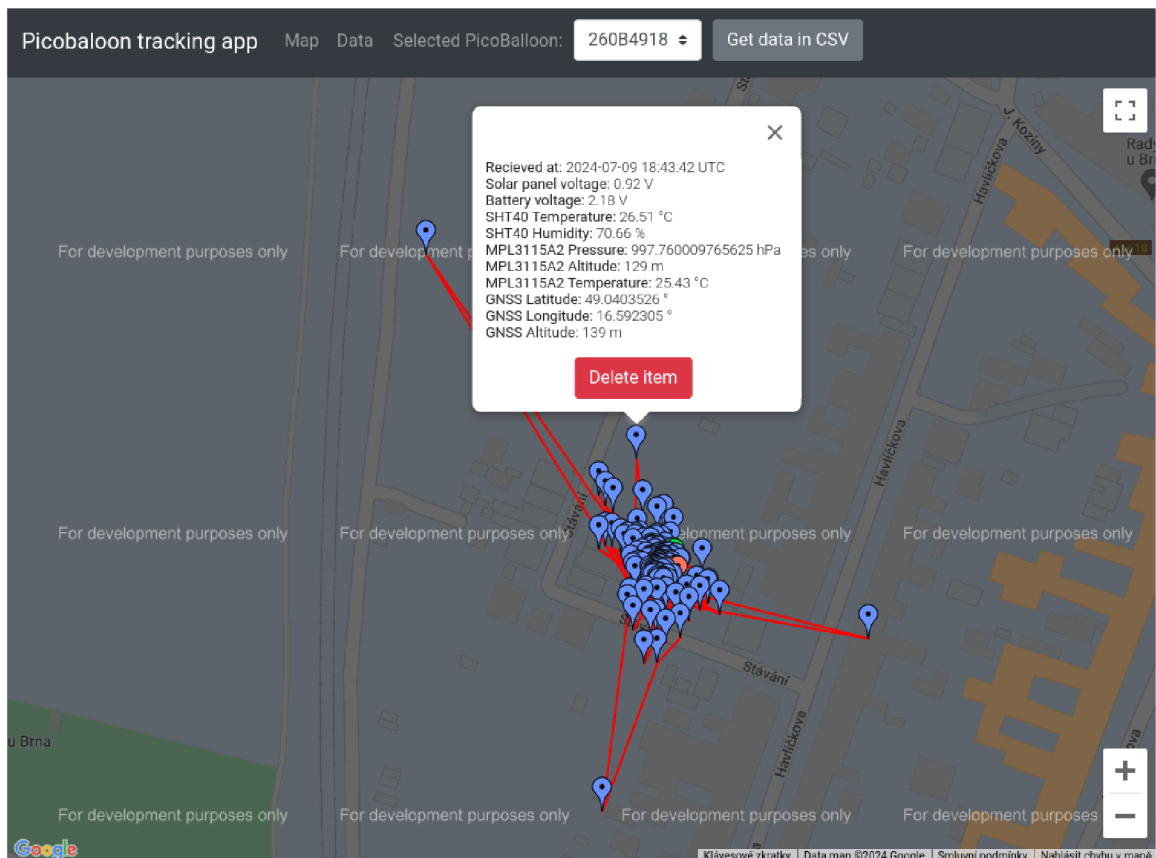
### Battery voltage:



Obrázek 14.4: Hodnoty napětí solárního panelu a superkondenzátoru zobrazené ve webové aplikaci po provedení několikadenního testu, kdy bylo zařízení umístěno na zahradě.

Naměřené hodnoty polohy zařízení z tohoto testu jsou zobrazeny na obrázku 14.5 a je na nich vidět, že reportovaná poloha zařízení je většinu času přesná s odchylkou několika metrů od reálné polohy. V několika případech je však patrné, že se vypočítaná poloha odchýlí o několik desítek metrů od skutečné polohy. Odchylky jsou rovněž viditelné ve vypočítané výšce z GNSS modulu, kde je často rozdíl také v desítkách metrů od reálné hodnoty. Tyto odchylky pro fungování tohoto zařízení nemají žádný zásadní vliv, protože stačí znát jen přibližnou polohu zařízení.





Obrázek 14.5: Naměřené polohy PicoBalloonu během několikadenního testu, kdy bylo zařízení umístěno na zahradě.

Dále při tomto testu bylo možné zkontrolovat, jaké hodnoty poskytují použité senzory na zařízení PicoBalloonu. Po prozkoumání hodnot ze senzorů bylo zjištěno, že senzory poskytují hodnoty, které byly během daného období očekávány. Nicméně, naměřená teplota byla výrazně ovlivněna, pokud na senzor svítilo přímé sluneční světlo. Během dne byla například naměřena teplota přes 40 °C. S těmito hodnotami je však nutné počítat, když senzory nejsou nijak kryté před přímým sluncem. Naměřeným teplotám nepomáhá ani černá barva desky, která pohlcuje sluneční světlo a ohřívá samotnou desku zařízení PicoBalloonu. Jak již bylo dříve zmíněno v sekci popisující objednání desek plošných spojů, byla černá barva desky zvolena právě proto, aby se deska ohřívala, a tím byly zajištěny lepší provozní teploty zařízení v jeho operující výšce. V tomto testu se tedy ukázalo, že tato úvaha je správná.

Všechna data zaznamenaná z tohoto testování budou určitou dobu po zveřejnění této práce dostupná i na webové adrese <https://picoballoonmap.duckdns.org/>, na které běží vytvořená webová aplikace. Pokud již webová stránka není dostupná, je možné si webovou aplikaci rozjet lokálně ze souborů uložených na datovém médiu této práce [A](#).

Při tomto testu bylo zařízení pokryto již zmíněným sprejem PLASTIK 70 a úspěšně vydrželo veškeré venkovní podmínky. Během testování nebylo možné otestovat funkčnost zařízení za nízkých teplot kvůli nedostatku potřebného vybavení, takže tato funkčnost bude otestována přímo při samotném vypuštění zařízení. Další sekce textu se zabývá testováním zařízení ve vzduchu.

