



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# HW PLATFORMA PRO DOHLED NAD POHYBEM NÁMOŘNÍCH KONTEJNERŮ

HW PLATFORM FOR SURVEILLANCE OVER MARITIME CONTAINER TRANSPORT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Tomáš Roško**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. et Ing. Petr Musil**

**BRNO 2022**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Tomáš Roško

**ID:** 186804

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## HW platforma pro dohled nad pohybem námořních kontejnerů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem této diplomové práce je komplexní návrh sledovacího zařízení pro kontrolu nad pohybem přepravních kontejnerů využitím kombinace satelitních a mobilních sítí. Teoretická část práce bude zaměřena na rozbor dostupných satelitních a mobilních komunikačních technologií a na výběr vhodných čipů pro oba uvedené způsoby komunikace. Bude také proveden rozbor možných způsobů měření požadovaných veličin a stavů v rámci vnitřního prostředí kontejneru. Důležitým aspektem návrhu je i možnost přesného určení polohy kontejneru. V praktické části bude proveden výběr vhodných součástek, návrh desek plošných spojů, sestavení, oživení a otestování zařízení. Testy budou zaměřeny i na měření a přenášení naměřených hodnot a stavů ze sestavené jednotky až na vzdálený server. V návrhu zařízení musí být zohledněna potřeba vysoké dostupnosti připojení za současně nízké spotřeby energie (napájení akumulátory). Výstupem diplomové práce bude technický popis řešení, návrh a výroba desek plošných spojů, sestavení celého zařízení a otestování požadovaných funkcí s ohledem na charakter komunikačních a provozních omezení, které jsou typické pro tento typ přepravy.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FOSSA, Carl E. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSONAFB OH SCHOOL OF ENGINEERING. A Performance Analysis of the IRIDIUM Low Earth Orbit Satellite System. 1998. Dostupné také z: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA348174>

[2] MONK, Simon. Make your own PCBs with EAGLE: from schematic designs to finished boards. New York: McGraw-Hill Education, [2014]. ISBN 9780071819251.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 24.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. et Ing. Petr Musil

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

S rostoucí komplexitou mezinárodní dopravy vzrůstají také požadavky na sledování polohy kontejnerů a měření jejich vnitřního stavu. Navzdory těmto požadavkům však lodní doprava čelí specifickým technickým problémům, například nutnosti odesílat data přesně, často a s nízkou spotřebou energie. Tato práce se zabývá návrhem sledovacího zařízení, které vyhovuje současným požadavkům. Zařízení využívá kombinaci satelitních a mobilních sítí, pro kontrolu nad pohybem přepravních kontejnerů, přičemž sledovací zařízení splňuje specifické požadavky související s lodní dopravou, jako je přesné určení polohy kontejneru či potřeba dostupnosti připojení za nízké spotřeby energie. Teoretická část se zabývá výběrem jednotlivých komponent a zdůvodněním jejich volby vzhledem k dostupným možnostem na trhu. V praktické části je pak navrženo schéma zapojení jednotlivých modulů a senzorů. Dále je popsán návrh i výroba desky plošných spojů a také krabičky zhotovené na míru pomocí 3D tisku. V softwarové části se práce zabývá datovým protokolem a popisem běhu programu, přičemž není vynechána ani testovací fáze zaměřená především na měření a přenášení hodnot na server.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Internet věcí, ESP32, WROOM-32, Iridium, 9602, Short Burst Data, SBD, satelitní síť, NB-IoT, Quectel, BG77, mobilní síť, GPS, sledování majetku, lodní kontejner, BME280

## **ABSTRACT**

The complexity of international transportation is increasing, and with that, the logistics requirements also increase: such as the need to monitor containers' location or measure inside conditions. Despite these demands, marine transportation faces specific technical problems, such as the need for sending data precisely, often, and with low energy consumption. This paper aims to create a monitoring device that meets the demands of marine transportation. The device combines satellite and mobile networks to control the container location and, at the same time, allows for precise pinpointing of place and availability of access while having low battery consumption. The theoretical part of the paper explains the process of selecting components and justification of the process with regard to market options. The practical part contains a diagram of the connection of the modules and sensors. Next, the design and manufacture of the printed circuit board and custom 3D printed box are discussed. The software part deals with data protocol and the description of the application, which is then tested with a particular focus on measuring and transmitting the values onto the server.

## **KEYWORDS**

Internet of Things, ESP32, WROOM-32, Iridium, 9602, Short Burst Data, SBD, satellite network, NB-IoT, Quectel, BG77, mobile network, GPS, asset tracking, shipping container, BME280

ROŠKO, Tomáš. *HW platforma pro dohled nad pohybem námořních kontejnerů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. et. Ing. Petr Musil

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Bc. Tomáš Roško  
**VUT ID autora:** 186804  
**Typ práce:** Diplomová práce  
**Akademický rok:** 2021/2022  
**Téma závěrečné práce:** HW platforma pro dohled nad pohybem námořních kontejnerů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. et Ing. Petru Musilovi za odborné rady, připomínky a trpělivost, kterou mi věnoval při jejím vytváření. Dále bych rád poděkoval také své rodině a všem přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili a motivovali.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Popis systému a definice požadavků</b>	<b>12</b>
<b>2 Výběr jednotlivých komponent</b>	<b>14</b>
2.1 Řídící jednotka ESP32	14
2.1.1 ESP32-WROOM-32	14
2.1.2 Regulátor napětí	15
2.2 Napájení zařízení	15
2.2.1 Baterie	15
2.2.2 Nabíjecí obvod	16
2.2.3 Solární panel	17
2.3 Senzory	18
2.3.1 Senzor teploty, vlhkosti a tlaku	18
2.3.2 Detektor vody	19
2.3.3 Magnetický kontakt	20
2.3.4 Otřesový senzor	20
2.3.5 Měření stavu baterie	21
2.4 Satelitní jednotka Iridium 9602	22
2.4.1 DC/DC měnič	23
2.4.2 Iridium anténa	23
2.5 Mobilní komunikátor a lokalizátor Quectel BG77	23
2.5.1 Měnič logických úrovní	25
2.5.2 Regulátor napětí	25
2.5.3 Držák SIM karty	25
2.5.4 Anténa pro NB-IoT sítě	25
2.5.5 GPS anténa	26
<b>3 Návrh schématu zapojení</b>	<b>27</b>
3.1 Editor Eagle	27
3.2 Blokové schéma zapojení	27
3.3 Zapojení nabíjecího modulu	28
3.4 Zapojení modulu ESP32	28
3.4.1 Komunikace s ESP32	29
3.4.2 Zapojení tlačítek	30
3.4.3 Zapojení spínacích obvodů	31
3.5 Zapojení modulu Iridium 9602	32

3.5.1	Zapojení DC/DC měniče . . . . .	33
3.6	Zapojení modulu Quectel BG77 . . . . .	34
3.6.1	Zapojení microSIM . . . . .	34
3.6.2	Zapojení měniče logických úrovní . . . . .	34
3.7	Zapojení senzorů . . . . .	35
3.7.1	Zapojení senzoru BME280 . . . . .	35
3.7.2	Zapojení detekčních senzorů . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Návrh a výroba DPS</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Návrh a výroba 3D krabičky</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>Softwarová část</b>	<b>41</b>
6.1	Datový protokol . . . . .	41
6.1.1	Binární protokol . . . . .	41
6.1.2	Šifrování dat . . . . .	43
6.1.3	Definice struktury zprávy v jazyce C++ . . . . .	43
6.2	Popis běhu programu . . . . .	43
6.2.1	Inicializační fáze . . . . .	44
6.2.2	Měření dat ze senzorů, získání GPS údajů . . . . .	46
6.2.3	Odesílání dat . . . . .	47
6.2.4	Režim spánku . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Testování funkčnosti</b>	<b>49</b>
	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>58</b>
<b>A</b>	<b>Schémata zapojení</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Obsah elektronické přílohy</b>	<b>63</b>

# Seznam obrázků

1.1	Blokový diagram funkčnosti systému. . . . .	12
2.1	ESP32-WROOM-32E (převzato z [5]). . . . .	15
2.2	Baterie Samsung ICR18650-26F. . . . .	16
2.3	Vybíjecí charakteristika baterie (převzato z [8]). . . . .	17
2.4	Solární panel Voltaic P124. . . . .	18
2.5	Senzor teploty, vlhkosti a tlaku BME280 (převzato z [10]). . . . .	19
2.6	Magnetický jazýčkový kontakt (NO/NC). . . . .	20
2.7	Senzor vibrací SW-18010P. . . . .	21
2.8	Satelitní modul Iridium 9602 (převzato z [11]). . . . .	22
2.9	Patch anténa pro komunikaci se sítí Iridium. . . . .	24
2.10	Mobilní komunikátor a lokalizátor Quectel BG77 (převzato z [15]). . . . .	24
2.11	Anténa pro komunikaci se sítěmi NB-IoT. . . . .	26
2.12	Patch anténa pro komunikaci s navigačním systémem GPS. . . . .	26
3.1	Zjednodušený blokový diagram zapojení. . . . .	27
3.2	Zapojení nabíjecího modulu. . . . .	28
3.3	Zapojení stabilizátoru 3,3 V. . . . .	29
3.4	Převodník WaveShare s IC CP2102. . . . .	29
3.5	Zapojení UART. . . . .	30
3.6	Zapojení tlačítek ENABLE a BOOT. . . . .	30
3.7	Zapojení spínacího obvodu pro měření stavu baterie. . . . .	31
3.8	Zapojení spínacího obvodu pro ovládání DC/DC měniče. . . . .	32
3.9	Zapojení modulu Iridium 9602. . . . .	33
3.10	Zapojení DC/DC měniče. . . . .	34
3.11	Zapojení držáku SIM karty. . . . .	35
3.12	Zapojení senzoru BME280. . . . .	36
4.1	Výsledná podoba osazených DPS. . . . .	38
5.1	Vizualizace modelu krabičky a víka. . . . .	39
6.1	Zjednodušený diagram běhu programu. . . . .	44
7.1	Testování zařízení. . . . .	49
7.2	Detail zařízení v aplikaci GINA Central. . . . .	50
7.3	Odeslání dat pomocí modulu Iridium 9602. . . . .	51
A.1	Celkové schéma zapojení – hlavní deska. . . . .	60
A.2	Celkové schéma zapojení – Quectel BG77. . . . .	61
A.3	Celkové schéma zapojení – BME280. . . . .	62

## Seznam výpisů

6.1	Definice struktury zprávy jazyce C++ . . . . .	43
6.2	Funkce pro zpracování AT příkazu. . . . .	45
6.3	NMEA RMC věta. . . . .	47

# Úvod

Více než devadesát procent celosvětového obchodu se odehrává pomocí přepravních kontejnerů [1]. Jejich počet dávno přesahuje stovky milionů po celém světě, což se rovná mnohamiliardovému byznysu [1]. Velká část mezinárodního obchodu je odkázána zejména na lodní dopravu, která v současném systému logistiky nabývá na stále větší důležitosti [2]. S narůstající komplexitou mezinárodního obchodu vzrůstají také požadavky na kvalitu a monitoring transportu jednotlivých objektů po světě. A rostou také nároky na zachování specifických podmínek, které zajistí, že zboží dorazí v nejlepší možné kvalitě a neporušeno, což platí především v oblasti potravinářství a medicíny.

Jedním ze způsobů řešení této situace je monitoring kvality, a to pomocí zařízení Internetu věcí [2] umístěných v přepravních kontejnerech, které umožňují monitorovat specifické podmínky přispívající ke změně kvality zboží, jako je například vlhkost či změny teplot. Tato chytrá zařízení dokáží sledovat podmínky a aktivně varovat přepravce o klesající kvalitě zboží, čímž může velmi rychle dojít k nápravě podmínek a předcházení plýtvání, což snižuje náklady na vrácení, likvidaci znehodnocených materiálů a také na přepravu [3].

Problémem, se kterým se však současná lodní doprava potýká, je nutnost co nejdetailnějšího monitoringu, který se musí spoléhat na kombinaci satelitní i mobilní komunikace z důvodu nedostupnosti mobilních sítí na některých místech. To vše je nutné za co nejjednoduššího a energeticky málo náročného provozu, neboť cesty, včetně uskladnění v transportních depech, trvají v řádu týdnů až měsíců.

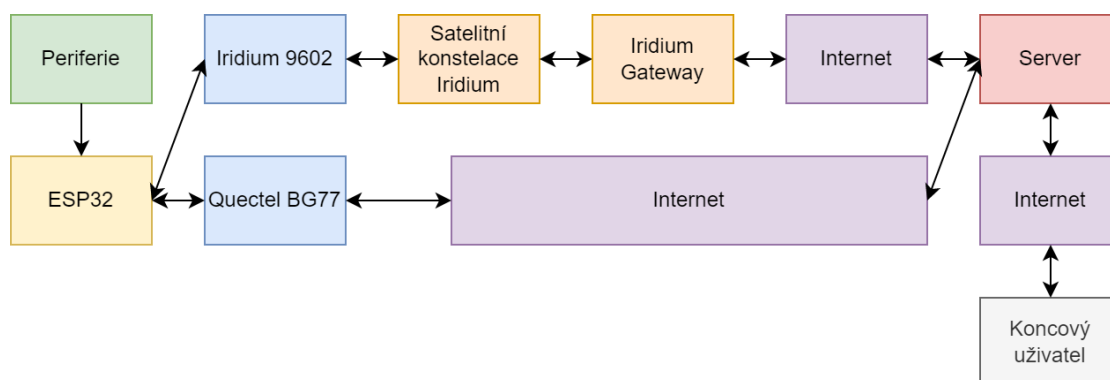
Cílem této práce je vytvořit a zrealizovat sledovací zařízení pro kontrolu nad pohybem přepravních kontejnerů a monitoringem podmínek uvnitř kontejnerů, které kombinuje satelitní a mobilní připojení. Současně zařízení plní několik specifických požadavků, jako je potřeba dostupnosti připojení za co nejnižší spotřeby energie, přesné určování polohy a také měření vybraných hodnot pomocí senzorů a jejich přenos na vzdálený server. Zařízení, které je navrženo v této práci, určuje polohu kontejneru, monitoruje teplotu, vlhkost a tlak, detekuje přítomnost vody, magnetický kontakt (ve smyslu zavření a otevření dveří kontejneru) a také otřesy kontejneru.

Teoretická část práce se zabývá popisem jednotlivých komponent a zdůvodněním jejich volby s přihlédnutím k požadavkům na monitorovací zařízení a současné nabídce na trhu. V praktické části je pak popis návrhu schématu zapojení jednotlivých modulů a senzorů. Dále je popsán návrh i zhotovení desky plošných spojů a také na míru 3D vytištěná krabice. V softwarové části práce je popsán datový protokol a popis běhu programu, přičemž není vynechána ani testovací fáze, která se zabývá především měřením hodnot a jejich přenosem na vzdálený server.

# 1 Popis systému a definice požadavků

Jak již bylo řečeno v úvodu, cílem této práce je navrhnout zařízení pro dohled a monitoring lodních kontejnerů, které bude schopno měřit určitá data, zpracovat je a odeslat přes mobilní nebo satelitní síť na server, kde budou dále zpracována a zobrazena koncovému uživateli. Finální zařízení by mělo být napájeno bateriově a mělo by být energeticky co nejméně náročné, aby byla zaručena jeho bezúdržbovost. Součástí zařízení má být nabíjecí obvod, kterému bude dodávána energie pomocí solárního panelu. Na obrázku 1.1 lze vidět blokový diagram toho, jak by měl celý systém fungovat.

Zařízení je vyvíjeno ve spolupráci s brněnskou firmou GINA Software [4], která se zabývá vývojem softwaru pro správu a dohled nad GSM a satelitními lokátory. GINA Software se v rámci této práce stará o integraci vyvíjeného zařízení do jejich systému. Odeslaná data touto jednotkou jsou na jejich straně přijata, zpracována, uložena a vhodným způsobem zobrazena pomocí jejich aplikace GINA Central.



Obr. 1.1: Blokový diagram funkčnosti systému.

