ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra informačních a komunikačních technologií v lékařství

Nízkopříkonový senzorový nod pro monitoraci environmentálních veličin

Low-power monitoring node for monitoring environmental variables

Bakalářská práce

Studijní program:	Biomedicínská a klinická technika
Studijní obor:	Informační a komunikační technologie v lékařství

Vypracoval:	Jiří Kubín
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Smrčka, Ph.D.

Praha 2021

ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	**Kubín**	Jméno:	**Jiří**	Osobní číslo:	**483398**
Fakulta:	**Fakulta biomedicínského inženýrství**				
Garantující katedra:	**Katedra informačních a komunikačních technologií v lékařství**				
Studijní program:	**Biomedicínská a klinická technika**				
Studijní obor:	**Informační a komunikační technologie v lékařství**				

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nízkopříkonový senzorový nod pro monitoraci environmentálních veličin

Název bakalářské práce anglicky:

Low-power monitoring node for monitoring environmental variables

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte, realizujte a ověřte řešení ultranízkopříkonového senzorového uzlu, použitelného pro kontinuální dlouhodobou bezdrátovou monitoraci environmentálních veličin. Řešení bude koncipované tak, že umožní bezúdržbový provoz v terénu (bez výměny baterie) v řádu několika let. Monitorované údaje se budou dávkově přenášet vybraným radiovým rozhraním do sběrné stanice v pravidelných intervalech (perioda řádově desítky až stovky minut dle konfigurace) ve stanoveném datovém protokolu. Senzorový nod bude mít pouzdření a teplotní rozsah odpovídající stálému provozu ve venkovním prostředí. Součástí řešení bude také modulární sada vybraných senzorů environmentálních veličin (např. teplota, vlhkost, případně koncentrace CO2 apod.) připojitelných k senzorovému nodu. Senzorový nod bude zhotoven ve formě několika funkčních vzorků, které budou propojeny do jednoduché senzorové sítě hvězdicové topologie. Ověřte funkčnost sytému v laboratorních a poloterénních podmínkách, analyzujte dosažené výsledky a parametry a vytvořte podrobnou konstrukčně-technologickou dokumentaci řešení.

Seznam doporučené literatury:

[1] ĎAĎO, Stanislav, KREIDL Marcel, Senzory a měřicí obvody, ed. 1, České vysoké učení technické, 1996, ISBN 80-01-01500-9
[2] S. Alimi, S. Shue and J. M. Conrad, Design and implementation of an open-source Wireless Sensor Network development platform, 2014, 1-2 s., IEEE SOUTHEASTCON, 10.1109/SECON.2014.6950740
[3] Lozano, Jesús & Apetrei, Constantin & Ghasemi-Varnamkhasti, Mahdi & Matatagui, Daniel & Santos, José, Sensors and Systems for Environmental Monitoring and Control, Journal of Sensors, ročník 10.1155/2017/6879748, číslo 1-2, 2017

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Smrčka, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Martin Vítězník

Datum zadání bakalářské práce: **03.02.2021**
Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

doc. Ing. Karel Hána, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
podpis děkana(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Nízkopříkonový senzorový nod pro monitoraci environmentálních veličin“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 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.

V Praze dne ....

Jiří Kubín

ABSTRAKT

Cílem práce je navrhnout a vyrobit nízkopříkonovou multisenzorickou jednotku pro monitorování environmentálních veličin, umožnující bezdrátové odesílání naměřených dat s využitím vybrané komunikační technologie. V rámci práce byl proveden průzkum trhu, na jehož základě byly vybrány vhodné komponenty pro konstrukci zařízení. Následně bylo vytvořeno schéma zapojení, podle kterého byl navržen, vyroben a osazen plošný spoj.

U vyrobeného zařízení byly provedeny testy komunikačního dosahu. Dále byly predikovány výdrže na baterii pro vybrané konfigurace. Výsledky testů senzorické jednotky byly zpracovány jako technická dokumentace navrženého zařízení.

Klíčová slova

LPWAN, IoT, LoRa, mikropočítač, baterie, watchdog, external timer, TPL5010.

ABSTRACT

The aim of this work is to design and put together a low-power multisensor unit for monitoring environmental variables, enabling wireless sending of measured data using selected communication technology. Within the work, a market research was proved, on the basis of which suitable components for construction equipment were selected. Subsequently, a circuit diagram was created, according to which a printed circuit board was designed, manufactured and installed.

Communication range tests have been carried out on manufactured equipment. Next, battery life was predicted for the selected configurations. Test results of the sensory unit were processed as technical documentation of the proposed equipment.

Key words

LPWAN, IoT, LoRa, microcomputer, battery, watchdog, external timer, TPL5010.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek **8**

1 Úvod **10**

2 Přehled současného stavu **11**
2.1 Sigfox . . . 12
2.2 Nb-IoT . . . 13
2.3 LoRa . . . 14
2.3.1 Fyzická vrstva LoRa . . . 14
2.3.2 Nastavitelné parametry komunikace . . . 15
2.3.3 Datový paket LoRa . . . 16
2.3.4 LoRaWAN . . . 19
2.4 Porovnání technologií pro LPWAN . . . 20

3 Návrh senzorické jednotky **21**
3.1 Stanovení požadavků . . . 21
3.2 Výběr komponent . . . 22
3.2.1 Výběr baterie . . . 22
3.2.2 Výběr externího časovače . . . 24
3.2.3 Výběr mikrokontroléru . . . 25
3.2.4 Výběr bezdrátového komunikačního modulu . . . 26
3.3 Návrh senzorické jednotky . . . 27
3.3.1 Blok napájení . . . 27
3.3.2 Návrh plošného spoje . . . 30
3.4 Konstrukce zařízení . . . 32
3.4.1 Výběr krycí krabičky . . . 32
3.4.2 Konstrukce senzorické jednotky . . . 32
3.4.3 Konstrukce přijímače . . . 33

4 Testování senzorické jednotky **35**
4.1 Experimentální ověření komunikačního dosahu . . . 35
4.1.1 Postup měření . . . 36
4.1.2 Výsledky měření . . . 37

4.2 Predikce výdrže na baterii 40
4.2.1 Rovnice pro odhad výdrže 40
4.2.2 Měření příkonu modulu LoRa 42
4.2.3 Konkrétní odhad výdrže 43

5 Diskuze **49**

6 Závěr **51**

Seznam použitých zdrojů **53**

Přílohy **57**

A Schéma modulu m0 LoRa **58**

B Schéma senzorické jednotky **59**

C Naměřené příkony modulu RF95 **60**

Seznam symbolů a zkratek

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
BW	Hz	Šířka pásma
E_{cycle}	J	Energie pro vykonání jednoho cyklu
E_{BATT}	J	Energie pro vykonání jednoho cyklu
n_{cycles}	-	Počet uskutečnitelných cyklů senzorické jednotky
n_{pl}	bit	Délka užitečné zprávy
n_{pr}	bit	Délka preamble
n_{pr}	bit	Délka preamble
$P_{selfdischarge}$	W	Samovybíjecí výkon baterie
P_{LoRa}	W	Příkon komunikačního modulu LoRa
$RSSI$	dBm	Síla přijatého signálu
R_b	bitů/s	Komunikační rychlost
SNR	dB	Poměr signálu a šumu
$t_{function}$	roky	Pohotovostní doba
t_{cycle}	s	Čas vykonávání jednoho cyklu
t_{pl}	s	Čas odesílání payload
t_{pr}	s	Čas odesílání preamble
t_s	s	Čas odesílání jednoho symbolu
t_{TX}	s	Čas odesílání paketu

