



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## **AUTOMATICKÁ DETEKCE VYVÁZÁNÍ PLAVIDLA NA KOTEVNÍ BÓJI V SÍTÍCH LPWAN**

AUTOMATIC DETECTION OF A VESSEL MOORING AT AN ANCHOR BUOY IN LPWAN NETWORKS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Petr Kejík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.**

**BRNO 2023**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Petr Kejík

**ID:** 195355

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2022/23

## NÁZEV TÉMATU:

### **Automatická detekce uvázání plavidla na kotevní bóji v sítích LPWAN**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s problematikou komunikačních technologií LPWAN.
- 2) Vypracujte rešerši o této technologii se zaměřením na síť LoRa a NB-IoT.
- 3) Seznamte s postupem návrhu embedded systémů zvolené architektury mikrokontroléru. Prostudujte postup uvázování plavidel na kotevní bóji a zamyslete se nad způsobem detekce uvázání plavidla.
- 4) Pro danou aplikaci navrhnete blokové schéma zařízení umožňujícího automatickou detekci uvázání plavidla na kotevní bóji.
- 5) Vyberte vhodné komponenty a navrhnete zapojení mikrokontroléru, detekčního prvku a komunikačního modulu. Pro napájení uvažujte bateriový zdroj a alternativní nabíjení buď pomocí solárního panelu nebo jiného alternativního zdroje energie.
- 6) Navrhnete koncept mechanického řešení prototypu pro detekci uvázané lodi a pro navržené zapojení prototypu vytvoříte desku plošných spojů s možností osazení radiového modulu technologie LoRa i NB-IoT.
- 7) Realizujte prototyp zařízení a měřením v laboratoři změřte základní elektrické parametry související s provozem bóje. Prototyp zařízení otestujte.
- 8) Vyhodnoťte dosažené výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

SINHA, Rashmi Sharan, Yiqiao WEI a Seung-Hoon HWANG. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. ICT Express [online]. 2017, 3(1), 14-21 [cit. 2022-09-08]. ISSN 24059595. Dostupné z: doi:10.1016/j.ict.2017.03.004

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 17.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Miroslav Rujzl

**doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.**  
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**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou bezúdržbové jednotky pro detekci vyvázání plavidla ke kotvení bóji. Jednotka je napájena z baterie a s volitelnou možností napájení a dobíjení z alternativního zdroje v podobě solárního panelu. Pro bezdrátovou komunikaci jednotka využívá technologie LoRa a NB-IoT pracující v síti LPWAN. Při návrhu jednotky je kladen důraz na aspekty jako je bezúdržbový provoz, minimální spotřeba a možnost montáže na libovolný typ bóje. Práce se také zabývá mechanickým provedením zařízení a návrhem prototypu detekčního členu.

Práce vzniká ve spolupráci s firmou Netlia IoT s.r.o., která se zabývá hlavně zakázkovou výrobou zařízení s využitím chytrých senzorů a komunikačních technologií LPWAN.

## **Klíčová slova**

LPWA, LPWAN, LoRa, NB-IoT, IoT, Li-ion, Lithiová baterie, bóje, kotvení, řídicí jednotka, komunikační jednotka, mikrokontrolér, STM321071KZ

## **Abstract**

This Master's thesis deals with the design and construction of a maintenance-free unit for the detection of vessel mooring to an anchor buoy. The unit is powered by a battery with the possibility of running from another alternative source of power, in this particular case a solar panel. For wireless communication, the unit uses LoRa and NB-IoT technologies working in the LPWAN networks. During the designing phase, emphasis is placed on aspects such as maintenance-free duty, minimal consumption and the possibility of mounting on any type of buoy. The thesis also deals with the mechanical design of the device and design of the prototype of the detection element.

The work is created in a cooperation with Netlia IoT s.r.o., which mainly deals with the custom production of devices using smart sensors and LPWAN communication technologies.

## **Keywords**

LPWA, LPWAN, LoRa, NB-IoT, IoT, Li-ion, lithium battery, buoy, mooring, control unit, communication unit, microcontroller, STM321071KZ

## **Bibliografická citace**

KEJÍK, Petr. *Automatická detekce vyvážení plavidla na kotevní bóji v sítích LPWAN*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151769>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Lukáš Kopečný.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Bc. Petr Kejík</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>195355</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2022/23</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Automatická detekce vyvázání plavidla na kotevní bóji v sítích LPWAN</i>

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 jsem si 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.

V Brně dne: 16. května 2023

-----  
Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Lukášovi Kopečnému, Ph.D. za metodické vedení a trpělivost. Rovněž děkuji konzultantovi Ing. Miroslavovi Rujzlovi za přínosné konzultace a rady při návrhu a zpracování diplomové práce.

V Brně dne: 16. května 2023

-----  
Podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2. LPWA TECHNOLOGIE.....</b>	<b>11</b>
2.1 LoRA .....	12
2.2 NB-IoT .....	13
<b>3. VYVÁZÁNÍ LODĚ NA BÓJKU.....</b>	<b>14</b>
3.1 VÝBĚR BÓJKY .....	14
3.2 VYTAŽENÍ BÓJKY .....	14
3.3 VIZUÁLNÍ KONTROLA BÓJKY.....	15
3.4 VYVÁZÁNÍ.....	15
<b>4. KONCEPT NAVRHOVANÉHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>16</b>
<b>5. POPIS ZAPOJENÍ.....</b>	<b>18</b>
5.1 NAPÁJENÍ JEDNOTKY.....	18
5.1.1 <i>Primární způsob napájení.....</i>	<i>18</i>
5.1.2 <i>Sekundární způsob napájení .....</i>	<i>20</i>
5.1.3 <i>Sloučení napájecí sběrnice.....</i>	<i>24</i>
5.2 MIKROKONTROLÉR .....	25
5.3 MODULY A SENZORY.....	28
5.3.1 <i>GNSS modul.....</i>	<i>28</i>
5.3.2 <i>Akcelerometr a magnetometr .....</i>	<i>29</i>
5.3.3 <i>LoRaWAN modul .....</i>	<i>29</i>
5.3.4 <i>NB-IoT modul.....</i>	<i>30</i>
5.3.5 <i>Připojení antén.....</i>	<i>31</i>
5.4 OSTATNÍ PERIFÉRIE .....	33
5.4.1 <i>Připojení detekčního členu.....</i>	<i>33</i>
5.4.2 <i>Magnetodynamický bzučák .....</i>	<i>34</i>
5.4.3 <i>Tampery .....</i>	<i>34</i>
<b>6. NÁVRH A REALIZACE DPS.....</b>	<b>37</b>
<b>7. NÁVRH PŘÍSTROJOVÉ KRABICE .....</b>	<b>38</b>
7.1 NÁVRH.....	38
7.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH DÍLŮ.....	38
<b>8. NÁVRH A POPIS DETEKČNÍHO ČLENU .....</b>	<b>40</b>
<b>9. 3D TISK A VOLBA MATERIÁLU.....</b>	<b>42</b>
<b>10. MĚŘENÍ .....</b>	<b>43</b>
<b>11. ZÁVĚR.....</b>	<b>45</b>
LITERATURA.....	46
SEZNAM ZKRATEK .....	47

**SEZNAM PŘÍLOH..... 48**



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Vývoj počtu připojených zařízení [1] .....	12
Obrázek 4.1: Koncept zařízení .....	16
Obrázek 5.1: Blokové schéma řídicí a komunikační jednotky .....	18
Obrázek 5.2: Schéma zapojení primárního způsobu napájení .....	19
Obrázek 5.3: Schéma zapojení sekundárního způsobu napájení .....	23
Obrázek 5.4: Schéma zapojení prvků na napájecí sběrnici .....	24
Obrázek 5.5: Schéma zapojení mikrokontroléru, prog. konektoru a reset tlačítek .....	27
Obrázek 5.6: Schéma zapojení expandéru I/O portů .....	28
Obrázek 5.7: Schéma zapojení GNSS modulu .....	29
Obrázek 5.8: Schéma zapojení LoRaWAN modulu .....	30
Obrázek 5.9: Schéma zapojení akcelerometru a magnetometru .....	30
Obrázek 5.10: Schéma zapojení NB-IoT modulu .....	32
Obrázek 5.11: Schéma zapojení anténního připojení .....	33
Obrázek 5.12: Schéma připojení detekčního členu .....	35
Obrázek 5.13: Schéma zapojení bzučáku .....	35
Obrázek 5.14: Schéma zapojení tamperů .....	36
Obrázek 6.1: Rozvržení komponent na DPS .....	37
Obrázek 7.1: Vytvořený model přístrojové krabice .....	39
Obrázek 8.1: Vizualizace celého detekčního členu .....	41
Obrázek 8.2: Vizualizace jednotlivých částí detekčního členu .....	41
Obrázek 10.1: Časový průběh vstupního proudu .....	44
Obrázek 11.1: Měřicí pracoviště .....	53
Obrázek 11.2: Pohled na DPS z horní strany .....	53
Obrázek 11.3: Jednotka v přístrojové krabici .....	54
Obrázek 11.4: Podhled na DPS ze spodní strany .....	54

# 1. ÚVOD

Cílem této diplomové práce je návrh a výroba bezúdržbové jednotky pro detekci vyvázání plavidla na kotevní bóji, která bude napájena z baterie. Jednotka bude mít možnost napájení z jiného alternativního zdroje, jako je na příklad externí solární panel. Zároveň by také měla být navržena, aby ji bylo možné namontovat či jinak uchytit na různé typy bójí.

Bezúdržbový chod zařízení je myšlen ve smyslu dlouhé výdrže baterie bez nutnosti její výměny, kde tedy klíčovou podmínkou je nízká celková spotřeba. Další důležitou vlastností je vzdálená komunikace se zařízením pro vyčítání zakotvení lodě a dalších parametrů stavu jednotky. Kotevní bóje jsou běžně rozmístěny v rozsáhlých zálivech, kde je vyžadováno spojení na delší vzdálenosti (cca 3 km), přitom množství přenášených dat je minimální. Ve spojení s nízkou spotřebou zařízení a dle zadání práce budou pro tento účel využity komunikační sítě LPWAN (Low-Power Wide-Area Networks).

Práce zahrnuje vytvoření obecného konceptu a navržení způsobu detekce vyvázání plavidla ke kotevní bóji. Následně je třeba v souladu s konceptem vytvořit konkrétní řešení a to realizovat. Samotná realizace obnáší návrh schéma zapojení, výrobu a osazení DPS, vytvoření softwaru a provedení testování. Součástí práce je i návrh přístrojové krabice a jiných prototypových mechanických částí.

Diplomová práce vzniká ve spolupráci s firmou Netlia IoT s.r.o., pro kterou pracuji jako návrhář zapojení a DPS. Jedná se o začínající firmu („start-up“), která se zabývá hlavně zakázkovou výrobou zařízení s využitím chytrých senzorů a komunikačních technologií LPWAN. Mezi další produkty patří zpracování a analýza dat, vývoj uživatelských aplikací atd.

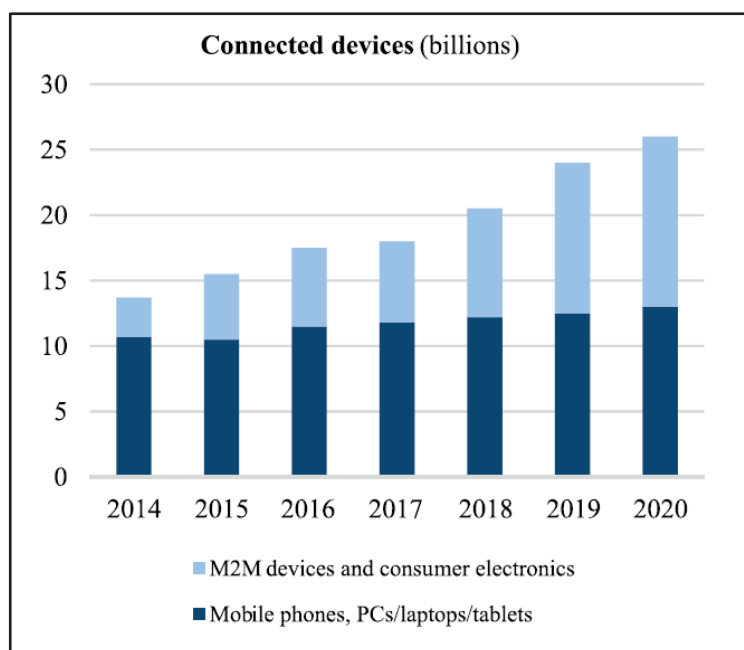
Prvotní motivaci pro návrh zařízení jsem získal při plavbě na pronajaté plachetnici během dovolené v Chorvatsku, kde jsem pochopil úskalí manuální kontroly využívání kotevních bójí ze strany provozovatele. Po průzkumu trhu, kde jsem nenašel žádné komerčně dostupné řešení, jsem se rozhodl zařízení navrhnout v rámci své diplomové práce s vizí možné komercializace ve spolupráci s firmou Netlia IoT s.r.o. Vzhledem k tomu, že nelze očekávat, že by prototyp byl dokonalý bude výrobek sekundárně využit jako platforma pro vývoj firmwarů ve spojení s osazenými perifériemi (expandér I/O portů, GNSS modul, akcelerometr, magnetometr atd.).

## 2. LPWA TECHNOLOGIE

V této kapitole je teoreticky rozebrán a popsán koncept sítě LPWA (Low-Power Wide Area) a následně jsou popsány některé technologie využívané při vytvoření navrhovaného zařízení. Používané technologie se nejčastěji dělí do dvou velkých skupin dle pásma. Pro bezlicenční pásmo to jsou technologie LoRa a Sigfox. V licencovaném pásmu jsou největšími zástupci technologie NB-IoT a LTE-M.

V současné době ve světě prudce stoupá počet přenosných „chytrých“ zařízení. Většina těchto zařízení vyžaduje nějakou formu bezdrátového připojení k internetu a jejich propojování do rozsáhlejších kooperujících celků vede k rapidnímu rozvoji tzv. IoT (Internet of Things). Tyto požadavky vyvíjejí tlak na vývoj komunikačních technologií s dostatečně širokou oblastí pokrytí (až 30 km) a se schopností zvládnout komunikaci s vysokým počtem zařízení v jeden okamžik. Dále je vyžadován spolehlivý přenos dat v řádu desítek b/s s nízkou spotřebou energie pro dlouhou výdrž zařízení napájených z baterií. Podmínkou je také funkčnost na místech, kde dnešní moderní mobilní sítě GSM a LTE nemají pokrytí, nebo nemají dostatečnou kapacitu pro velký počet zařízení. Z tohoto důvodu byla v roce 2015 poprvé na trh uvedena LPWA technologie.