Hlavním prvkem celého systému je modul ESP32. Tento modul je zodpovědný za sběr a zpracování dat ze všech připojených periférií, což zahrnuje senzor teploty, vlhkosti, detektor vody, detektor stavu otevření či zavření dveří, detektor otřesu, napětí baterie a také aktuální souřadnicovou pozici. Výběr a popis jednotlivých komponent je detailněji popsán v kapitole 2.

Modul bude vstupní data měřit v uživatelem stanovených intervalech, které si sám zvolí pomocí sériové linky při prvotní inicializaci celého zařízení. V čase, kdy zařízení data měřit nebude, bude celé zařízení v režimu spánku tak, aby nedocházelo ke zbytečné spotřebě energie. Kromě periodického měření zvolených veličin může být zařízení probráno i v situaci, kdy některý ze senzorů zaznamená neobvyklou aktivitu, například otřes.

Po naměření dat přichází na řadu jejich odeslání. K tomu je využito dvou možností. První z nich je odeslání dat přes mobilní síť pomocí modulu Quectel BG77. V případě, že komunikace z nějakého důvodu selže, bude jako záložní možnost použit satelitní modul Iridium 9602.

Pro zařízení byla navrhnutá a vyrobena deska tištěných spojů. Aby bylo zařízení chráněno před vnějšími vlivy, je v rámci práce navrhnutá a vytištěná vlastní 3D krabička.

## 2 Výběr jednotlivých komponent

V rámci této kapitoly jsou popsány jednotlivé komponenty, ze kterých se finální zařízení skládá.

### 2.1 Řídící jednotka ESP32

Řídící jednotka je centrální komponentou celého zařízení, neboť zpracovává naměřená data ze vstupních periferií a připravuje je k následnému odeslání. Mezi hlavní požadavky na tento modul patří především nízká energetická náročnost.

Tento požadavek splňuje právě modul ESP32 od čínské firmy Espressif Systems. Tato firma se zabývá produkcí nízkoenergetických, avšak výkonných Wi-Fi a Bluetooth mikrokontrolérů. Modul ESP32 je společně s jeho předchůdcem ESP8266 jedním z jejich nejznámějších produktů. Modul ESP32 je dostupný v celé řadě verzí, které se liší v mnoha aspektech a které jsou určeny pro různé druhy použití. V poslední době se do popředí dostávají také novější modely tohoto čipu, konkrétně verze ESP32-S2, S3 a ESP32-C.

Hlavním z důvodů, proč byl v rámci řešení této práce vybrán právě modul ESP32, je jeho režim hlubokého spánku, kdy spotřeba modulu klesá na řádově jednotky  $\mu\text{A}$  (což je v souladu s požadavky práce na minimalizaci spotřeby). Jedním z důvodů je i jeho nízká pořizovací cena a vysoká dostupnost.

#### 2.1.1 ESP32-WROOM-32

Jedná se o nejrozšířenější a nejznámější verzi ESP32, která byla na trh uvedena jako jedna z prvních verzí tohoto modulu. Poslední vydání této verze (ESP32-WROOM-32E [5], 4 MB flash) je využito v rámci řešení práce. Její klíčové parametry jsou:

- napájecí napětí: 3 až 3,6 V (typicky 3,3 V),
- napěťová logika: typicky 3,3 V,
- 240 MHz dvoujádrový mikrokontrolér Xtensa LX6,
- 448 KB ROM,
- 520 KB SRAM,
- 16 KB RTC,
- až 16 MB flash,
- Wi-Fi podporující standardy IEEE 802.11 b/g/n v pásmu 2,4 GHz,
- Bluetooth (Classic i Low Energy),
- 34 GPIO pinů (podporující rozhraní jako UART (3×), SPI, I<sup>2</sup>C, I<sup>2</sup>D; A/D a D/A převodníky, touch senzory).



Obr. 2.1: ESP32-WROOM-32E (převzato z [5]).

### 2.1.2 Regulátor napětí

Aby mohl být modul ESP32 napájen, je nutné, aby vstupní napětí bylo v rozmezí 3 až 3,6 V. Z tohoto důvodu je potřeba vstupní napětí stabilizovat na předem zvolenou úroveň.

K tomuto účelu byl zvolen regulátor napětí TLV75733PDBVR [6] od firmy Texas Instruments, který vstupní napětí stabilizuje na úroveň 3,3 V. Výstupní napětí z tohoto stabilizátoru je využito i jako vstupní napětí k desce s modulem Quectel BG77 a jako zdroj napětí pro připojené detektory. Klíčové vlastnosti:

- rozsah vstupního napětí: 1,45 až 5,5 V,
- výstupní napětí: 3,3 V,
- minimální rozdíl IN/OUT napětí: 100 mV (při proudovém odběru 300 mA),
- maximální výstupní proud: až 1 A.

## 2.2 Napájení zařízení

Vzhledem k povaze zařízení je nutné jej napájet bateriově. Samotná baterie by zařízení zvládla napájet po určitou dobu, avšak poté by se vybila a zařízení by muselo být manuálně nabito. Z tohoto důvodu je k baterii připojen nabíjecí obvod, pomocí kterého se bude nabíjet. Jako zdroj energie v tomto případě poslouží solární panel.

### 2.2.1 Baterie

Jako hlavní zdroj energie byla vybrána dobíjecí baterie typu Li-Ion. Konkrétně byla vybrána lehce dostupná baterie ICR18650-26F od výrobce Samsung. Její klíčové specifikace jsou:

- nominální kapacita: 2600 mAh,
- nominální napětí: 3,7 V (rozsah 2,75–4,2 V),
- počet nabíjecích cyklů: 350,

- maximální nabíjecí proud: 2,6 A,
- maximální vybíjecí proud: 5,2 A,
- teplotní rozsah: 0 až +45 °C (nabíjení), -20 až +60 °C (vybíjení),
- rozměry: 18×65 mm (š×h).

Vzhledem k tomu, že baterie v základní verzi neposkytuje žádnou ochranu proti přebíjení, podbíjení a zkratu, mohlo by být nebezpečné ji používat. Z tohoto důvodu byla zvolena verze s integrovaným ochranným obvodem, který výše zmíněné nedostatky odstraňuje. Velikost baterie je tak o pár milimetrů větší, proto je nutné dbát na výběr vhodného držáku.



Obr. 2.2: Baterie Samsung ICR18650-26F.

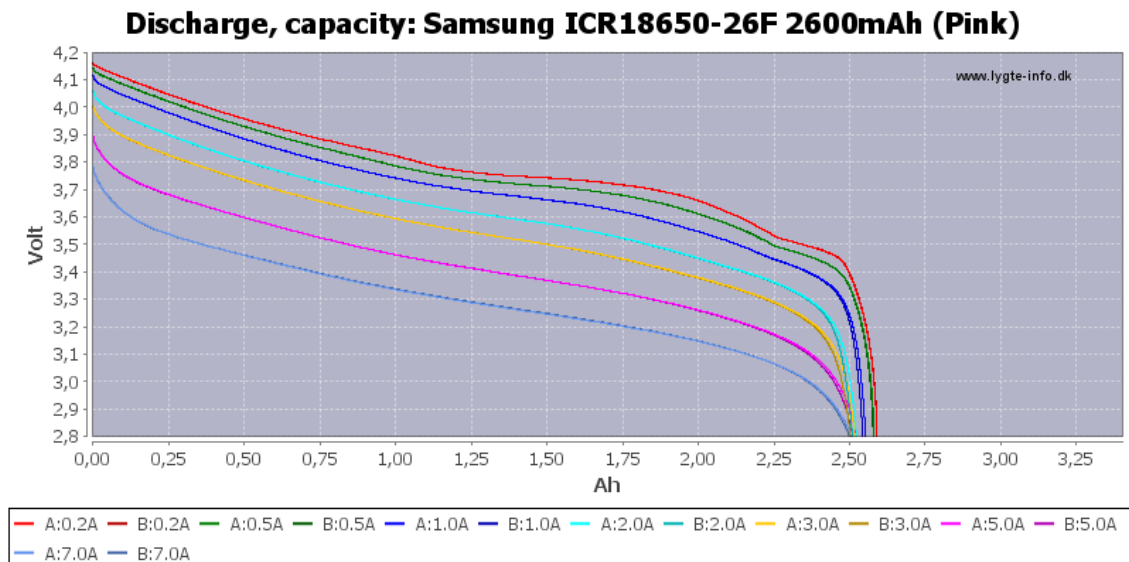
Na obrázku 2.3 lze vidět, že většina kapacity baterie je vyčerpána přibližně ve chvíli, kdy napětí baterie poklesne na úroveň 3,6 V. Toto napětí je v našem případě bráno jako limitní a baterie by se neměla pod tuto úroveň dlouhodobě vybíjet, v opačném případě by mohlo dojít k jejímu poškození. Tohoto je docíleno pomocí softwarové implementace, kdy při naměření napětí baterie pod 3,6 V je zařízení uspáno do doby, než bude baterie manuálně dobítá (viz sekce 6.2.2). Tomuto problému je však předcházeno použitím solárního dobíjení, neměl by proto nikdy nastat.

## 2.2.2 Nabíjecí obvod

Pro nabíjecí baterie byl zvolen čip BQ24074 [7] od firmy Texas Instruments. Čip funguje na principu odpojování a připojování baterie, což šetří její životnost.

Pokud je energie dodávaná zdrojem dostatečně velká na pokrytí spotřeby celého zařízení, baterie je odpojována a zařízení je napájeno pouze z externího zdroje (v našem případě solární panel).

Pokud je dodávaná energie větší než spotřeba zařízení, zbývající energie nabíjí baterii.



Obr. 2.3: Vybíjecí charakteristika baterie (převzato z [8]).

V případě, že spotřeba zařízení začne růst, čip sníží dobíjecí proud aby pokryl spotřebu zařízení. Pokrytí spotřeby zařízení je tedy prioritizováno nad nabíjením baterie.

V případě, že by dodávaná energie nebyla dostatečná nebo by nastal náhly růst spotřeby, obvod je ihned schopen připojit baterii, která bude zdroj suplovat. Klíčové parametry tohoto obvodu jsou:

- maximální vstupní napětí: 10,2 V,
- výstupní napětí: 4,4 V nebo napětí baterie,
- maximální vstupní proud: 1,6 A,
- maximální nabíjecí proud: 1,5 A,
- maximální výstupní proud: 5 A (zahrnuje baterii).

### 2.2.3 Solární panel

Jako vhodný solární panel, který vydrží venkovní podmínky, a který je schopen dodat dostatečné množství elektrické energie při zachování rozumné velikosti, se ukázal být panel of firmy Voltaic s výrobním číslem P124 [9].

Jedná se o monokrystalický solární panel s ETFE povrchovou úpravou, díky níž je solární panel velice odolný a vydrží i nepříznivé venkovní podmínky. Jeho klíčové specifikace jsou:

- stupeň krytí IP67,
- odolnost vůči UV záření (5-7 let),
- účinnost: 22+ %,

- maximální napětí: 6,07 V,
- maximální proud: 0,2 A,
- maximální výkon: 1,22 W,
- rozměry: 66×113×2,6 mm (š×v×h).

Při deklarovaných faktorech účinnosti a maximálního výkonu by měl být panel schopen dodat přibližně 260 mA. Tato hodnota je však závislá na mnoha faktorech, ať již natočení panelu vůči slunci, síle slunečního svitu či v neposlední řadě také čistotě samotného panelu.

V rámci této práce se počítá s tím, že zařízení bude zapnuté jen v řádu minut, popřípadě desítek minut denně, proto je tento panel naprosto dostačující na dobítí ztrát kapacity baterie.



Obr. 2.4: Solární panel Voltaic P124.

## 2.3 Senzory

### 2.3.1 Senzor teploty, vlhkosti a tlaku

Jedním z požadavků práce je schopnost zařízení měřit veličiny jako je teplota a vlhkost. Na trhu existuje široká řada takovýchto čidel, která se od sebe parametrově liší,

ať už měřenými veličinami, přesností jejich měření, rozsahem, velikostí napájecího napětí, spotřebou či cenou.

Na výběr bylo z více variant, avšak finální volbou bylo čidlo BME280 [10] od firmy Bosch, kombinující možnost měření teploty, vlhkosti, a navíc i tlaku. Jeho klíčové vlastnosti jsou:

- měření teploty:  $-40$  až  $+85$  °C ( $\pm 0,5$  °C),
- měření vlhkosti: 0 až 100 % ( $\pm 2$  %)
- měření tlaku: 300 až 1100 hPa ( $\pm 1,4$  hPa),
- pracovní napětí: 1,71 až 3,6 V,
- spotřeba: jednotky  $\mu\text{A}$ ,
- komunikační protokol: I<sup>2</sup>C nebo SPI.



Obr. 2.5: Senzor teploty, vlhkosti a tlaku BME280 (převzato z [10]).

Senzor lze sehnat ve více variantách. První z nich je varianta holého čipu, ke kterému musí být vytvořen obvod, aby se senzor mohl použít. Druhou variantou je již hotová deska, která obsahuje všechny potřebné komponenty ke správnému fungování. Jelikož tyto desky obsahují zbytečné komponenty, jako například LDO regulátor a měnič logických úrovní, bylo přistoupeno k návrhu desky vlastní, a to především z důvodu úspory energie.

### 2.3.2 Detektor vody

Dalším požadavkem práce je navrhnout mechanismus, který detekuje zatopení určité oblasti vodou, respektive zvýšenou hladinu v ní.

Nejjednodušší a nejefektivnější variantou je v tomto případě využití mechanického spínače, který je realizován pomocí dvou vodičů, které jsou za normálního stavu rozpojené. V případě, že se hladina vody zvedne, kontakty se díky její vodivosti propojí a mikrokontrolér detekuje změnu stavu napětí na GPIO pinu.

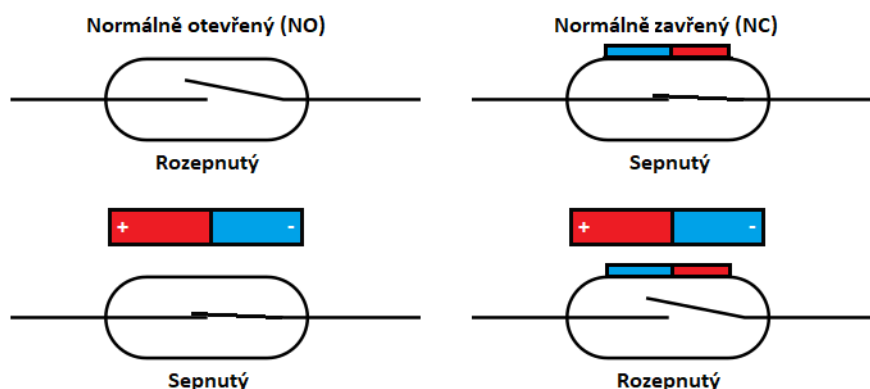
### 2.3.3 Magnetický kontakt

V práci je dále využit magnetický (jazýčkový) kontakt, který slouží k detekci změny stavu otevření či zavření dveří.

V principu se jedná o jednoduchý mechanický spínač, který je ovládaný magnetickým polem. Jazýčkový kontakt je tvořen ze dvou feromagnetických jazýčků, které jsou umístěny ve skleněné, hermeticky uzavřené trubici.

V případě, že na spínač začne působit dostatečně silné magnetické pole, feromagnetické jazýčky se zmagnetizují, což zapříčiní jejich vzájemné přitáhnutí. Vzniká tedy vodivé spojení. V případě, že je magnetické pole odstraněno, kontakty se opět rozpojí. Tento princip platí pro typ kontaktu „normálně otevřený (NO – Normally open)“.

Opačným způsobem funguje typ kontaktu „normálně zavřený (NC – Normally closed)“. Bez aplikovaného magnetického pole je spínač uzavřen, po dobu přiloženého magnetického pole je spínač otevřen.



Obr. 2.6: Magnetický jazýčkový kontakt (NO/NC).