### 14.3 Testovací vypuštění PicoBaloonu přivázaného k zemi

Další test, který byl na PicoBaloonu proveden, je testovací vypuštění, u kterého bylo zařízení přivázáno rybářským vlascem k zemi. Při tomto testu se tedy zařízení vzneslo jen do výšky určené tímto vlascem. Konkrétně pro uvázání zařízení byl použit 150metrový rybářský vlasce, kterým bylo zařízení také připevněno k nosným balónkům. Zařízení PicoBaloonu uvázané k nosným balónkům je zobrazeno na obrázku 14.6. Cílem tohoto testu bylo ověřit, zda zařízení bude správně fungovat i při podmínkách, kdy je pohazováno větrem ze strany na stranu. Zde je důležité ověřit, jestli všechny fyzické části zařízení PicoBaloonu vydrží toto pohazování a zda se bude superkondenzátor správně nabíjet, i když se budou neustále měnit podmínky osvětlení solárního panelu.



Obrázek 14.6: Zařízení PicoBaloonu přivázané k nosným balónkům při testu, kdy bylo zařízení uvázané k zemi přes kotvicí lanko.

V běžných obchodech se dají koupit dva typy balónek, a to fóliové a latexové. Rozdíl mezi těmito balónkami spočívá především v rychlosti, jakou z nich uniká nosný plyn, obvykle helium. Podle článků na internetu mohou latexové balónek zůstat ve vzduchu maximálně několik dní, zatímco fóliové balónek mohou létat týden i déle<sup>4</sup>. Při tomto testu není výběr typu nosných balónek tak důležitý, protože není nutné, aby balónek vydržely ve vzduchu po delší dobu. Pro tento test byly konkrétně použity balónek Qualatex Duha 36"/91cm (fóliový balónek) a Qualatex - Zelený achát 30"/76cm (latexový balónek). Rozhodnutí použít

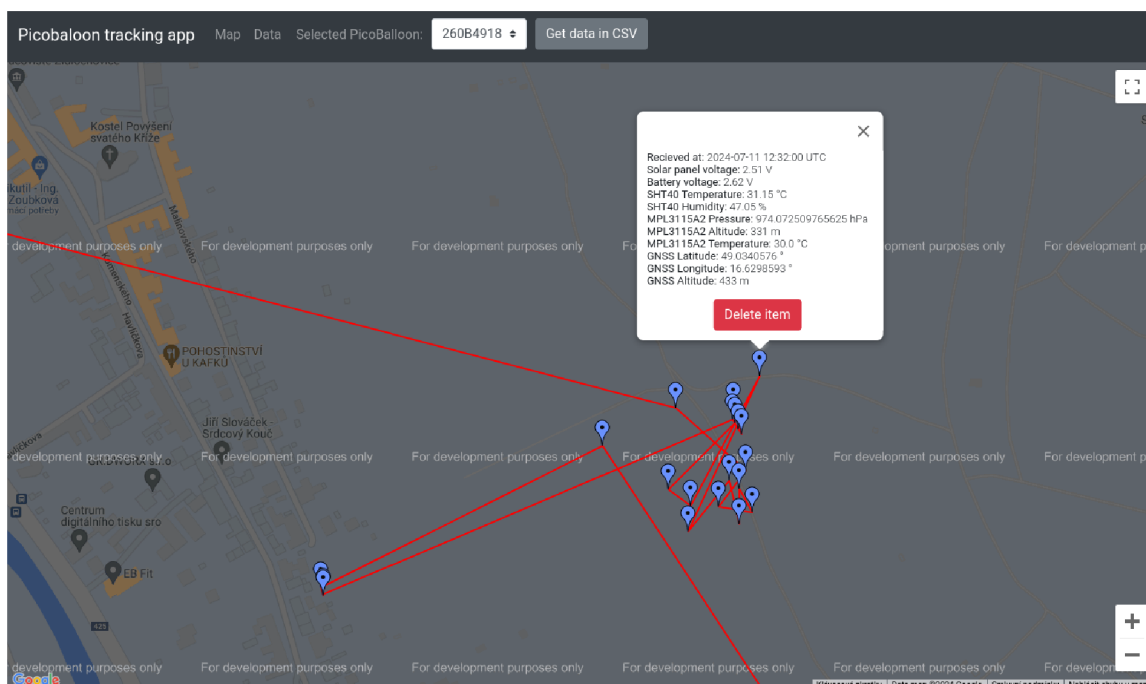
<sup>4</sup><https://shimmerandconfetti.com/blogs/the-shimmer-and-confetti-blog/how-long-will-my-balloon-float-for-helium-float-times>

více nosných balónků není závislé na tom, že by jeden balónek zařízení neunesl. Použití více balónků zajišťuje větší vztlak, který pomáhá zařízení lépe odolávat bočnímu větru, který by jinak mohl zařízení stahovat k zemi. Toto stahování k zemi je způsobené kotvicím lankem, které způsobí, že pokud je balónek zanášen větrem více na stranu, jeho výška se zmenšuje. U finálního vypuštění není použito žádné kotvicí lanko, takže tento problém není potřeba řešit.

Tento test byl konkrétně proveden na kopci Výhon v Židlochovicích dne 11.7.2024 a trval od 10.30 do 18.00 h. V den testu bylo převážně polojasné počasí a rychlost větru byla od 0.5 do 1.7 m/s dle meteorologických údajů na stránce iDNES<sup>5</sup>.

Při tomto testu bylo potvrzeno, že zařízení se bez problémů nabíjí a správně posílá všechny měřené hodnoty. Mapa zaznamenaných poloh zařízení během tohoto testu je zobrazena na obrázku 14.7. Hodnoty napětí na solárním panelu a superkondenzátoru z tohoto testu lze vidět na obrázku 14.8. Všechna data zaznamenaná z tohoto testu budou určitou dobu po zveřejnění této práce dostupná i na webové adrese

<https://picoballoonmap.duckdns.org/>, na které běží vytvořená webová aplikace. Pokud již webová stránka není dostupná, je možné si webovou aplikaci spustit lokálně ze souborů uložených na datovém médiu této práce A.