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
BPSK	Binary-Phase Shift Keying – Binární-fázové klíčování
AES	Advanced Encryption Standard – Standard pokročilého šifrování
bps	Bits per second – Bity za sekundu
Bps	Bytes per second – Bajty za sekundu
CRC	Cyclic Redundancy Check – Cyklický redundantní součet
CSS	Chirp Spread Spectrum – Chirpová modulace rozprostřeného spektra
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Electrical Erasable Programmable Read-Only Memory
GPIO	General Purpose Input Output – Univerzální vstupně/výstupní pin
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global Systém for Mobile Communications – Systém pro mobilní komunikaci
IoT	Internet of Things – Internet věcí
ISM	Industrial, Scientific and Medical – Pásma pro rádiové vysílání v oborech průmyslu, vědy a zdravotnictví
Kbps	Kilobits per second – Kilobity za sekundu
LPWAN	Low Power Wire Area Network
LTE	Long Term Evolution
Mbps	Megabits per second – Megabity za sekundu
MCU	Microcontroller Unit – Mikrokontrolér
QoS	Quality of Service – Kvalita služeb
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying – Kvadraturní fázové klíčování
SPI	Seriál Peripheral Interface – Sériové periférní rozhraní
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – Asynchronní sériové rozhraní
UNB	Ultra Narrow Band

1. Úvod

Internet věcí (Internet of Things) je v současnosti velmi často zmiňované téma, které se díky novým technologiím rychle rozvíjí. Jeho hlavní myšlenkou je připojování elektronických zařízení („věcí“) do internetu za účelem automatické výměny malého objemu dat na vybrané, nejčastěji bezdrátové komunikační technologii.

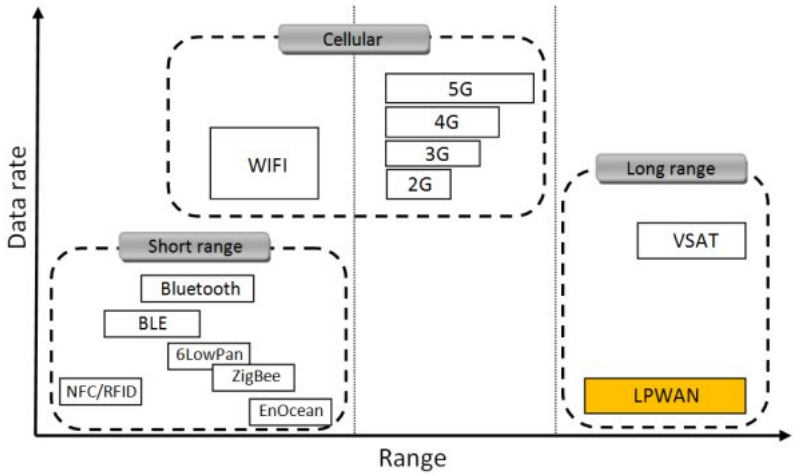
Významná část těchto zařízení je umístěna na místech, kde není k dispozici elektrická rozvodná síť, proto jsou tyto koncové body odkázány na napájení z baterií. Důležitým požadavkem na koncové zařízení je nízkopříkonové řešení pro maximalizaci výdrže baterie, která nemůže být neustále vyměňována nebo dobíjena.

Cílem práce je návrh, realizace a testování nízkopříkonového senzorického systému pro dálkovou monitoraci environmentálních veličin schopného operovat bez výměny nebo dobití baterie řádově jednotky až desítky let v širokém pásmu teplot. První část práce shrnuje dostupné nízkopříkonové bezdrátové technologie pro přenos dat. Druhá část je věnována návrhu a praktické realizaci vlastní senzorické jednotky. Poslední část dokumentuje experimentální ověření komunikačního dosahu a energetické náročnosti zkonstruovaného řešení pro vybrané módy operace.

2. Přehled současného stavu

V současné době existuje spousta technologií pro komunikaci mezi zařízeními ve světě IoT. Z hlediska praktičnosti převažují technologie bezdrátové, umožňující instalovat koncové zařízení na libovolné místo v rámci dosahu použité komunikační technologie. V takovém případě je koncové zařízení téměř jistě odkázáno na bateriové napájení, které s sebou přináší jen omezenou výdrž.

V rámci této kapitoly budou rozebrány vlastnosti nízkopříkonových bezdrátových technologií s dlouhým komunikačním dosahem pro použití v IoT. Tyto technologie se používají v sítích LPWAN (low power wide area network). Porovnání sítí LPWAN s ostatními sítěmi z hlediska dosahu a přenosové rychlosti, je znázorněno na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Porovnání vlastností sítě LPWAN s ostatními sítěmi[1]

Obecně lze říct, že komunikační technologie pro použití v LPWAN sítích poskytují jen velmi omezenou komunikační rychlost, avšak mají dobrý komunikační dosah a nízkou spotřebu. Mezi nejpoužívanější

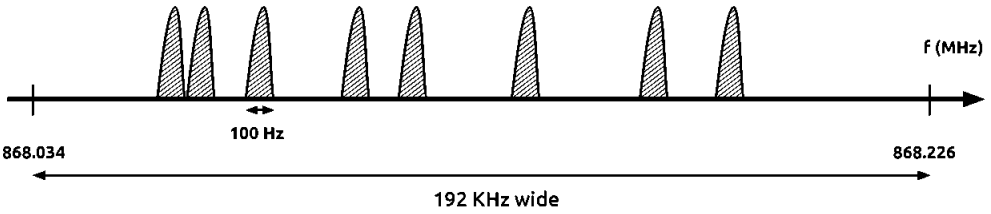
technologie se zmíněnými vlastnostmi patří Sigfox, Nb-IoT a LoRa. Výše uvedené technologie budou popsány a navzájem porovnány, přičemž největší část bude věnována technologii LoRa, která bude použita v praktické části práce.

2.1 Sigfox

Technologie Sigfox patentovaná stejnojmennou francouzskou společností byla představena v roce 2010 [2]. Sigfox pro svou komunikaci využívá bezlicenční pásma ISM (industrial, scientific and medical) pracující na volných frekvencích (868 Mhz pro Evropu a 915 Mhz pro Severní Ameriku). Technologie využívá BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulaci na velmi úzkém frekvenčním pásmu o šířce 100 Hz, které je zárukou velmi efektivního využití ISM pásma a velké kapacity sítě. Použití velmi úzkého frekvenčního pásma zkráceně UNB (Ultra-Narrow band) dále přináší vysokou úroveň potlačení šumu, z čehož plyne vysoká citlivost i při nízkém vysílacím výkonu.