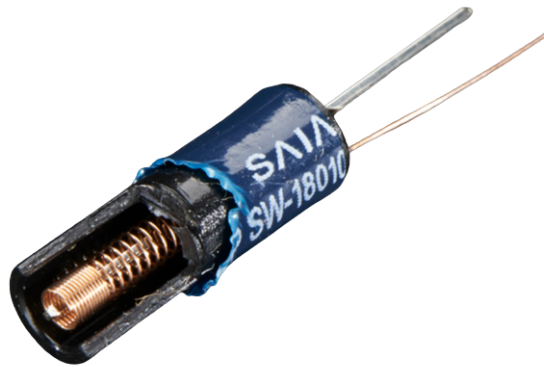
V práci je použit kontakt typu NC, jelikož je žádoucí, aby spínačem neprotékal žádný proud ve chvíli, kdy jsou dveře zavřeny (na jazýčky působí magnetické pole). Ve chvíli, kdy jsou dveře otevřeny, obvodem začne protékat proud a GPIO pin modulu ESP32 je schopen detekovat změnu napětí a na tu patřičným způsobem reagovat.

### 2.3.4 Otřesový senzor

V neposlední řadě by zařízení mělo být schopno reagovat na vnější podněty, jako jsou například prudké pohyby, pády či vibrace. Po důkladné rešerši možných řešení byla zvolena nejjednodušší varianta, a to použití vibračního senzoru, který je schopen jmenované jevy zachytit.

Senzor je vyroben ze dvou vodičů. Okolo hlavního (středového) vodiče je ovíjena pružina (druhý vodič). Za normálních okolností je pružina v klidovém stavu a středového vodiče se nedotýká, okruh je tedy otevřený. Ve chvíli, kdy na senzor zapůsobí vnější síla, pružina se rozkmitá a dotkne se hlavního vodiče. V tu chvíli se okruh uzavře, obvodem začne protékat proud a modul ESP32 detekuje změnu stavu napětí.

Na výběr bylo mezi třemi variantami citlivosti, každá z nich se liší silou pružiny (čím citlivěji mají být detekovány pohyby, tím tenčí je pružina). Na obrázku 2.7 lze vidět průřez zvoleným senzorem SW-18010P. Jedná se o variantu „fast“, která je umístěna ve vzduchotěsném pouzdře. Tato varianta je schopna zachytit i jemnější otřesy, například lehké ťuknutí prstem. Vybraný senzor je nesměrový, nezáleží tedy na tom, ze které strany síla zapůsobí.



Obr. 2.7: Senzor vibrací SW-18010P.

### 2.3.5 Měření stavu baterie

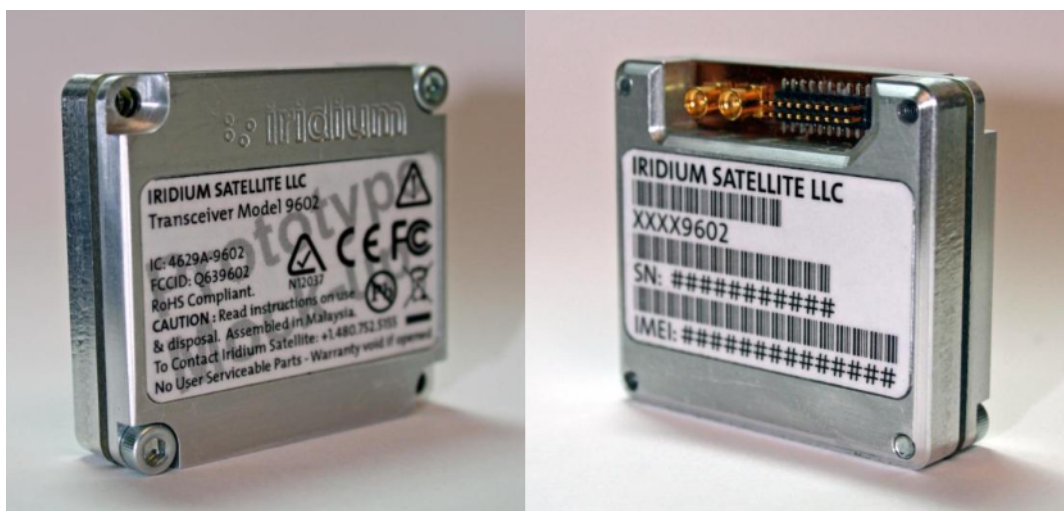
V bateriově napájených aplikacích je vhodné mít přehled o stavu baterie. Vzhledem k tomu, že stav baterie se nedá měřit napřímo, je nutné ho zpětně zjistit z hodnoty napětí naměřeného na baterii. Toho se dá přibližně docílit pomocí grafu vybíjecí charakteristiky, viz obrázek 2.3.

Měření napětí baterie je realizováno pomocí integrovaného A/D převodníku modulu ESP32. Převodník disponuje přepínatelným rozsahem napětí, ve kterém dokáže měřit. Jeho maximální hodnota je 3,3 V. Vzhledem k tomu, že maximální napětí baterie může dosahovat úrovně až 3,6 V, je nutné využít napěťový dělič. Přesnost převodníku je volitelná v rozmezí 9 až 12 bitů, v našem případě je však pro přesnější výsledky využito 12 bitové rozlišení.

Aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám kapacity baterie, je napětí na napěťový dělič přivedeno pouze ve chvíli, kdy má být napětí měřeno.

## 2.4 Satelitní jednotka Iridium 9602

Pro odesílání dat pomocí satelitní sítě byl zvolen modul Iridium 9602 [11]. Jedná se o výrobek americké firmy Iridium Communications z roku 2010. Jméno společnosti bylo odvozeno od chemického prvku iridium s protonovým číslem 77, které mělo odkazovat na počet satelitů firmy na oběžné dráze Země. Nakonec jich však obíhá Zemi pouze 75, přičemž 66 satelitů je aktivních, 9 slouží jako záloha v případě nouze a dalších 6 satelitů je umístěno na zemi. Celkově tak počet satelitů firmy Iridium činí 81.



Obr. 2.8: Satelitní modul Iridium 9602 (převzato z [11]).

Satelity obíhají Zemi v šesti orbitách (6×11 satelitů) na úrovni nízké oběžné dráhy, přibližně ve výšce 780 km. Zemi jsou schopné obkroužit za zhruba sto minut, jejich rychlost tedy činí přibližně 27000 km/h. Živou polohu satelitů lze sledovat na webu [12]. Satelitní síť Iridium je unikátní tím, že v každý okamžik pokrývá celou planetu Zemi, včetně oceánů, polárních oblastí a leteckých tras.

Síť Iridium nabízí mnoho služeb včetně přenosu dat a zvuku. Jednou z nich je i Iridium Short Burst Data (SBD), která slouží k odesílání a přijímání dat o malé velikosti. Tato služba je podporována modulem Iridium 9602 a je využita v rámci této práce.

Komunikace mezi koncovými stanicemi na Zemi a satelitní sítí je realizována na frekvencích v rozmezí 1616 až 1626,5 MHz. Tyto frekvence spadají do tzv. L pásma (1-2 GHz). Komunikace mezi jednotlivými satelity a centrálními stanicemi na Zemi pak probíhá v K pásmu (na určitých frekvencích v rozmezí 18-27 GHz).

Novější variantou modulu je verze 9603, která má oproti svému předchůdci čtvrtinový objem a zabírá polovinu původní plochy. Co do funkce se od verze 9602

významně neliší, proto byla zvolena starší verze dodaná fakultou. Klíčové vlastnosti modulu Iridium 9602 jsou:

- pracovní napětí: 5 V,
- napěťová logika: 3,3 V,
- špičkový proud při odesílání dat: 1,5 A
- 1×UART – komunikace pomocí AT příkazů.

### 2.4.1 DC/DC měnič

Pro správnou funkčnost satelitního modulu Iridium 9602 je potřeba zdroj, který dokáže dodat napětí o velikosti 5 V a proud o velikosti až 1,5 A (pro pokrytí proudových špiček při odesílání dat). Vzhledem k tomu, že baterie je schopna dodat maximálně 4,2 V, je nutné využít napěťový měnič.

Jako napěťový měnič byl zvolen integrovaný obvod TPS61032PWP [13] od firmy Texas Instruments. Jeho klíčové vlastnosti jsou:

- rozsah vstupního napětí: 1,8 až 5,5 V,
- výstupní napětí: 5 V,
- maximální výstupní proud: až 3,2 A (při vstupním napětí 4,8 V),
- účinnost: až 96 %.

Měnič bude zapnut jen ve chvíli, kdy bude potřeba odesílat data pomocí modulu Iridium 9602. O spínání měniče se stará spínací obvod, viz sekce 3.4.3.

### 2.4.2 Iridium anténa

Jako anténa pro připojení k síti Iridium byla zvolena pasivní patch anténa firmy Pulse Larsen Antennas s označením W3228 [14], která bude připojena k jednotce pomocí kabelu. Pro lepší příjem signálu je anténa umístěna na tzv. „ground plane“ o velikosti 6×6 cm. Klíčové specifikace:

- frekvenční rozsah: 1617 MHz až 1625 MHz,
- středová frekvence: 1621 MHz,
- polarizace: RHCP,
- nominální impedance: 50 Ω,
- špičkový zisk: 1,8 dBi,
- účinnost: 84 %.

## 2.5 Mobilní komunikátor a lokalizátor Quectel BG77

Jako mobilní komunikační jednotka byl zvolen modul Quectel BG77 [15] od stejnojmenné firmy Quectel. Modul byl uveden na trh v roce 2020. Jedná se o nízkoener-



Obr. 2.9: Patch anténa pro komunikaci se sítí Iridium.

getický komunikační modul sloužící pro přenos dat pomocí technologie LTE-M nebo NB-IoT. Výhodou tohoto modulu je podpora služby GNSS, která slouží k určování polohy po celém světě. Této funkce je využito v rámci práce. Klíčové vlastnosti:

- napájecí napětí: 2,6 až 4,8 V (typicky 3,3 V),
- napěťová logika: 1,8 V,
- NB-IoT protokol stack dle 3GPP vydání 14,
- přenosová rychlost LTE kategorie NB2: až 127 kb/s DL, až 158,5 kbps UL,
- podpora protokolů (například): TCP, UDP, FTP(S), HTTP(S), PING,
- podpora GNSS systému – GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS,
- 1×USB 2.0,
- 3×UART – komunikace pomocí AT příkazů.



Obr. 2.10: Mobilní komunikátor a lokalizátor Quectel BG77 (převzato z [15]).

Vzhledem k tomu, že technologie LTE-M není v České Republice podporována, bylo při vývoji využito technologie NB-IoT. Tato technologie je ve světě také více rozšířená [16].

### 2.5.1 Měníč logických úrovní

Vzhledem k tomu, že modul ESP32 pracuje s napětovou logikou 3,3 V a modul Quectel BG77 s logikou 1,8 V, je potřeba mezi těmito úrovněmi provádět konverzi.

K tomuto účelu byl vybrán měnič logických úrovní TXS0108EPWR [17] od firmy Texas Instruments. Jedná se o 8-bitový obousměrný převodník, který je vhodný pro převod mezi různými napětovými levely UART rozhraní. Klíčové vlastnosti:

- rozsah vstupního napětí (kanál A): 1,4 až 3,6 V,
- rozsah vstupního napětí (kanál B): 1,65 až 5,5 V.

### 2.5.2 Regulátor napětí

Pro správnou funkci převodníku popsaného výše je potřeba zdroj o napětí 1,8 V. K tomu slouží vybraný regulátor napětí TPS7A0318DBVR [18] od firmy Texas Instruments. Klíčové vlastnosti:

- rozsah vstupního napětí: 1,5 až 6 V,
- výstupní napětí: 1,8 V,
- minimální rozdíl IN/OUT napětí: 50 mV.

### 2.5.3 Držák SIM karty

Vzhledem k faktu, že NB-IoT technologie vyžaduje ke své funkčnosti SIM kartu, je nutné ji k modulu Quectel připojit. V rámci práce byl zvolen microSIM držák TE 2199337-5 [19].

### 2.5.4 Anténa pro NB-IoT síť

Jako anténa pro připojení k NB-IoT síti byla zvolena anténa od firmy Linx Technologies s označením ANT-B20-CW-QW-SMA [20]. Tato anténa je naladěna na LTE pásmo 20, tedy pásmo, na kterém v České Republice využívá NB-IoT síť firma Vodafone a T-Mobile. V případě, že by zařízení bylo uvedeno do ostrého provozu, musela by být zvolena jiná anténa, jelikož různé země využívají různá LTE pásma a tato anténa by nemusela stačit. Klíčové specifikace:

- frekvenční rozsah: 790 MHz až 870 MHz,
- středová frekvence: 826 MHz,
- polarizace: lineární,
- nominální impedance: 50  $\Omega$ ,
- špičkový zisk: 1,6 dBi,
- účinnost: 63 %.

Anténa bude připojena pomocí kabelu externě, vně krabičky.



Obr. 2.11: Anténa pro komunikaci se sítěmi NB-IoT.

### 2.5.5 GPS anténa

Jako anténa pro připojení k síti GPS byla zvolena pasivní patch anténa firmy Taoglas s označením CGGP.25.4.E.02 [21], která bude připojena k jednotce pomocí kabelu. Pro lepší příjem signálu je anténa umístěna na tzv. „ground plane“ o velikosti 6×6 cm. Klíčové specifikace:

- frekvenční rozsah: 1574,4 MHz až 1576,44 MHz,
- středová frekvence: 1575,42 MHz,
- polarizace: lineární,
- nominální impedance: 50  $\Omega$ ,
- špičkový zisk: 5,39 dBi,
- účinnost: 88,02 %.



Obr. 2.12: Patch anténa pro komunikaci s navigačním systémem GPS.

## 3 Návrh schématu zapojení

V předchozí kapitole byly popsány jednotlivé komponenty potřebné k návrhu a sestavení finálního zařízení. V této kapitole jsou jednotlivé komponenty spojeny dohromady a je vysvětleno jejich zapojení.

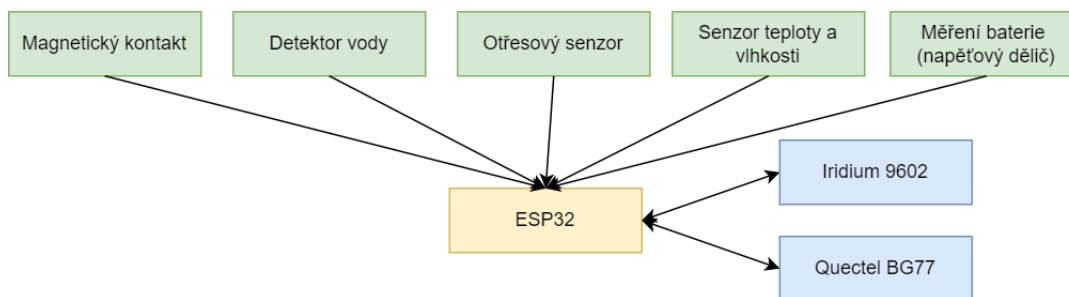
### 3.1 Editor Eagle

Pro návrh schématu a desky plošných spojů byl využit program Eagle [22], vyvinutý společností Autodesk. Eagle nabízí několik druhů licencí, na základě kterých jsou v programu odemčeny určité limitace. Základní, freewarová verze je limitována maximální velikostí DPS na 100×80 mm (š×v) a možností využít pouze dvouvrstvý návrh desky (spodní a horní signálová vrstva). Tato licence také neumožňuje vytvářet schémata větší než jeden list.

V našem případě byl program Eagle využit ve verzi 9.6.2 za použití studentské licence, která všechny výše zmíněné nedostatky odstraňuje. Pro návrh a výrobu DPS byly ve většině případů využity volně dostupné knihovny jednotlivých komponent, avšak některé z nich musely být upraveny nebo dokonce navrženy od základu (postup vytváření/úprav jednotlivých knihoven pro Eagle není součástí této práce).

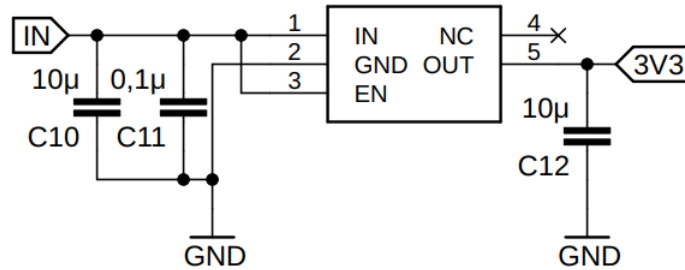
### 3.2 Blokové schéma zapojení

V této sekci je pomocí blokového schématu znázorněno, jak jsou jednotlivé části zařízení zapojeny. Na základě tohoto zapojení jsou dále navržena schémata a zhotoveny desky plošných spojů. Na obrázku 3.1 lze vidět zjednodušený blokový diagram zapojení jednotlivých komponent. Detailní schémata zapojení lze nalézt v přílohách.