Soubory. uvádí projekci předpokládaného vývoje připojených M2M a ostatních zařízení.[1] [2]



Obrázek 2.1: Vývoj počtu připojených zařízení [1]

## 2.1 LoRa

LoRa je v současné době nová síťová technologie, která operuje v nelicencovaném pásmu pod 1 GHz, v závislosti na regionu. V Evropě LoRa operuje v pásmu 867-869 MHz. Tuto technologii spravuje LoRa Alliance, což je sdružení několika průmyslových firem, které zajišťují standardizaci.[1][2]

## **2.2 NB-IoT**

NB-IoT je rovněž nová technologie, která definována v 3GPP vydání 13 a je specificky určena pro komunikaci IoT zařízení. Technologie je založena na standardu LTE a využívá jeho fyzickou vrstvu i vyšších protokolů pro snadnou a efektivní standardizaci produktu. NB-IoT operuje v úzkých pásmech širšího spektra sítí LTE a GSM v závislosti na regionu.[1]

### 3. VYVÁZÁNÍ LODĚ NA BÓJKU

V této části je nastíněn obecný postup při vyvazování plavidla ke kotevní bóji. Stání na bóji se mezi kapitány považuje za jeden z nejlepších a nejpohodlnějších způsobů, jak zakotvit loď v zátocě. Jednou z výhod je většinou ekonomická stránka, kdy stání na bóji stojí méně peněz než uvázání lodě u mola v maríně. Alternativou je zakotvení lodě pomocí své vlastní kotvy. Tento způsob je však náročnější a přináší svá rizika, jako je například utržení špatně zaklesnuté kotvy. Stání na bóji rovněž poskytuje jisté soukromí, kdy jsou lodě od sebe více vzdálené než lodě na mole. Na druhou stranu stání v maríně poskytuje větší komfort z hlediska sanitárního zařízení, obchodů, restaurací, atd. Nevýhodou může být i samotný stav bójky (např. špatný stav kotevního lana). Proto je při vyvázání lodě na bójku potřeba dodržovat jisté zásady a postupy.[3]

#### 3.1 Výběr bójky

V první řadě je potřeba obhlédnout vybranou zátoku a rozmístění bójí. Musí se vybrat bóje kolem, které je dostatečný prostor vzhledem k velikosti plavidla. Je třeba počítat s tím, že plavidlo se bude kolem místa uchycení bóje stáčet v určitém okruhu v závislosti na délce kotevního lana, úvazu lodě, délky lodě a větru. Rovněž ne každá bóje je určena k vyvázání lodě. Některé slouží například rybářům k uchycení klecí či sítí a nejsou nijak kotveny. Na tento typ bójky se loď nevyvazuje. Jiné bóje jsou zase blíže ke břehu a kotveny v malé hloubce. Tyto bójky jsou většinou kotveny do menších betonových bloků a slouží pro vyvázání menších motorových člunů.[3]

#### 3.2 Vytažení bójky

K vytažení bóje se používá mooringový háček, kterým se bóje vytáhne z vody za kovové oko na horní části. Na chytání bóje je několik způsobů. Jedním ze způsobů je vytažení bóje přes zád' lodě. Tento způsob může být jednodušší, neboť zád' je běžně níže k hladině vody a je možné jej zvládnout i v jedné osobě. Po zachycení a vytažení bóje je třeba s ní přejít podél lodě na příď'. U této metody však hrozí nebezpečí namotání kotevního lana od bóje do lodního šroubu.[3]

Preferovanější způsob je chytání bóje přes příď', při kterém je ovšem potřeba více osob a trup lodí to musí umožňovat. Ideální je, když jsou na přídi 2 lidé. Jeden, který se stará o zachycení a vytažení bójky a druhý mu může případně pomoci, když je kotevní lano moc napnuté, nebo je příď' vysoká. V neposlední řadě je potřeba komunikovat s kormidelníkem a navádět ho na přiblížení k bóji, kterou přes loď nemůže vidět. Následně se loď vyváže k bóji.[3]

### **3.3 Vizuální kontrola bójky**

Před provedením úvazu je vhodné zkontrolovat celkový stav bóje. Běžně se stává, že nová bóje je uchycena ke kotevnímu lanu ve špatném stavu a pochybné pevnosti. Problém může být i níže u betonového bloku na dně. Pokud to situace dovoluje je nejlepší se potopit pod vodu a přesvědčit se o stavu zbytku kotevního lana na vlastní oči.[3]

### **3.4 Vyvázání**

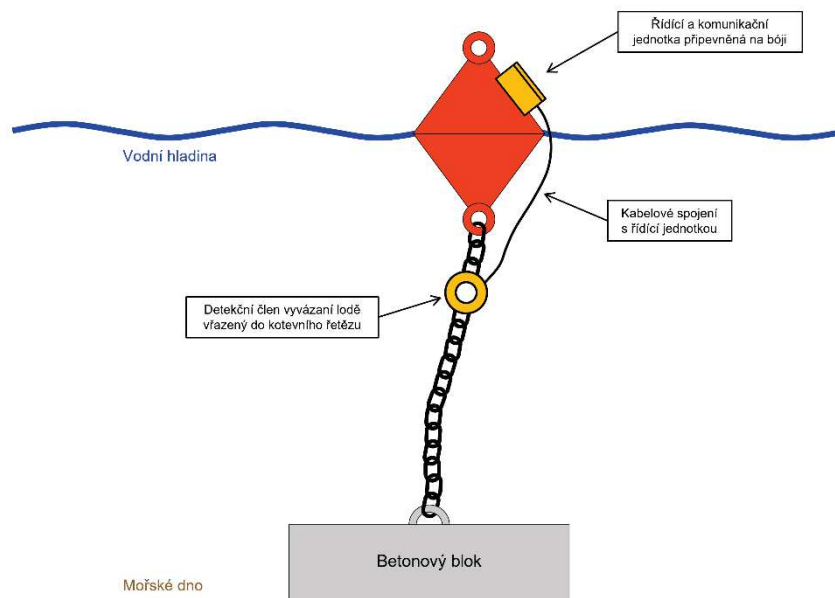
K vyvázání se používá přední mooringové lano, které je přivázané k vazáku. Lano se provleče skrze oko pod bóji a druhý konec se opět přiváže za vazák. Mooringové lano by nemělo být napnuté a bóje by neměla být příliš blízko trupu lodi. Pro uvázání lana k vazáku se používá několik různých způsobů, kde nejčastější je dračí smyčka v kombinaci s liščí smyčkou nebo knakovacím vazákovým uzlem.[3]

## 4. KONCEPT NAVRHOVANÉHO ZAŘÍZENÍ

Jedním ze základních aspektů návrhu byla univerzálnost pro možnost aplikace systému na stávající kotevní bóje různých typů. Toto vedlo k vytvoření externí jednotky, kterou je možné namontovat z venku na horní stanů bóje, namísto vytvoření celé bóje se zakomponovanou jednotkou a detektorem uvnitř. Toto provedení a už jen samotná podstata způsobu vyvázání plavidla vedlo k vytvoření separátního podvodního členu pro detekci vyvázání lodě. Ilustrace celého konceptu provedení je k uvedena na Obrázek 4.1.

Člen je navržen robustně bez složité elektroniky a mechanismů. Pro správnou funkci člen spoléhá na provlečení vázacího lana skrze něj. Může se však vyskytnou situace, kdy uživatel neprovleče lano skrze člen, ale skrze jiné oko kotevního řetězu či bóje. Pro tyto případy je v řídicí jednotce obsažen akcelerometr pro zpřesnění detekce a další doplňující využití, jako je třeba detekce vytažení bóje z vody.

Další vlastností, na kterou byl kladen důraz byl bezúdržbový provoz s vysokou výdrží baterie. Z tohoto důvodu je jednotka navržena s ohledem na malý odběr vhodným výběrem komponent. Většina komponent při klidovém stavu bude provozována v úsporném režimu. Primární napájení vychází z požadavků firmy a je uskutečněno v podobě jednoho článku lithiové baterie typu CR123A o kapacitě 1500 mAh. Jednotka obsahuje i alternativní způsob napájení v podobě jednoho článku Li-ion baterie o kapacitě přibližně 2000 mAh (kapacita může být větší v závislosti na článku). Při napájení z Li-ion článku je pak možné tento článek dobít z připojeného solární panelu přes měnič využívající metodu MPPT.



Obrázek 4.1: Koncept zařízení

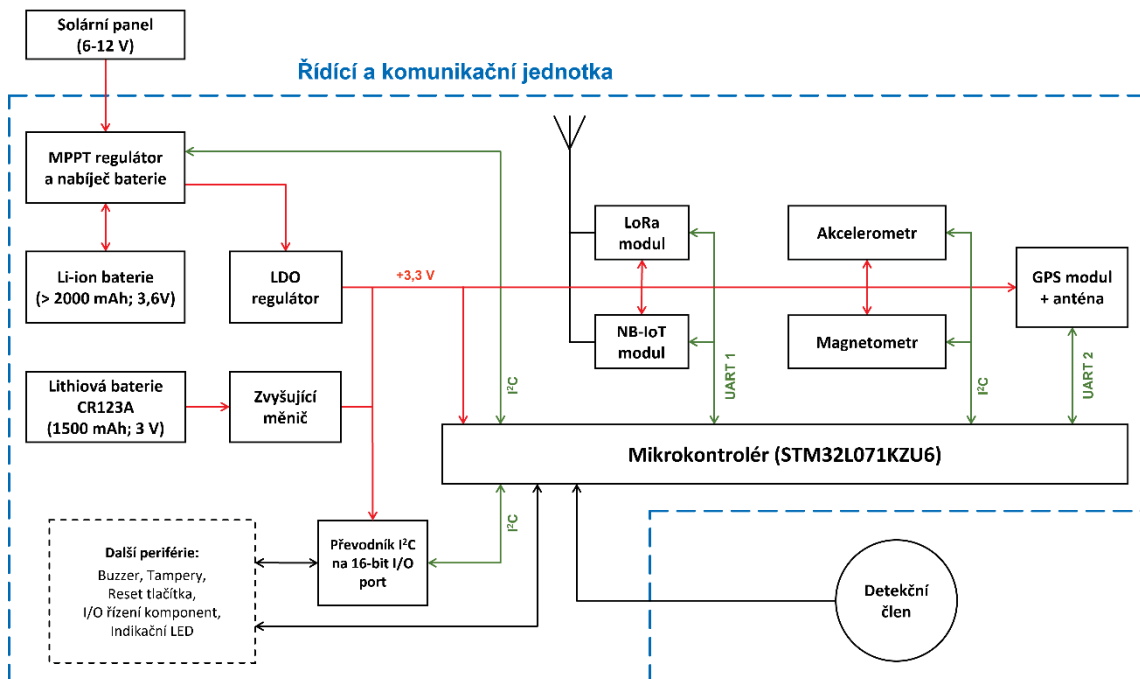


Komunikace s jednotkou bude probíhat přes LPWAN sítě, které se vyznačují nízkou spotřebou při pokrytí relativně velké oblasti. Jednotka umožňuje využití technologie LoRa provozované ve volném pásmu nebo NB-IoT provozovanou v placeném licencovaném pásmě.

Koncept systému do budoucnosti počítá s dalším rozšířením funkcí a celkovým zlepšením konceptu. Plánuje se rozšíření systému o funkci Bluetooth ve spojení s elektronickou platbou.

## 5. POPIS ZAPOJENÍ

Následující kapitola podrobně rozebírá zapojení a popisuje funkce jednotlivých částí hlavní řídicí a komunikační jednotky. Popis vychází z jednotlivých funkčních celků, které jsou uvedeny v blokovém schéma zapojení (Obrázek 5.1).



Obrázek 5.1: Blokové schéma řídicí a komunikační jednotky

### 5.1 Napájení jednotky

Jednotka je koncipována pro bezúdržbový provoz z baterie s nízkým odběrem. Napájení je však rozděleno na dva separátní vstupy, kdy je možné použít jiné typy článků. Využita bude vždy pouze jedna možnost a součástky pro druhý způsob napájení nebudou na pozicích osazeny.

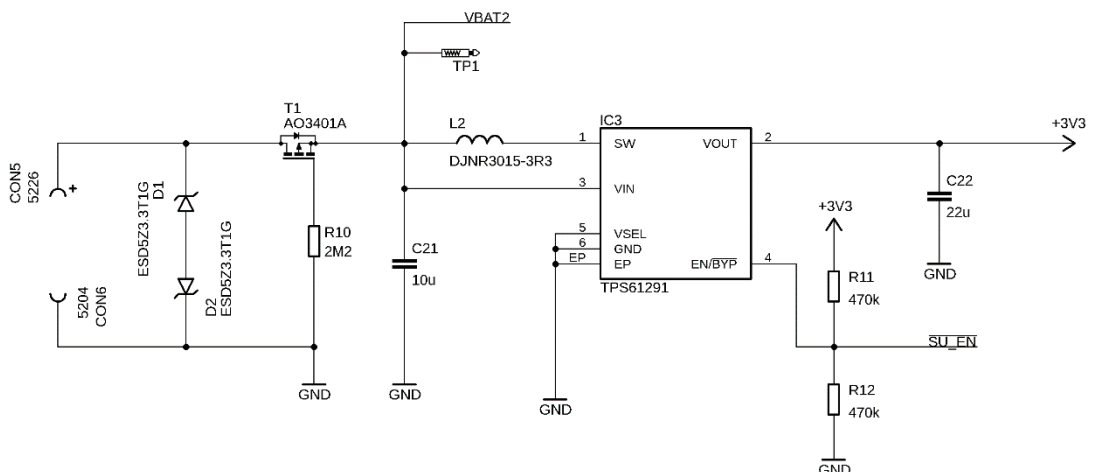
#### 5.1.1 Primární způsob napájení

Hlavním zamýšleným způsobem napájení je lithiová baterie typu CR123A s celkovou kapacitou 1500 mAh poskytující napětí o velikosti 3 V. Tato baterie je uzpůsobena pro přímé napájení nízkonapěťových zařízení s dlouhou životností. Napěťová úroveň 3 V je dostatečná pro provoz hlavního mikrokontroléru IC4 a udržení interního stavu periférií za předpokladu, že jsou nečinné. Nicméně tato napěťová úroveň je nedostatečná pro provoz komunikačních modulů a GNSS (vyžadují striktně 3,3 V). Z tohoto důvodu je napájení z baterie přivedeno na ovládatelný zvyšující měnič IC3 (TPS64291) s pevným výstupem a funkcí překlenutí (bypass) ve vypnutém stavu. Vstupní napájení z baterie je přivedeno přes hlavní cívku L2 o hodnotě 3,3  $\mu$ H na spínací vstup IC3 v souladu

s příslušným datovým listem [4]. Při výběru cívky je třeba uvažovat její maximální proudové zatížení. Přibližná hodnota protékajícího proudu cívkou pro maximální výstupní proud daného měniče vyplývá ze vztahu (5.1). dle datového listu [4]. Dále je doporučeno cívku nadhodnotit pro saturační proud, který dle datového listu [4] může dosáhnout až 1 A. Měnič je také opatřen vstupní kapacitou C21 o hodnotě 10  $\mu\text{F}$  a výstupní kapacitou C22 o hodnotě 22  $\mu\text{F}$  dle doporučení datového listu. Činnost měniče IC3 je řízena napětovou úrovní přiváděnou na pin 4, kdy logická úroveň 1 značí zapnutí zvyšujícího měniče, zatímco logická úroveň 0 uvede IC3 do stavu nízké spotřeby a přemostí napájení ze vstupu na výstup s minimálním úbytkem napětí. Tento vstup je připojen na obecný I/O pin mikrokontroléru IC4, který bude aktivně zapínat funkci zvyšování napětí pouze na nezbytně krátkou dobu potřebnou pro práci s perifériemi. Návrh DPS uvažuje osazení buď pull-up nebo pull-down rezistoru (R11 nebo R12) v závislosti na požadovaném výchozím stavu měniče a režimu práce s I/O pinu mikrokontroléru. Mezi baterií a vstup měniče je vložen obvod chránící zařízení proti přepětí (D1 a D2) a prepólování vlivem obráceně vložené baterie (T1 a R10). Výstup měniče je pak přiveden na společnou napájecí sběrnici.

$$I_{L(max)} = \frac{U_{out} \cdot I_{out}}{0,8 \cdot U_{in}} + 0,15 = \frac{3,3 \cdot 0,25}{0,8 \cdot 3} + 0,15 = 0,494 \text{ A} \quad (5.1)$$

$I_{L2(max)}$	...	Maximální protékající proud cívkou L2 [A]
$U_{out}$	...	Výstupní napětí měniče IC3 [V]
$I_{out}$	...	Maximální výstupní proud měniče IC3 [A]
$U_{in}$	...	Vstupní napětí měniče IC3 [V]



Obrázek 5.2: Schéma zapojení primárního způsobu napájení

### 5.1.2 Sekundární způsob napájení

Přestože primární způsob napájení představuje jednoduchou a ve firmě Netlia IoT s.r.o. dobře otestovanou metodu napájení, použití technologie v bójích přináší specifické okolnosti. Na jednu stranu nejsou bóje pohotově přístupné a navíc obsahují větší množství periferních obvodů s vyšší očekávanou spotřebou energie. Na druhou stranu lze očekávat, že bóje bude vystavena velkému množství slunečního svitu (provoz v jižních oblastech a v průběhu letní sezóny). V této situaci se nabízí provoz z akumulátoru s dobíjením ze solárního panelu.