Síť Sigfox umožňuje obousměrnou komunikaci, která je omezena na 140 odchozích zpráv (uplink) s maximální délkou 12 bajtů a 4 garantované příchozí zprávy (downlink) s maximální délkou 8 bajtů [1]. Daná omezení vyplývají z všeobecného oprávnění k využívání rádiových kmitočtů a zařízení krátkého dosahu. Tento dokument existuje v několika zněních pro různé světové lokace. V České Republice se lze řídit podle [3].

Pro maximalizaci úspěšnosti přenosu dat v síti Sigfox je zpráva odeslána celkem třikrát, vždy s jinou náhodnou nosnou frekvencí, v rámci vyhrazeného subpásma ISM o šířce 192 kHz, viz obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Frekvenční pásmo s jednotlivými UNB kanály technologie Sigfox[4]

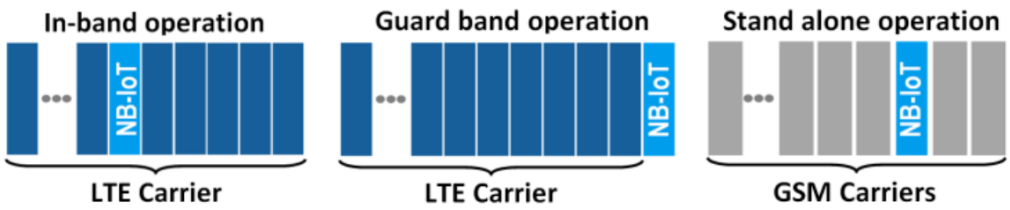
Vyslané pakety z koncových zařízení jsou zachycovány přijímači, které monitorují UNB komunikační kanály. Přijatá data jsou dále odesílána na Sigfox server [4].

Spolehlivost komunikace koncových zařízení závisí na pokrytí sítí Sigfox, kterou lze ověřit na webové stránce [5]. Dále je také závislá na samotném umístění koncového zařízení, jemuž technologie Sigfox umožňuje komunikovat rychlostí 100 nebo 600 bitů za sekundu s komunikačním dosahem zhruba 10 km v zastavěných oblastech a 40 km ve volném prostranství. Komunikační rychlost se liší podle regionu použití [1].

2.2 Nb-IoT

NB-IoT (NarrowBand IoT) je úzkopásmová nízkopříkonová komunikační technologie, která operuje v licencovaných LTE a GSM frekvenčních pásmech. Technologie využívá šířku pásma 180 kHz s 15 kHz ochrannými pásmy.[6] Existují celkem tři módy operace technologie NB-Iot znázorněné na obrázku 2.3.

- Stand alone operation: Mód operace používaný v případech, kdy není dostupné LTE.
- Guard band operation: Komunikace probíhá v ochranných pásmech LTE pásma.
- In-band operation: Komunikace probíhá v jednom slotu LTE pásma.



Obrázek 2.3: Módy operace technologie Nb-IoT v LTE a GSM pásmech [1]

NB-IoT umožňuje připojení více než 100 tis. zařízení na jeden přijímač. Technologie využívá modulaci QPSK (quadrature phase-shift keying) [6]. Maximální propustnost je 200 kbps pro downlink a 20 kbps pro uplink. Maximální délka zprávy je 1600 bajtů. Komunikační dosah je odhadován na 1 km pro zastavěné oblasti a 10 km pro volné prostranství [1].

2.3 LoRa

LoRa (Long Range) technologie byla navržena a patentována společností Semtech, která je v současné době spolu s firmou Microchip jediným výrobcem RF (radio frekvenčních) čipů s LoRa modulací. Technologie je koncipována pro komunikaci na dlouhou vzdálenost, v rámci které budou přenášeny malé objemy dat. Komunikace je realizována v bezlicenčních ISM pásmech, která jsou mnohem více zarušena, než pásma placená. Z tohoto důvodu byl při vývoji kladen důraz na ochranu soukromí a odolnost vůči rušení. Výhodou modulace LoRa je nízká energetická náročnost. Technologie je tak přímo předurčená pro konstrukci zařízení, které by mělo vydržet fungovat několik let na baterii.

2.3.1 Fyzická vrstva LoRa

Fyzická vrstva je založena na proprietární modulaci patentované firmou Semtech. Tato modulační technika je založena na modulaci Chirp Spread Spectrum (CSS). Jejími hlavními klady jsou relativně nízké

nároky na vysílací výkon a odolnost vůči degradaci kvality kanálu (vícecestné šíření, útlum signálu, Dopplerův jev, rušení v přenosovém pásmu).

Princip Chirp modulace spočívá v generování Chirp signálu, který lineárně s časem zvyšuje svoji frekvenci od spodní hranice pásma po horní hranici pásma (Chirp-up), nebo svoji frekvenci snižuje (Chirp-down) viz obrázek 2.4. Frekvenční rozdíl mezi vysílačem a přijímačem může představovat až 20 % šířky pásma bez vlivu na dekódovací schopnost. Díky tomuto rozdílu je snížena cena LoRa modulů, protože výrobci nemusí implementovat vysoce přesné krystaly navyšující koncovou cenu [7].

2.3.2 Nastavitelné parametry komunikace

Uživatelsky lze ovlivnit parametry přenosu (citlivost přijímače, přenosová rychlost, protichybový kód) konfigurací parametrů uvedených v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Nastavitelné parametry fyzické vrstvy LoRa [8]

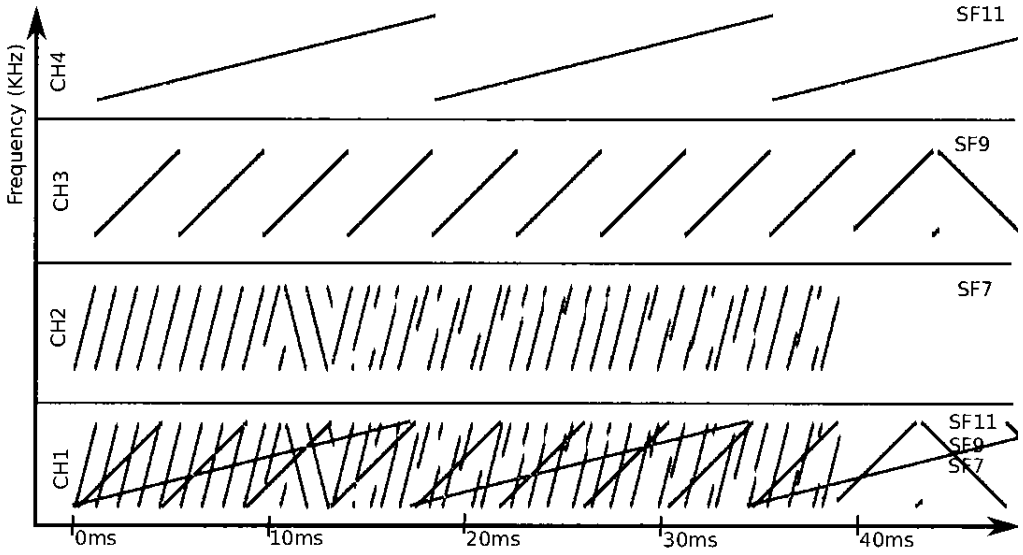
Parametr	Možné konfigurace
BW (band width) [kHz]	7,8; 10,4; 15,6; 20,8; 31,2; 41,7; 62,5; 125; 250; 500
SF (spreading factor)	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
CR (code rate)	1, 2, 3, 4
n_{pl} (délka payload) [Bajt]	0-255
n_{pr} (délka preamble) [Bit]	0-65535

Parametry SF (spreading factor) a šířka pásma BW stanovují čas (s) odeslání jednoho symbolu (bajtu) viz rovnice 2.1 [8].

$$t_s = \frac{2^{SF}}{BW} \tag{2.1}$$

Závislost komunikační rychlosti na zvoleném SF demonstruje obrázek 2.4. Na zmíněném obrázku je patrné, že fyzické rámce s různým nastavením SF jsou navzájem ortogonální (vzájemně se neruší).