Obr. 3.1: Zjednodušený blokový diagram zapojení.





Obr. 3.3: Zapojení stabilizátoru 3,3 V.

Mezi pinem 3V3 modulu ESP32 a zemí jsou připojeny dva keramické kondenzátory. První z nich je blokovací kondenzátor o velikosti 0,1 µF. Druhý kondenzátor o velikosti 22 µF slouží k pokrytí proudových špiček.

### 3.4.1 Komunikace s ESP32

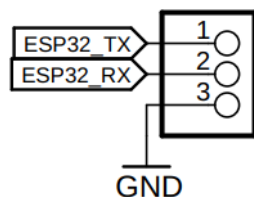
Pro potřeby komunikace se zařízením, ať už pro nahrávání firmwaru, jeho debugování nebo zadávání vstupních parametrů při běhu programu, je nutné mít možnost s ním navázat spojení přes počítač. Toho je docíleno využitím sériové linky modulu ESP32. Nynější počítače již nenabízí možnost připojení sériové linky napřímo, je proto zapotřebí využít převodník USB/UART.

Jedním z takových převodníků je například WaveShare [23], obsahující integrovaný obvod CP2102, který se běžně využívá na vývojových kitech ESP32-DevKitC.



Obr. 3.4: Převodník WaveShare s IC CP2102.

Ke komunikaci mezi počítačem a zařízením jsou potřeba tři piny, TX (Transmit Data), RX (Receive Data) a GND (Ground). Převodník nabízí i možnost napájení (lze měnit mezi 3,3 a 5 V). V našem případě tato možnost není využita, na desku jsou vyvedeny pouze tři výše zmíněné piny, které slouží k jeho připojení. Na obrázku 3.5 lze vidět zapojení UART linky. Pin ESP32\_TX je spojen s pinem TX modulu ESP32, obdobně je tomu u pinu RX. K zajištění komunikace s počítačem se k těmto pinům do kříže připojuje již zmiňovaný USB/UART převodník.

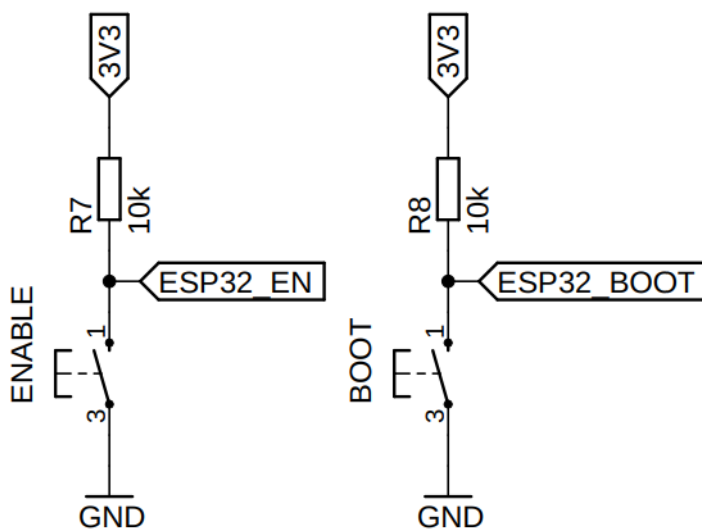


Obr. 3.5: Zapojení UART.

### 3.4.2 Zapojení tlačítek

Na desce jsou umístěna dvě tlačítka. Prvním z nich je tlačítko ENABLE. V případě, kdy tlačítko není zmáčknuto, na pin EN modulu ESP32 je pomocí pull-up rezistoru<sup>1</sup> přivedeno napětí, které modulu dává signál, aby pracoval. Ve chvíli, kdy je tlačítko zmáčknuto, pin EN je uzemněn a zařízení je vypnuto. Toto tlačítko lze tedy použít pro restartování modulu (jeho chvilkovým zmáčknutím).

Druhým tlačítkem je tlačítko BOOT. Toto tlačítko je určeno pro uvedení modulu ESP32 do režimu programování. Na pin GPIO0 je opět pomocí pull-up rezistoru přivedeno napětí, které pin udržuje ve stavu HIGH. Ve chvíli, kdy je pin GPIO0 pomocí tlačítka spojen se zemí a zařízení je restartováno (pomocí tlačítka ENABLE, on/off spínače či opětovného vložení baterie), je zařízení uvedeno do režimu programování.



Obr. 3.6: Zapojení tlačítek ENABLE a BOOT.

<sup>1</sup>Rezistor, za jehož pomoci se na vodiči určuje logická jednička.

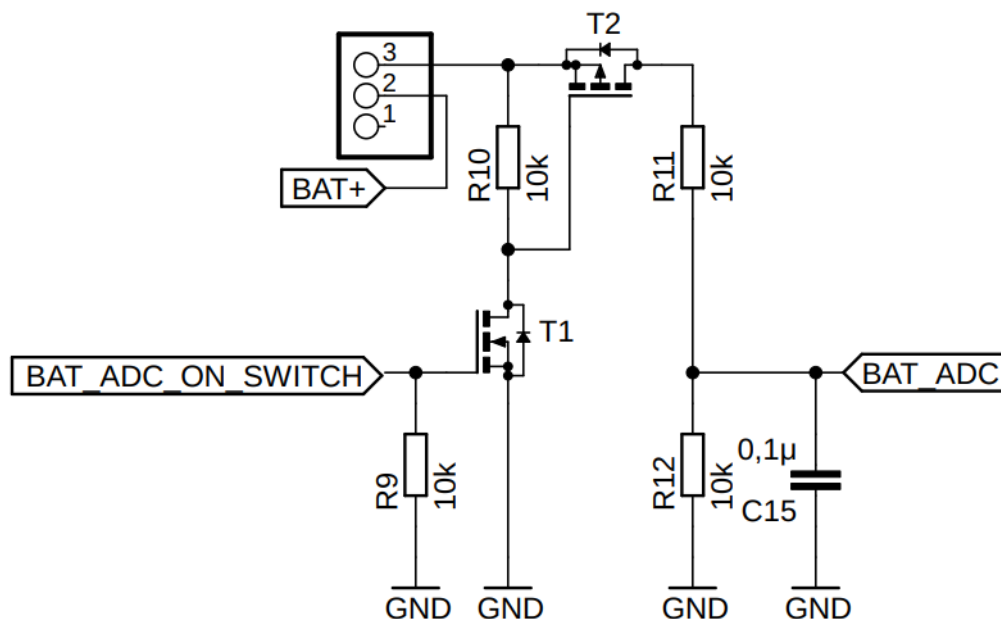
### 3.4.3 Zapojení spínacích obvodů

Aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám kapacity baterie, součástí návrhu jsou dva spínací obvody, které slouží k zapínání/vypínání určitých částí obvodu.

Tato funkce je zajištěna kombinací N-channel a P-channel MOSFET tranzistorů, které jsou řízené výstupním GPIO pinem modulu ESP32. V případě, kdy je výstup GPIO pinu nastaven jako logická nula, tranzistory jsou zavřené a napětí není přivedeno na výstup (nulová spotřeba). Ve chvíli, kdy je stav GPIO změněn na logickou jedničku, tranzistory se otevřou, na určité části je tedy přivedeno napětí a ty začnou fungovat.

První z obvodů slouží k měření napětí baterie. Jak bylo zmíněno v sekci 2.3.5, měření stavu zdroje je realizováno pomocí napěťového děliče. Tento dělič se skládá ze dvou rezistorů o hodnotách 10 a 10 k $\Omega$  (poměr 1:1). Tím je zajištěno, že maximální úroveň napětí baterie (4,2 V) je pro účely měření snížena o polovinu, dosahuje tedy maximálně 2,1 V, což je v rozmezí rozsahu A/D převodníku (maximálně 3,3 V). Napětí baterie je poté zpětně vypočítáno jako naměřená hodnota vynásobená dvěma.

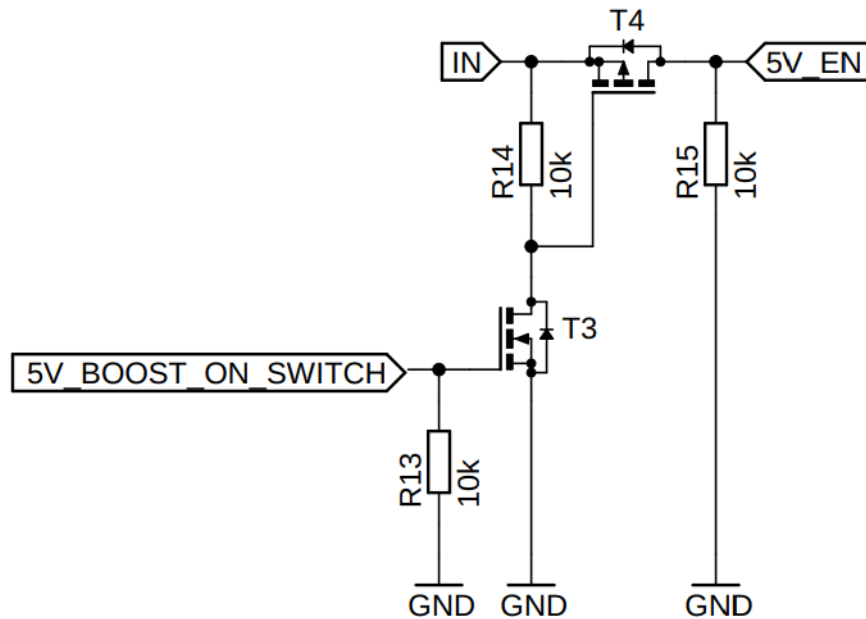
Mezi A/D pin modulu ESP32 a společnou zem je navíc paralelně připojen 100 nF kondenzátor, který slouží ke zvýšení přesnosti výsledků měření.



Obr. 3.7: Zapojení spínacího obvodu pro měření stavu baterie.

Druhý spínací obvod slouží k ovládání DC/DC měniče, který napájí modul Iridium 9602. Na vstup tranzistoru T4 je přivedeno výstupní napětí nabíjecího obvodu. Při sepnutí GPIO pinu modulu ESP32 do stavu HIGH jsou tranzistory otevřeny a na pin ENABLE DC/DC měniče je přivedeno napětí, které měnič uvede do zapnutého

stavu. Tím je také zapnut modul Iridium 9602. Využitím tohoto řešení nedochází ke zbytečným ztrátám energie, což je v souladu se zadáním práce. Ve vypnutém režimu měnič spotřebovává proud o velikosti maximálně  $1\ \mu\text{A}$ .



Obr. 3.8: Zapojení spínacího obvodu pro ovládání DC/DC měniče.

### 3.5 Zapojení modulu Iridium 9602

Jak již bylo zmíněno, celá část satelitního modulu je společně s měničem napětí zapojena až za spínacím obvodem.

Tímto je docíleno šetření kapacity baterie, jelikož modul je zapnut pouze ve chvíli, kdy mají být odesílána data. Při sepnutí spínacího obvodu je výstupní napětí nabíjecího obvodu přivedeno na napěťový měnič, který poté napájí satelitní modul. Napětí je přivedeno celkem na tři piny, dva napájecí a jeden ON/OFF pin, pomocí kterého lze řídit stav zapnutí a vypnutí modulu. V návrhu je tento pin napevno spojen s napájecí linkou a modul je tedy zapnut vždy, když je na něj přivedeno napětí (zapnutí a vypnutí modulu je řízeno pomocí spínacího obvodu).

Satelitní modul dále obsahuje piny, pomocí kterých je možné indikovat stav, kdy je modul napájen (je přivedeno napájecí napětí) a kdy je satelitní modul připojen k síti Iridium. Tyto piny jsou vyvedeny na desku a mohou být pomocí jumperů<sup>2</sup> spojeny s LED diodami, které jsou schopné indikovat daný stav. Jumpery jsou využity z důvodu minimalizace energetické náročnosti. Pin, indikující dostupnost sítě

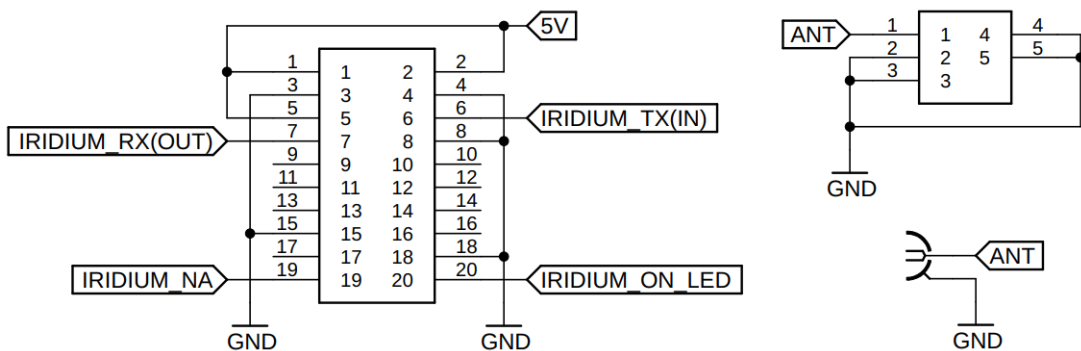
<sup>2</sup>Mechanická spojka vodičů.

Iridium, je zároveň spojen se vstupním GPIO pinem modulu ESP32. Na základě této hodnoty je rozhodováno o tom, jestli zahájit proces odesílání dat či nikoliv.

Komunikace mezi modulem ESP32 a modulem Iridium 9602 probíhá za využití sériové linky ve třívodičovém provedení (TX, RX, GND). Modul Iridium využívá pro sériovou komunikaci stejné napěťové levely jako modul ESP32, tedy 3,3 V. Není tedy zapotřebí žádný převodník napěťových úrovní.

Pin TX modulu Iridium (modul Iridium přijímá data) je spojen s TX pinem modulu ESP32. V případě pinu RX je analogie stejná, RX pin (modul Iridium odesílá data) je spojen s pinem RX modulu ESP32.

Pro připojení antény je interní konektor modulu (ANT) spojen s SMA konektorem vyvedeným na desku (IRIDIUM ANT).



Obr. 3.9: Zapojení modulu Iridium 9602.

### 3.5.1 Zapojení DC/DC měniče

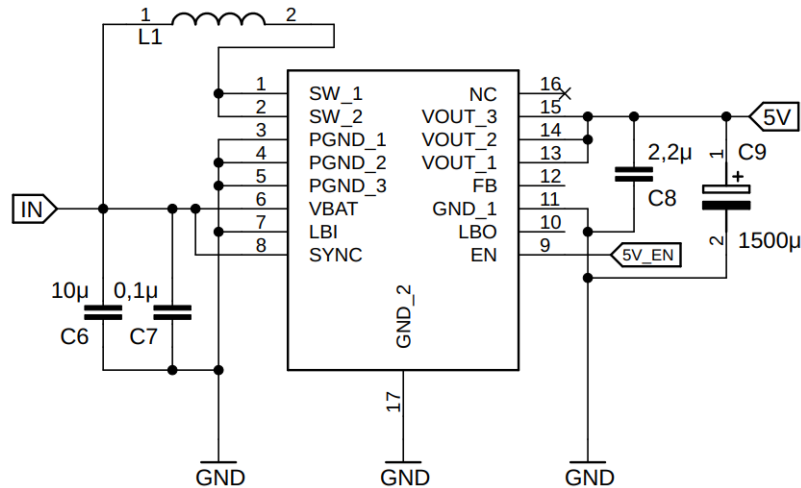
Obvod disponuje induktorem L1, skrze který prochází proud obvodu měniče. Velikost tohoto induktoru byla zvolena podle doporučení výrobce.

Dále je k měniči připojen elektrolytický kondenzátor C9, který slouží k pokrytí napěťových špiček modulu Iridium 9602.