V této variantě je napájení přiváděno z Li-ion článku s nominálním napětím 3,6 V (maximálně 4,2 V) přes interní spínače regulátoru nabíjení IC1 na snižující lineární LDO regulátor IC2, který trvale poskytuje regulovanou úroveň 3,3 V na hlavní napájecí sběrnici. IC2 je opatřen filtračními kapacitami C19 a C20 v souladu s datovým listem [5]. Dobíjení článku je realizováno pomocí spínaného regulátoru s funkcí MPPT pro dosažení maximálního zisku energie (plocha panelu je limitována). Při návrhu je obecně předpokládáno, že napětí ze solárního panelu je vyšší než napětí baterie a IC1 bude pracovat v režimu snižujícího měniče (buck). Neregulované napětí ze solárního panelu (až 30 V) je přiváděno z konektoru CON1 přes zásobní kapacity C2 a C4 (10  $\mu$ F) a filtrační kapacity C6 a C8 (100 nF) na vstup IC1. Regulátor IC1 pak interně využívá kapacitu tvořenou kondenzátory C1, C3, C5 a C7 jako hlavní vstupní kapacitu spínaného měniče tvořeného dále hlavní pracovní indukčností L1 a výstupní kapacitou C15, C16, C17 a C18. Rezistor R1 slouží pro nastavení kombinace počtu článků a spínací frekvence měniče. V této aplikaci (1 článek) se dle datového listu [6] nabízí hodnoty 3,0 k $\Omega$  pro frekvenci 1,5 MHz a 4,7 k $\Omega$  pro frekvenci 750 kHz, což by příslušně vyžadovalo pracovní indukčnost o velikosti 1 nebo 2,2  $\mu$ H. Vzhledem k tomu, že velikost pouzdra cívky L1 není z hlediska DPS faktorem, je preferována spínací frekvence 750 kHz z důvodu nižších spínacích ztrát, nižšího vyzařování a obecně větší tolerance k fyzickému provedení DPS vzhledem k nežádoucím vlivům skin efektu a parazitních kapacit/indukčností. Z bezpečnostní a designových důvodů je vstupní proud do měniče omezen na hodnotu 1 A pomocí jeho interní funkce (nastaveno děličem napětí R3/R4 na základě výpočtu dle rovnice (5.3) z datového listu [6]). Tímto je automaticky zaručeno, že nabíjecí proud do baterie nepřesáhne tuto hodnotu. Za těchto podmínek a za předpokladu činnosti v režimu snižujícího měniče bylo odhadnuto proudové zvlnění na pracovní cívce L1 na základě vztahu (5.4) na 1,27 A pro nejhorší situaci. Tato situace nastává, když výstupní napětí je polovina vstupního při maximální hodnotě těchto napětí. V rámci tohoto řešení se jedná o stav maximálního nabití článku (4,2 V) při současném vstupním napětí 8,4 V ze solárního panelu. Dle vztah (5.5) by pak maximální proud cívkou za provozu neměl přesáhnout 1,63 A. Zvolená cívka má udávaný saturační proud 5,10 A, je tedy více než 3x nadhodnocena. Nakonec byla na základě kritéria maximálního zvlnění výstupu (50 mV) při nejhorší situaci dle vztahu (5.6) zvolena hodnota výstupní kapacity C15–C18 na přibližnou hodnotu 30  $\mu$ F.

$$U_{R4} = \frac{U_{REGN}}{R_3 + R_4} \cdot R_4 = \frac{4,8}{200 + 120} \cdot 120 = 1,8 V \quad (5.2)$$

$$I_{lim} = \frac{U_{R4} - 1}{0,8} = \frac{1,8 - 1}{0,8} = 1 A \quad (5.3)$$

$U_{R4}$	...	Úbytek napětí na rezistoru R4 [V]
$U_{REGN}$	...	Výstupní napětí interního LDO lin. regulátoru IC1 [V]
$R_3$	...	Hodnota rezistoru R3 [kΩ]
$R_4$	...	Hodnota rezistoru R4 [kΩ]
$I_{lim}$	...	Nastavený limit vstupního proudu regulátoru IC1 [A]

$$I_{ripple} = \frac{U_{sys} \cdot (U_{bus} - U_{sys})}{U_{sys} \cdot f_{sw} \cdot L_1} = \frac{4,2 \cdot (8,4 - 4,2)}{8,4 \cdot 750 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 1,27 A \quad (5.4)$$

$$I_{max} = I_{in} + \frac{I_{ripple}}{2} = 1,0 + \frac{1,27}{2} = 1,63 A \quad (5.5)$$

$I_{ripple}$	...	Proudové zvlnění na pracovní cívce L1 [A]
$U_{sys}$	...	Výstupní napětí regulátoru IC1 [V]
$U_{bus}$	...	Napětí na vstupu regulátoru IC1 [V]
$f_{sw}$	...	Spínací frekvence regulátoru IC1 [Hz]
$L_1$	...	Indukčnost pracovní cívky L1 [H]
$I_{max}$	...	Maximální protékající proud pracovní cívkou L1 [A]
$I_{in}$	...	Maximální (omezený) vstupní proud regulátoru IC1 [A]

$$C_{out} = \frac{I_{in} \cdot D}{\Delta U \cdot f_{sw}} = \frac{1,0 \cdot 1,0}{0,05 \cdot 750 \cdot 10^3} = 26,6 \cdot 10^{-6} F \quad (5.6)$$

$C_{out}$	...	Celková velikost výstupní kapacity [F]
$I_{in}$	...	Maximální vstupní proud [A]
$D$	...	Střída spínání [-]
$\Delta U$	...	Maximální zvlnění výstupního napětí [V]
$f_{sw}$	...	Spínací frekvence regulátoru IC1 [Hz]

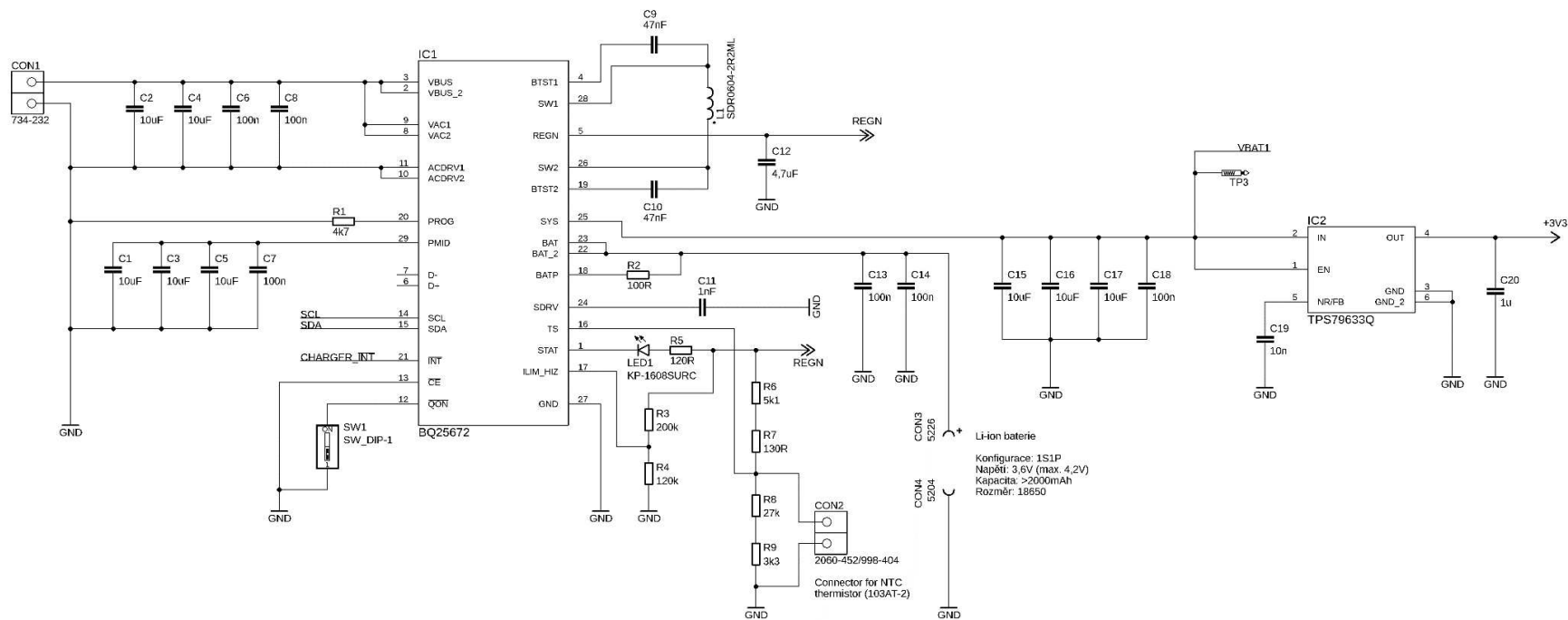
Pro bezpečnost regulátor IC1 poskytuje možnost monitorování teploty baterie pomocí připojeného externího NTC termistoru. Teplotní limity jsou určeny pomocí děliče napětí, přes který je daný termistor připojen na měřící vstup regulátoru. Pro doporučený NTC termistor typu 103AT-2 [6] je výchozí nastavení rezistorů děliče 5,24 kΩ ku 31,31 kΩ pro teplotní rozsah -10 a 60 °C. Hodnoty určených rezistorů nejsou standartní, proto jsou aproximovány sériovou kombinací rezistorů R6 + R7 a R8 + R9. Termistor se připojuje pomocí konektoru CON2.

Pro indikaci různých stavů nabíjení využívá regulátor IC1 externí LED diodu LED1 připojenou k výstupu interního LDO lineárního regulátoru přes sériový rezistor R5 s hodnotou 120 Ω (zvolena nejbližší hodnota k vypočítané (5.7)).

$$R_5 = \frac{U_{REGN} - U_{LED1}}{I_{LED1}} = \frac{4,8 - 2,5}{0,02} = 115 \Omega \quad (5.7)$$

$R_5$	...	<i>Vypočítaná hodnota rezistoru R5 [Ω]</i>
$U_{REGN}$	...	<i>Výstupní napětí interního LDO lin. regulátoru IC1 [V]</i>
$U_{LED1}$	...	<i>Úbytek napětí na použité LED diodě [V]</i>
$I_{LED1}$	...	<i>Proud protékající LED diodou [A]</i>

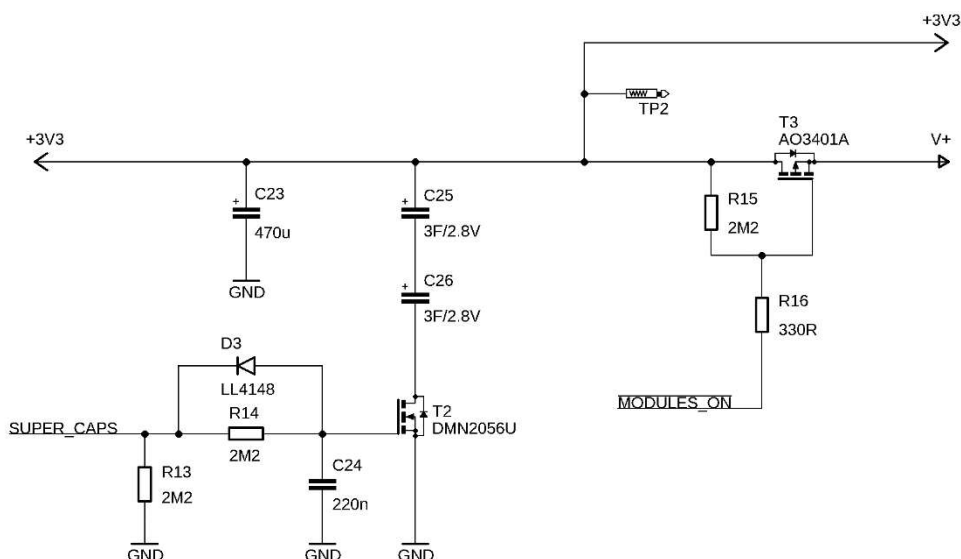
Dále je regulátor IC1 doplněn o podpůrné součástky s fixními hodnotami dle datového listu: kondenzátory C9 a C10 pro buzení interních tranzistorů, R2 pro měření napětí baterie a blokační kondenzátory C11, C12, C13 a C14. Regulátor IC1 navíc podporuje režim transportu (shipping mode), kdy je měnič deaktivován a baterie interně odpojena od zbytku zařízení. Tím lze efektivně dosáhnout vypnutí a nulové spotřeby zařízení. Tento režim je aktivován připojením pin QON na stav logická 0 přes přepínač SW1 na DPS. Regulátor IC3 podporuje mnoho dalších funkcí, které lze ovládat prostřednictvím I<sup>2</sup>C sběrnice a signálu přerušení mikrokontrolérem IC4.



Obrázek 5.3: Schéma zapojení sekundárního způsobu napájení

### 5.1.3 Sloučení napájecí sběrnice

Jelikož všechny komponenty jednotky pracují s napájecí úrovní 3,3 V, jsou výstupy ze zvyšujícího měniče IC3 a LDO lineárního regulátoru IC2 (vždy osazena pouze jedna varianta napájení) sloučeny na jednu společnou napájecí sběrnici. Za těmito obvody se nachází hlavní napájecí kapacita C23 o hodnotě 470  $\mu$ F. Dále jsou zařazené dva sériově zapojené superkondenzátory C25 a C26 s celkovou kapacitou 1,5 F. Tyto superkondenzátory jsou nezbytné v případě osazení desky NB-IoT modulem IC8, který při vysílání zprávy má na krátkou chvíli vysoký odběr a jinak by přetížil napájecí sběrnici. Superkondenzátory slouží pro vykompenzování této nárazové spotřeby. Jako vedlejší důsledek by při počáteční energizaci celého zařízení mohlo dojít k přetížení napájecí sběrnice v důsledku nabíjení této velké kapacity. Proto jsou superkondenzátory spínány přes tranzistor T2 v záporné větvi až po naběhnutí zařízení a s využitím pomalého průchodu přes rezistivní oblast tranzistoru pro utlumení. Gate tranzistoru je spínán logickou úrovní 1 mikrokontrolérem IC4 přes RC článek R14/C24 s časovou konstantou 0,48 s. Odpojení superkondenzátorů probíhá signálem logická 0 rychle díky přemostění rezistoru R14 diodou D3. Pull-down rezistor R13 pak zajišťuje, že superkondenzátory jsou ve výchozím stavu odpojené. Napájení energeticky náročných modulů (GNSS modul IC7, NB-IoT modul IC8 a LoRaWAN modul IC9), které vykazují značnou spotřebu v klidovém stavu, je odděleno a spínáno přes tranzistor T3 s pomocnými rezistory R15 a R16. Předpokládá se, že tyto moduly budou napájeny je po nezbytnou dobu.



Obrázek 5.4: Schéma zapojení prvků na napájecí sběrnici



## 5.2 Mikrokontrolér

Hlavním řídicím prvkem jednotky je 32-bitový ARM Cortex-M0 mikrokontrolér IC4 (STM32L071KU6), ve kterém poběží hlavní firmware zařízení zodpovědný za komunikaci s moduly, měření napětí, indikaci stavů a ovládání dalších komponent. Zvolený mikrokontrolér se vyznačuje nízkou spotřebou pro použití v podobných nízkoeenergetických zařízeních, avšak poskytuje dobrý výpočetní výkon a široké spektrum zabudovaných interních periférií včetně hodin reálného času (RTC).

Mikrokontrolér IC4 je napájen napětím 3,0–3,3 V z hlavní napájecí sběrnice. Napájení digitální části je opatřeno odrušovací kondenzátory C29, C30 a C31 o hodnotě 100 nF. Napájení analogové části je realizováno obdobně s odrušovacím kondenzátorem C34. Stabilita napájení je lokálně posílena kondenzátorů C27 a C28 o hodnotě 10  $\mu$ F. Uvedené hodnoty součástek byly převzaty dle doporučení z datového listu [1].

Mikrokontrolér je opatřen externím krystalem XTAL1 s pracovní frekvencí 32,768 kHz pro interní oscilátor RTC periférie. Krystal je doplněn o kondenzátory C38 a C39 s hodnotou 15 pF. Zapojení a hodnoty kondenzátorů vychází z datového listu [1], kdy se kondenzátory doporučuje volit v rozmezí 5-25 pF v závislosti na použitém krystalu.

K mikrokontroléru je připojen konektor CON7, který je využit pro programování prostřednictvím rozhraní USART. Konektor obsahuje potřebné signály RX, TX, BOOT0, NRST, +3,3 V a GND. Konektor také umožňuje interaktivní ladění programu skrze rozhraní SWD, díky vyvedeným signálům SWDIO a SWCLK. Signál BOOT0 má připojený pull-down rezistor, neboť úroveň logické 1 volí zavádění interního bootloaderu pro režim programování. K signálu NRST je také připojeno tlačítko BT2 pro manuální vyvolání HW resetu. Kondenzátor C32 s hodnotou 100 nF je připojen pro tlumení záskmitů tlačítka. Podobným způsobem je na jeden z pinů připojeno druhé tlačítko BT1 pro vyvolání SW resetu.

Jednou z důležitých činností, kterou mikrokontrolér provádí je měření napětí na obou typech baterií. Napětí z baterií je přivedeno přes rezistory R23 a R24 (3,3 k $\Omega$ ) na vstupy ADC. Rezistory mají bezpečnostní funkci, kdy zamezují vzniku zkratu při nechtěném nakonfigurování příslušných pinů jako výstupů.

Kromě spínání různých komponent, mikrokontrolér obstarává komunikaci s moduly pomocí dvou rozhraní UART. Jedno rozhraní UART je využito pro GNSS modul, druhé rozhraní UART slouží pro komunikaci s osazeným typem modulu pro bezdrátovou komunikaci (LoRa nebo NB-IoT) v závislosti na využitých variantě.