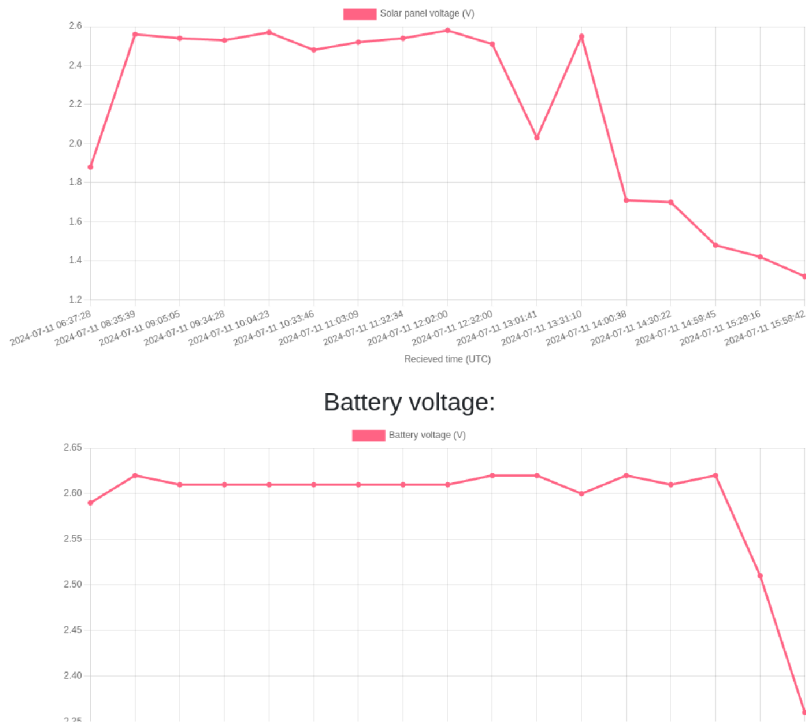


Obrázek 14.7: Mapa zobrazující polohu PicoBaloonu během testu vypuštění s kotvicím lankem. Body v levém dolním rohu obrázku zařízení odeslalo již po odnesení z testovacího místa.

Tento test byl ukončen jiným způsobem, než bylo zamýšleno, protože nosné balónky praskly. Prasknutí balónků bylo pravděpodobně způsobeno teplem, které vedlo k rozpínání helia. Zařízení tento pád přežilo bez poškození a nadále posílalo údaje, podle kterých bylo nalezeno. Tento pád je i důvodem pro klesající hodnoty na konci grafů, které zobrazují napětí na solárním panelu a superkondenzátoru. Vzhledem k tomu, že zařízení úspěšně

<sup>5</sup><https://pocasi.idnes.cz/jihomoravsky-kraj/vitr>





Obrázek 14.8: Napětí na solárním panelu a superkondenzátoru během testu, kdy bylo zařízení Picobaloonu vypuštěno s kotvicím lankem, zobrazeno ve webové aplikaci.

překonalo tento test a finální pád bez poškození, lze předpokládat, že bude schopné fyzicky vydržet i finální vypuštění.

Při provádění testu tohoto typu je potřeba dávat pozor na větší boční vítr, který může zařízení při dostatečné síle značně stáhnou k zemi. To může být problém pokud jsou v okolí místa vypuštění objekty, o které se může zařízení zachytit. Silnější poryvy větru také způsobovaly výrazné poskakování zařízení, které mělo za následek postupné zamotávání zařízení do kotvicího lanka. To může být problém například pro antény zařízení, které by lanko mohlo utrhnout. Tyto problémy není nutné tolik řešit u finálního vypuštění, kde nebudou přítomny nárazy způsobené napínáním kotvicího lanka při bočních poryvech větru. Při finálním vypuštění by se zařízení mělo primárně pouze houpat pod nosným balónem.

Dále během tohoto testu bylo možné zjistit maximální dosaženou komunikační vzdálenost. Údaj o maximální komunikační vzdálenosti lze konkrétně získat z JSON zpráv, které odesílá API TTN sítě při obdržení nové zprávy. V těchto zprávách jsou uvedeny informace o tom, které TTN brány zprávu přijaly a na základě polohy těchto bran lze následně vypočítat vzdálenost k zařízení. Polohu TTN brány lze nalézt buď přímo v JSON zprávě, nebo na stránkách TTN sítě<sup>6</sup>.

Zprávy vysílané PicoBaloonem při tomto testu se podařilo zaznamenat branami v Brně (20 km), dále pak branami směrem na Ketkovice (30 km) a nejvzdálenější brána, která zprávu zachytila, se nachází v rakouském Rebensburgu (50 km). Z těchto dat je tedy vidět, že data z PicoBaloonu lze zaznamenat při dobrých podmínkách i na vzdálenost 50 km. Vždy však závisí i na parametrech konkrétní brány, jako je její citlivost, umístění antény

<sup>6</sup><https://www.thethingsnetwork.org/map>

a typ antény, který používá. Obrázky z tohoto vypuštění lze nalézt na přiloženém datovém médiu A.

## 14.4 Finální vypuštění PicoBaloonu

Finálním testem vytvořeného PicoBaloonu už bylo jen jeho reálné vypuštění. Vypuštění bylo provedeno z kopce Výhon v Židlochovicích dne 14.7.2024 v 11.16 h a je zobrazeno na obrázku 14.9. Při tomto testu bylo zařízení PicoBaloonu připevněno rybářským vlascem k fóliovému balónku naplněnému heliem a následně vypuštěno.



Obrázek 14.9: Vypuštění PicoBaloonu z kopce Výhon v Židlochovicích.

Pro vypuštění byl využit fóliový balónek Qualatex 36"<sup>7</sup>. Tento balónek byl vybrán především proto, že jsou k němu k dispozici potřebné informace pro finální vypuštění. Pro úspěšné vypuštění PicoBaloonu jsou důležité informace, jako je objem balónku, jeho hmotnost a hmotnost připevněného zařízení. Na základě těchto údajů lze vypočítat potřebné množství helia, které je třeba do balónku naplnit, a očekávanou výšku, ve které se PicoBaloon ustálí. Informace o použitém nosném balónku i kalkulačka (float1g.xlsm), která slouží k výpočtu všech potřebných parametrů pro vypuštění, byly získány ze stránky <https://github.com/KevWal/Balloon-Info>. Tato stránka poskytuje informace a nástroje vyvinuté a používané nadšenci do PicoBaloonů.