Měnič má možnost pracovat v úsporném režimu. Tento režim se nastavuje pomocí pinu SYNC, kdy uzemnění pinu tento režim aktivuje. V návrhu je pin SYNC spojen se vstupním napětím, a to především z důvodu, že úsporný režim není potřeba, jelikož bude měnič zapínán a vypínán pouze v určité krátkodobé intervaly.

Pro zapínání a vypínání měniče je na pin EN přiveden jeden ze spínacích obvodů. Tyto obvody jsou popsány výše.

Při návrhu desek plošných spojů je potřeba dbát na správné rozmístění komponentů na desce a také dostatečnou šířku tras.



Obr. 3.10: Zapojení DC/DC měniče.

## 3.6 Zapojení modulu Quectel BG77

Napájení modulu Quectel je realizováno pomocí napěťového stabilizátoru na 3,3 V.

Z modulu jsou vyvedeny piny pro sériovou komunikaci, které jsou spojeny s měničem logických úrovní. Dále je vyveden pin STATUS, který slouží k signalizaci stavu zařízení. Tento pin je společně s pinem NET\_STATUS spojen pomocí jumperů s LED diodami, které jsou vyvedeny na desku.

Dalším pinem vyvedeným z tohoto modulu je pin PWRKEY, pomocí kterého je zařízení zapínáno a vypínáno.

Vyvedeny jsou také cesty pro připojení externích antén pro sítě NB-IoT a GPS.

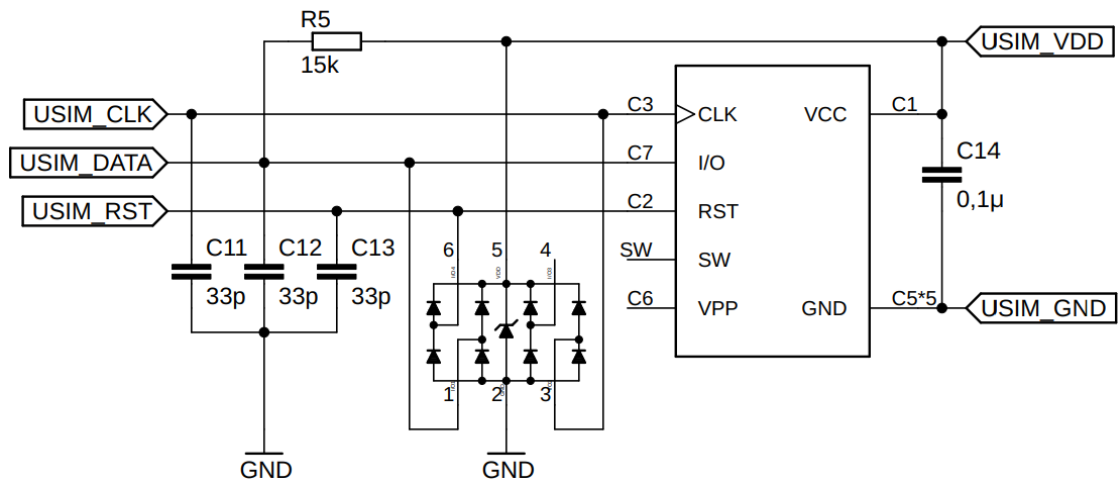
### 3.6.1 Zapojení microSIM

K připojení držáku microSIM je využito celkem čtyř pinů modulu Quectel BG77. Prvním z nich je napájecí pin USIM\_VDD, datové vedení USIM\_DATA, zdroj hodinového signálu USIM\_CLK a reset karty USIM\_RST. Zapojení lze vidět na obrázku 3.11.

Pro každý vývod je implementován blokovací kondenzátor a ochrana proti elektrostatickému výboji.

### 3.6.2 Zapojení měniče logických úrovní

Zapojení měniče logických úrovní je realizováno pomocí dvou napěťových úrovní.



Obr. 3.11: Zapojení držáku SIM karty.

První z úrovní je 3,3 V. Toto napětí je přivedeno z regulátoru napětí 3,3 V zmíněného v subsekcí 2.1.2. Druhou z úrovní je napětí o velikosti 1,8 V. To je dodáváno z napěťového regulátoru zmíněného v subsekcí 2.5.2.

Napětí o větší hodnotě je připojeno k pinu měniče VCCB, menší k pinu VCCA. Menší napětí je také připojeno k pinu OE (output enable). Tento pin ve zkratce řídí stav zapnutí nebo vypnutí měniče.

Do jednotlivých kanálů jsou zapojeny piny pro sériovou komunikaci. Jeden pin je také vyhrazen pro stavovou diodu modulu Quectel BG77 STATUS.

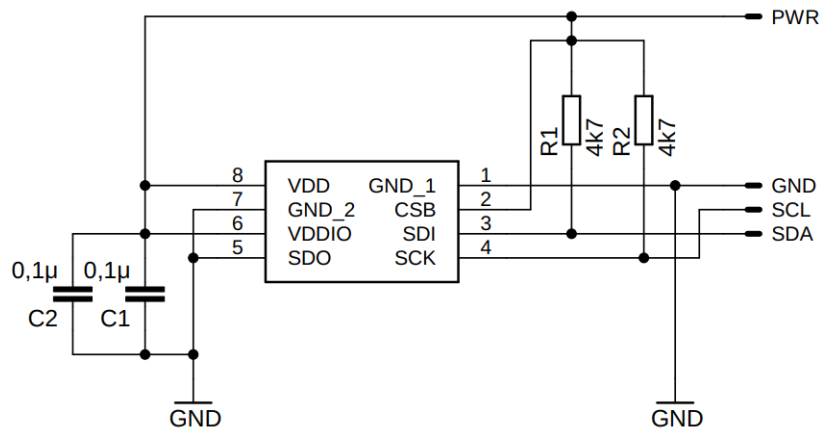
## 3.7 Zapojení senzorů

### 3.7.1 Zapojení senzoru BME280

Jako napájecí pin senzoru BME280 je využit výstupní GPIO pin modulu ESP32. GPIO pin může na výstupu poskytnout proud o velikosti až 40 mA, což je pro potřeby tohoto senzoru naprosto dostačující. Tímto stylem zapojení je docíleno minimalizace spotřeby, vzhledem k tomu, že senzor je zapnut pouze v moment měření.

Mezi vstupní napětí a piny SCL a SDA jsou umístěny pull-up rezistory, které jsou potřebné pro správné fungování I<sup>2</sup>C komunikace.

Pin SDO slouží k volbě hexadecimálního I<sup>2</sup>C identifikátoru zařízení. V návrhu zapojení je tento pin spojen se zemí, identifikátor čidla je tedy 0x76 (v případě spojení pinu SDO s napájecím napětím je identifikátor 0x77).



Obr. 3.12: Zapojení senzoru BME280.

### 3.7.2 Zapojení detekčních senzorů

Zapojení všech tří detekčních senzorů je realizováno stejným způsobem. K jedné straně pomyslného spínače je připojeno výstupní napětí 3,3V LDO stabilizátoru, druhá strana je připojena k GPIO pinu modulu ESP32 a zároveň je spojena se zemí za využití pull-down rezistoru<sup>3</sup>). Při změně stavu se spínač uzavře a GPIO pin tedy detekuje logickou jedničku. Jelikož modul ESP32 musí být schopen detekovat změny stavu i ve chvíli, kdy je v režimu spánku, bylo potřeba tyto senzory připojit pomocí RTC GPIO pinů (piny, které jsou schopné pracovat i v režimu spánku).

Otřesový senzor je umístěn na desce, pro detektor vody a magnetický kontakt jsou však na desce vyvedeny pouze konektory pro jejich připojení, jelikož senzory budou připojeny externě.

<sup>3</sup>Rezistor, za jehož pomoci se na vodiči určuje logická nula.

## 4 Návrh a výroba DPS

Po navrhnutí a vytvoření celkového schématu z jednotlivých částí, zmíněných v předchozí sekci, začal návrh desek plošných spojů.

Vzhledem k tomu, že se má na deskách nacházet mnoho komponent, které by bylo složité propojit pouze na jedné vrstvě, bylo hned na začátku návrhu přistoupeno ke dvouvrstvé variantě. V návrhu jsou využity zemnicí polygony na obou stranách desek, které celkový návrh usnadňují. Tyto polygony jsou navzájem propojeny prokovy na různých místech jednotlivých desek.

Jednotlivé komponenty bylo potřeba logicky rozmístit tak, aby na deskách zabíraly co nejméně místa, z důvodu velikosti finálního produktu, který by měl být co nejmenší. Velikost pouzder byla volena s ohledem na pohodlnost ručního pájení, s výjimkou desky pro NB-IoT modul a senzoru BME280, které musely být osazeny strojově.

Všechny plošné spoje byly navrženy s ohledem na jejich délku, a to kvůli minimalizaci jejich odporu. Šířka jednotlivých tras byla volena úměrně maximální velikosti proudu, který jimi může procházet, pro redukci případného ohřevu vodičů.

Hlavní deska má velikost 190×67 mm (š×v). Na desce se nachází celkem osm montážních děr, které zajišťují její nehybnost a odolnost proti vibracím i za nepříznivých podmínek. Na hlavní desce se nachází mini PCI-E konektor s patičí pro připojení desky s modulem Quectel BG77. Tato deska byla velikostně dimenzována jako standardní mini PCI-E karta, rozměry jsou tedy 30×50,95 mm (š×v).

Jako poslední byla navržena deska se senzorem BME280. Na desce se nachází dva montážní otvory. Velikost této desky je 31×14 mm (š×v).

Ve chvíli, kdy byly pomocí programu Eagle navrženy jednotlivé desky plošných spojů, bylo potřeba začít s jejich výrobou. Domácí výroba nepřipadala v úvahu, jelikož výsledná podoba desek je poměrně složitá a finální kvalita by tedy nemusela být dostatečná.

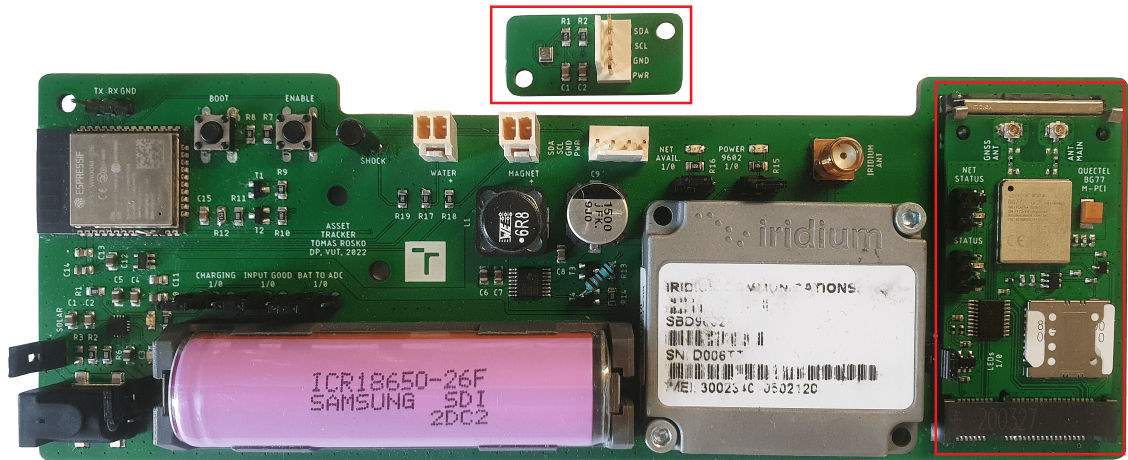
Bylo potřeba najít výrobce, který by byl schopen tyto desky vyrobit za relativně malé náklady, při malém počtu odebíraných kusů. Na českém trhu se takového výrobce najít nepodařilo, proto byla nakonec zvolena možnost výroby v zahraničí, konkrétně v Číně. Vzhledem k tomu, že se v Číně nachází mnoho firem, které se zaměřují na tuto činnost, existuje velká konkurence, a proto se jednotlivé firmy předhání v konečné ceně a výsledné kvalitě.

Po vygenerování souborů potřebných k výrobě (tzv. Gerber soubory<sup>1</sup>) bylo pomocí portálu firmy JLCPCB [24] zažádáno o výrobu. V našem případě byl zvolen materiál FR-4, což je standardní materiál používaný pro výrobu DPS. Tloušťka desek byla ponechána ve výchozím nastavení, tedy 1,6 mm.

---

<sup>1</sup>Soubory obsahující data o jednotlivých vrstvách desky.

Výslednou podobu dodaných a osazených desek lze vidět na obrázku 4.1. Kvalita desek a jejich provedení je na velmi vysoké úrovni.

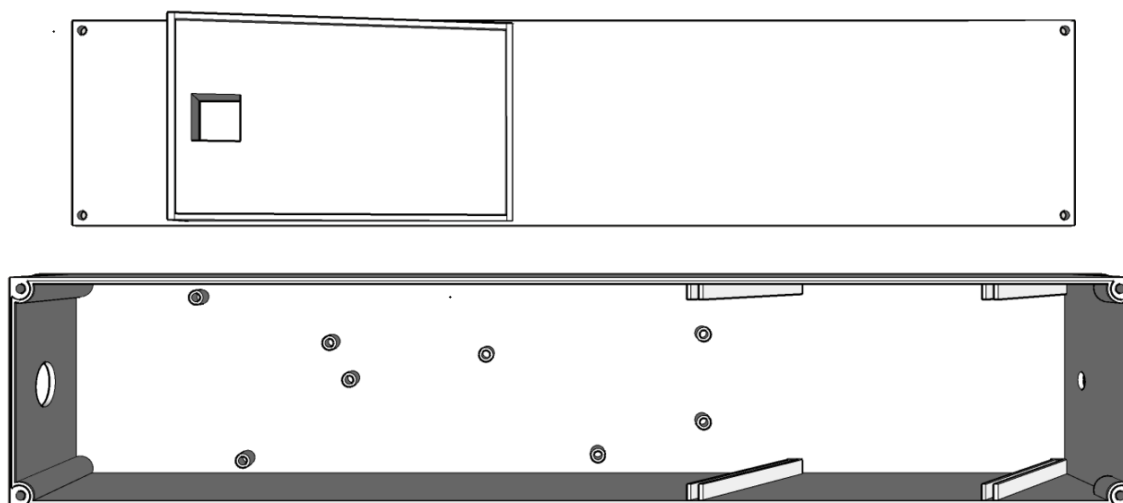


Obr. 4.1: Výsledná podoba osazených DPS.

## 5 Návrh a výroba 3D krabičky

Celé zařízení je vzhledem k jeho povaze potřeba umístit do vhodného krytí, které odolá vnějším vlivům. Kvůli atypickým rozměrům navrženého zařízení je v tomto případě jedinou možností vymodelovat a vytisknout vlastní krabičku, do které se celé zařízení umístí.

K modelování byl využit program SketchUp Pro [25] verze 20.0.363 od společnosti Trimble. Celý model je složen ze dvou částí, a to z krabičky a víka. Vizualizaci modelu lze vidět na obrázku 5.1. Velikost vytisknutého modelu včetně víka činí  $38,8 \times 5,15 \times 7,3$  cm (š×v×h).



Obr. 5.1: Vizualizace modelu krabičky a víka.

Velikost všech závitů uvnitř krabičky byla zvolena pro šroubky o velikosti M3. Tyto závitky jsou do plastu nataveny, aby nedocházelo k jejich protáčení. Na krabičce se dále nachází čtyři otvory pro její uchycení ke stěně kontejneru. Tyto závitky jsou velikostně voleny pro šroubky o velikosti M6.

Pro připojení antén Iridium a GPS jsou v krabičce navrženy zarážky, do kterých budou antény zasunuty. Tyto zarážky jsou skloněné pod úhlem  $45^\circ$ , což zaručuje, že při svislém zapojení krabičky na stěnu kontejneru budou antény směřovat směrem na oblohu.

K vyvedení antény pro NB-IoT sítě a pro vyvedení kabelů pro připojení externích senzorů jsou na koncích modelu vyhloubeny dva otvory. Větší z otvorů, sloužící pro vývod kabelů ven z krabičky, je vyplněn kabelovou vývodkou PG7, která splňuje standard IP67. V menším z otvorů, který slouží pro připojení NB-IoT antény, je umístěn samičí SMA konektor, který je pomocí gumových O-kroužku spojen se stěnou krabičky.