Komunikace s ostatními senzory a čipy je realizována přes sběrnici I<sup>2</sup>C. Jedním z těchto čipů je I/O expandér IC5 (PCF8575), který poskytuje dodatečných 16 I/O portů. Toto řešení vyplývá z nedostatku ovládacích pinů na hlavním mikrokontroléru, protože z důvodu skladových zásob firmy Netlia IoT s.r.o. bylo žádoucí použít variantu s 32 pinovým pouzdem. Expandér I/O je schopen pracovat i při napájení 3,0 V a jeho vstup je opatřen sérií odrušovacích kondenzátorů C33, C35, C36 a C37 s hodnotami 4,7  $\mu$ F, 100 nF, 100 pF a 22 pF. Sběrnice I<sup>2</sup>C je vztažena k hlavní napájecí sběrnici 3,3 V přes

pull-up rezistory R21 a R22. Hodnoty pull-up rezistorů byly vypočítány dle vztahů uvedených v datovém listu pro expandér PCF8475 [7]. Minimální hodnota pull-up rezistorů je určena napájecím napětím expandéru, maximálním hraničním napětím úrovně logické 0 a proudem při logické 0. Dle datového listu je při napájecím napětí 3,3 V hraniční napětí 0,4 V a proud vychází na 3 mA. Celý výpočet je proveden v rovnici (5.8).

$$R_{p(min)} = \frac{U_{cc} - U_{OL(max)}}{I_{OL}} = \frac{3,3 - 0,4}{0,003} = 966,66 \Omega \quad (5.8)$$

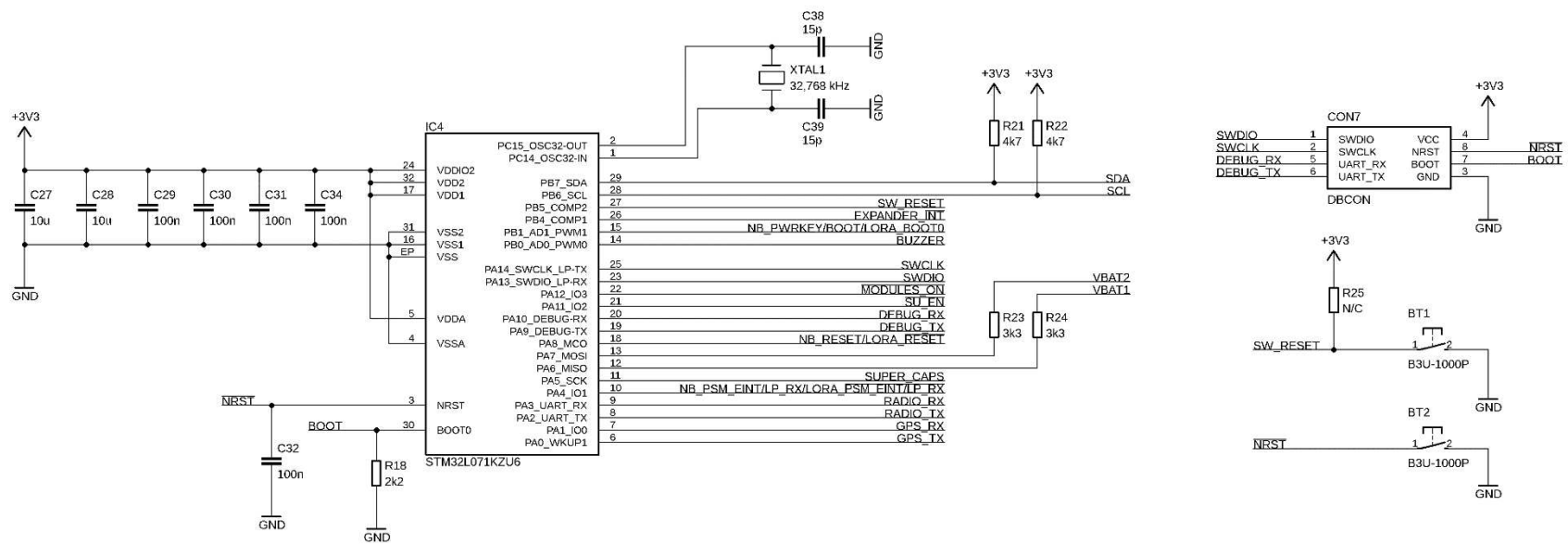
$R_{p(min)}$	...	Minimální hodnota pull-up rezistorů [ $\Omega$ ]
$U_{cc}$	...	Napájecí napětí expandéru IC5 [V]
$U_{OL(max)}$	...	Maximální hraniční napětí logické 0 [V]
$I_{OL}$	...	Proud při logické 0 [A]

Maximální hodnota pull-up rezistorů závisí na době vzestupné hrany a kapacitě I<sup>2</sup>C sběrnice. Dle datového listu [7] je při standartním módu (pracovní frekvence 100 kHz) maximální doba vzestupné hrany 1  $\mu$ s. Kapacitu I<sup>2</sup>C nelze jednoduše určit a je třeba ji aproximovat sečtením jednotlivých dílčích kapacit. Do celkového součtu přispívá každý připojený logický obvod a je třeba započítat i kapacitu samotné sběrnice. Bohužel u některých komponent se v datových listech nepodařilo dohledat konkrétní kapacity a byly uvedeny pouze doporučené velikosti pull-up rezistorů. Lze odhadnout, že hodnota se bude pohybovat v řádu desítek pF. Pro získání rezervy byl výpočet proveden s hodnotou 100 pF. Navíc dle datového listu [7] hodnota kapacity nesmí za žádných okolností převýšit 400 pF. Výpočet maximální hodnoty pull-up rezistorů je proveden v rovnici (5.9).

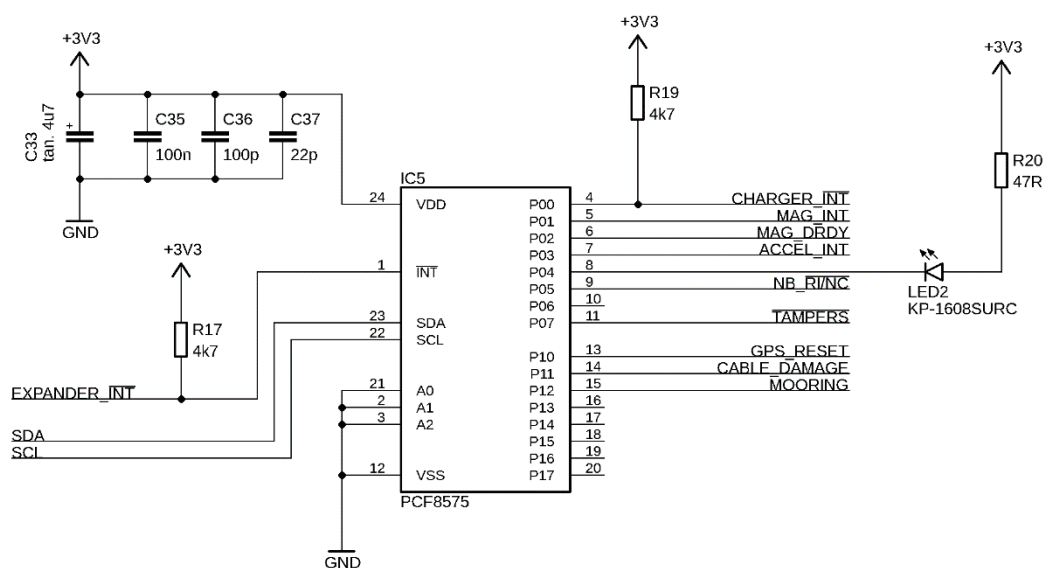
$$R_{p(max)} = \frac{t_r}{0,8473 \cdot C_b} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{0,8473 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 11802,20 \Omega \quad (5.9)$$

$R_{p(max)}$	...	Maximální hodnota pull-up rezistorů [ $\Omega$ ]
$t_r$	...	Maximální doba trvání vzestupné hrany [s]
$C_b$	...	Celková nadhodnocená kapacita I <sup>2</sup> C sběrnice [F]

Ve vypočítaném rozmezí byla hodnota pull-up rezistorů R21 a R22 stanovena na 4,7 k $\Omega$ . Totožná hodnota byla použita pro pull-up rezistory R17 a R19, které jsou na signálech přerušeni s invertovanou logikou z obvodů IC1 a IC5. Díky dostatku volných portů byla připojena i jedna indikační LED dioda (LED2) se sériovým odporem R20. Tato dioda je určena pro testovací a ladící účely.



Obrázek 5.5: Schéma zapojení mikrokontroléru, prog. konektoru a reset tlačítek

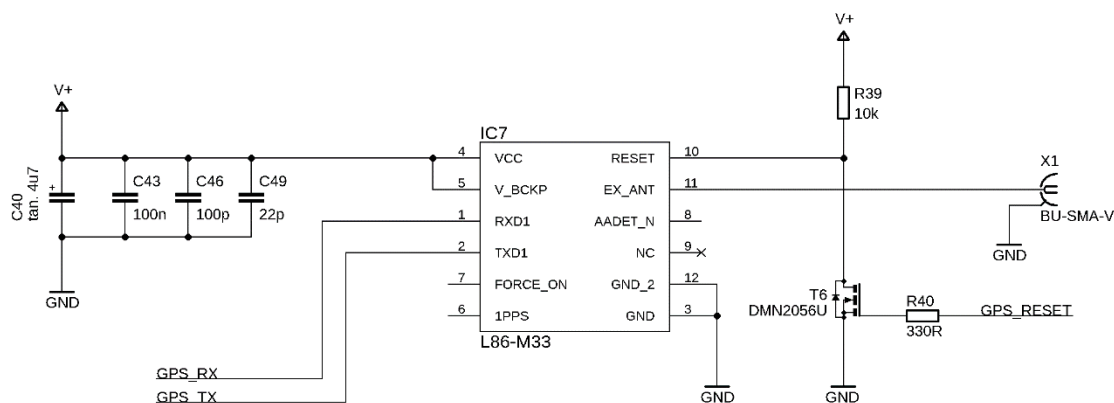


Obrázek 5.6: Schéma zapojení expandéru I/O portů

## 5.3 Moduly a senzory

### 5.3.1 GNSS modul

Pro určení či kontrolu pozice kotevní bóje s jednotkou je na DPS možnost osadit GNSS modul IC7. Vybraný modul L86-M33 se vyznačuje nízkou spotřebou a je přímo určen pro tyto aplikace. Další výhodou je integrovaná keramická anténa přímo na modulu, která eliminuje potřebu připojovat externí anténu. Modul přesto poskytuje rozhraní pro její připojení v případě potřeby a tento vstup je vyveden na koaxiální SMA konektor X1. Na vstupu napájení je umístěna série odrušovacích kondenzátorů C40, C43, C46 a C49 o hodnotách 4,7  $\mu$ F, 100 nF, 100 pF a 22 pF. Napájení je provedeno ze separátní spínané větve 3,3 V. GNSS modul komunikuje s řídicím mikrokontrolérem IC4 přes rozhraní UART. V případě potřeby je možné modul resetovat pomocí externího reset pinu přivedením úrovně logická 0. Reset pin je tedy přes pull-up rezistor R39 o velikosti 10 k $\Omega$  držen ve stavu logická 1. Aktivace resetu se provádí přes tranzistor T6 ovládaný mikrokontrolérem přes expandér IC5. Toto nepřímé zapojení je nutné, protože expandér I/O nepodporuje plovoucí stav výstupu. Rezistor R40 omezuje špičkový proud při sepnutí T6.



Obrázek 5.7: Schéma zapojení GNSS modulu

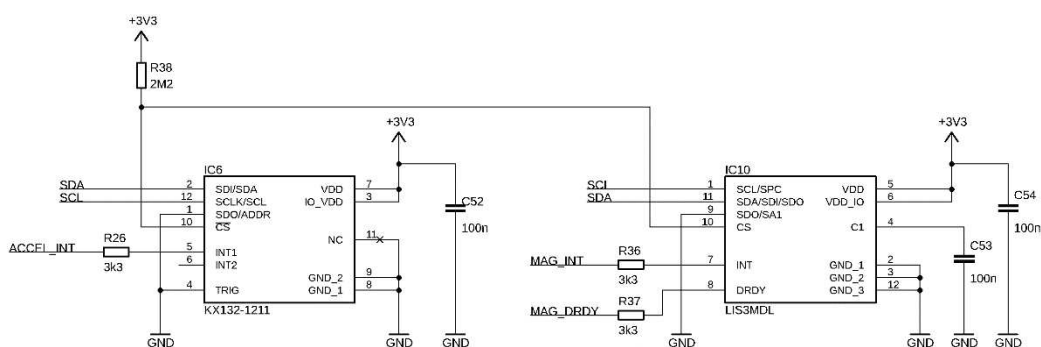
### 5.3.2 Akcelerometr a magnetometr

Nedílnou součástí zařízení jsou akcelerometr IC6 (KX132-1211) a magnetometr IC1 (LIS3MDL). Sensory budou společně využívány v algoritmu pro rozpoznání pohybu. Při vytažení bóje akcelerometr zaznamená zrychlení v dané ose. Samotné rozpoznání pohybu se však vyhodnocuje na základě dat z magnetometru, jenž zaznamenává změny v absolutní orientaci kotevní bóje vůči magnetickému poli Země. Akcelerometr i magnetometr komunikují s mikrokontrolérem po I<sup>2</sup>C sběrnici. Sensory podporují i rozhraní SPI a I<sup>2</sup>C režim je pevně zvolen přivedením úrovně logické 1 na příslušné piny CS. Připojení je provedeno cestou vysoké impedance přes pull-up rezistor R38 s hodnotou 2,2 MΩ. Při dostupnosti nových výsledků měření oba senzory generují přerušení na dedikovaných pinech INT. Magnetometr poskytuje navíc jeden výstup DRDY (Data ready) pro alternativní signalizaci dostupnosti dat. Tyto piny jsou připojeny k expandéru I/O přes ochranné rezistory R26, R36 a R37 o hodnotě 3,3 kΩ. Oba senzory jsou napájeny z hlavní sběrnice 3,3 V a opatřeny odrušovacími kondenzátory 100 nF (C52 a C54). Magnetometr navíc vyžaduje další 100nF kondenzátor C53 pro svoji interní potřebu dle doporučeného zapojení v datovém listu [8].

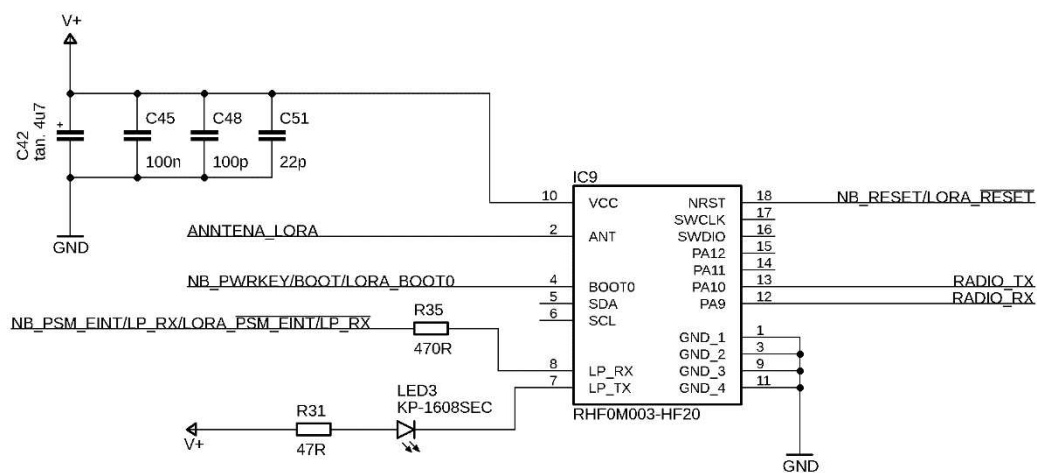
### 5.3.3 LoRaWAN modul

Jednou z možností pro bezdrátovou komunikaci je využití technologie LoRa. K tomuto účelu je možné na desce osadit modul modemu sítě LoRaWAN IC9 (RHF0M003-HF20). Modul je napájen ze spínané části napájecí sběrnice 3,3 V a modul tak lze úplně odpojit od napájení. Na vstupu napájení je umístěna série odrušovacích kondenzátorů C42, C45, C48 a C51 s hodnotami 4,7 μF, 100 nF, 100 pF a 22 pF, stejně jak je tomu na několika místech v zapojení. Přenos dat mezi modulem a hlavním

mikrokontrolérem IC4 je zajištěn přes rozhraní UART (signály RX, TX a GND) a signál RESET. Dle doporučení datového listu jsou na hlavní mikrokontrolér IC4 přivedeny i vývody BOOT0 a LP\_RX, které v budoucnu mohou sloužit pro aktualizaci firmwaru v modulu IC9, pokud to výrobce umožní. LED dioda LED3 slouží pro indikaci probíhající RF komunikace.