<sup>7</sup><https://www.amazon.com/Qualatex-Inch-Round-Plain-Balloon/dp/B009SR2GVM>

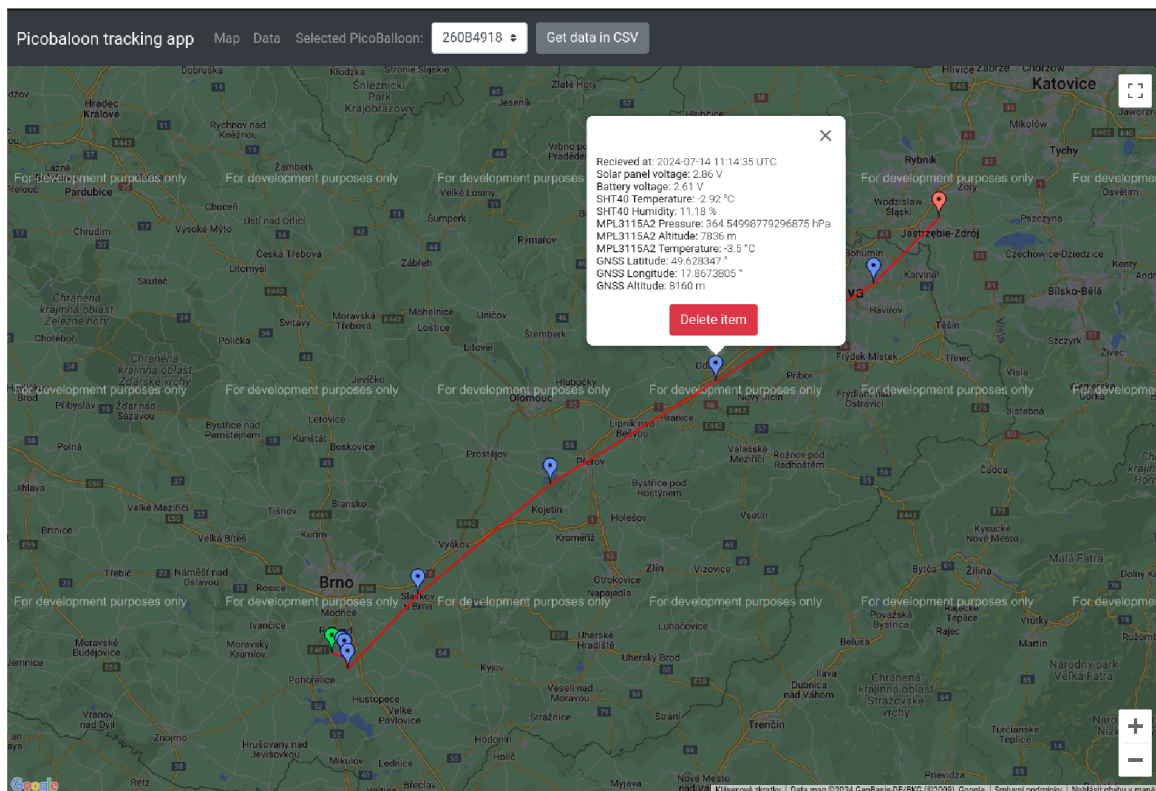


SuperPressure Balloon float calculator (by Steve Randall)							Version 1g - 17/11/2020		Gas Density Table in Kg/cu m							
							at 101.325kPa at MSL			0 deg C	15 deg C					
Gas	Chosen Gas Density	Free Lift (g)	SP Balloon vol (cu m)	weight (g)	Payload Weight (g)	Gas Mass (g)	Total Mass (kg)	Neck Lift (g)	Launch Gas Fill (cu m)	Hydrogen	0.0899	0.0852				
Helium	0.1693	7.00	0.120	33.00	17.50	9.22354949	0.0597	>>> 24.5000	0.0545 <<<	Helium	0.1786	0.1693				
										Helium 97%	0.2120	0.2010				
										Air	1.2920	1.2247				
System Density at float (Kg/cu m)			K		Internal Pressure (kPa)			External Pressure (kPa)			Temp (deg C)		Altitude (m)		Atmospheric Pressure (kPa)	
0.4977			0.0191724		37.220441			33.28242			-40.00		>>> 8480 <<<		(27814.4 ft) 101.325	
free lift ratio (see [1])			K/V		Differential Pressure at float (kPa)			(psi)			Superpressure Onset (m)					
0.1172067			0.15977		>>> 3.9380 <<<			0.5712 <<<			>>> 7520 <<<		(24665.6 ft)			
Use:					Super Pressure by [1] (kPa)			(psi)								
Inputs in green cells					>>> 3.9009 <<<			0.5658 <<<								
Results in <u>arrowed</u> pink cells															Altitude at which the balloon envelope becomes full, superpressure starts and the ascent rate slows down into float	
Inputs:																
Gas - drop-down of the the type of gas you will use to fill the balloon (Hydrogen/Helium)																
Free Lift - desired free lift - sets the amount of gas needed, float differential pressure and altitude																
SP balloon vol. - the volume of the balloon (or total volume if multiple balloons) that you will be using															References:	
SP balloon weight - the weight of the balloon envelope (or total weight if multiple balloons)															[1] Superpressure Balloons for Horizontal	
Payload weight - weight should include everything that is not included in the balloon weight (so line, tape etc).															Soundings of the Atmosphere V.E. Lally	

Obrázek 14.10: Výsledky z kalkulačky použité k nastavení PicoBaloonu k vypuštění.

Informace, které byly konkrétně do použité kalkulačky vloženy, jsou: nosný plyn: helium, volný vztlak: 7 g, objem balónu: 0.120 m<sup>3</sup>, váha balónu: 33 g a váha zařízení 17.5 g (obsahuje i váhu popruhů použitých pro přivázání zařízení k nosnému balónku). Hodnota volného vztlaku (Free Lift) určuje, jaký má mít balónek vztlak ve stavu, kdy je připraven k vypuštění (je k němu připevněné zařízení). Hodnota 7 g byla vybrána na základě článku [PICO-Ballooning – By John Ruthroff](#), který popisuje zkušenosti autora s PicoBaloony. Na základě zadaných informací bylo vypočítáno, že by vztlak nosného balónku měl být 24.5 g, má být naplněný 0.0545 m<sup>3</sup> helia a ustálit by se měl ve výšce kolem 8 km. Výška, ve které se PicoBalloon zastaví, je závislá na objemu samotného balónu a je možné ji zvýšit například použitím většího balónku či použitím více menších balónků. Při tomto testu byl k dispozici již zmíněný nosný balón, a proto byl tento test proveden s tímto nastavením. Výsledná výška 8 km, ve které se PicoBalloon zastaví, menší než bylo původně plánováno, ale pro provedení tohoto testu a ověření výsledné funkčnosti PicoBaloonu, je dostatečná.

Výsledky tohoto vypuštění byly menší než očekávané, a to z důvodu, že PicoBalloon vydržel ve vzduchu jen 3 h. Tento krátký čas fungování PicoBaloonu byl způsoben prasknutím balónu hodinu poté, co zařízení dosáhlo očekávané výšky letu. Toto selhání balónu bylo nejspíše způsobeno výrobní vadou. I přes tento krátký let bylo možné ověřit, že PicoBaloony funguje dle očekávání. Trasa zaznamenaná z tohoto vypuštění je zobrazena na obrázku 14.11. Při tomto letu PicoBalloon urazil přibližně 220 km a správně zaznamenával všechny hodnoty. Nejnižší teplota, kterou PicoBalloon při tomto vypuštění zaznamenal, byla - 6 °C. Nebylo tedy možné ověřit fungování při extrémně nízkých teplotách, jako je - 50 °C, ale nižší teplota byla ověřena.