Z toho plyne, že maximální přenosová kapacita na vybrané šířce pásma je dána součtem rychlostí pro všechna možná nastavení SF. Například pro zvolenou šířku pásma $BW = 125$ kHz je přenosová kapacita 21,531 kb/s.



Obrázek 2.4: Modulace technologie LoRa pro různé nastavení SF[7]

Zahrnutím kódového poměru CR do předchozí rovnice 2.1 dostaneme vztah pro užitečnou komunikační rychlost R_b v bajtech za sekundu viz 2.2. [9]

$$R_b = \frac{\frac{4 \cdot SF}{4+CR}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \tag{2.2}$$

Kódový poměr vychází z Hammingova kódu, který souží pro opravu chybně přenesených dat.[8] Vypočtené komunikační rychlosti pro různé konfigurace SF a CR vypočítané dle vztahu 2.2 jsou v tabulce 2.2.

2.3.3 Datový paket LoRa

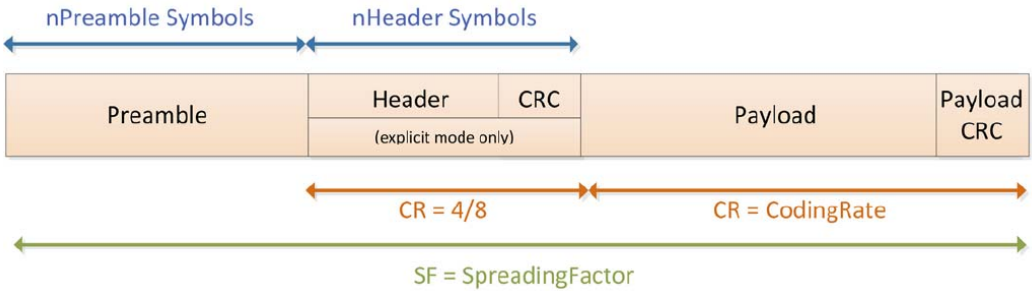
Podkapitola popisuje datovou strukturu LoRa paketu, dále uvádí rovnice pro výpočet doby odesílání paketu, které vychází z předchozí podkapitoly.

Tabulka 2.2: Komunikační rychlosti fyzické vrstvy LoRa pro různé konfigurace SF a CR na šířce pásma 125kHz

	Komunikační rychlosti (Bps)			
	$CR = 1$	$CR = 2$	$CR = 3$	$CR = 4$
$SF = 7$	683,59	569,66	488,28	427,25
$SF = 8$	390,63	325,52	279,02	244,14
$SF = 9$	219,73	183,11	156,95	137,33
$SF = 10$	122,07	101,73	87,19	76,29
$SF = 11$	67,14	55,95	47,96	41,96
$SF = 12$	36,62	30,52	26,16	22,89

Datový paket se může skládat ze tří částí: preamble, header a payload viz obrázek 2.5. Odesílání prostřední části paketu (header) není povinné. Pokud je header součástí payload, hovoříme o implicitním módu, pokud je header zvlášť, hovoříme o explicitním módu [10].

- Preamble - Část paketu sloužící pro časovou synchronizaci mezi vysílačem a přijímačem. Délku preamble lze nastavit na 6 až 65535 symbolů. Podstatné je, aby byla délka preamble nastavena u vysílače i přijímače identicky. Pokud přijímač nezná délku preambule vysílače, je vhodné na straně přijímače nastavit preamble na maximální délku.
- Header (hlavička) nese informaci o délce zprávy uložené v payloadu, součet pro dopřednou kontrolu chyb a popřípadě také adresu zařízení začleněného do komuniakce. Samotná hlavička má svůj kontrolní součet.
- Payload obsahuje užitečná data. Při volbě explicitního módu komunikace je navíc payload doplněn přednastaveným kontrolním součtem.



Obrázek 2.5: Struktura datového paketu LoRa[10]

Čas potřebný pro odeslání paketu t_{TX} lze vyčíslit jako součet času odesílání preamble t_{pr} a času odesílání užitečné zprávy t_{pl} viz 2.3.

$$t_{TX} = t_{pl} + t_{pr} \tag{2.3}$$

Čas potřebný pro odeslání preamble t_{pr} spočteme podle rovnice 2.4.

$$t_{pr} = (n_{pr} + 4,25) \cdot t_s \tag{2.4}$$

Kde n_{pr} je délka preamble, 4,25 je délka synchronizačního slova a t_s je doba odeslání jednoho znaku.

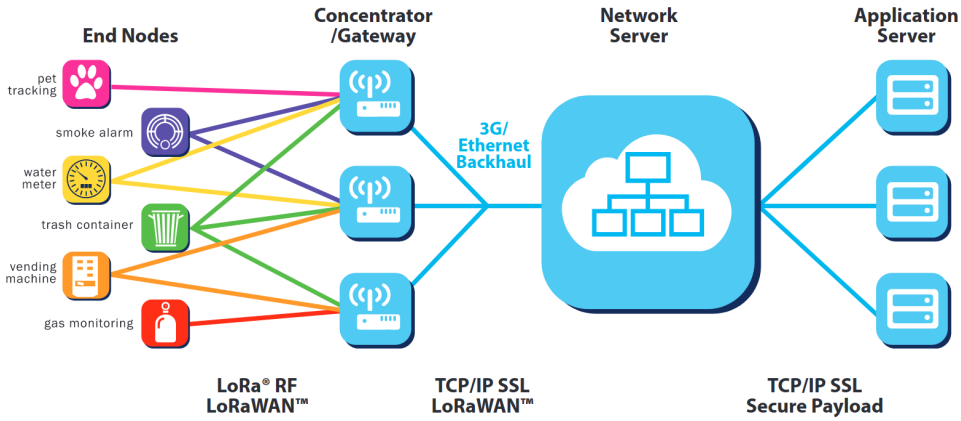
Čas pro odesílání zprávy t_{pl} obsahující kontrolní součet a užitečnou zprávu o délce n_{pl} symbolů je dán rovnicí 2.5 upraveno z [10].

$$t_{pl} = \left\{ 8 + ceil \left[\left(\frac{(8 \cdot n_{pl} - 4SF + 28 + 16CR - 20IH)}{4(SF - 2DE)} \right) \cdot (CR + 4) \right] \right\} \cdot t_s \tag{2.5}$$

Kde parametr IH (implicit header) může nabývat hodnot 0 nebo 1 (hlavička se neodesílá). Parametr DE nabývá hodnoty 1 pouze pokud $t_s > 16ms$. To se obvykle děje při pomalých vysílacích konfiguracích například $BW = 125$ kHz, $SF = 12$. Funkce ceil zaokrouhlí číslo nahoru, na první celé číslo.