Obrázek 5.9: Schéma zapojení akcelerometru a magnetometru



Obrázek 5.8: Schéma zapojení LoRaWAN modulu

### 5.3.4 NB-IoT modul

Alternativně může DPS být osazena NB-IoT modulem IC8 (BC66). Tato technologie poskytuje několikanásobně vyšší datovou propustnost (downlinkový paket až 1024 B oproti 251 B u technologie LoRa) a umožňuje využití stávající infrastruktury operátorů sítí GSM. Tyto výhody jsou vyváženy obecně vyšší spotřebou a nutností

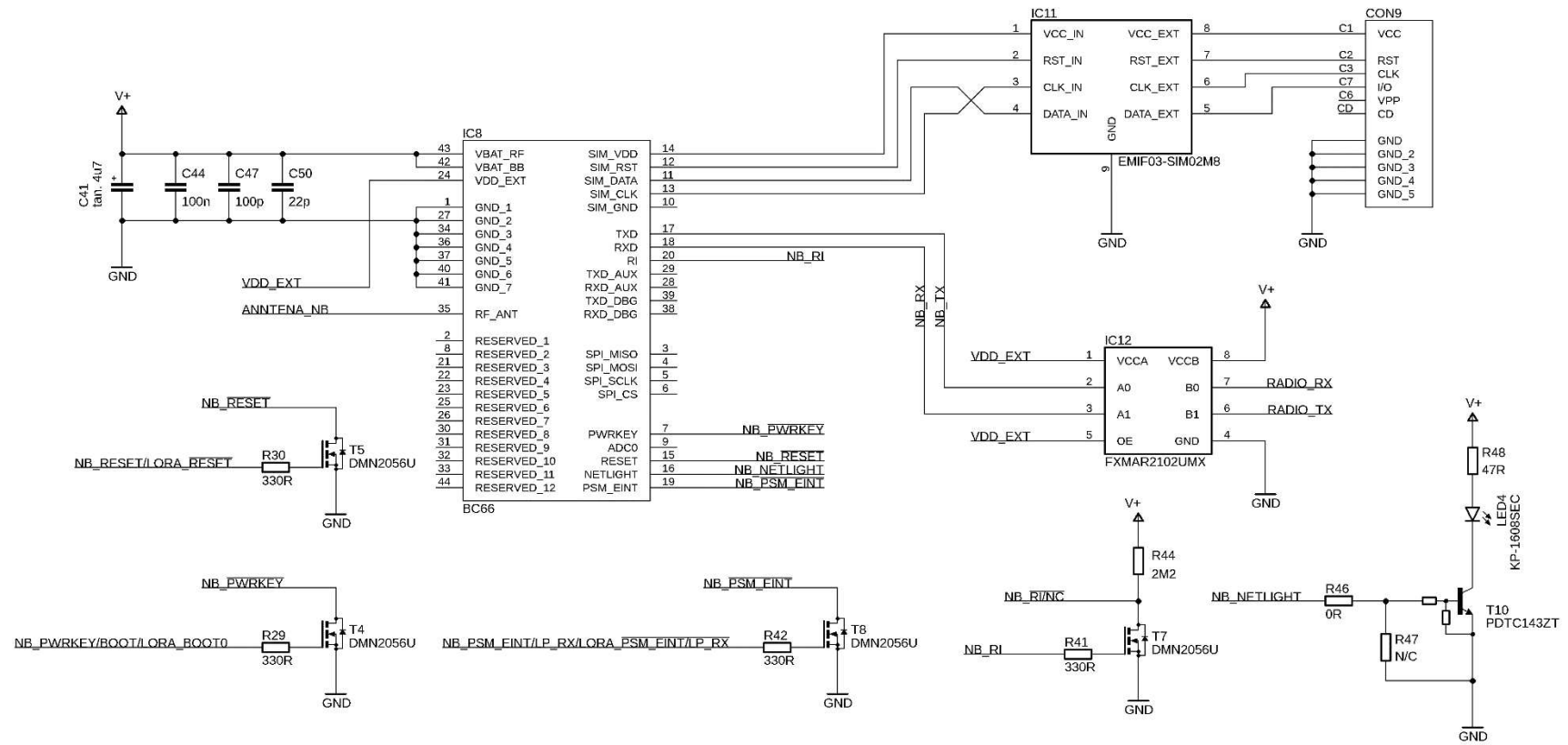
instalace SIM modulu s předplacený datovým tarifem. Použití tohoto modulu bezpodmínečně vyžaduje osazení superkondenzátorů C25 a C26.

Napájení je přivedeno analogickým způsobem jako u modulu LoRa (5.3.3) ze spínané části napájecí sběrnice 3,3 V s využitím odrušovacích kondenzátorů C41, C44, C47 a C50 se stejnými hodnotami. Komunikace s mikrokontrolérem IC4 rovněž probíhá přes rozhraní UART, ovšem IC8 interně operuje na napěťové úrovni 1,8 V včetně UART. Propojení s hlavním mikrokontrolérem IC4 je proto zajištěno přes převodník napěťových úrovní IC12. Vysokonapěťová část tohoto převodníku je napájena ze stejné 3,3 V sběrnice jako IC8, zatím co napětí 1,8 V pro nízkonapěťovou část je poskytováno přímo modulem IC8. Kromě samozřejmého signálu RESET poskytuje modul IC8 širší spektrum řídicích signálů. Modul obsahuje vlastní správu napájení, kde výchozím stavu je vypnutý a pro jeho aktivaci je nutné stáhnout signál PWRKEY na úroveň logická 0. Obdobně ze stavu usnutí je modul probouzen signálem externího přerušení přes pin PSM\_EINT. Všechny tyto vstupy operují rovněž na úrovni 1,8 V a signály z mikrokontroléru IC4 jsou převedeny na tuto napěťovou úroveň pomocí tranzistorů T4, T5, T8 v konfiguraci open-drain. Modul IC8 na zpět poskytuje informační signály RI a NELIGHT. Signál RI informuje o přítomnosti nových dat a po změně napěťové úrovně pomocí T7 a R44 je přiveden na IC4. Signál NETLIGHT indikuje komunikaci a přes T10 rozsvěcí informační diodu LED4. Připojení SIM modulu operátora je realizováno pomocí konektoru CON9 připojeného přes EMI filtr IC11 k modulu IC8. tato zapojení vychází přímo z doporučených zapojení v datovém listu [11].

### 5.3.5 Připojení antén

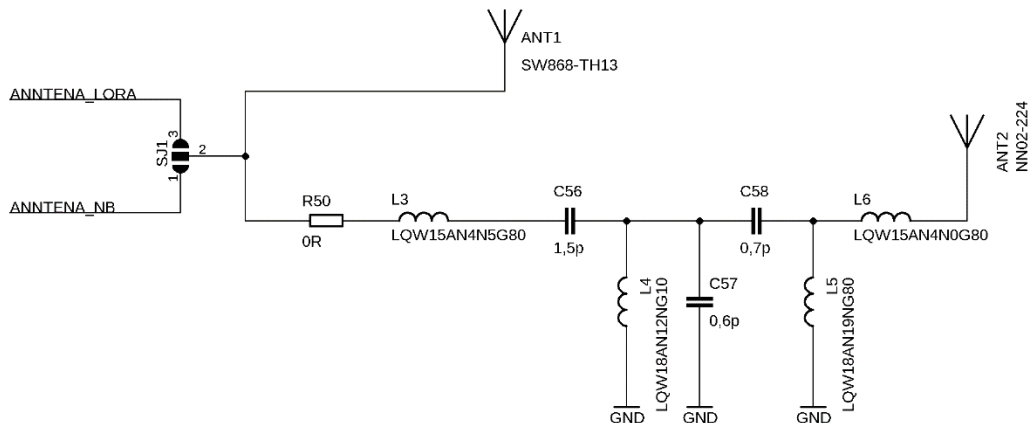
Na desce je realizována možnost připojení dvou různých externích antén pro komunikační moduly. Primárně je uvažována drátová pružinová anténa SW686-TH13 s označením ANT1. Tato anténa je laděná na úzké frekvenční pásmo a je tedy připojena napřímo ke komunikačním modulům IC8 nebo IC9. Připojení antény k jednomu či druhému modulu dle konfigurace jednotky je zprostředkováno přes zkratospojku SJ1.

Pro účely budoucího testování byla na desce vytvořena pozice pro druhou keramickou čipovou anténu NN02-224 označenou ANT2. Jedná se o vícepásmovou anténu malých rozměrů pro mobilní nebo IoT zařízení. Pro optimální výkon ve frekvenčních pásmech 824–960 MHz a 1710–2690 MHz je třeba připojení přes sérii členů pro přizpůsobení impedance vedení. Přizpůsobovací členy se skládají z cívek L3, L4, L5 a L6 a kondenzátorů C56, C57 a C58. Hodnoty součástek a samotné zapojení jsou převzaty z datového listu [9]. Spojení antény s moduly je zajištěno přes nulový rezistor R50.



Obrázek 5.10: Schéma zapojení NB-IoT modulu





Obrázek 5.11: Schéma zapojení anténního připojení

## 5.4 Ostatní periférie

### 5.4.1 Připojení detekčního členu

Detekční člen se k jednotce připojuje pomocí třížilového kabelu, který je zaveden do svorkovnice CON8. Samotný detekční člen obsahuje čtyři magnetické jazýčkové spínače, které jsou zapojeny paralelně se společnými vývody. Jeden vodič reprezentuje výstup spínačů a je spojen se společnou zemí zařízení. Druhým vodičem se připojují vstupy spínačů a tato linka je držena přes pull-up rezistor R27 o hodnotě 33 kΩ na úrovni logické 1. V případě sepnutí spínačů (detekce zakotvení loď) dojde k přizemnění linky a změně úrovně na logickou 0. Tato změna je detekována mikrokontrolérem. Třetí vodič slouží jako kontrolní pro detekci případného přerušování spojovacího kabelu mezi jednotkou a detekčním členem. Vodič je v detekčním členu spojen nakrátko s prvním vodičem (společná zem zařízení). Tento vodič je připojen obdobným způsobem přes pull-up rezistor R28 s totožnou hodnotou 33 kΩ. Detekce stavu logická 1 na tomto vodiči značí přerušování vedení k detekčnímu členu. Zapojení a využití tohoto vodiče není nezbytné pro funkci detekčního členu. Hodnota pull-up rezistorů byla zvolena s ohledem na omezení spotřeby v klidovém stavu (proud v klidu teče). Příslušný výpočet je uveden ve vztahu (5.10). Kontakty svorkovnice jsou připojeny přes nulové rezistory R32, R33 a R34 pro případnou úpravu a testování.

$$I_D = \frac{U_{pwr}}{R_P} = \frac{3,3}{33 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ A} \quad (5.10)$$

$I_D$	...	<i>Proud protékající detekčním členem [A]</i>
$U_{pwr}$	...	<i>Napájecí napětí [V]</i>
$R_p$	...	<i>Zvolená hodnota pull-up rezistorů R27 a R28 [Ω]</i>

#### 5.4.2 Magnetodynamický bzučák

Pro zvukovou signalizaci stavů a případného poplachu při podvodném/neoprávněném užití kotevní bóje je jednotka vybavena magnetodynamickým bzučákem X2. Bzučák je spínáný nepřímo pomocí tranzistoru T9, který je ovládán mikrokontrolérem IC4. Frekvence tónu závisí na zvoleném typu bzučáku. Gate tranzistoru je připojen přes rezistor R43 s hodnotou 330 Ω pro omezení proudových špiček. Rezistor R45 s hodnotou 2,2 MΩ zabraňuje náhodné akumulaci náboje na gate tranzistoru T9 ve chvílích, kdy se ovládací pin mikrokontroléru nachází v plovoucím stavu. Jelikož magnetodynamický bzučák je indukční zátěž, je přemostěn ochrannou flyback diodou D4.

#### 5.4.3 Tampery

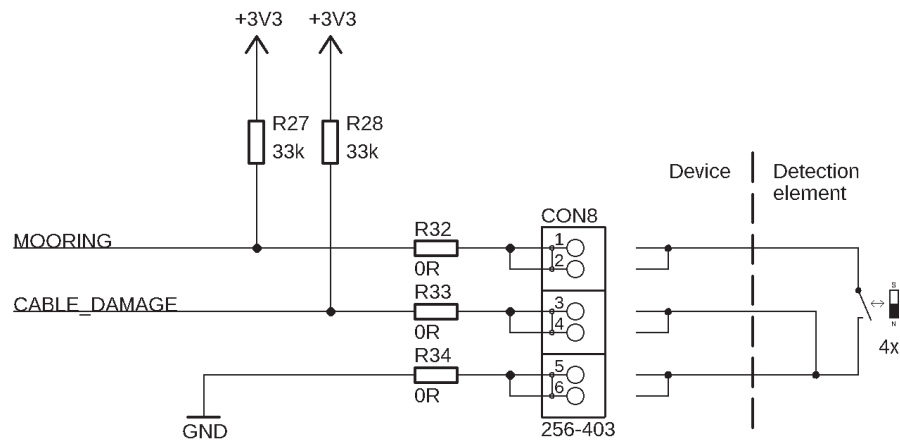
Tampery jsou dva sériově spojené mikrospínače TL1 a TL2, které detekují otevření mechaniky a manipulaci se zařízením. Spínače jsou osazeny na obou stranách DPS a jsou sepnuty pomocí výstupků na mechanice. Protože jsou spínače trvale sepnuté, je potřeba omezit jimi protékající proud za účelem snížení spotřeby zařízení. Proto je v sérii se spínači zařazen rezistor R49 s hodnotou 2,2 MΩ, který omezí protékající proud na 1,5 μA dle výpočtu (5.11). Při otevření mechaniky dojde k rozpojení obvodu a tato změna logické úrovně je detekována mikrokontrolérem. Mikrokontrolér je připojen přes ochranný rezistor R51 o hodnotě 330 Ω pro zamezení zkratu v případech nechtěného nakonfigurování pinu jako logického výstupu. Pro odfiltrování nechtěných zákmitů způsobených například vibracemi je k tlačítkům připojen kondenzátor C55, který v kombinaci s rezistorem R49 tvoří RC článek, jehož časová konstanta by měla být alespoň v řádu 1 s pro správné odrušení (debouncing). V opačném extrému by také časová konstanta neměla být nadměrně dlouhá (asi 5 s), aby znemožnila i velmi rychlé narušení zařízení. Z těchto důvodů byla pro kondenzátor C55 zvolena hodnota 1 μF, kdy časová konstanta vychází na 2,2 s, jak je vypočítáno dle vztahu (5.12).

$$I_T = \frac{U_{pwr}}{R_{49}} = \frac{3,3}{2,2 \cdot 10^6} = 1,5 \mu A \quad (5.11)$$

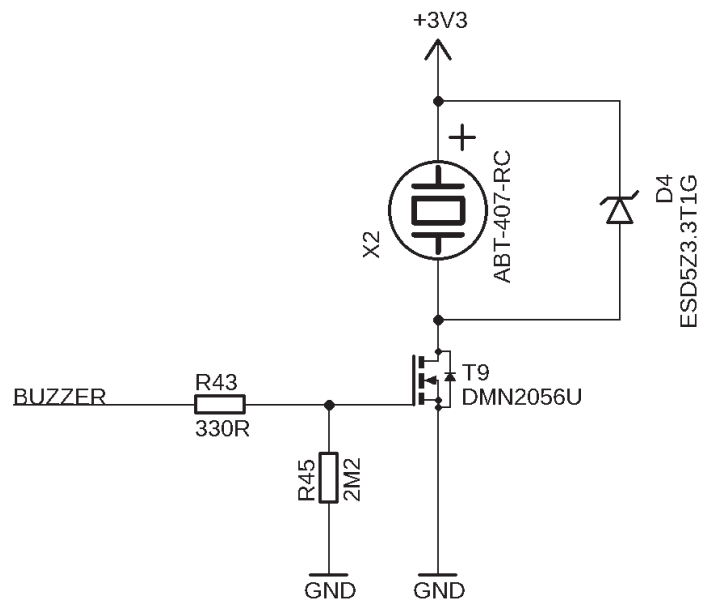
$I_T$	...	<i>Proud protékající tampery [A]</i>
$U_{pwr}$	...	<i>Napájecí napětí [V]</i>
$R_{49}$	...	<i>Zvolená hodnota rezistoru R49 [Ω]</i>

$$T_{tamper} = R_{49} \cdot C_{55} = 2,2 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 2,2 \text{ s} \quad (5.12)$$

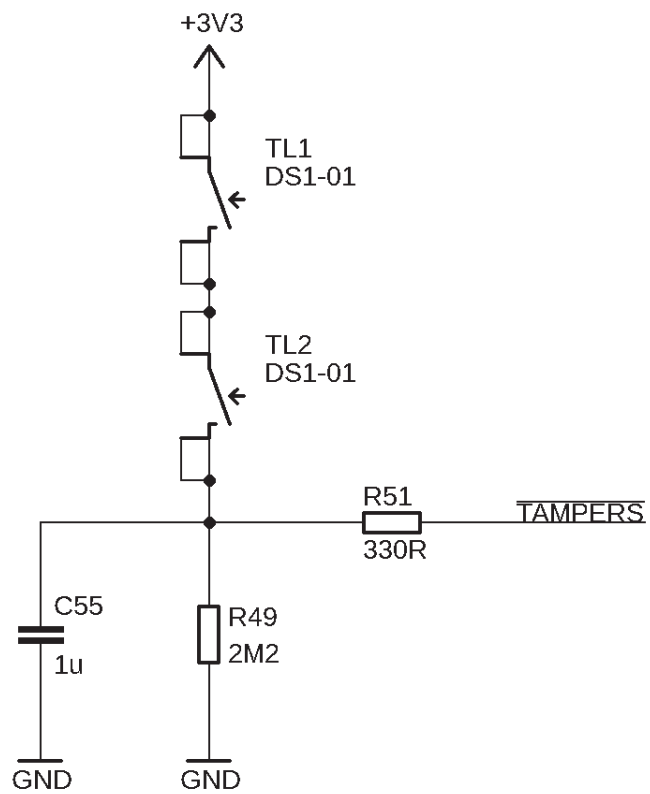
- $T_{tamper}$  ... Časová konstanta RC článku u tamperů [s]  
 $R_{49}$  ... Hodnota rezistoru R49 [Ω]  
 $C_{55}$  ... Zvolená hodnota kondenzátoru C55 [F]