Obrázek 14.11: Mapa trasy PicoBaloontu při finálním vypuštění.

Dále při tomto vypuštění byly znovu prověřeny maximální vzdálenosti komunikace technologie LoRa. Při tomto vypuštění nejdelší zaznamenaná vzdálenost komunikace byla přibližně 330 km (Odry - Kecskemét), což je velice dobrý výsledek. Všechna data zaznamenaná z tohoto vypuštění budou určitou dobu po zveřejnění této práce dostupná na webové adrese <https://picoballoonmap.duckdns.org/>, na které běží vytvořená webová aplikace. Pokud již webová stránka není dostupná, je možné si webovou aplikaci spustit lokálně ze souborů uložených na datovém médiu této práce A.

Závěrem testování lze tedy říci, že se podařilo vytvořit PicoBaloont, který funguje dle vytvořené specifikace, a je možné ho použít pro získání několika meteorologických veličin z atmosféry. V budoucnu by bylo vhodné provést více testovacích vypuštění, při kterých vydrží PicoBaloont ve vzduchu delší dobu. Další doplňující informace o vypouštění PicoBaloontů lze nalézt na odkazech <https://www.instructables.com/How-to-Make-a-Picoballoon/> a <https://www.klofas.com/papers/Picoballoons-Pacificon-2021.pdf>.

## 14.5 Vylepšení PicoBaloonu a zobrazovací aplikace

Firmware pro verzi PicoBaloonu s TTN komunikačním modulem v aktuální verzi dokáže používat jen evropský frekvenční plán a pro globální použití je nutné upravit používanou LoRaWAN knihovnu a otestovat, zda zařízení v ostatních regionech funguje. Při této úpravě by bylo nutné přizpůsobit i aplikaci, která získává data ze sítě TTN. V současnosti komunikuje pouze s evropským TTN serverem, a proto by bylo potřeba přidat připojení k dalším regionům (Amerika a Asie). Pokud by někdy byla sestavena verze PicoBaloonu s Argos sítí, tak i pro ni je nutné rozšířit aplikaci ukládající data do databáze, protože nemá implementovanou komunikaci s Argos servery.

Dále by bylo zajímavé například vytvořit dynamický interval odesílání naměřených hodnot, který by mohl záviset na aktuálním napětí baterie. Například by bylo možné odesílat 2 zprávy za hodinu při plném nabití superkondenzátoru. Dále pak jednu zprávu za hodinu při napětí 2.4 - 2 V a nakonec jednu zprávu za dvě hodiny při napětí nižším než 2 V. Nastavení frekvence odesílání zpráv je vždy primárně závislé na konkrétní aplikaci.

V aktuální podobě dokáže vytvořený systém PicoBaloonu zaznamenat základní veličiny a pak je zobrazit ve webové aplikaci. Do budoucna by mohlo být zajímavé přidat další senzory na desku zařízení PicoBaloonu, například akcelerometr a gyroskop, které by poskytly informace o tom, jak se zařízení během letu hýbe. Zde je nutné vzít v potaz, že delší odesílané zprávy znamenají delší vysílací čas i více spotřebované energie. Při delší době vysílání je větší šance, že bude zpráva poškozena jiným vysláním. Také je nutné brát ohled na maximální vysílací čas pro použitou komunikační síť, aby tato hodnota nebyla překročena.

Do zobrazovací aplikace by bylo možné přidat složitější grafy, které by zobrazovaly statistická zhodnocení odeslaných hodnot. Konkrétně by bylo možné vyhodnotit průměrné hodnoty, rozptyly, odlehle hodnoty a tak dále. Existují i další možná vylepšení, která jsou limitována fantazií konkrétního uživatele.

# Kapitola 15

## Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit PicoBalloon, malou atmosférickou sondu s hmotností maximálně 20 g na vlastní desce plošných spojů. Tato sonda periodicky odesílá naměřené hodnoty, které se zobrazují v aplikaci, jež byla vytvořena pro toto zařízení. Tento cíl se podařilo splnit a celý vytvořený systém byl úspěšně otestován vypuštěním jednoho zařízení.

Práce na tomto projektu započala studiem technologií, které lze použít při vývoji tohoto systému. Po prostudování relevantních technologií bylo analyzováno, co přesně je PicoBalloon. Na základě těchto informací byla následně vytvořena specifikace navrhovaného systému. Následně byl vytvořen podrobný návrh systému, ve kterém bylo rozhodnuto, že budou navrženy dvě verze PicoBalloonu, jedna s pozemní komunikační sítí TTN a druhá s družicovou komunikační sítí Argos. Tato zařízení zaznamenávají data jako je teplota, absolutní atmosférický tlak, relativní vlhkost, napětí na superkondenzátoru a poloha. Napájení je řešeno solárním panelem a generovaná energie je ukládána do superkondenzátoru, který umožňuje provoz zařízení i bez slunečního svitu. Pro zobrazení dat z těchto zařízení byla vytvořena webová aplikace, která zobrazuje trasu PicoBalloonu na mapě a poskytne přehledné zobrazení naměřených dat v grafech. Po provedení návrhu systému byly vybrány potřebné komponenty pro zařízení PicoBalloonu, navrženy desky plošných spojů a implementován software pro PicoBalloon i zobrazovací webová aplikace. Software pro PicoBalloon byl vytvořen ve vývojovém prostředí MCUXpresso, které slouží pro programování mikrokontrolérů od společnosti NXP, která poskytla podporu při realizaci tohoto projektu. Zobrazovací webová aplikace byla vytvořena pomocí frameworku Flask pro programovací jazyk Python. Poté, co byl systém implementován, byla otestována funkčnost zařízení PicoBalloonu i funkčnost zobrazovací webové aplikace. Testování zařízení PicoBalloonu započalo testováním, kdy bylo zařízení umístěno po dobu jednoho týdne venku, dále bylo zařízení vypuštěno na nosných balóncích, které byly ukotveny k zemi a nakonec bylo provedeno finální vypuštění do očekávané operační výšky.