Na víku se nachází držák pro solární panel. I při jeho návrhu bylo využito zkosení tak, aby při provozu směřoval směrem k obloze. Z tohoto držáku vede otvor zpět do krabičky. Tento otvor slouží k připojení solárního panelu k desce. Solární panel je ke krabičce přilepen lepidlem a zataven horkovzdušnou pistolí. Podél celého víka se také nachází drážka, ve které je umístěno gumové těsnění, které slouží k lepšímu utešnění krabičky. Díky faktům zmíněným výše by zařízení mělo splňovat stupeň krytí IP65 (úplná prachotěsnost, odolnost proti tryskající vodě – tři minuty ze vzdálenosti tří metrů).

Jelikož se jedná o prototyp, je model vyroben z PLA filamentu, aby výsledná cena nebyla vysoká. V případě, že by zařízení mělo být uvedeno do ostrého provozu, bylo by potřeba volit materiál jiný, například FRJet. Materiál PLA není pro venkovní podmínky nejvhodnější.

Krabička pro senzor BME280 a ostatní externí senzory není součástí tohoto řešení. V rámci návrhu se počítá s jejich připojením uvnitř kontejneru, kde nelze předem určit polohu jejich montáže.

## 6 Softwarová část

Následující kapitola popisuje vytvořený program pro zařízení navržené v předchozích kapitolách. Program byl vytvořen v jazyce C++ za využití Arduino frameworku pro zařízení ESP32. Kód byl vytvořen v programu Visual Studio Code [26] verze 1.67.2 s nádstavbou PlatformIO verze 6.0.1.

### 6.1 Datový protokol

Aby odeslaná data mohla být na již zmíněném GINA serveru zpracována, zařízení je musí odesílat v předem domluveném formátu a délce. Vzhledem k tomu, že pro odeslání dat mohou být využity i satelitní sítě, bylo nutné dbát na délku odeslané zprávy, jelikož odesílání dat přes tyto sítě je zpozplatněno podle velikosti odeslané zprávy. Z tohoto důvodu byl vytvořen komunikační protokol, podle kterého jsou data odesílána. Protokol byl navrhnout tak, aby minimalizoval délku zprávy.

#### 6.1.1 Binární protokol

Minimalizace délky zprávy bylo nakonec dosaženo využitím binárního protokolu, který získaná data kóduje do smluveného formátu, aby došlo k jejich minimalizaci. Stejný protokol je využit pro přenos přes mobilní i satelitní sítě. Délka jedné zprávy je 31 bajtů.

##### Verze

Tato hodnota udává verzi komunikačního protokolu. Při vývoji bylo počítáno s tím, že komunikační protokol se časem může měnit. Z důvodu zachování zpětné kompatibility proto bylo přistoupeno k přidání hodnoty verze, aby se od sebe jednotlivé verze mohly rozlišit a mohlo se s nimi dále pracovat. Pro tuto hodnotu je vyhrazeno 8 bitů (1B) a její výchozí hodnota je nastavena na 1, tedy 0x01. Hodnota je uchována v poli „version“.

##### Délka

Hodnota délka je uchována v poli „len“, které má velikost 8 bitů (1B). Obsahuje počet bajtů celé struktury. Primárním účelem je usnadnění parsování neznámých verzí, avšak může sloužit i jako kontrola, že všechna data byla doručena.

## Stav baterie

Další hodnotou je úroveň stavu baterie, která je uložena v poli „batteryLevel“. Je vyjádřena pomocí 8 bitů (1B). Hodnota 0 signalizuje baterii vybitou (v případě námi použité baterie je úroveň stanovena na 3,6 V), hodnota 100 signalizuje baterii nabitou (4,2 V).

## Flagy

Tato hodnota slouží k signalizaci specifických událostí, které mohou nastat. Je pro ně vyhrazeno 8 bitů (1B). Hodnota je uložena v poli „flags“. Jednotlivé flagy mají vyhrazen jeden specifický bit:

- 1b – DOOR\_OPEN (logická 1, pokud jsou dveře otevřeny),
- 2b – CARGO\_SHAKING (logická 1, pokud senzor vibrací zaznamená aktivitu),
- 3b – WATER\_INTRUSION (logická 1, pokud senzor vody detekuje narušení),
- 4b – LAST\_KNOWN\_GPS\_POSITION (logická 1, pokud aktuální GPS pozice není známa).

Zbylé 4 bity jsou rezervované pro budoucí využití.

## Čas

Pomocí této hodnoty je zaznamenáno časové razítko. Hodnota je uložena v poli „timestamp“. Jelikož tato hodnota reprezentuje 64 bitový unixový čas, je pro tuto hodnotu vyhrazeno 8B.

## Teplota

Teplota je uložena v poli „temperature“ a má delku 16 bitů (2B). Může nabývat hodnot od  $-128$  (0x0000) až  $+127^{\circ}\text{C}$  (0xFFFF).

## Vlhkost

Vlhkost se nachází v poli „humidity“ a má delku 16 bitů (2B). Značí hodnoty od 0 (0x0000) až 100 % (0xFFFF).

## Tlak

Tlak je uložen v poli „pressure“ a má delku 16 bitů (2B). Může nabývat hodnot od 0 (0x0000) až 6553,6 hPa (0xFFFF).

## Poloha

Poloha je zaznamenána pomocí třech hodnot, každá z nich má delku 32b (4B), celkem tedy 12B. Jedná se o pole „latitude“, „longitude“ a „altitude“.

## HDOP – horizontal dilution of precision

Posledním polem zprávy je hodnota HDOP, uložena v poli „HDOP“, která signalizuje přesnost lokalizace GPS satelity. Velikost tohoto pole je 8b (1B) a signalizuje hodnoty od 0 (0x00) až 256 (0xFF).

### 6.1.2 Šifrování dat

Šifrování dat není v rámci této práce žádným způsobem řešeno a je využito šifrování na vyšší vrstvě.

### 6.1.3 Definice struktury zprávy v jazyce C++

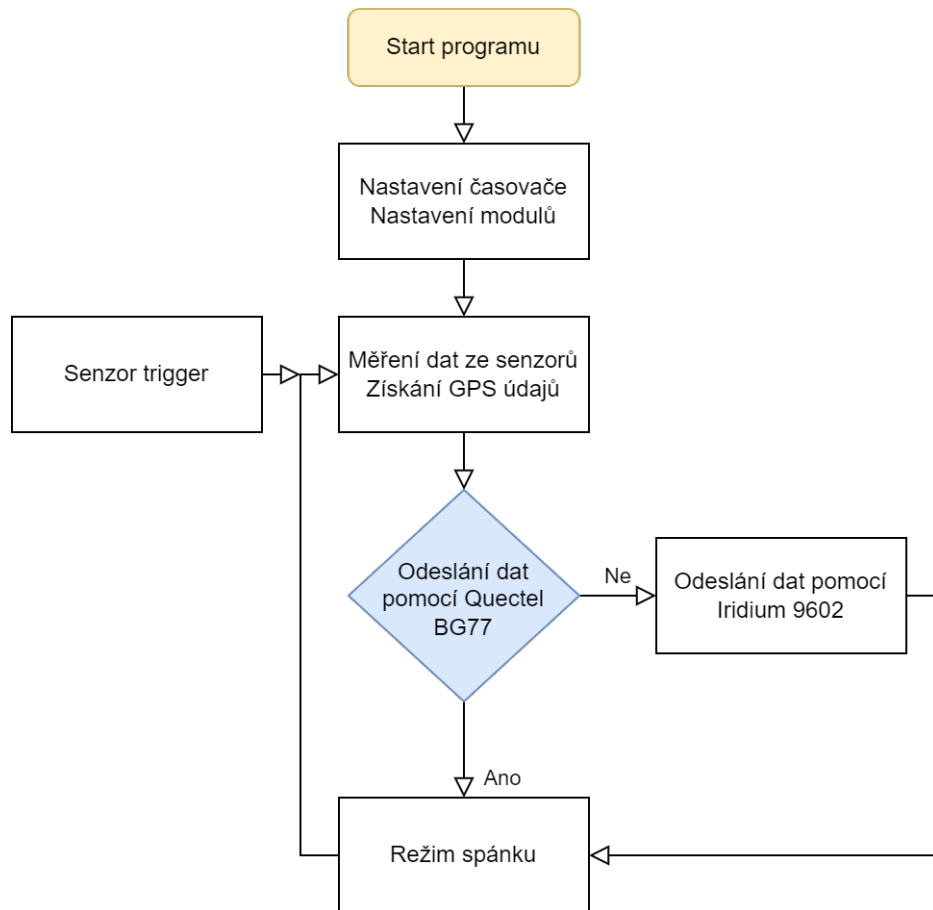
Výpis 6.1: Definice struktury zprávy jazyce C++.

```
1 typedef struct __attribute__((packed)) {
2     uint8_t version;
3     uint8_t len;
4     uint8_t batteryLevel;
5     uint8_t flags;
6     uint64_t timestamp;
7     uint16_t temperature;
8     uint16_t humidity;
9     uint16_t pressure;
10    int32_t latitude;
11    int32_t longitude;
12    int32_t altitude;
13    uint8_t HDOP;
14 } Payload;
```

## 6.2 Popis běhu programu

Na obrázku 6.1 lze vidět zjednodušený diagram běhu programu. Jednotlivé části programu jsou popsány v následujících subsekcích. Po nastartování programu dochází k inicializační fázi, kde dojde k prvotnímu nastavení. Poté následuje fáze měření dat

ze senzorů a získávání údajů z GPS. Po naměření dat nastavá pokus o jejich odeslání pomocí mobilní, popřípadě satelitní sítě. Po úspěšném i neúspěšném pokusu o odeslání dat je zařízení uspáno na dobu zvolenou v inicializační fázi. Z této fáze může být zařízení probránno, a to pomocí externích senzorů.



Obr. 6.1: Zjednodušený diagram běhu programu.

## 6.2.1 Inicializační fáze

Po spuštění zařízení nastává první, inicializační, fáze. Tato fáze je vykonána jen jednou, a to při prvním startu zařízení. V této části dochází k nastavení intervalu měření zadaného uživatelem pomocí sériové linky. Dále jsou v této části nastaveny parametry modulu Iridium 9602 a Quectel BG77.

Komunikace s jednotlivými moduly probíhá pomocí sériové linky za využití AT příkazů [11, 27]. AT příkazy jsou krátké sekvence znaků, začínající řetězcem 'AT', a ukončené sekvencí '\r\n'.

O komunikaci s moduly se stará funkce *sendATCommand()*, která jako vstupní parametry očekává zadaný AT příkaz, očekávanou odpověď a maximální dobu čekání

na žádanou odpověď. Posledním parametrem je výběr sériové linky, pomocí které má komunikace probíhat (stejná funkce je využita pro oba moduly). V případě, že modul ESP32 dostane očekávanou odpověď dříve, než vypřší maximální doba čekání na odpověď, funkce vrací hodnotu true, v opačném případě false.

Výpis 6.2: Funkce pro zpracování AT příkazu.

```
1 sendATCommand(const char command[] ,
2               const char awaitedReply[] ,
3               uint32_t maxWaitTime ,
4               HardwareSerial &refSer)
```

Před nastavením parametrů obou modulů jsou jednotlivé moduly zapnuty. U modulu Iridium 9602 probíhá zapnutí nastavením pinu „SwitchPinIridium“ do stavu HIGH (ve schématu pin 5V\_BOOST\_ON\_SWITCH). Modul Quectel je zapnut pomocí pinu „SwitchPinQuectel“ (PCIE\_SLOT\_QUECTEL\_PWRKEY), který musí být po dobu 900 mS držen ve stavu HIGH. Po uplynutí tohoto času je nutno pin přepnout zpět do vychozího stavu LOW. V případě, že program vyhodnotí, že některý z modulů není připojen, zařízení je uspáno do doby, než se modul(y) připojí a zařízení ručně restartuje.

### Nastavení modulu Iridium 9602

Nastavení modulu Iridium 9602 probíhá pomocí následujících AT příkazů:

- **ATE0** – Vypnutí funkce „local echo“. Tento příkaz zajišťuje, že modul na výstupu seriové linky nebude opakovat zadaný příkaz.
- **AT&D0** – Vypnutí DTR signálu.
- **AT&K0** – Vypnutí funkce „flow control“.
- **AT&W0** – Uložení konfigurace do profilu s číslem 0.
- **AT&Y0** – Příkaz nastavující číslo profilu, který je načten po zapnutí modulu.

### Nastavení modulu Quectel BG77

Nastavení modulu Quectel BG77 probíhá pomocí následujících AT příkazů:

- **ATE0**
- **AT&D0**
- **AT+IFC=0,0** – Vypnutí funkce „flow control“.
- **AT+GSN** – Příkaz vracející IMEI modulu.
- **AT+CFUN=0** – Deaktivace rádiové části.
- **AT+QCFG="nwscanseq",030303,1** – Optimalizační příkaz, který slouží k urychlení vyhledání NB-IoT sítě.
- **AT+QCFG="iotopmode",1,1** – Optimalizační příkaz.

- **AT+CFUN=1** – Aktivace rádiové části.
- **AT+QICSGP=1,1,"lpwa.vodafone.iot", "", "",1** – Nastavení APN.
- **AT&W0** – Nastavení aktivní konfigurace jako výchozí.

Po dokončení konfigurace jsou oba moduly vypnuty. Modul Iridium 9602 pomocí příkazu **AT\*F** a modul Quectel BG77 pomocí příkazu **AT+QPOWD**. Modul Iridium 9602 je také navíc vypnut i hardwarově. Toho je docíleno uvedením pinu „SwitchPinIridium“ do stavu LOW. Tím je vypnut i DC/DC měnič.

## 6.2.2 Měření dat ze senzorů, získání GPS údajů

### Kontrola detekčních senzorů

Dalším krokem programu je kontrola detekčních senzorů. Na začátku běhu programu jsou do proměnných uloženy jejich stavové hodnoty. Tyto hodnoty jsou následně uvnitř funkce *getSensorValues()* porovnány a v případě potřeby jsou nastaveny určité flagy.

V případě, že je modul probrán detekčním senzorem, je schopen zaznamenat číslo daného pinu. Toho je při porovnání využito jako pojistka pro případ, že by po probuzení modul ESP32 načel hodnotu false, i když jej daný senzor reálně probudil.

### Měření teploty, vlhkosti a tlaku

Po kontrole detekčních senzorů přichází na řadu získání hodnot ze senzoru BME280. O to se stará funkce *getBME280Values()*. Pro zapnutí senzoru je potřeba nastavit pin „SwitchPinBME280“ (BME280\_ON\_SWITCH) do hodnoty HIGH. Po nastavení pinu přichází kontrola, zda je senzor připojen. V případě, že ano, jsou naměřeny všechny potřebné hodnoty, které jsou následně upraveny do podoby potřebné k odeslání, dle již zmiňovaného datového protokolu. V opačném případě tyto hodnoty zůstávají nastavené na výchozí hodnotě 0. Po úspěšném i neúspěšném naměření veličin je senzor vypnut.

### Měření stavu baterie

Poslední hodnotou měřenou modulem ESP32 je stav baterie. Před měřením stavu baterie je nutné uvést pin „SwitchPinBatteryADC“ (BAT\_ADC\_ON\_SWITCH) do stavu HIGH. Tímto krokem je sepnut spínací obvod a na dělič je přivedeno napětí baterie.

Hodnota baterie je změřena pomocí ADC pinu modulu ESP32. Po zpětném vy počítání napětí baterie přichází na řadu kontrolní podmínka, která má na starost uvést zařízení do permanentního režimu spánku, pokud je napětí baterie pod 3,6 V.

Návrh zařízení je však koncipován tak, aby ke splnění této podmínky nedošlo. Pokud by k takovému stavu došlo, baterie by musela být manuálně dobita a zařízení restartováno.

Pokud tato podmínka splněna není, je naměřená hodnota převedena do vhodného tvaru k odeslání. Po naměření hodnoty je pin „SwitchPinBatteryADC“ uveden do stavu LOW. Tím dojde k odpojení baterie od děliče napětí.