Obrázek 5.12: Schéma připojení detekčního členu



Obrázek 5.13: Schéma zapojení bzučáku



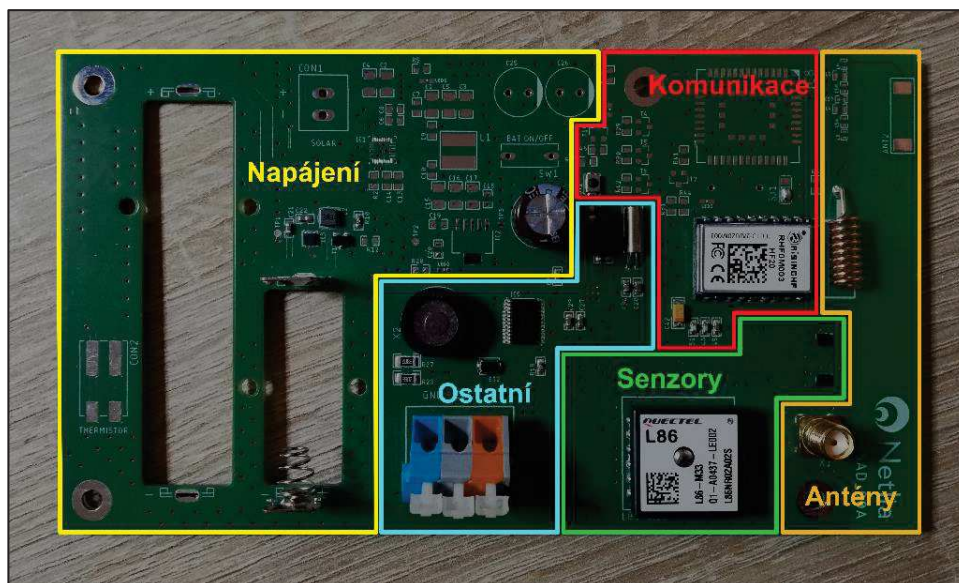
Obrázek 5.14: Schéma zapojení tamperů

## 6. NÁVRH A REALIZACE DPS

Při návrhu desky plošných spojů se vycházelo z vytvořeného schéma zapojení. K návrhu obou částí byl použit program Eagle. Zařízení obsahuje pouze jednu dvouvrstvou desku. Důraz byl kladen na maximální využití SMD součástek, přesto se použití vývodových (drátových) součástek nedalo zcela vyhnout, jedná se zejména o vývodové konektory a elektrolytické kondenzátory. Použití SMD součástek také přináší snížení vlivu parazitních vlastností, které se projevují hlavně na dlouhých drátových přívodech vývodových součástek. Intenzivního provázání GND bylo dosaženo rozmístěním velkého množství prokůvů mezi plošnými vylitími v obou vrstvách.

Celá deska plošných spojů byla navržena s myšlenkou modulárního seskupení funkčních celků, které budou spojeny signálními a napájecími spoji. Při pohledu na DPS shora (Obrázek 6.1) se v levé části nachází prostor pro objemné napájecí články obou plánovaných typů. V jejich těsné blízkosti jsou umístěny veškeré napájecí obvody, od kterých poté vedou jen napájecí sběrnice. Na pravém okraji, daleko od ostatních součástek, jsou umístěny antény. V tomto prostoru je odstraněna měděná vrstva na obou stranách, aby nedocházelo k jejich stínění (provedeno dle doporučení [9]). V návaznosti na prostor antén jsou vedle umístěny komunikační moduly a senzory. Okolo GNSS modulu je vytvořeno prázdné pásmo bez součástek na horní vrstvě dle doporučení z datového listu [10] z důvodu přítomnosti keramické antény na samotném modulu. Řídící obvody a ostatní periférie se poté nachází uprostřed desky a také na druhé straně.

Výroba DPS byla realizována českou firmou Gatema s.r.o. Deska o rozměrech 150 x 84 mm je vyrobena ze standartního materiálu FR-4 s tloušťkou měděné vrstvy 18  $\mu\text{m}$  na obou stranách. Na pájecí plošky byla aplikována povrchová úprava bezolovnatého HAL.



Obrázek 6.1: Rozvržení komponent na DPS

## 7. NÁVRH PŘÍSTROJOVÉ KRABICE

### 7.1 Návrh

V rámci diplomové práce byla pro řídicí a komunikační jednotku navržena přístrojová krabice. Koncept vychází z běžné elektroinstalační krabičky malých rozměrů. Celkově se navržená přístrojová krabice skládá ze tří dílů (spodní část, vnitřní kryt desky a víko s těsněním). Jednotlivé díly a deska plošných spojů jsou pohromadě drženy pomocí metrických šroubů (M3x10 se zápusťnou hlavou) a distančních sloupků (DA M3x5 a DI M3x30).

Návrh 3D modelů byl zpracován v CAD systém SolidWorks. Návrh počítá s výrobou prototypu pomocí 3D tisku aditivními metodami FFF/FDM. Celý návrh byl tedy vytvořen s ohledem na jednoduchost a snadný tisk bez použití tiskových podpěr. Každý díl má jednu výchozí plochou stranu, kterou dosedá na tiskovou podložku. Tisk následně probíhá směrem nahoru pouze s malými přesahy s minimální strmostí 45°, které nepotřebují podpěry. Ostré hrany přístrojové krabice jsou začištěny zkosením pod úhlem 45°. Zkosení hran je preferováno před zaoblením, z důvodu lepších výsledkům při tisku. U zaoblení je v některých bodech zakřivení pod větším úhlem, než je 45° a okrajové linky jsou tištěny mimo návaznost a propadají se. Výsledkem bývá nevzhledný okraj. Užití podpěr je i v tomto případě nežádoucí, kdy samotné podpěry produkují nerovné a nevzhledné plochy. Pro čistý vzhled přístrojové krabice byly použity šrouby se zápusťnou hlavou. Zapuštění pro šrouby bylo také vytvořeno patřičným zkosením hran otvorů. Návrh počítá i s hrubostí stěn od tisku a na místech zasunutí dvou dílů do sebe byla zvolena patřičná tolerance.

Pro samotné uchycení přístrojové krabice na kotevní bóji bylo zváženo použití speciálního dodatečného držáku. Vzhledem k různorodosti tvarů kotevních bójí by ovšem žádný držák nebyl univerzální a musely by být vyrobeny na míru pro daný typ bóje. Jako lepší volba se jeví lepení přístrojové krabice přímo na bóji pomocí voděodolných kontaktních lepidel. Krabice může být dodatečně uchycena pojistným lankem k hornímu oku bóje, zamezující pádu jednotky do vody v případě odlepení. Obdobná argumentace platí i pro uchycení volitelného externího solárního panelu.

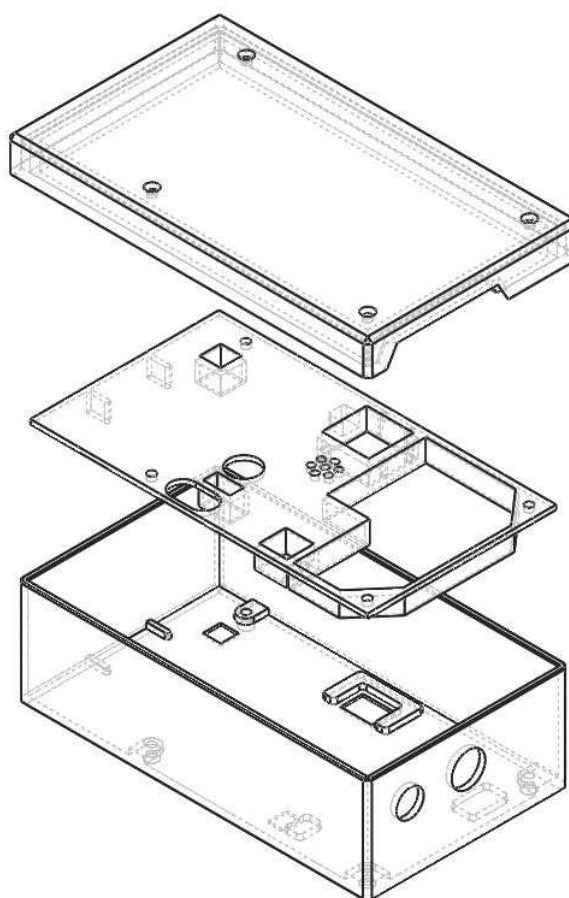
### 7.2 Popis jednotlivých dílů

Spodní část přístrojové krabice slouží jako základna pro uchycení desky. Dle daných rozměrů jsou na spodní straně umístěny výstupky s otvory pro uchycení desky plošných spojů pomocí šroubů. Další výstupky na spodní straně jsou vytvořeny v místech konektorů. Tyto místa jsou mechanicky namáhána a výstupky složí jako mechanická podpěra pro zamezení prohýbání desky. Na místech, kde jsou osazeny vývodové součástky, například kondenzátory, jsou ve spodní straně vytvořena mírná zapuštění

poskytující prostor na výstupky vývodů. Jedna z bočních stěn pak obsahuje dva kulaté otvory, které slouží pro upevnění kabelových vývodků (velikosti PG7 a PG9). Skrze tyto vývodky se k jednotce následně připojují detekční člen a volitelný solární panel.

Střední částí je vnitřní kryt desky plošných spojů, který má neznalému uživateli zamezit v přístupu k citlivým komponentám na desce. Jedná se o tenkou vodorovnou přepážku s ohraničujícími výsečemi, které chrání okraje výřezů a umožňují přístup pouze ke konektorům, bateriím a přepínači. V krytu jsou také další otvory skrze které vystupují prostorově náročné kondenzátory na úroveň přepážky. V neposlední řadě je důležitý i dobrý průchod zvuku z magnetodynamického bzučáku. Výseče se opírají přímo o desku plošných spojů a celá přepážka je uchycena skrze distanční sloupky.

Horní kryt mírně přesahuje rozměry spodní části a po obvodu má dva paralelní okraje. Mezi okraji vzniká drážka, do které je zasazen gumový těsnicí váleček. Do stejné drážky se proti těsnění následně zasouvá okraj spodního dílu. Na stejné straně, kde spodní díl má namontované vývodky, víko obsahuje mírný výřez pro eliminaci kolize okraje s maticemi vývodků. Celé víko je uchyceno pomocí šroubů do vnitřních distančních sloupků



Obrázek 7.1: Vytvořený model přístrojové krabice

## 8. NÁVRH A POPIS DETEKČNÍHO ČLENU

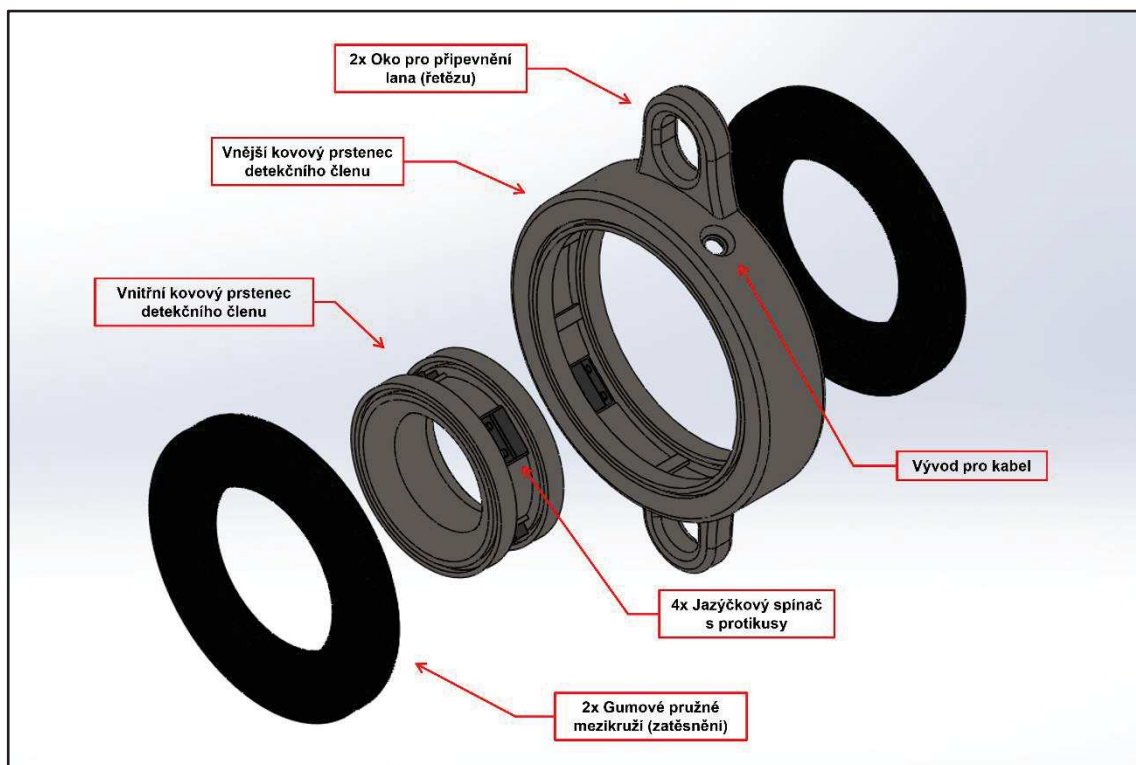
Pro zařízení byl navržen prototyp detekčního členu, který je určený pro podvodní montáž. Na návrh se vztahují stejné zásady jako v kapitole 7.1, protože pro výrobu prototypu je předpokládáno užití aditivního 3D tisku. Návrh tedy nereprezentuje finální podobu a bude muset být přizpůsoben pro průmyslovou výrobu. Finální podoba bude obsahovat základní prvky vyrobené z nerez oceli, neboť detekční člen pro reálné testování a provoz musí být schopný vydržet tahové síly vyvážané několikatunové lodi. Jednotlivé části jsou zobrazené na Obrázek 8.2 a sestavený celý detekční člen poté na Obrázek 8.1.

Celý detekční člen se skládá ze dvou základních částí, a sice vnitřního a vnějšího prstence. Vnitřní prsteneček se nachází uprostřed vnějšího prstence a ve středu má díru o průměru 60 mm se zaoblenými hranami pro provlečení lana k vyvážání lodi. Ze své vnější strany má prsteneček připravené čtyři výstupky pro montáž protikusů (magnetů) k jazýčkovým spínačům, které jsou rozmístěny po obvodu s pravidelným rozestupem 90°.

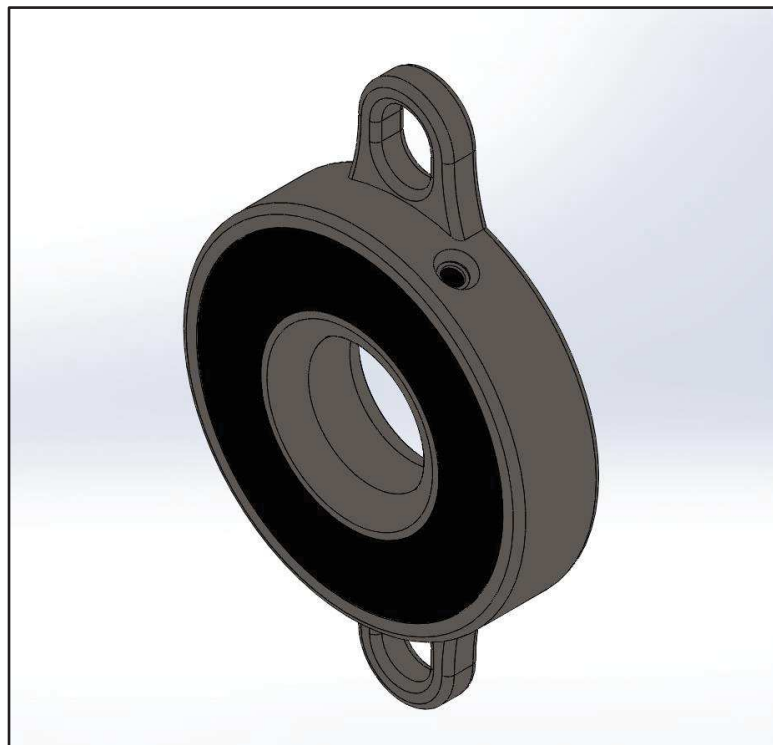
Vnější prsteneček má podobně naproti těmto pozicím ze své vnitřní strany také připravené pozice pro připevnění samotných jazýčkových spínačů. Vývody spínačů jsou poté vedeny v mezikruží za přichytnými výstupky směrem k otvoru pro vyvedení spojovacího kabelu s řídicí a komunikační jednotkou. Vývody jsou spojeny dle schéma zapojení a spoje jsou zaizolovány pro zajištění voděodolnosti. Samotný spojovací kabel je provlečen skrze otvor z boční strany vnějšího prstence. Otvor je opatřen gumovým těsněním a po zavlečení kabelu je dodatečně zalit epoxidovým lepidlem pro lepší upevnění a zatěsnění. V blízkosti vývodového otvoru a podobně na protější straně se nachází úchytné oko pro připevnění detekčního členu k bóji a kotevnímu lanu.