Cena výsledných zařízení, která se podařilo navrhnout, je konkrétně 2 750 Kč bez DPH za zařízení s komunikačním modulem pro síť TTN a 7 223 Kč bez DPH za zařízení s komunikačním modulem pro síť Argos (tato verze nebyla z důvodu vysoké ceny komunikačního modulu sestavena a otestována). Závěrem této práce lze říci, že se podařilo vytvořit očekávaný systém pro PicoBalloon a lze ho do budoucna použít i přesto, že by bylo vhodné udělat další rozšiřující testy.

# Literatura

- [1] *Comparison of Vaisala Radiosondes RS41 and RS92* [online]. Vaisala Oyj, 2014 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/RS-Comparison-White-Paper-B211317EN.pdf>.
- [2] *Iridium NEXT: In Review* [online]. Iridium Satellite LLC, 2019 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.iridium.com/blog/iridium-next-review/>.
- [3] *Supercapacitors – A Viable Alternative to Lithium-Ion Battery Technology?* [online]. Cheers Interactive (India) Private Limited, 2020 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-mobility/supercapacitors-a-viable-alternative-to-lithium-ion-battery-technology/>.
- [4] *Using supercapacitors in energy harvesting* [online]. bitbanging, 2020 [cit. 2024-06-25]. Dostupné z: <https://www.bitbanging.space/posts/solar-charged-supercapacitos>.
- [5] *Network Architecture Overview* [online]. Swarm Technologies Inc., 2021 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://swarm.space/wp-content/uploads/2022/06/Swarm-Network-Architecture-Overview.pdf>.
- [6] *Soutěž picoBalloon Challenge 2022 startuje!* [online]. Hvězdárna a planetárium Brno, p. o., 2022 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.hvezdarna.cz/novinky/soutez-picoballoon-challenge-2022-startuje/>.
- [7] *How an IoT System Actually Works* [online]. Leverage LLC, 2023 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://www.leverage.com/iot-ebook/how-iot-systems-work>.
- [8] *About Argos* [online]. Argos System, 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.argos-system.org/about-argos/>.
- [9] *Get to know Sigfox* [online]. Sigfox, Inc., 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://build.sigfox.com/study>.
- [10] *Swarm - Low cost, global satellite connectivity for IoT* [online]. Swarm Technologies Inc., 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://swarm.space/>.
- [11] *The Things Network* [online]. The Things Industries, 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.thethingsindustries.com/docs/reference/ttn/>.
- [12] *What are LoRa® and LoRaWAN®?* [online]. Semtech Corporation, 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>.



- [13] ABDUL QAWY, A. S., PRAMOD, P. J., MAGESH, E. a SRINIVASULU, T. *The Internet of Things (IoT): An Overview* [online]. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 5, Issue 12, (Part - 2), India, 2015 [cit. 2024-01-08]. ISSN 2248-9622. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/323834996\\_The\\_Internet\\_of\\_Things\\_IoT\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/323834996_The_Internet_of_Things_IoT_An_Overview).
- [14] ADINA, P. V., PETRICA, P. P., BANZ, C. a LATANOVIC, T. *Research about harvesting energy devices and storage method* [online]. Carpathian Journal of Electrical Engineering, Romania, 2015 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/292154962\\_Research\\_about\\_harvesting\\_energy\\_devices\\_and\\_storage\\_method](https://www.researchgate.net/publication/292154962_Research_about_harvesting_energy_devices_and_storage_method).
- [15] ALSHOHOUMI, F., SARRAB, M., ALHAMADANI, A. a AL ABRI, D. *Systematic Review of Existing IoT Architectures Security and Privacy Issues and Concerns* [online]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 10, No. 7, Oman, 2019 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/334944162\\_Systematic\\_Review\\_of\\_Existing\\_IoT\\_Architectures\\_Security\\_and\\_Privacy\\_Issues\\_and\\_Concerns](https://www.researchgate.net/publication/334944162_Systematic_Review_of_Existing_IoT_Architectures_Security_and_Privacy_Issues_and_Concerns).
- [16] BOJJA, S., PAVANI, M. a RANDGANATHAN, R. *Artificial Intelligence and Technologies*. 1. vyd. Springer, India, 2021. 384-394 s. ISBN 978-981-16-6447-2.
- [17] BÎRLOG, I.-A., BORCAN, D.-M. a COVRIG, G.-M. *Internet of Things Hardware and Software* [online]. Informatica Economică vol. 24, Romania, 2020 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/342869071\\_Internet\\_of\\_Things\\_Hardware\\_and\\_Software](https://www.researchgate.net/publication/342869071_Internet_of_Things_Hardware_and_Software).
- [18] CHATTERJEE, S. *A Beginner's Guide to IoT Power Converters and Regulators* [online]. Medium, 2018 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://medium.com/iotforall/a-beginners-guide-to-iot-power-converters-and-regulators-b74d37f11f31>.
- [19] DARGIE, W. *Principles and Applications of Ubiquitous Sensing*. 1. vyd. JohnWiley and Sons, Ltd., Germany, 2017 [cit. 2024-04-26]. 253-277 s. ISBN 978-1119091349.
- [20] DRŤINA, M. *Sigfox v Česku končí, T-Mobile vypíná vysílače [AKTUALIZOVÁNO]* [online]. Internet Info, s.r.o., 2023 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/aktuality/sigfox-se-v-cesku-odmlcel-zda-je-to-konec-teto-site-internetu-veci-jeji-provozovatele-nekomentuji/>.
- [21] GERLÉE, K. *Top 4 IoT Enabling Technologies* [online]. Freeway, 2023 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://freeway.com/top-4-iot-enabling-technologies/>.
- [22] GONDI, V., WHITE, D. L., GEMMILL, J. a POST, C. W. *Security Vulnerabilities and Challenges in IoT End to End systems and Current Security Implementations* [online]. Clemson University, South Carolina USA, 2016 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/301200106\\_Security\\_Vulnerabilities\\_and\\_Challenges\\_in\\_IoT\\_End\\_to\\_End\\_Systems\\_and\\_Current\\_Security\\_Implementations](https://www.researchgate.net/publication/301200106_Security_Vulnerabilities_and_Challenges_in_IoT_End_to_End_Systems_and_Current_Security_Implementations).
- [23] KUMARAN, D. N. M. a SONYA, R. *Principles of Wireless Communications*. 1. vyd. Scholars-Press Publication, Mauritius, 2017. ISBN 978-620-2-30432-0.