## Získání GPS informací

Posledním krokem před samotným odesláním dat je získání údajů z GPS. To probíhá v rámci funkce *getPosition()*. Po zapnutí modulu Quectel BG77 a aktivování jeho GNSS části (příkaz **AT+QGPS=1**) je pomocí příkazu **AT+QGPSLOC=0** zjišťováno, zda došlo k získání GPS polohy. Příkaz je vykonáván v rámci cyklu, který běží maximálně 60 sekund.

V případě, že je GPS pozice získána, jsou do modulu Quectel BG77 odeslány dva AT příkazy, které vracejí NMEA věty. Tyto věty obsahují detailnější GPS informace než samotný příkaz **AT+QGPSLOC=0**. Jak může taková věta vypadat lze vidět ve výpisu 6.3.

Výpis 6.3: NMEA RMC věta.

```
$GPRMC,123519.00,A,4807.038,N,01131.000,E,,230394,,A*6A
```

Existuje několik druhů NMEA vět, které se od sebe liší jejich obsahem. V našem případě je nutné využít NMEA věty dvě. První z nich je věta RMC, druhá GGA. Věta RMC totiž neobsahuje hodnotu HDOP.

Pro rozparsování jednotlivých vět je využito knihovny „TinyGPSPlus.h“. Rozparsovaná data jsou v rámci funkce vhodně upravena do tvaru připraveného k odeslání. Převedení časového razítka ze získaných GPS dat je realizováno pomocí knihovny „TimeLib.h“. V případě, že GPS data nebyla získána, je nastaven flag `LAST_KNOWN_GPS_PO` na bitovou hodnotu 1.

Po dokončení získávání GPS dat je GNSS část modulu Quectel BG77 vypnuta. Je tomu tak z důvodu, že hardware modulu sdílí určité části a modul není schopen odesílat data přes mobilní síť, pokud je GNSS část zapnuta.

### 6.2.3 Odesílání dat

Odesílání dat je rozděleno do dvou funkcí. První z nich je funkce *sendDataQuectel()*, zařízení se tedy vždy snaží odeslat data pomocí modulu Quectel BG77 jako první.

Odesílání dat pomocí mobilní sítě vypadá následovně:

- Čekání na registraci k síti (maximálně 60 sekund).
- Aktivování Packet Data Protocolu.

- Otevření spojení se serverem (přednastavená hodnota v kódu).
- Odesílání dat.
- Čekání na potvrzení přijetí dat serverem.
- Ukončení spojení se serverem.

Pokud jakákoliv z těchto fází selže, přichází na řadu funkce *sendDataIridium()*. V této funkci nejprve dochází k naplnění odchozího bufferu modulu Iridium 9602. V dalším kroku se čeká na dostupnost Iridium sítě (maximálně 60 sekund). Jakmile je tato síť dostupná, zařízení zkouší odeslat data. V určitých případech může nastat, že odesílání dat selže, proto je u této funkce nastaveno, aby se data zkusila odeslat ve třech pokusech (maximálně tedy 180 sekund). Výběr koncového serveru a portu se provádí pomocí žádosti odeslané společnosti Iridium.

#### **6.2.4 Režim spánku**

Po dokončení odeslání dat (i v případě neúspěchu) je modul uspán na dobu zadanou uživatelem. Z tohoto režimu může být modul vzbuděn pomocí již několikrát zmiňovaných detekčních senzorů. Po probuzení modulu jsou všechna naměřená data vynulována a cyklus začíná nanovo.

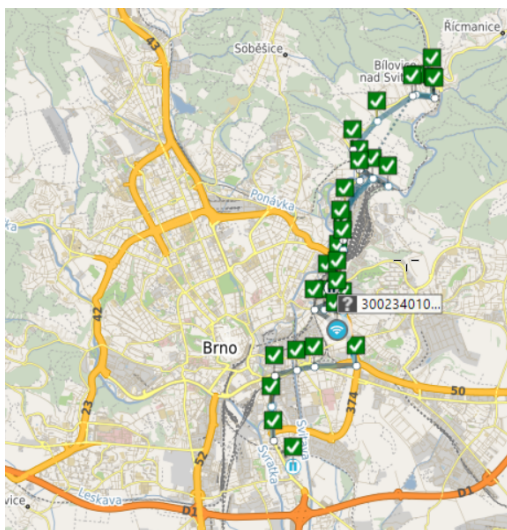
## 7 Testování funkčnosti

Poslední částí této práce je samotné testování finálního produktu. Při testování všech zmíněných funkcí bylo potřeba brát ohled na charakter komunikačních a provozních omezení, které jsou typické pro námořní druh přepravy.

Testování probíhalo po dokončení vývoje zařízení a dokončení parseru na straně GINA Software. Odesílaná data jsou na straně GINA Software rozparsována a uložena podle identifikátoru IMEI, který je součástí příchozího paketu. V případě odesílání dat modulem Iridium 9602 je IMEI součástí hlavičky paketu, v případě modulu Quectel BG77 je IMEI vloženo jako součást payloadu. Aplikace je tedy schopna rozeznat, zda data dorazila pomocí mobilní nebo satelitní sítě.

V průběhu testování bylo zařízení umístěno na palubní desku auta a byla uskutečněna přibližně půlhodinová jízda směrem z centra Brna do městské části Brno-Maloměřice a Obřany a zpět.

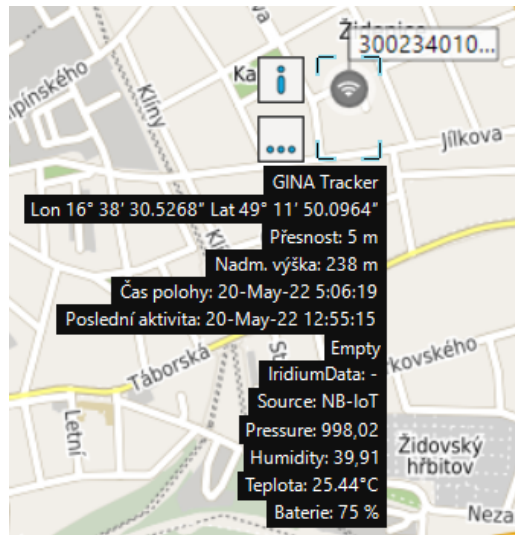
Interval buzení zařízení byl nastaven na jednu minutu. Při jízdě nedošlo k žádnému výpadku při odesílání dat. Všechna data však byla odeslána pouze pomocí NB-IoT sítě modulu Quectel BG77, jelikož pokrytí České Republiky touto sítí je na velmi vysoké úrovni. Výslednou trasu cesty lze vidět na obrázku 7.1.



Obr. 7.1: Testování zařízení.

Lze vidět, že v určitých částech cesty je interval příjmu dat častější. Toto je způsobeno vibračním senzorem, který byl za dobu jízdy několikrát aktivován z důvodu nerovnosti cest.

V aplikaci GINA Software lze po rozkliknutí daného zařízení vidět detailnější stav zařízení samotného, viz obrázek 7.2.



Obr. 7.2: Detail zařízení v aplikaci GINA Central.

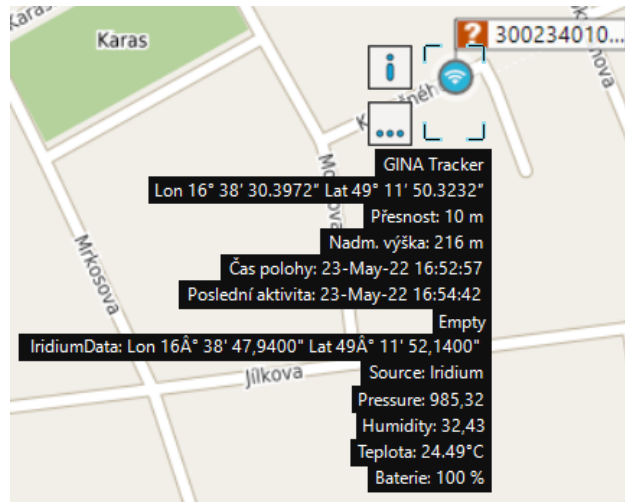
Za zmínku stojí několik polí. Prvním z nich je „Čas polohy“, které udává, kdy byla získána a úspěšně odeslána poslední GPS poloha. V případě, že zařízení není schopno naměřit polohu, naměřená data ze senzorů se snaží odeslat i tak, pouze využije flag `LAST_KNOWN_GPS_POSITION`, kterým říká, že aktuální pozice není známa. V tomto případě jsou na serveru uloženy pouze data ze senzorů a je aktualizováno pole „Poslední aktivita“. Čas v tomto poli je aktuální čas serveru v momentě příjmu dat.

Dalším polem je pole udávající stav detekčních senzorů. Na obrázku je toto pole s hodnotou „empty“, jelikož žádný se senzorů nebyl v moment měření dat ve stavu logické jedničky. Pokud by však zařízení naměřilo některý ze senzorů jako aktivní, v detailu zařízení bychom byli schopni tuto hodnotu vidět.

Posledním polem, které stojí za zmínku, je pole „IridiumData“. Toto pole je naplněno daty pouze v případě, že způsob odeslání dat provedla satelitní jednotka Iridium 9602 (tedy pole „Source“ má hodnotu Iridium). Je v něm uložena hodnota pozičních souřadnic, které byly získány pomocí sítě Iridium, a které byly poslány v hlavičce příchozího paketu. Možnost lokalizace modulu Iridium 9602 je prováděna na straně firmy Iridium a její zapnutí je volitelné. Na obrázku 7.3 lze vidět, jak taková situace vypadá. V tomto případě činí odchylka přibližně 350 metrů vzdušnou čarou. I když v tomto případě není přesnost lokalizace Iridium sítě nejhorší, v určitých případech může dosahovat odchylky až několik desítek kilometrů.

Na obrázcích lze také vidět naměřené hodnoty senzorem BME280, které odpovídají přibližnému stavu okolního prostředí v tomto období (květen 2022).

S ohledem na výše uvedená fakta a obrázky se testování dá považovat za úspěšné.



Obr. 7.3: Odeslání dat pomocí modulu Iridium 9602.

Odeslání naměřených dat se zdařilo jak za použití mobilního, tak satelitního komunikátoru.

# Závěr

Pro celosvětový obchod je nesmírně důležitá kontejnerová přeprava, a zejména ta lodní [1]. Aby se předcházelo ztrátě kvality zboží a souvisejících nákladů, je třeba dodržovat v kontejnerech specifické podmínky. Jedním z řešení tohoto problému jsou zařízení Internetu věcí, které umožňují detailní monitorování kvality a pomocí přenosu informací včas varovat přepravce o klesajících podmínkách v kontejneru, který tak může ihned zareagovat a předejít velkým finančním ztrátám související s transportem nepoužitelného zboží [3]. Lodní doprava se však potýká s několika problémy: zařízení musí umět přesně měřit různé veličiny a polohu kontejneru, pro přenos dat umět kombinovat satelitní i mobilní sítě, protože na některých místech mobilní síť není dostupná, a to vše za co nejmenší spotřeby energie, protože doprava může trvat několik týdnů až měsíců.

Tato práce se zabývala návrhem a zhotovením právě takového sledovacího zařízení určeného pro lodní kontejnery. Zařízení dle požadavků kombinuje satelitní a mobilní připojení a snímá polohu kontejneru, monitoruje teplotu, vlhkost, tlak i přítomnost vody, kontroluje magnetický kontakt a dokáže tak určit, zda je kontejner otevřený či zavřený, a také detekuje otřesy kontejneru. To vše za nízké spotřeby energie. K nabíjení je využit solární panel a dobíjecí baterie Li-Ion. V praktické části práce nechybí popis návrhu schématu zapojení jednotlivých částí obvodu, a také návrh a zhotovení desek plošných spojů a na míru vytvořené krabičky. Krabička byla navržena a zhotovena pomocí 3D tisku, tak, aby mohlo být zařízení v krytí, které odolá vnějším vlivům.

Softwarová část práce popsala program pro zařízení zhotovený ve frameworku Arduino. Datový protokol byl navrhnutý tak, aby minimalizoval délku zprávy s informacemi – to kvůli zpoplatnění satelitního přenosu dat, které se odvíjí podle délky zprávy. V poslední části práce došlo k testování funkčnosti zařízení, zejména s ohledem na charakter komunikačních a provozních omezení, které s sebou lodní přeprava nese. Testování proběhlo umístěním na palubní desku auta během zhruba třicetiminutové jízdy. Výsledky testu jsou uspokojivé vzhledem k požadavkům na zařízení a odeslání naměřených dat se podařilo jak pomocí mobilního, tak satelitního přenosu dat.

Závěrem lze pak konstatovat, že cíle práce byly naplněny a dle požadavků byl zhotoven funkční prototyp zařízení, který zohledňuje jak specifické požadavky lodní dopravy, tak i ekonomickou stránku věci.

# Literatura

- [1] Mahlknecht, Stefan and Madani, Sajjad A. *On Architecture of Low Power Wireless Sensor Networks for Container Tracking and Monitoring Applications* [online]. 2007 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4384782>>.
- [2] Tang, Peiyao and Postolache, Octavian Adrian and Hao, Yangyang and Zhong, Meisu. *Reefer Container Monitoring System* [online]. 2019 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8724950>>.
- [3] Mahmood, Salman and Hasan, Raza and Ullah, Asad and Sarker, Kamal Uddin. *SMART Security Alert System for Monitoring and Controlling Container Transportation* [online]. 2019 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8645574>>.
- [4] GINA Software. *About Us* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.ginasystem.com/about-us.php>>.
- [5] Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32E Datasheet* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e\\_esp32-wroom-32ue\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf)>.
- [6] Texas Instruments. *TLV757P Datasheet* [online]. 2017 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv757p.pdf>>.
- [7] Texas Instruments. *BQ24074 Datasheet* [online]. 2021 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24074.pdf>>.
- [8] Jensen, Henrik. *Samsung ICR18650-26F 2600mAh (Pink)* [online]. 2012 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <[https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Samsung%20ICR18650-26F%202600mAh%20\(Pink\)%20UK.html](https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Samsung%20ICR18650-26F%202600mAh%20(Pink)%20UK.html)>.
- [9] Voltaic Systems. *Voltaic P124 Solar Panel* [online]. 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://voltaicsystems.com/content/Voltaic%20Systems%20P124%20R1G.pdf>>.
- [10] Bosch. *BME280* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>>.

- [11] Iridium Communications. *Iridium 9602 SBD Transceiver Developer's Guide* [online]. 2010 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<http://nearspace.ru/doc/Iridium-9602-SBD-Transceiver-Product-Developers-Guide.pdf>>.
- [12] IridiumWhere. *IridiumWhere* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://iridiumwhere.com>>.
- [13] Texas Instruments. *TPS6103x Datasheet* [online]. 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61030.pdf>>.
- [14] Mouser. *Pulse Larsen Antennas W3328 Datasheet* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://cz.mouser.com/datasheet/2/336/W3228-1375646.pdf>>.
- [15] Quectel. *BG77 Hardware Design* [online]. 2021 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <[https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel\\_BG77\\_Hardware\\_Design\\_V1.2.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel_BG77_Hardware_Design_V1.2.pdf)>.
- [16] GSMA. *Mobile IoT Deployment Map* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.gsma.com/iot/deployment-map>>.
- [17] Texas Instruments. *TXS0108E Datasheet* [online]. 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/txs0108e.pdf>>.
- [18] Texas Instruments. *TPS7A03 Datasheet* [online]. 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a03.pdf>>.
- [19] TE Connectivity. *SIM Connector TE 2199337-5* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.te.com/usa-en/product-2199337-5.datasheet.pdf>>.
- [20] Mouser. *Linx Technologies ANT-B20-CW-QW-SMA Datasheet* [online]. 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <[https://cz.mouser.com/datasheet/2/238/LNNC\\_S\\_A0009830673\\_1-2551023.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/238/LNNC_S_A0009830673_1-2551023.pdf)>.
- [21] Taoglas. *Taoglas CGGP.25.4.E.02 Datasheet* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.taoglas.com/datasheets/CGGP.25.4.E.02.pdf>>.
- [22] Autodesk. *PCB Design Software Eagle* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>>.
- [23] WaveShare. *WaveShare CP2102 USB UART Board (type A)* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.waveshare.com/cp2102-usb-uart-board-type-a.htm>>.