Oba prstence jsou na svých spodních a vrchních stranách opatřeny vyfrézovanými drážkami, do kterých zapadá pružné gumové těsnění. Tyto gumové kruhy nejen zatěsňují prázdné mezikruží, ale jsou důležité pro funkci detekčního členu. Pružnost umožňuje, aby vyvážané plavidlo přes svůj úvaz tahalo za vnitřní prsteneček. Tento prsteneček s protikusy (magnety) se přibližuje k vnějšímu prstenci, kde vlivem magnetického pole dochází ke kontaktu ve spínačích. Toto je poté v řídicí jednotce vyčítáno, a tak detekována přítomnost uvázaného plavidla.





Obrázek 8.2: Vizualizace jednotlivých částí detekčního členu



Obrázek 8.1: Vizualizace celého detekčního členu

## 9. 3D TISK A VOLBA MATERIÁLU

Nejběžněji používaný plast pro elektroinstalační krabice je ABS (akrylonitril-butadien-styren). Polymer ABS se vyznačuje vysokou tvrdostí, chemickou odolností a celkovou houževnatostí. Jeho přední vlastností je i vysoká teplota skelného přechodu (105-120 °C), které jej činí vhodný i pro elektroinstalační zařízení, která se zahřívají. Nevýhodami tohoto polymeru jsou vysoká teplotní roztažnost a nízká vůči UV záření. Tepelná roztažnost činí ABS velmi problematickým materiálem při použití metod aditivního tisku, protože nerovnoměrné chladnutí vede k deformacím a odlepování od podložky. V případě dokonalého temperování je i samotná izotropní smrštitivost překážkou při výrobě rozměrově přesných dílů, které do sebe musí zapadat. Ze spektra polymerů běžně používaných při 3D tisku by se jako lepší alternativa nabízela ASA (Acrylonitrile styrene acrylate) vzhledem k dobré odolnosti vůči UV záření, ovšem tento polymer přináší stejná úskalí tepelné roztažnosti jako ABS. Proto pro výrobu prototypu byl použit polymer PETG, který má ideální vlastnosti pro tisk a umožňuje dokonalou reprodukci rozměrů, přestože pro finální aplikaci je nevhodný a příliš měkký. Tisk byl proveden na 3D tiskárně Prusa MK3 a převod 3D modelu na GCODE byl proveden za použití programu Prusa Slicer.

V případě budoucí komercializace by byl detekční člen z kovu a obal zařízení by byl vyroben metodami vstřikování do formy, kde lze použít vhodnější polymer a rozměry výrobku jsou přesnější.

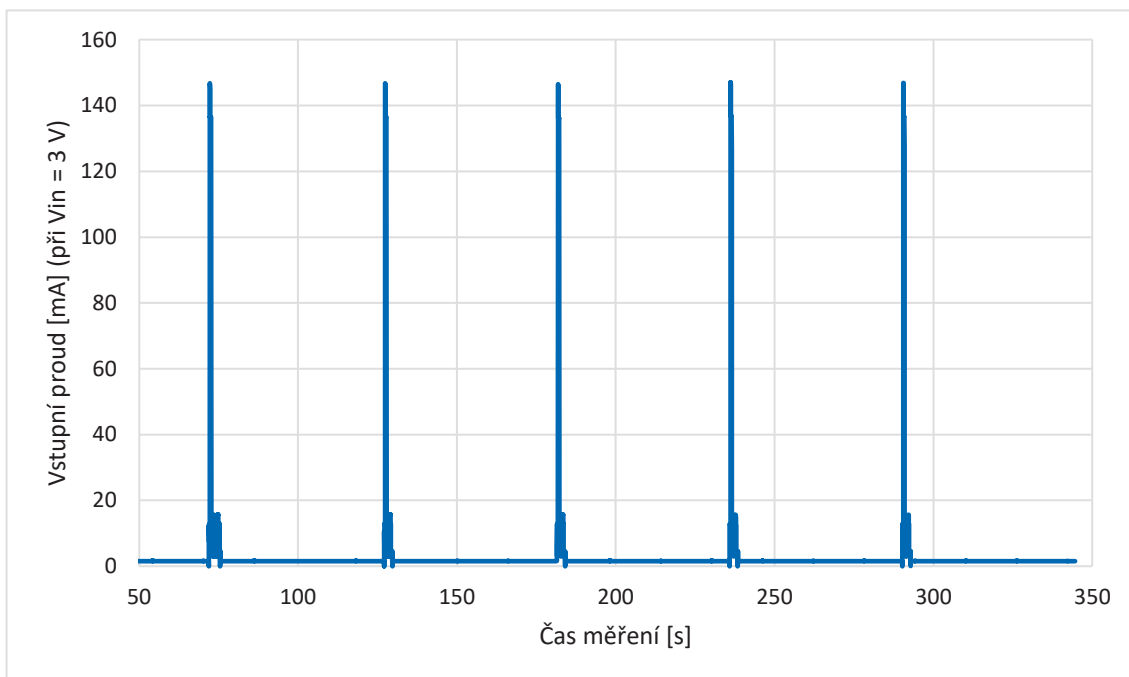
## 10. MĚŘENÍ

Zařízení sestává převážně z hotových komerčních modulů a čipů, které jsou propojeny napájecími obvody a čistě digitálními komunikačními sběrnici s využitím co nejmenšího počtu externích součástek. Oživení a kontrola funkce prototypu proto spočívají v ověření činnosti těchto dvou aktivně navrhovaných částí zařízení. Během měření bylo zařízení operováno pomocí rozpracované verze firmwaru, kterou pro toto zařízení paralelně vyvíjí firma Netlia s.r.o. Tento firmware obsahuje jádro senzorové aplikace, které komunikuje přes rozhraní LoRa, aktivně řeší správu napájení zapínáním a vypínáním zvyšujícího měniče IC3 a umožňuje nalezení a komunikaci se zařízeními I<sup>2</sup>C sběrnici.

Hlavní otázkou, kterou je potřeba zodpovědět z oblasti napájení je reálná spotřeba zařízení v klidovém stavu a při aktivním vysílání a její důsledky na reálnou výdrž baterie. Osazená varianta počítá s napájením z jednorázové lithiové baterie s nominálním napětím 3 V a kapacitou 1500 mAh, proto bylo provedeno měření spotřeby při této konfiguraci napájení. Průběh spotřeby proudu v čase je znázorněn na []. Při tomto měření zařízení po počáteční inicializaci periodicky odesílalo stavovou zprávu (proudové špičky) v intervalech 1 min a vždy následně přecházelo do úsporného režimu. Průměrné hodnoty spotřeby proudu v okamžicích maxima a klidového režimu stejně jako průměrná hodnota za dlouhé časové období jsou zpracovány v tabulce [] Výpočet indikuje, že s použitou periodicitou zprávy 1 min by baterie zařízení vydržela maximálně 25 dní a i v případě nepřerušovaného spánku by se výdrž prodloužila na pouhých 41 dní. Na základě tohoto výpočtu se řešení se solárním panelem jeví jako výrazně rentabilnější pro potencionálního provozovatele kotevních bojů.

Tabulka 10.1: Statistika spotřeby zařízení a projektované výdrže baterie

	Klidový stav	Vysílání zprávy	Dlouhodobý průměr
I [mA]	1.525	146.636	2.487
W [mW]	4.575	439.908	7.461
Výdrž [hod]	983.6	10.2	603.1



**Obrázek 10.1: Časový průběh vstupního proudu**

Následující úryvek ladícího výstupu ze zařízení přes UART [] demonstruje nalezení všech osazených zařízení na I2C sběrnici a s očekávanými adresami: 0x1C (LIS3MDL), 0x1E (KX132-1211), 0x20 (PCF8575). Výpis dále potvrzuje úspěšnou inicializaci expandéru I/O PCF8575. Nakonec demonstruje úspěšnou výměnu AT příkazů mezi firmwarem a modulem LoRa. Průchodnost rádiové komunikace byla ověřena na straně serveru firmy Netlia s.r.o.

```
[dbg] Build <-- Wed May 15 10:17:01 2023 -->
[brd] Config valid: 1 noConf: 0 badCRC: 0 ERR: 0 CRC: 0x48d7
[i2c] I2C devices:
[i2c] -> 0x1C
[i2c] -> 0x1E
[i2c] -> 0x20
[gpio] PCF8575 init OK
[rhf] AT ping
[rhf] Ping check
[rhfv] CMD: CMD: AT
[rhf] Ping check
[rhfv] CMD: CMD: AT
[rhf] Ping check
[rhfv] CMD: CMD: AT
[rhf] Ping check
[rhfv] CMD: CMD: AT
[rhfv] RESP: ..+AT: OK
```

## 11. ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla vypracována základní rešerše sítí LPWAN a technologií LoRa a NB-IoT, které tyto sítě využívají. Dále byl teoreticky rozebrán způsob vyvazování plavidla na kotevní bóji, jakožto jeden ze základních aspektů pro vytvoření konceptu zařízení. Dále byly diskutovány další specifické požadavky kladené na vlastnosti zařízení jako je bezúdržbový provoz, nízká spotřeba, bezdrátová komunikace atd.

Při dodržení těchto požadavků byl navržen koncept zařízení s odděleným detekčním členem a řídicí/komunikační jednotkou využívající mikrokontrolér architektury ARM Cortex-M0 typu STM32L07x a. Návrh by nejdříve rozpracován ve formě blokového schématu s uvažováním dvou různých zdrojů napájení (jednorázová baterie nebo akumulátor dobíjený solárním panelem) a dvou různých typů komunikačních modulů (LoRa nebo NB-IoT). Dále na základě vytvořeného blokového schéma bylo navrženo konkrétní elektrické schéma zapojení zvolených součástek a komponent a příslušné rozvržení DPS umožňující variabilní způsob osazení. Součástí práce bylo i vytvoření 3D návrhu prototypu zmíněného detekčního členu a přístrojové krabice pro jednotku.

Nakonec byly zhotoveny prototyp DPS (s osazením obvodů pro napájení z jednorázové baterie a LoRa modulu) a prototyp přístrojové krabice. Oživení a výstupní měření ukázaly, že napájení funguje nominálně a moduly na DPS správně komunikují. Měření spotřeby ukázalo, že lze očekávat maximální výdrž jednorázové baterie kratší než jeden měsíc a pro byla varianta se zapojeným solárním panelem shledána za lepší volbu s vyšším potenciálem pro úspěšnou komercializaci.

## LITERATURA

- [1] SINHA, Rashmi Sharan, Yiqiao WEI a Seung-Hoon HWANG. *A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT*. *ICT Express* [online]. 2017, **3**(1), 14-21 [cit. 2022-09-08]. ISSN 24059595. Dostupné z: doi:10.1016/j.ict.2017.03.004
- [2] RAZA, Usman, Parag KULKARNI a Mahesh SOORIYABANDARA. *Low Power Wide Area Networks: An Overview*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2017, **19**(2), 855-873 [cit. 2022-09-08]. ISSN 1553-877X. Dostupné z: doi:10.1109/COMST.2017.2652320
- [3] Yachting.com. *Jak správně a bezpečně vyvázat loď?*. – Článek [online]. 2022. [cit. 2022-04-01] Dostupné z: <https://www.yachting.com/cs-cz/novinky-a-clanky/jak-spravne-a-bezpecne-vyvazat-lod>
- [4] Texas Instruments. *TPS61291 Low Iq Boost Converter with Bypass Operation*. – Datasheet [online]. 2014. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61291.pdf?ts=1684256798952&ref\\_url=http%253A%252F%252Fwww.google.com.hk%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61291.pdf?ts=1684256798952&ref_url=http%253A%252F%252Fwww.google.com.hk%252F)
- [5] Texas Instruments. *Ultralow-Noise, High-PSRR, Fast, RF, 1-A LOW-DROPOUT LINEAR REGULATORS*. – Datasheet [online]. 2012. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps79633-q1.pdf?ts=1684281356814&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Ftps79633-Q1](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps79633-q1.pdf?ts=1684281356814&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Ftps79633-Q1)
- [6] Texas Instruments. *BQ25672 I2C Controlled, 1- to 4-Cell, 3-A Buck Battery Charger with Dual-Input Selector, MPPT for Solar Panels and Integrated ADC*. – Datasheet [online]. 2021. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25672.pdf?ts=1684223763741&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25672](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25672.pdf?ts=1684223763741&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25672)
- [7] Texas Instruments. *PCF8575 Remote 16-BIT I2C AND SMBus I/O Expander with Interrupt Output*. – Datasheet [online]. 2020. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8575.pdf?ts=1684287635005&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FPCF8575](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8575.pdf?ts=1684287635005&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FPCF8575)
- [8] STMicroelectronics. *LIS3MDL Digital output magnetic sensor: ultra-low power, high-performance 3-axis magnetometer*. – Datasheet [online]. 2017. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3mdl.pdf>
- [9] Ignion. *USER MANUAL RUN mXTENDTM (NN02-224)*. – Datasheet [online]. 2021. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: [https://ignion.io/files/UM\\_NN02-224.pdf](https://ignion.io/files/UM_NN02-224.pdf)
- [10] Quectel. *L86 Hardware Design*. – Datasheet [online]. 2014. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/1fe5/0900766b8147dbfb.pdf>
- [11] Quectel. *BC66 Hardware Design*. – Datasheet [online]. 2019. [cit. 2023-05-16] Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/BC66-Quectel-datasheet-138897511.pdf>

## SEZNAM ZKRATEK

3D	Three-Dimensional Space
ABS	Akrylonitril-Butadien-Styren
ADC	Analog-to-Digital Converter
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate
CAD	Computer-Aided Design
DPS	Deska plošných spojů
EMI	ElectroMagnetic Interference
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSM	Groupe Spécial Mobile
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
I/O	Input/Output
LDO	Low-Dropout Regulator
Li-ion	Lithium-ion (baterie)
LoRa	Long Range
LPWA	Low-Power Wide Area
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NB-IoT	Narrowband – Internet of Things
NTC	Negative Temperature Coefficient
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
RTC	Real-time Clock
SIM	Subscriber Identity Module
SMA	Sub-Miniature A connector
SMD	Surface Mount Device
UART	Universal Asynchronous Receiver-Tansmitter
UV	Ultraviolet

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - SOUBORY .....</b>	<b>50</b>
<b>PŘÍLOHA B - SEZNAM SOUČÁSTEK .....</b>	<b>51</b>
<b>PŘÍLOHA C - FOTOGRAFIE.....</b>	<b>53</b>





## **Příloha A - Soubory**

### **A.1 Soubory Eagle ()**

Soubory: „SAD\_00A.sch“  
„SAD\_00A.brd“

Příloha A.1 – Soubory Eagle jsou odevzdány v elektronické podobě v zipu.

### **A.2 3D návrh detekčního členu**

Soubory: „01\_Inner\_Ring.sldptr“  
„02\_Outer\_Ring.sldptr“  
„03\_Rubber\_Seal.sldptr“  
„04\_Reed\_Switch\_Model.sldptr“

Příloha A.2 – 3D návrh detekčního členu je odevzdán v elektronické podobě v zipu.

### **A.3 3D návrh přístrojové krabice**

Soubory: „01\_SAD\_00A\_Case\_Bottom.sldptr“  
„02\_SAD\_00A\_Case\_Inner\_Cover.sldptr“  
„03\_SAD\_00A\_Case\_Top.sldptr“

Příloha A.3 – 3D návrh přístrojové krabice je odevzdán v elektronické podobě v zipu.