- [24] LIKITHA9. *Introduction to Internet of Things (IoT) – Set 1* [online]. GeeksforGeeks, 2023 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-internet-of-things-iot-set-1/>.
- [25] MAINE, K., DEVIEUX, C. a SWAN, P. *Overview of IRIDIUM satellite network* [online]. IEEE Xplore, United States, 1995 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/3622510\\_Overview\\_of\\_IRIDIUM\\_satellite\\_network](https://www.researchgate.net/publication/3622510_Overview_of_IRIDIUM_satellite_network).
- [26] MARS, P. *Charging a supercapacitor from a solar cell with a bq25504 PPT energy harvesting IC* [online]. CAP - XX, 2012 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.cap-xx.com/wp-content/uploads/2015/04/1208-CAP-XX-Charging-a-Supercapacitor-from-a-Solar-Cell.pdf>.
- [27] MARS, P. *Using supercapacitors in energy harvesting* [online]. Power Systems Design, 2017 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.powersystemsdesign.com/using-supercapacitors-in-energy-harvesting/31>.
- [28] MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F. a MEYER, F. *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment* [online]. ICT Express, France, 2017 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/322018958\\_A\\_comparative\\_study\\_of\\_LPWAN\\_technologies\\_for\\_large-scale\\_IoT\\_deployment](https://www.researchgate.net/publication/322018958_A_comparative_study_of_LPWAN_technologies_for_large-scale_IoT_deployment).
- [29] NEUMANN, D. *Nebe nad Českem brázdí meteorologické balóny se sondami* [online]. InMeteo, s.r.o, 2020 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/meteorologicke-balony-sondy-4.2.2020/>.
- [30] OK1HZZ, H. *Výsledky picoBalloon Challenge 2020* [online]. Radioklub OK1RAJ, 2020 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://ok1raj.cz/?p=1095>.
- [31] PAUL, B. *An Overview of LoRaWAN* [online]. WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS, Bangladesh, 2020 [cit. 2024-04-26]. ISSN 2224-2864. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/348464014\\_An\\_Overview\\_of\\_LoRaWAN](https://www.researchgate.net/publication/348464014_An_Overview_of_LoRaWAN).
- [32] PAULZC. *ARGOS (ARTIC R2) Satellite Communication Guide* [online]. SparkFun Electronics, 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: [https://learn.sparkfun.com/tutorials/argos-artic-r2-satellite-communication-guide?\\_ga=2.208333979.862165647.1714131593-566272601.1707215879](https://learn.sparkfun.com/tutorials/argos-artic-r2-satellite-communication-guide?_ga=2.208333979.862165647.1714131593-566272601.1707215879).
- [33] PETERSON, Z. *What is a PCB and Intro to PCB Design* [online]. Altium Limited, 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/what-is-a-pcb>.
- [34] QUENCY, T. *At what rate does temperature drop with altitude?* [online]. Quora, Inc., 2019 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.quora.com/At-what-rate-does-temperature-drop-with-altitude>.
- [35] RAMSON, S. J., VISHNU, S. a SHANMUGAMI, M. *Applications of Internet of Things (IoT) - An Overview* [online]. 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems, India, 2020 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/340893282\\_Applications\\_of\\_Internet\\_of\\_Things\\_IoT\\_-\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/340893282_Applications_of_Internet_of_Things_IoT_-_An_Overview).

- [36] SINHA, S. *State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16% to 16.7 billion globally* [online]. IoT Analytics GmbH, 2023 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.
- [37] SKØIEN, K. R. *Wireless IoT Architecture* [online]. Nordic Semiconductor, 2020 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/iot-wireless-architecture>.
- [38] TERRA, J. *Real-World IoT Applications in 2024* [online]. Simplilearn Solutions, 2023 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://www.simplilearn.com/iot-applications-article>.
- [39] WASEEM, U. *SMT VS SMD (VS THT): A Comprehensive Guide to Electronics Assembly Techniques* [online]. Wevolver, 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/smt-vs-smd-vs-tht-a-comprehensive-guide-to-electronics-assembly-techniques>.
- [40] ZLATANOV, N. *PCB Design Process and Fabrication Challenges* [online]. PCB West, United States, 2012 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/299406927\\_PCB\\_Design\\_Process\\_and\\_Fabrication\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/299406927_PCB_Design_Process_and_Fabrication_Challenges).
- [41] ŠEBESTA, J. *Globální navigační systémy*. Czech Republic, 2012. [cit. 2024-04-26]. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/ostatni-studijni-material/globalni-navigacni-systemy>.

## Příloha A

# Obsah příloženého paměťového média

Tato příloha obsahuje popis souborů, které jsou uloženy na datovém médiu této práce.

- `TTN_board/` - Složka obsahuje soubory pro desku plošných spojů s komunikačním modulem pro síť TTN vytvořené v programu KiCad.
- `ARGOS_board/` - Složka obsahuje soubory pro desku plošných spojů s komunikačním modulem pro síť ARGOS vytvořené v programu KiCad.
- `TTN_code/` - Složka obsahuje projekt vývojového prostředí MCUXpresso, který obsahuje kód pro zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť TTN.
- `ARGOS_code/` - Složka obsahuje projekt vývojového prostředí MCUXpresso, který obsahuje kód pro zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť TTN.
- `web_code/` - Složka obsahuje soubory potřebné pro zprovoznění webové aplikace, která zobrazuje data z PicoBaloonů.
- `text_src/` - Složka obsahuje zdrojové soubory textu práce psané v LaTeXu.
- `launch_pictures/` - Složka obsahuje obrázky z testovacích vypuštění PicoBaloonu.
- `TTN_board/README.md` - Soubor obsahuje návod jak vytvořit desku plošných spojů zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť TTN.
- `ARGOS_board/README.md` - Soubor obsahuje návod jak vytvořit desku plošných spojů zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť ARGOS.
- `TTN_code/README.md` - Soubor obsahuje návod jak zprovoznit firmware zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť TTN.
- `ARGOS_code//README.md` - Soubor obsahuje návod jak zprovoznit firmware zařízení PicoBaloonu s modulem pro síť ARGOS.
- `web_code/README.md` - Soubor obsahuje návod jak zprovoznit webovou aplikaci, která zobrazuje data odeslaná PicoBaloony.

## Příloha B

# Komponenty potřebné k sestavení zařízení PicoBaloonu

Tato příloha obsahuje dvě tabulky obsahující všechny komponenty, které je potřeba k sestavení obou verzí PicoBaloonu. Tabulka obsahuje i jména obchodu, kde je možné součástku koupit.