2.3.4 LoRaWAN

LoraWAN je komunikační protokol, který slouží k připojení jednotlivých koncových bodů do sítě, přes tzv. brány (gateway). Brány dále odesílají přijatá data pomocí běžných síťových technologií na aplikační server, odkud jsou dostupná koncovým uživatelům. Princip funkce je znázorněn na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Architektura sítí LoRaWAN[11]

Síť LoRaWAN rozřazuje koncová zařízení do třech tříd, podle energetické náročnosti.

- Třída A - Do této třídy spadají energeticky nejméně náročná zařízení. Downlink koncového bodu je umožněn pouze ve dvou krátkých časových intervalech následujících po odeslané zprávě z koncového bodu.
- Třída B - Vychází z třídy A, navíc umožňuje dodatečný downlink v přesně stanovených časech.
- Třída C - Zahrnuje koncová zařízení s nejrychlejší odezvou. Většinou se jedná o zařízení, která jsou trvale připojená k elektrické rozvodné síti, což umožňuje stálý příjem dat.

Síť LoRaWAN umožňuje šifrování pomocí symetrické šifry AES s klíčem o délce 128 bitů. Odesílaná zpráva je tímto způsobem zašifrovaná od koncového zařízení až po aplikační server [11].

2.4 Porovnání technologií pro LPWAN

Zmíněné LPWAN technologie lze porovnávat podle parametrů uvedených v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Základní parametry vybraných LPWAN technologií, upraveno z [1]

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulace	BPSK	CSS	QPSK
Pásmo	ISM pásmo	ISM pásmo	Pásma LTE a GSM
Šířka pásma	100 Hz	125 kHz a 250 kHz	200 kHz
Maximální přenosová rychlost	100 bps	50 kbps	200 kbps
Obousměrný přenos	omezený/Half-duplex	ano/Half-duplex	ano/Half-duplex
Počet zpráv za den	140 (UL), 4 (DL)	omezeno pásmem ISM	neomezený
Maximální délka zprávy	12 B (UL), 8 B (DL)	243 B (UL)	1600 B
Dosah	10 km (městská zástavba), 40 km (přímá viditelnost)	5 km (městská zástavba), 20 km (přímá viditelnost)	1 km (městská zástavba), 10 km (přímá viditelnost)
Odolnost vůči rušení	velmi vysoká	velmi vysoká	nízká
Šifrování	nepodporuje	ano (AES 128 b)	ano (LTE šifrování)
Adaptivní rychlost komunikace	nepodporuje	podporuje (upravuje podle kvality signálu)	nepodporuje

Téměř všechny zmíněné technologie byly komercializovány. Pouze technologii LoRa lze využít zcela nezávisle na provozovateli cizí radiové sítě. Výhodou zmíněné technologie je široká konfigurovatelnost vysílacích parametrů (SF, BW, CR). Díky tomu lze při vhodném nastavení dosáhnout dlouhé životnosti na baterii.

3. Návrh senzorické jednotky

Kapitola popisuje výběr jednotlivých komponent pro konstrukci senzorické jednotky. Dále je popsán návrh funkčních bloků, ze kterých je vytvořeno schéma zapojení a následně navržen plošný spoj. Závěr podkapitoly je věnován výběru krycí krabičky pro senzorickou jednotku.

3.1 Stanovení požadavků

Požadavky na konstrukci senzorické jednotky jsou:

- Dlouhá provozní doba na baterii.
- Komunikační dosah několik kilometrů ve volném prostranství.
- Schopnost operovat při teplotách -20 až 70 °C.
- Konstrukce vhodná pro provoz ve venkovním prostředí.
- Možnost snadného budoucího připojování kompatibilních environmentálních senzorů.

Nad rámec zadání je vhodné navrhnout i stranu přijímače dat ze senzorické jednotky pro otestování funkčnosti senzorického systému. Strana přijímače (gateway) by měla umožnit ukládání přijatých dat a jejich odesílání do počítače. Z hlediska použití by měla být její obsluha uživatelsky přívětivá. Senzorická jednotka bude zkonstruována tak, aby jí bylo možné použít i jako přijímací stranu.

3.2 Výběr komponent

Podkapitola popisuje výběr klíčových komponent senzorické jednotky, jejíž blokové schéma dokumentuje obrázek 3.1. Pozornost bude věnována výběru následujících komponent: baterii, mikrokontroléru, externího časovače a komunikačního modulu.

3.2.1 Výběr baterie

Požadavky na zdroj energie jsou následující:

- vysoká objemová energetická hustota $\mathrm{J\,.\,m^{-3}}$ (rozměrové kritérium)
- nízké samovybíjení (kritérium výdrže až několik let)
- schopnost operovat při teplotách -30 až 80 °C
- kontinuální proud vyšší než 500 mA (pro odesílání dat a napájení připojených senzorů)
- napětí článku vyšší než 3 V (pro napájení MCU bez nutnosti zvyšovat napětí)

Články na bázi lithia mají nejvyšší napětí. Lithiový článek nabízí nejvyšší měrnou energii $\mathrm{J\,.\,kg^{-1}}$ a hustotu energie $\mathrm{J\,.\,m^{-3}}$ ze všech dostupných chemikálií pro baterie. Lithiové články pracují v rozsahu provozního napětí od 2,7 do 3,6 V.

Dostupné chemikálie primární baterie zahrnují disulfát železitý $LiFeS_2$, oxid manganičitý lithný $LiMnO_2$, thionylchlorid lithný $LiSOCl_2$ a oxid lithný.[17]

Porovnání vybraných chemických zdrojů energie je v tabulce 3.1

Z uvedených zdrojů energie jsou pro výše specifikované požadavky nejvhodnější lithiové baterie na bázi thionylchloridu lithného ($LiSOCl_2$),

které se vyrábějí ve dvou provedeních, cívkovém a spirálovém. Na internetu jsou též známé pod pojmem průmyslové lithiové baterie.

Tabulka 3.1: Porovnání vybraných akumulátorů [17]

Primary Cell	$LiSOCl_2$ Bobbin-type with Hybrid Layer Capacitor	$LiSOCl_2$ Bobbin-type	Li Metal Oxide Modified for high capacity	Li Metal Oxide Modified for high power	Alkaline	$LiFeS_2$ Lithium Iron Disulfate	$LiMnO_2$ CR123A
Energy Density (Wh/l)	1,420	1,420	370	185	600	650	650
Power	Very High	Low	Very High	Very High	Low	High	Moderate
Voltage	3.6 to 3.9 V	3.6 V	4.1 V	4.1 V	1.5 V	1.5 V	3.0 V
Pulse Amplitude	Excellent	Small	High	Very High	Low	Moderate	Moderate
Passivation	None	High	Very Low	None	N/A	Fair	Moderate
Performance at Elevated Temp.	Excellent	Fair	Excellent	Excellent	Low	Moderate	Fair
Performance at Low Temp.	Excellent	Fair	Moderate	Excellent	Low	Moderate	Poor
Operating Life	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Moderate	Moderate	Fair
Self-Discharge Rate	Very Low	Very Low	Very Low	Very Low	Very High	Moderate	High
Operating Temp.	-55°C to 85°C, can be extended to 105°C for a short time	-80°C to 125°C	-45°C to 85°C	-45°C to 85°C	-0°C to 60°C	-20°C to 60°C	0°C to 60°C

Na základě rešerše zdrojů energie byla nalezena vhodná lithiová průmyslová baterie typu ER34615M/S STD výrobce FANSO s následujícími parametry viz tabulka 3.2.