- [24] JLCPCB. *About Us* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://jlcpcb.com/aboutUs>>.
- [25] Trimble. *Sketchup* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.sketchup.com>>
- [26] Microsoft. *Visual Studio Code* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://code.visualstudio.com>>
- [27] Quectel. *BG95&BG77&BG600L Series AT Commands Manual* [online]. 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <[https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel\\_BG95BG77BG600L\\_Series\\_AT\\_Commands\\_Manual\\_V2.0-3.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel_BG95BG77BG600L_Series_AT_Commands_Manual_V2.0-3.pdf)>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>3GPP</b>	3rd Generation partnership project
<b>APN</b>	Access point name
<b>A/D</b>	Analog to digital
<b>D/A</b>	Digital to analog
<b>DPS</b>	Deska plošných spojů
<b>DTR</b>	Data terminal ready
<b>ETFE</b>	Ethylene tetrafluoroethylene
<b>FTP(S)</b>	File transfer protocol (secure)
<b>GGA</b>	Fix information data
<b>GLONASS</b>	Global navigation satellite system (russian)
<b>GNSS</b>	Global navigation satellite system
<b>GPIO</b>	General-purpose input/output
<b>GPS</b>	Global positioning system
<b>HDOP</b>	Horizontal dilution of precision
<b>HTTP(S)</b>	Hypertext transfer protocol (secure)
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Inter integrated circuit
<b>I<sup>2</sup>S</b>	Inter integrated sound
<b>IEEE</b>	Institute of electrical and electronics engineers
<b>IMEI</b>	International mobile equipment identity
<b>LDO</b>	Low-dropout
<b>LED</b>	Light-emitting diode
<b>Li-Ion</b>	Lithium-ion
<b>LTE(-M)</b>	Long term evolution (machine)
<b>MOSFET</b>	Metal oxide semiconductor field effect transistor
<b>NB-IoT</b>	Narrowband internet of things
<b>NMEA</b>	National marine electronics association
<b>PCI(-E)</b>	Peripheral component interconnect (express)
<b>PLA</b>	Poly lactide
<b>QZSS</b>	Quasi-zenith satellite system
<b>RHCP</b>	Right hand circular polarization
<b>RMC</b>	Recommended minimum data
<b>ROM</b>	Read-only memory
<b>RTC</b>	Real time clock
<b>SBD</b>	Short burst data
<b>SCL</b>	Serial clock

<b>SDA</b>	Serial data
<b>SIM</b>	Subscriber identity module
<b>SMA</b>	SubMiniature version A
<b>SPI</b>	Serial peripheral interface
<b>SRAM</b>	Static random-access memory
<b>TCP</b>	Transmission control protocol
<b>UART</b>	Universal asynchronous receiver-transmitter
<b>UDP</b>	User datagram protocol
<b>USB</b>	Universal serial bus
<b>Wi-Fi</b>	Wireless fidelity

# Seznam příloh

A Schémata zapojení	59
B Obsah elektronické přílohy	63

# A Schémata zapojení

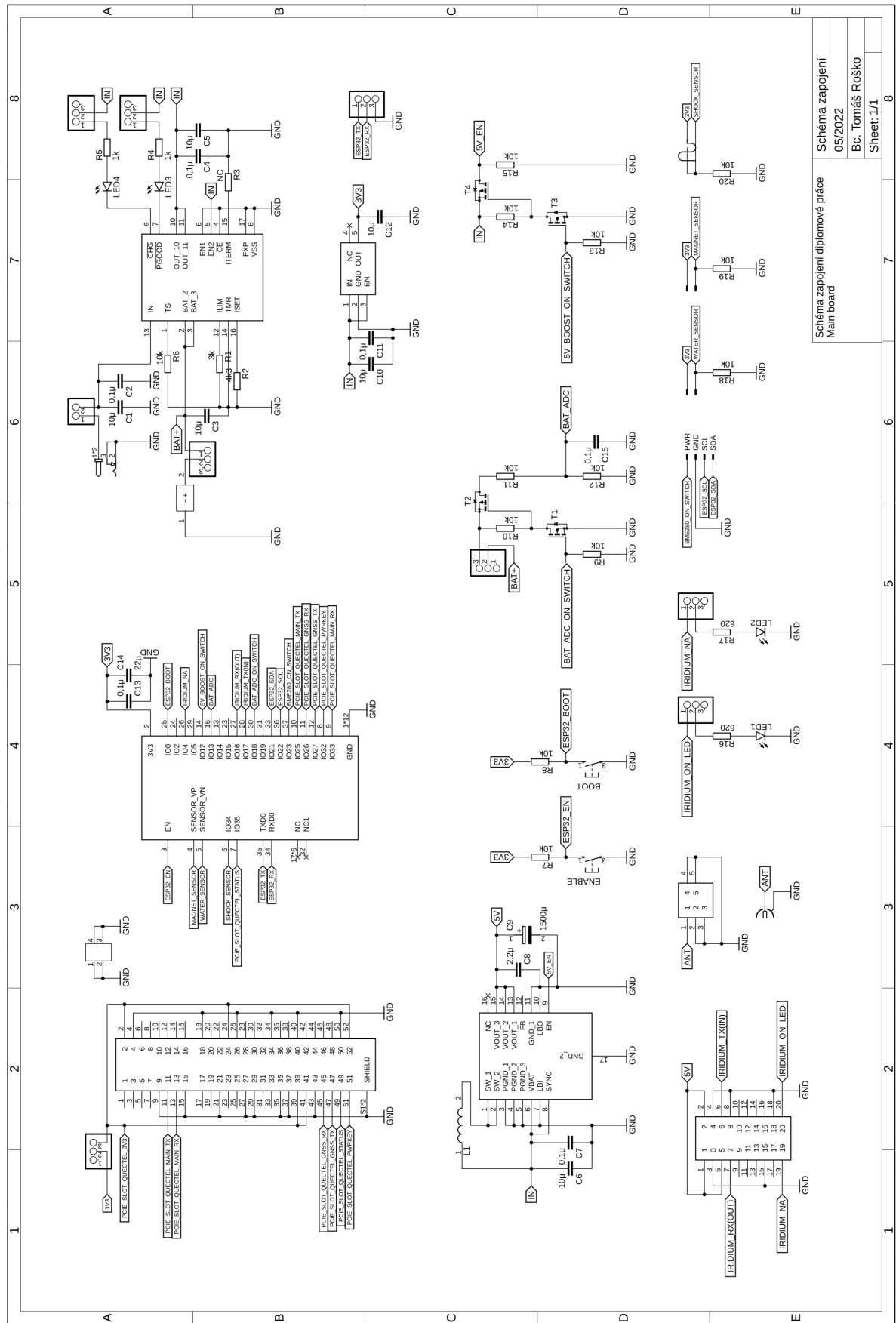


Schéma zapojení  
Main board

Schéma zapojení  
05/2022  
Bc. Tomáš Roško  
Sheet: 1/1

Obr. A.1: Celkové schéma zapojení – hlavní deska.

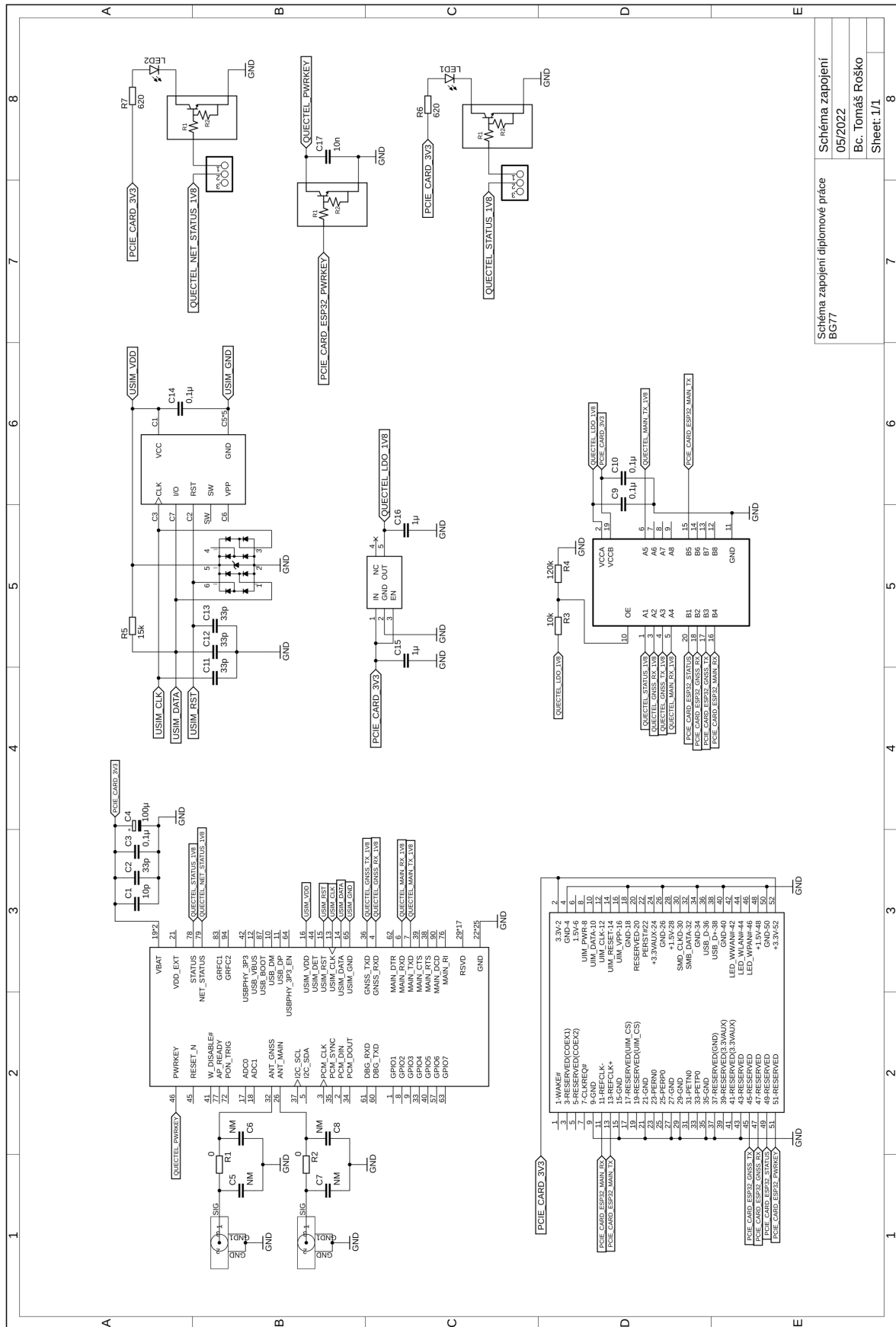


Schéma zapojení  
 BG77  
 05/2022  
 Bc. Tomáš Roško  
 Sheet: 1/1

Obr. A.2: Celkové schéma zapojení – Quectel BG77.

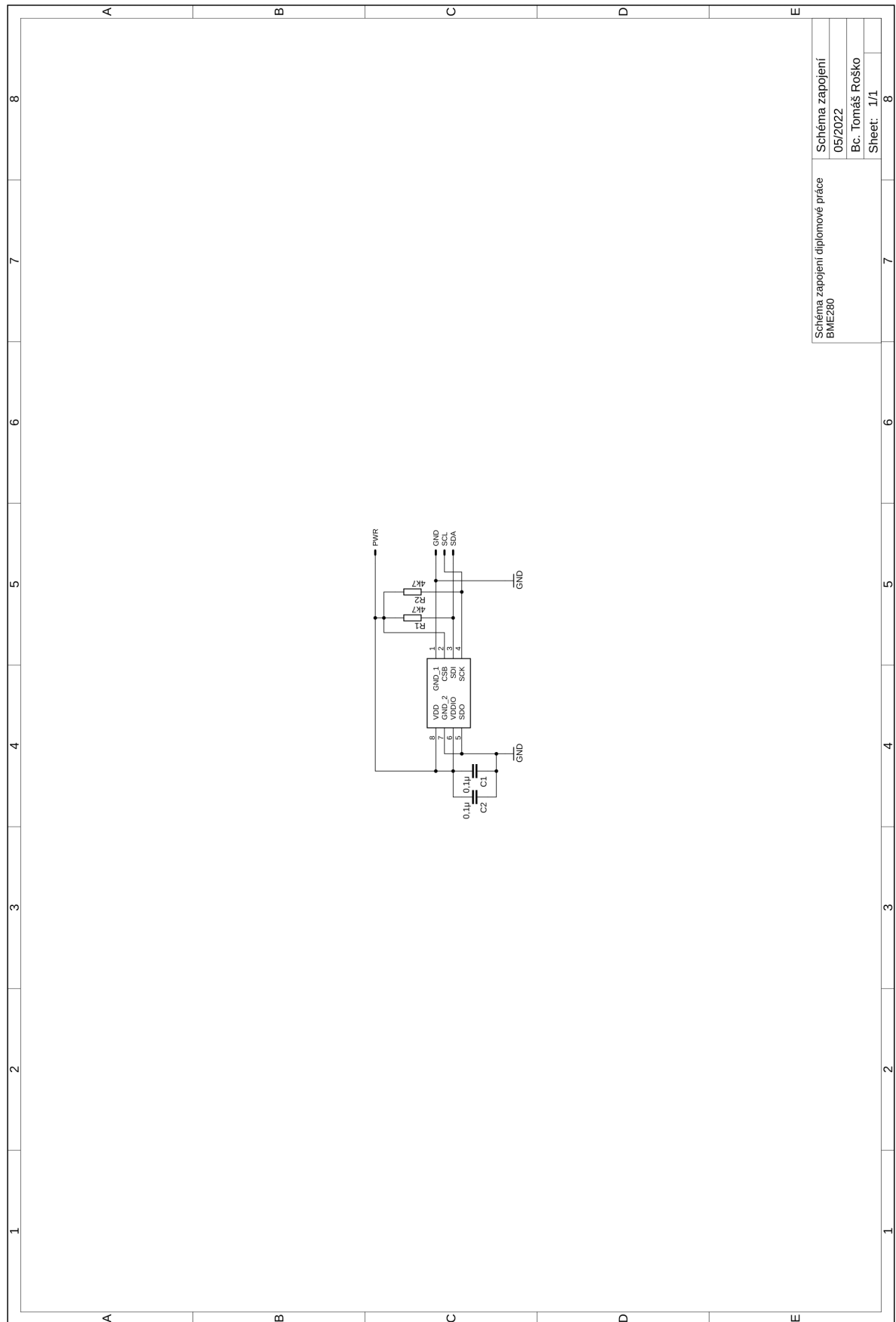


Schéma zapojení BME280	Schéma zapojení 05/2022	Schéma zapojení Bc. Tomáš Roško
		Sheet: 1/1

Obr. A.3: Celkové schéma zapojení – BME280.

## B Obsah elektronické přílohy

Příložený zip archiv je rozdělen na dvě části. V první části se nachází soubory obsahující schémata zapojení a návrh desek plošných spojů. Ty byly vytvořeny pomocí programu Eagle verze 9.6.2 za použití studentské licence. V této části je také uložen 3D model krabičky, který byl navrhut v programu SketchUp Pro verze 20.0.363.

Ve druhé části archivu se nachází samotný kód, který celé zařízení řídí. Kód byl vytvořen v programu Visual Studio Code verze 1.67.2 s nábstavbou PlatformIO verze 6.0.1.

```
/. .....kořenový adresář přiloženého zip souboru
├── Hardwarová část
│   ├── Boards
│   │   ├── BG77
│   │   │   ├── BG77.brd..... Deska tištěných spojů
│   │   │   ├── BG77.pdf
│   │   │   └── BG77.sch..... Schéma zapojení
│   │   ├── BME280
│   │   │   ├── BME280.brd..... Deska tištěných spojů
│   │   │   ├── BME280.pdf
│   │   │   └── BME280.sch..... Schéma zapojení
│   │   └── Main board
│   │       ├── Main board.brd..... Deska tištěných spojů
│   │       ├── Main board.pdf
│   │       └── Main board.sch..... Schéma zapojení
│   └── Box
│       ├── model.skp..... SketchUp návrh
│       └── model.stl..... Vyexportovaný model
└── Softwarová část
    └── main.txt
```