	Cena v Kč bez DPH	Prodejce
Deska plošných spojů	407	PCBWay
12x Kondenzátor C0805Y104J3RACTU (0.1uF)	34	Mouser Electronics
6x Kondenzátor C1206C106K3PACTU (10uF)	46	Mouser Electronics
4x Kondenzátor C0805C475J3RACAUTO (4.7uF)	63	Mouser Electronics
4x Kondenzátor C0805C105J3RACTU (1uF)	86	Mouser Electronics
2x Kondenzátor CBR06C101J5GACAUTO (100pF)	32	Mouser Electronics
2x Kondenzátor C0603X103F3GACTU (0.01uF)	84	Mouser Electronics
13x Odpor CRCW060310K0FKEA (10Kohm)	5	Mouser Electronics
4x Odpor RCA06030000ZSTA (0ohm)	17	Mouser Electronics
2x Odpor CRCW06031M00FKED (1Mohm)	5	Mouser Electronics
2x Odpor CRCW0603100RDHEAP (100ohm)	10	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603680KFKTA (680Kohm)	4	Mouser Electronics
Odpor CRCW06031M50FKEA (1.5Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603220KFKEA (220Kohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW060310M0DHEAP (10Mohm)	6	Mouser Electronics
Odpor CRCW06037M15FKEA (7.5Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW06039M53FKEA (9.53Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW06032M87FKEA (2.87Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603470KFKEA (470Kohm)	2	Mouser Electronics
Odpor RC0603JR-0716ML (16Mohm)	4	Mouser Electronics
Odpor CRCW06034M02FKEA (4.02Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603180KFKEA (180Kohm)	2	Mouser Electronics
Odpor RCA12180000Z0EKLS (0ohm)	15	Mouser Electronics
Cívka LPS3314-222MRC (2.2uH)	33	Mouser Electronics
Cívka 744025220 (22uH)	37	Mouser Electronics
Schottkyho dioda BAT54WS-E3-08	7	Mouser Electronics
Schottkyho dioda SL03-M-08	10	Mouser Electronics
Komparátor TLV3011AIDBVT	62	Mouser Electronics
6x Tranzistor DMP1045UQ-7	66	Mouser Electronics
Tranzistor DMG2302UK-7	6	Mouser Electronics
2x U.FL konektor U.FL-R-SMT(01)	59	Mouser Electronics
Dupont kolíková lišta 40Pin 2,54mm	3	LaskaKit
Solární panel SM111K04L	109	Digi-Key
Nabíječka BQ25504RGTR	91	Mouser Electronics
Superkondenzátor MAL222551013E3	82	Mouser Electronics
Měnič napětí TPS61200DRCT	62	Mouser Electronics
Mikrokontrolér K32L2B31VFT0A	143	Mouser Electronics
GNSS modul MAX-M10S-00B	469	Mouser Electronics
Anténa GNSS modulu	68	Mouser Electronics
Senzor SHT40-AD1B-R2	57	Mouser Electronics
Senzor MPL3115A2ST1	168	Mouser Electronics
TTN modul LoRa1276-868	329	LaskaKit
Anténa TTN modulu	84	Mouser Electronics

Tabulka B.1: Cena všech komponent PicoBaloonu pro verzi se sítí TTN. Ceny platné k 2.5.2024

	Cena v Kč bez DPH	Prodejce
Deska plošných spojů	407	PCBWay
11x Kondenzátor C0805Y104J3RACTU (0.1uF)	30	Mouser Electronics
5x Kondenzátor C1206C106K3PACTU (10uF)	38	Mouser Electronics
4x Kondenzátor C0805C475J3RACAUTO (4.7uF)	63	Mouser Electronics
4x Kondenzátor C0805C105J3RACTU (1uF)	86	Mouser Electronics
2x Kondenzátor CBR06C101J5GACAUTO (100pF)	32	Mouser Electronics
2x Kondenzátor C0603X103F3GACTU (0.01uF)	84	Mouser Electronics
11x Odpor CRCW060310K0FKEA (10Kohm)	4	Mouser Electronics
4x Odpor RCA06030000ZSTA (0ohm)	17	Mouser Electronics
2x Odpor CRCW06031M00FKED (1Mohm)	5	Mouser Electronics
2x Odpor CRCW0603100RDHEAP (100ohm)	10	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603680KFKTA (680Kohm)	4	Mouser Electronics
Odpor CRCW06031M50FKEA (1.5Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603220KFKTA (220Kohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW060310M0DHEAP (10Mohm)	6	Mouser Electronics
Odpor CRCW06037M15FKEA (7.5Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW06039M53FKEA (9.53Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW06032M87FKEA (2.87Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603470KFKTA (470Kohm)	2	Mouser Electronics
Odpor RC0603JR-0716ML (16Mohm)	4	Mouser Electronics
Odpor CRCW06034M02FKEA (4.02Mohm)	2	Mouser Electronics
Odpor CRCW0603180KFKTA (180Kohm)	2	Mouser Electronics
Odpor RCA12180000Z0EKLS (0ohm)	15	Mouser Electronics
Cívka LPS3314-222MRC (2.2uH)	33	Mouser Electronics
Cívka 744025220 (22uH)	37	Mouser Electronics
Schottkyho dioda BAT54WS-E3-08	7	Mouser Electronics
Schottkyho dioda SL03-M-08	10	Mouser Electronics
Komparátor TLV3011AIDBVT	62	Mouser Electronics
5x Tranzistor DMP1045UQ-7	55	Mouser Electronics
Tranzistor DMG2302UK-7	6	Mouser Electronics
U.FL konektor U.FL-R-SMT(01)	22	Mouser Electronics
Dupont kolíková lišta 40Pin 2,54mm	3	LaskaKit
Solární panel SM111K04L	109	Digi-Key
Nabíječka BQ25504RGTR	91	Mouser Electronics
Superkondenzátor MAL222551013E3	82	Mouser Electronics
Měnič napětí TPS61200DRCT	62	Mouser Electronics
Mikrokontrolér K32L2B31VFT0A	143	Mouser Electronics
GNSS modul MAX-M10S-00B	469	Mouser Electronics
Anténa GNSS modulu	68	Mouser Electronics
Senzor SHT40-AD1B-R2	57	Mouser Electronics
Senzor MPL3115A2ST1	168	Mouser Electronics
ARGOS modul SparkFun IOTA	4707	SparkFun Electronics
Anténa ARGOS modulu	234	SparkFun Electronics

Tabulka B.2: Cena všech komponent PicoBaloonu pro verzi se sítí ARGOS. Ceny platné k 2.5.2024