Tabulka 3.2: Parametry vybrané baterie ER34615M/S STD [18]. Cena baterie platí pro kusový odběr v roce 2021

Samovybíjení při 25°C	$< 1\%$ (rok)
Nominální kapacita při 15 mA (cut off 2 V) (Ah)	13
Maximální kontinuální proudový odběr (mA)	1800
Interval pracovních teplot °C	-55–85
Hmotnost (g)	109
Rozměry (mm)	ø 34,2 × 61,5
Cena 1ks cca (Kč)	306,-

Při výběru byly uvažovány také baterie s vyšší kapacitou než u vybrané baterie, ty však nedokáží dodat potřebný proud pro radiokomunikační modul v režimu odesílání paketu, které může trvat až několik sekund, zvláště pak při nízkých teplotách, nebo na konci své životnosti.

3.2.2 Výběr externího časovače

Požadavky na externí časovač jsou následující:

- velmi nízký příkon
- programovatelný interval probouzení minuty až hodiny
- cenová dostupnost
- vysoká přesnost interního časovače

Průzkum trhu byl proveden pomocí internetu zadáváním klíčových slov: external timer, external watchdog, programable timer, low power timer. Celkem byly nalezeny čtyři integrované obvody externího časovače, jejichž technické parametry a vlastnosti jsou zaneseny v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: Porovnání parametrů nalezených externích časovačů[13],[14],[15],[16]. Cena časovačů platí pro kusový odběr v roce 2021

	STWD100	TPS3431	MAX6369	TPL5010
Proudový odběr (μA)	13	10	8	35 nA
Pracovní napětí (V)	2,7-5,5	1,8-6,5	2,5-5,5	1,8-5,5
Přesnost časovače	neudává se	5 %	neudává se	1 %
Programovatelnost (−)	NE	ANO	ANO	ANO
Nejdelší perioda (s)	1,6	77,455	60	7200 ($2h$)
Pouzdro	SOT 23-5	VSON-8	SOT 23-8	SOT 23-6
Rok uvedení na trh	2007	2018	2000	2015
Cena 1ks cca (Kč)	20,-	35,-	72,-	18,-

Z nalezených možností je nejvhodnější časovač TPL5010, především díky velmi nízkému odběru 35 nA a možnosti nastavovat interval probouzení pomocí externího rezistoru v rozmezí 100 ms až 7200 s. Tento časovač má nejpřesnější oscilátor 1%, tj. během dne se čas může rozejít až od 864s (14,4 min). Pro naší aplikaci, kdy přijímač trvale přijímá signály z koncových bodů, je tato přesnost dostačující.

3.2.3 Výběr mikrokontroléru

Požadavky na vybíraný MCU jsou následující:

- Komunikační sběrnice (UART, SPI, I^2C) pro připojení environmentálních senzorů
- Integrovaný A-D převodník s rozlišením alespoň 12 bitů
- Přehledná technická dokumentace
- Dostatečný výpočetní výkon pro šifrování a dešifrování zpráv
- Cenově dostupné řešení
- Nízký příkon

V současné době je na trhu spoustu mikrokontrolérů různých výrobců, které splňují výše stanovená kritéria, což značně znesnadňuje výběr.

Po předchozí zkušenosti byl vybrán mikrokontrolér firmy Microchip SAMD21G18, jelikož splňuje všechna stanovená kritéria výběru. Jedná se o 32bitový nízkopříkonový MCU s jádrem ARM-Cortex M0+, který svým výkonem a spotřebou postupně nahrazuje zastarávající MCU s AVR jádry. Základní parametry vybraného MCU jsou v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4: Technické specifikace MCU SAMD21 [12]. Cena MCU platí pro kusový odběr v roce 2021

Digitální komunikační rozhraní	UART, SPI, I^2C
Pracovní napětí (V)	1,62–3,62
Interval pracovních teplot °C	-40–125
Rozlišení ADC	12 bitů
Maximální pracovní frekvence (MHz)	48
Časovače	3 x 24bit
Paměť FLASH	256 kB
Paměť SRAM	32 kB
Cena 1ks cca (Kč)	70,-

3.2.4 Výběr bezdrátového komunikačního modulu

V první části práce byly rozebrány dostupné bezdrátové technologie pro LPWAN, z nichž pouze technologii LoRa lze použít bezplatně a nezávisle na provozovateli cizí radiové sítě. Ostatní technologie jsou komerční.

V předchozích projektech byl testován LoRa modul RFM95, který se ukázal být vyhovující, proto bude použit i v navrhovaném zařízení. Jeho parametry jsou zaneseny v tabulce 3.5. Pro konstrukci bylo možné vybrat i moduly jiných výrobců, nicméně všechny integrují kontroléry výrobců Semtech nebo Microchip, kteří vlastní licenci pro výrobu LoRa kontrolérů. Z tohoto důvodu je zbytečné porovnávat několik modulů různých výrobců s kontrolérem stejného typu.

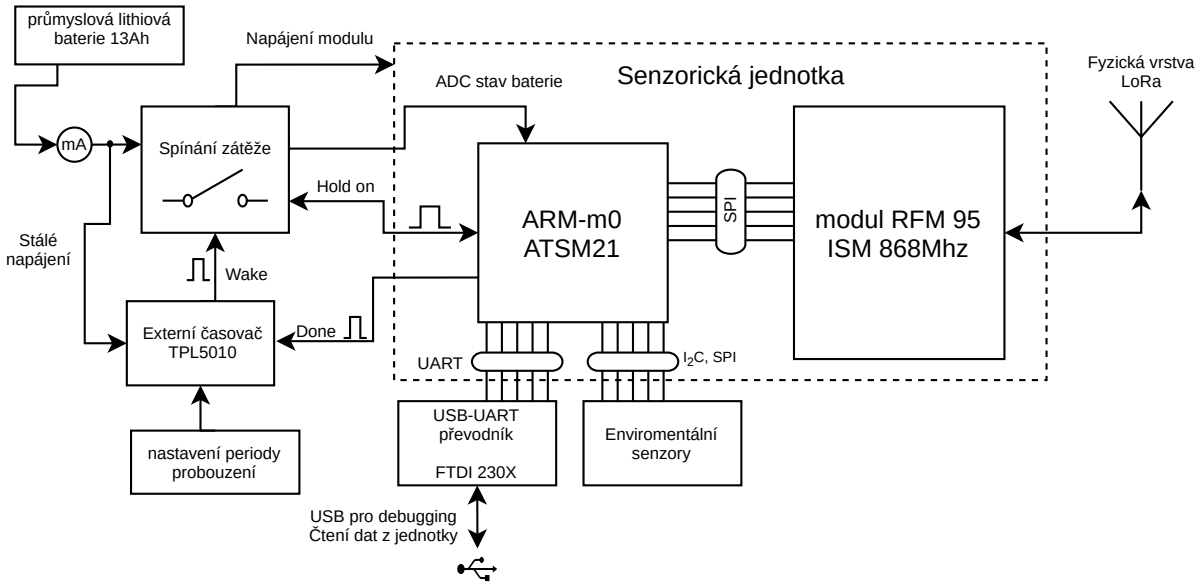
Tabulka 3.5: Parametry komunikačního modulu RFM95 [20]. Cena modulu platí pro kusový odběr v roce 2021