### **A.4 Diplomová práce**

Soubor: „Automatická detekce vyvázání plavidla na kotevní bóji v sítích LPWAN.pdf“

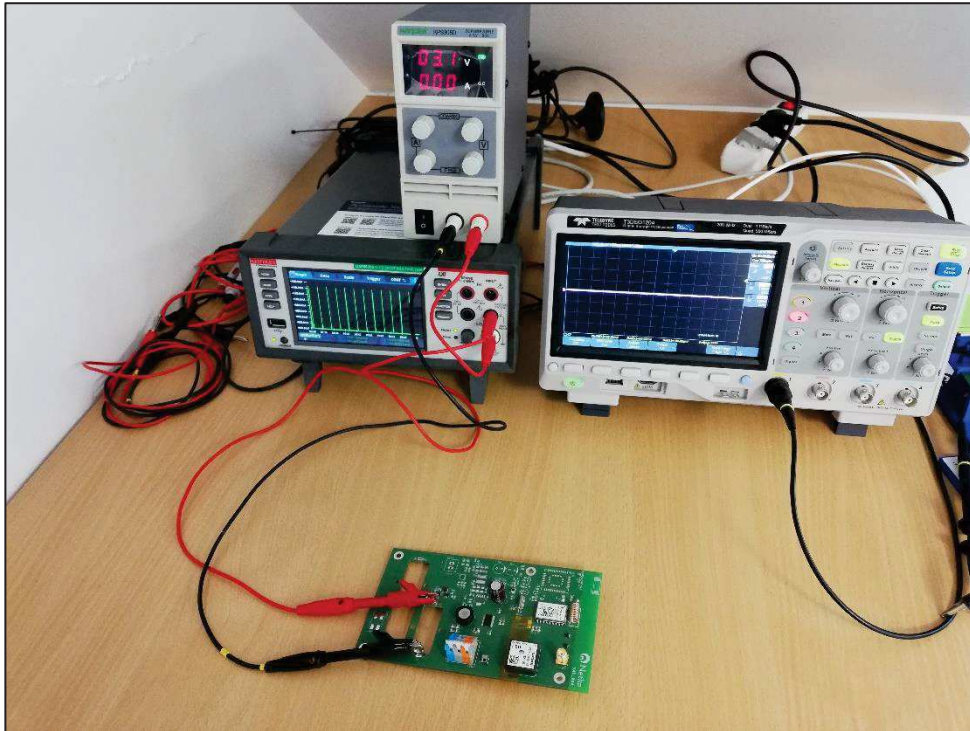
# Příloha B - Seznam součástek

Tabulka 11.1: Seznam součástek

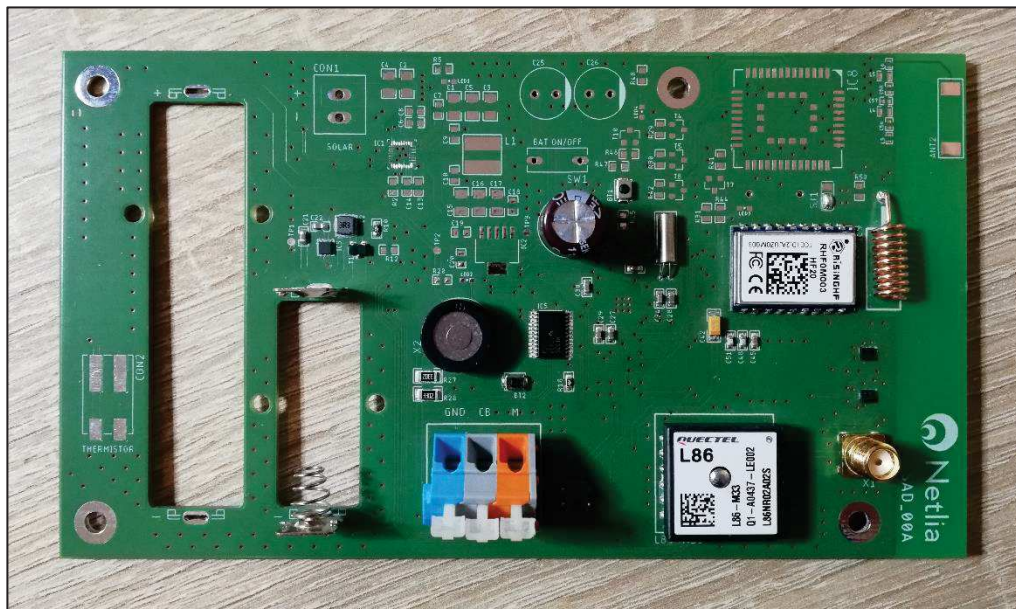
Počet kusů	Označení součástek	Pouzdro/Rozměry	Popis
2	R46, R50	0603	Rezistor SMD, 0 Ω, 0.125 W, 1%
3	R32, R33, R34	1206	Rezistor SMD, 0 Ω, 0.25 W, 1%
1	R2	0603	Rezistor SMD, 100 Ω, 0.1 W, 1%
1	R39	0603	Rezistor SMD, 10 kΩ, 0.1 W, 1%
1	R5	0603	Rezistor SMD, 120 Ω, 0.1 W, 1%
1	R4	0603	Rezistor SMD, 120 kΩ, 0.1 W, 1%
1	R7	0603	Rezistor SMD, 130 Ω, 0.1 W, 1%
1	R3	0603	Rezistor SMD, 200 kΩ, 0.1 W, 1%
1	R8	0603	Rezistor SMD, 27 kΩ, 0.1 W, 1%
8	R10, R13, R14, R15, R38, R44, R45, R49	0603	Rezistor SMD, 2.2 MΩ, 0.1 W, 1%
1	R18	0603	Rezistor SMD, 2.2 kΩ, 0.1 W, 1%
8	R16, R29, R30, R40, R41, R42, R43, R51	0603	Rezistor SMD, 330 Ω, 0.1 W, 1%
2	R27, R28	1206	Rezistor SMD, 33 kΩ, 0.25 W, 1%
6	R9, R23, R24, R26, R36, R37	0603	Rezistor SMD, 3.3 kΩ, 0.1 W, 1%
1	R35	0603	Rezistor SMD, 470 Ω, 0.1 W, 1%
1	R12	0603	Rezistor SMD, 470 kΩ, 0.1 W, 1%
3	R20, R31, R48	0603	Rezistor SMD, 47 Ω, 0.1 W, 1%
5	R1, R17, R19, R21, R22	0603	Rezistor SMD, 4.7 kΩ, 0.1 W, 1%
1	R6	0603	Rezistor SMD, 5.1 kΩ, 0.1 W, 1%
3	R11, R25, R47	0603	neosazeno, rezervované pozice
18	C6, C7, C8, C13, C14, C18, C29, C30, C31, C32, C34, C35, C43, C44, C45, C52, C53, C54	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 100 nF, 50 V, X7R, 10%
4	C36, C46, C47, C48	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 100 pF, 50 V, NPO, 5%
1	C19	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 10 nF, 50 V, X7R, 10%
3	C21, C27, C28	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 10 uF, 10 V, X5R, 20%
8	C1, C2, C3, C4, C5, C15, C16, C17	1206	Kondenzátor SMD, keramický, 10 uF, 25 V, X5R, 10%
2	C38, C39	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 15 pF, 50 V, NPO, 5%
1	C11	0402	Kondenzátor SMD, keramický, 1 nF, 50 V, X7R, 10%
2	C20, C55	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 1 uF, 16 V, X7R, 10%
1	C24	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 220 nF, 10 V, X7R, 10%
4	C37, C49, C50, C51	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 22 pF, 50 V, NPO, 5%
1	C22	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 22 uF, 6.3 V, X5R, 20%
1	C12	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 4.7 uF, 16 V, X5R, 10%
2	C9, C10	0603	Kondenzátor SMD, keramický, 47 nF, 50 V, X7R, 10%
1	C57	0402	Kondenzátor SMD, keramický, 0.6 pF, 50 V, NPO, 10%
1	C58	0402	Kondenzátor SMD, keramický, 0.7 pF, 50 V, NPO, 10%
1	C56	0402	Kondenzátor SMD, keramický, 1.5 pF, 50 V, NPO, 10%
4	C33, C40, C41, C42	SMD A	Kondenzátor SMD, tantalový, 4.7 uF, 16 V, 10%
1	C23	10 x 13 mm, RM5	Kondenzátor, elektrolytický, 470 uF, 25 V, Low-ESR
2	C25, C26	8 x 16 mm, RM3.5	Superkondenzátor, elektrolytický, 3 F, 2.8 V
1	L1	5.8 x 5.8 x 4.8 mm	Cívka SMD, 4.7 uH, 1.80 A, 0.08 Ω, 20%, SDR0604-4R7ML
1	L2	3 x 3 x 1.5 mm	Cívka SMD, 3.3 uH, 1.40 A, 0.08 Ω, 20%, DJNR3015-3R3
1	L3	0402	Cívka SMD, 4.5 nH, 1.45 A, 0.06 Ω, 2%, LQW15AN4N5G80D
1	L4	0603	Cívka SMD, 12 nH, 0.75 A, 0.071 Ω, 2%, LQW18AN18NG10D
1	L5	0603	Cívka SMD, 19 nH, 1.4 A, 0.075 Ω, 2%, LQW18AN19NG80
1	L6	0402	Cívka SMD, 4 nH, 1.95 A, 0.030 Ω, 2%, LQW15AN4N0G80

1	CON1	-	Konektor, WAGO, 734-232
1	CON2	-	Konektor, WAGO, 2060-452/998-404
2	CON3, CON5	-	Bateriový kontakt (kladný pól), Keystone, 5226
2	CON4, CON6	-	Bateriový kontakt (záporný pól), Keystone, 5204
1	CON8	-	Svorkovnice, WAGO, 256-403
1	CON9	-	Konektor SIM karty, GCT, SIM8065-6-1-14-01-A
1	X1	-	VF koaxiální konektor SMA, 50 Ω, rovný
2	T1, T3	SOT23	MOSFET, P-kanál, 30 V, 4 A, 0.05 Ω, AO3401A
7	T2, T4, T5, T6, T7, T8, T9	SOT23	MOSFET, N-kanál, 20V, 4 mA, 0.038 Ω, DMN2056U
1	T10	SOT23	Bipolární tranzistor NPN, 50V, 0.1 A, 0.25 W
3	D1, D2, D4	SOD-523	ESD ochranná dioda ESD5Z3.3T1G
1	D3	SOD80	Univerzální dioda LL4148
2	LED3, LED4	KP-1608 (0603)	Oranžová LED, 300 mcd, 20 mA, 2.5 V, 605 nm, KP-1608SEC
2	LED1, LED2	KP-1608 (0603)	Červená LED, 250 mcd, 20 mA, 2.5 V, 630 nm, KP-1608SURC
1	IC4	UFQFPN32	Mikrokontrolér STM32L071KZU6
1	IC3	WSON-6	TPS61291 - Zvyšující měnič
1	IC2	SOT223-6	TPS79633Q - LDO lineární regulátor 3.3 V
1	IC5	TSSOP24	PCF8575 - 16-bit I <sup>2</sup> C I/O expandér
1	IC1	RQM0029A-MFG	BQ25672 - Kontrolér nabíjení baterie s I <sup>2</sup> C a dvojitým vstupem
1	IC6	VFLGA-12	KX132-1211 - 3-osý digitální akcelerometr
1	IC10	VFLGA-12	LIS3MDL - 3-osý digitální magnetometr
1	IC7	L86_QWS	L86-M33 - GNSS modul
1	IC8	BC66	BC66 - LPWA modul
1	IC9	RHFOM003	RHFOM003-HF20 - LoRaWAN modul
1	IC11	QFN-8	EMIF03-SIM02M8 - EMI filtr pro SIM karty
1	IC12	UQFN8	FXMAR2102UMX - 2-bit převodník napěťových úrovní
1	XTAL1	TC-38 (8.3 x 3.1 mm)	Krystal 32.768 kHz
1	X2	12 x 5.5 mm	Magnetodynamický bzučák ABT-407-RC
1	ANT1	13.4 x 5.5 mm	SW868-TH13 - 868 MHz pružinová anténa
1	ANT2	12 x 2.4 x 3 mm	NN02-224 - 698-8000 MHz SMD anténa
2	BT1, BT2	-	Mikrospínač B3U-1000P
2	TL1, TL2	-	Mikrospínač DS1-01
1	SW1	-	1-pozicový DIP přepínač

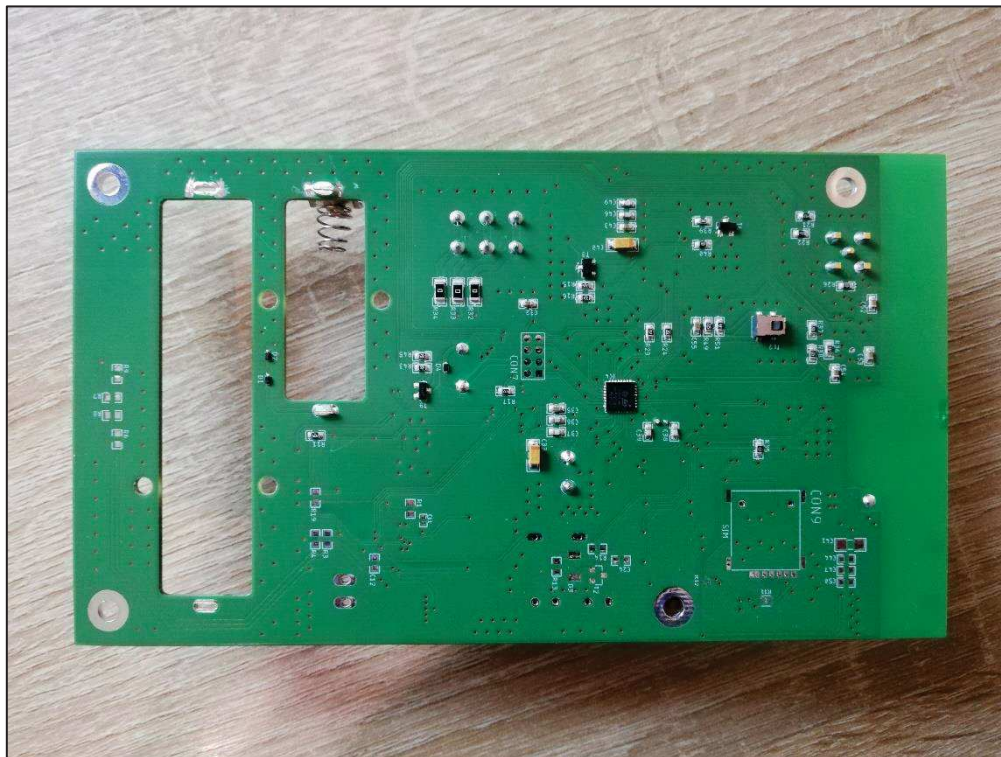
## Příloha C - Fotografie



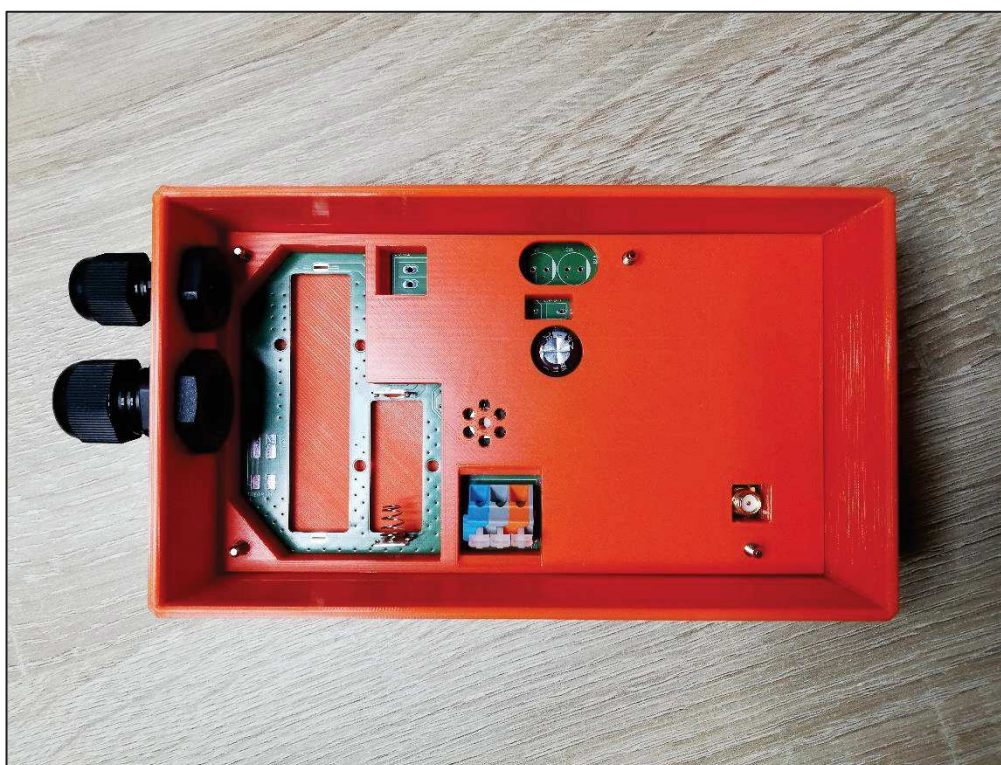
Obrázek 11.1: Měřící pracoviště



Obrázek 11.2: Pohled na DPS z horní strany



Obrázek 11.4: Podhled na DPS ze spodní strany



Obrázek 11.3: Jednotka v přístrojové krabici