Rozměry (mm)	1,6 × 1,6
Komunikační rozhraní	SPI
Pracovní napětí (V)	1,8 – 3.7
Rozsah měření teploty (°C)	-20–70
Maximální vysílací výkon (mW)	100 (20 dBm)
Citlivost přijímače (dBm)	-148
Pracovní pásmo	ISM 868 Mhz
Proudový odběr v režimu přijímače (mA)	10,4
Proudový odběr v režimu spánku (μA)	0,2
Cena 1ks cca (Kč)	190,-

Pro zjednodušení práce s vybraným modulem lze využít profesionálně napsané, vysokoúrovňové, volně dostupné knihovny Radiohead.[21]

3.3 Návrh senzorické jednotky

Návrh zapojení vycházel ze schématu modulu Feather M0 LoRa viz příloha A, ke kterému byl přidán externí časovač TPL 5010 s odporovou sítí pro nastavení intervalu probouzení senzorické jednotky. Dále byla přidána dvojice unipolárních tranzistorů pro spínání modulu. Pro snadnější debugging byl přidán USB-UART převodník FTDI230X. Blokové schéma navrhovaného řešení je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma jednotky

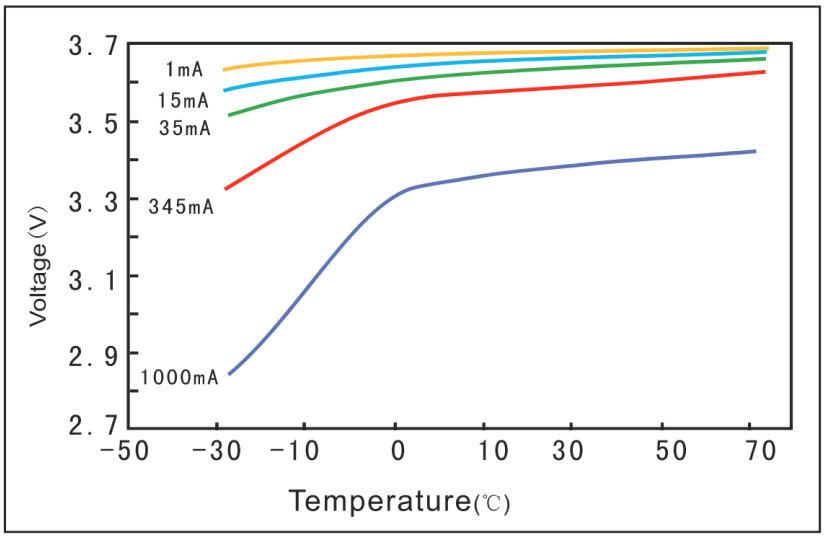
Navržené schéma zapojení uvedené v příloze B bude níže rozebráno.

3.3.1 Blok napájení

Zařízení bude podle přednastavené periody externího časovače připojováno k průmyslové lithiové baterii ER34615M/S, jejíž vybíjecí charakteristika je závislá na teplotě a odebíraném proudu. Při návrhu napájecí části senzorické jednotky je nutné zohlednit teplotní extrémy, kterým může být vybraná baterie vystavena.

Vysoké teploty do 85°C pro baterii nepředstavují problém, naopak

nízké teploty v kombinaci s vysokým odebíraným proudem způsobují pokles napětí. Konkrétní závislost výstupního napětí na odebíraném proudu a teplotě je znázorněna na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Závislost výstupního napětí na odebíraném proudu a teplotě [18]

Nízké teploty by mohly uvést MCU do stavu poklesu napětí pod nastavitelnou hodnotu BOD (Brown out detection). S vysokou pravděpodobností by tento stav nastal při maximálním možném proudovém odběru, který je nutno odhadnout a podle něj napájecí část vhodně dimenzovat.

Pro odhad je nutné sečíst všechny proudové odběry senzorické jednotky. Energeticky nejnáročnějším stavem je odesílání dat v konfiguraci maximálního vysílacího výkonu. Proudové odběry: (MCU, externího časovače, USB-UART převodníku, lineárního stabilizátoru, děliče napětí pro měření napětí akumulátoru atd..), jsou v porovnání s vysíláním LoRa modulu téměř zanedbatelné. Souhrn proudových odběrů je zanesen v tabulce 3.6

Tabulka 3.6: Odhad proudového odběru senzorické jednotky [12], [20]

Maximální proud LoRa modulu (při 3,3V) (mA)	120
Proud MCU SAMD21 ve while(1) (3,3V, 48Mhz) (mA)	3,37
Proud MCU SAMD21 při ADC (mA)	1,25
Proud přes pull-(up, down) rezistory (mA)	1,48
Odhad maximálního proudového odběru (mA)	126,1

Výše uvedená tabulka nezahrnuje proudový odběr připojených senzorů environmentálních veličin, protože výběr konkrétních senzorů nebyl náplní práce. Z tohoto důvodu je nutné počítat s proudovou rezervou. Pro další návrh bude kalkulováno s teoretickým maximálním proudovým odběrem $\mathrm{I_{max}} = 150\,\mathrm{mA}$. V případě, nutnosti připojit komponentu s vyšším proudovým odběrem by bylo nutné zamezit odesílání dat při její aktivitě, nebo komponentu připojit přímo k vybrané baterii s těmito parametry viz tabulka 3.1.

Pro napájení senzorické jednotky bude použit lineární stabilizátor výrobce Microchip AP2125 s výstupním napětím 3 V a maximálním výstupním proudem $0,3\,\mathrm{A}$. Uvažována byla i možnost napájet zařízení bez použití stabilizátoru napětí (přímo z baterie). Zmíněné řešení se jeví jako ideální a jistě by fungovalo. Z hlediska správné konstrukce je však toto řešení nevyhovující, protože napětí vybrané baterie $\mathrm{U_{BATT}} = 3,66\,\mathrm{V}$ překračuje maximální operační napětí zvoleného MCU SAMD21, které je $3,62\,\mathrm{V}$ [12].

Spínání senzorické jednotky v přednastavených intervalech je řešeno dvojicí externích unipolárních tranzistorů, v pouzdře SOT-23. Původně bylo záměrem použít jeden komplementární tranzistor obsahující N-mosfet i P-mosfet, nicméně z hlediska odporu v sepnutém stavu je lepší použít tranzistory v samostatných pouzdrech.

Periodu probouzení externího časovače TPL5010 lze volit rezistorem s požadovaným odporem. Výpočet požadované hodnoty externího

rezistoru R_{EXT} je dán rovnicí 3.1 dle výrobce [16].

$$R_{EXT} = 100 \cdot \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a(c - 100T)}}{2a} \right) \tag{3.1}$$

Kde a, b, c jsou konstanty výrobce, které je nutné dosadit podle požadované periody probouzení T. Hodnoty konstant pro časové intervaly jsou v tabulce 3.7.

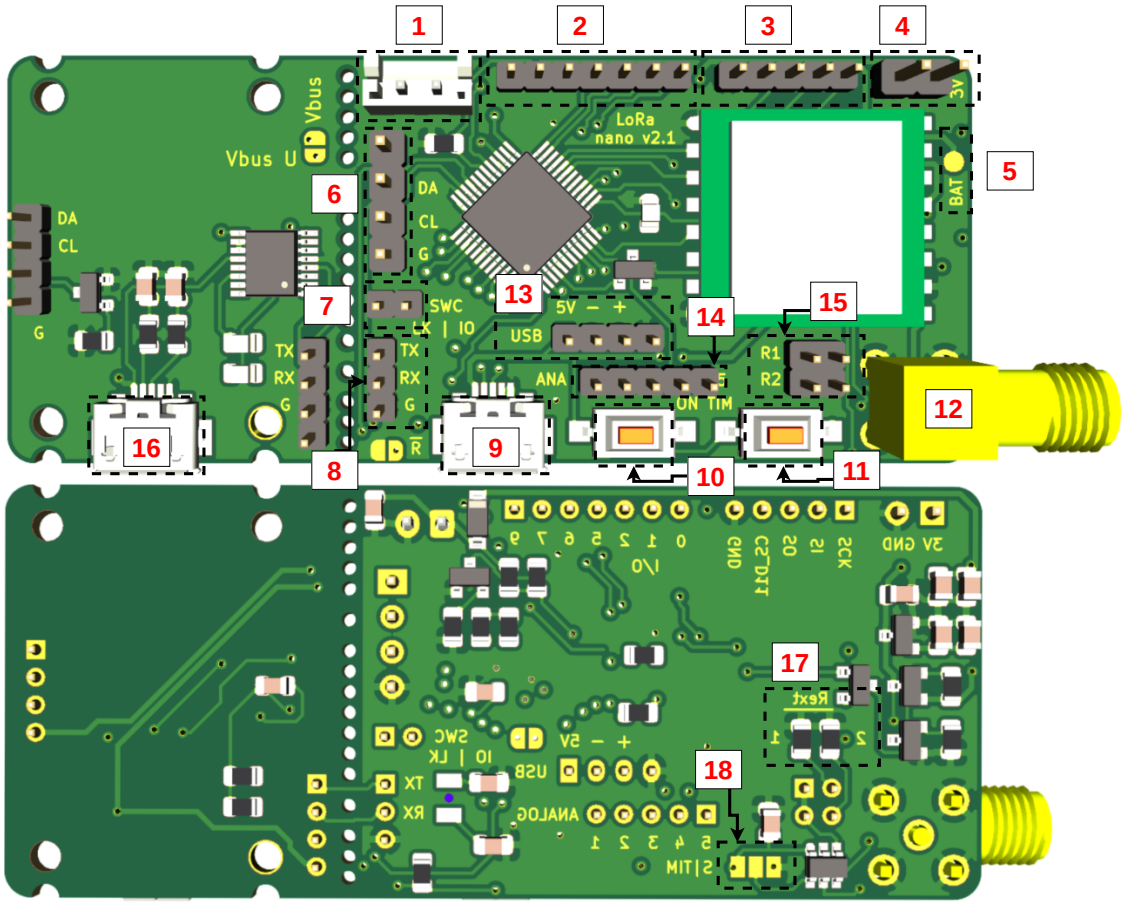
Tabulka 3.7: Konstanty pro výpočet hodnoty R_{EXT} [16]

Time interval Range (s)	a	b	c
1 < T ≤ 5	0.2253	–20.7654	570.5679
5 < T ≤ 10	–0.1284	46.9861	–2651.8889
10 < T ≤ 100	0.1972	–19.3450	692.1201
100 < T ≤ 1000	0.2617	–56.2407	5957.7934
T > 1000	0.3177	–136.2571	34522.4680

Přeprogramování časového intervalu se provádí stiskem SPST tlačítka SW1 viz schéma B, minimálně po dobu 120 ms [16].

3.3.2 Návrh plošného spoje

Podle navrženého schématu v příloze B byl s pomocí opensource programu Ki-Cad vytvořen čtyřvrstvý plošný spoj o rozměrech 30 × 71 mm. Cílem návrhu bylo vytvořit univerzální plošný spoj použitelný jako vysílač i přijímač. V aplikacích, kde není potřeba USB-UART převodník, lze plošný spoj v zeslabeném místě rozlomit na dvě části, čímž se rozměr zredukuje na 30 × 46 mm . Upevnění plošného spoje do krabičky lze řešit šrouby M2, pro které jsou na DPS připraveny montážní otvory. Pro připojení antény byl vybrán SMA konektor. Baterii lze připojit pomocí JST konektoru, nebo jí natrvalo připájet. Komunikační sběrnice a GPIO piny jsou vyvedeny na 2 mm a 2,54 mm hřebínky, které byly pro přehlednost popsány v nevodivé zelené masce DPS. Render navrženého plošného spoje je na obrázku 3.3. Popis jednotlivých částí je v tabulce 3.8



Obrázek 3.3: Render navrženého plošného spoje

Tabulka 3.8: Popis bloků dps senzorické jednotky

1	Konektor JST pro připojení napájení
2	Hřebínek s vyvedenými GPIO piny
3	Hřebínek s vyvedenou SPI sběrnicí včetně GPIO pro chip select
4	Konektor napájení environmentálních senzorů
5	Výstup napětí z baterie, v příloze B označen jako TP1
6	Hřebínek s vyvedenou I2C sběrnicí (SDA, SCL již s pull-up 4, 7 $k\Omega$)
7	Hřebínek pro připojení programátoru, piny (SWCLK, SWDIO)
8	Hřebínek s vyvedenou UART sběrnicí
9	Micro USB pro programování MCU a komunikaci s PC
10	Tlačítko pro zapnutí senzorické jednotky
11	Reset tlačítko externího časovače (pro změnu intervalu)
12	Konektor pro připojení antény
13	Hřebínek s vyvedenými piny USB sběrnice
14	Svorkovnice analogových vstupů
15	Jumpery pro výběr externího odporu, ve schématu B označeno jako J2
10	Výstup USB-UART převodníku
17	Rezistory pro nastavení intervalu probouzení
18	Volba módu operace časovače (timer - periodicky nebo once - jednou) více v [16]

Navržený plošný spoj byl osazen a jeho funkce úspěšně otestována.

3.4 Konstrukce zařízení

Kapitola dokumentuje sestavení senzorické jednotky a přijímače.

3.4.1 Výběr krycí krabičky

Hlavním účelem krabičky je ochrana senzorické jednotky proti vodě vlhkosti a prachu. Z tohoto důvodu byly do výběru zahrnuty krabičky s následujícími parametry.

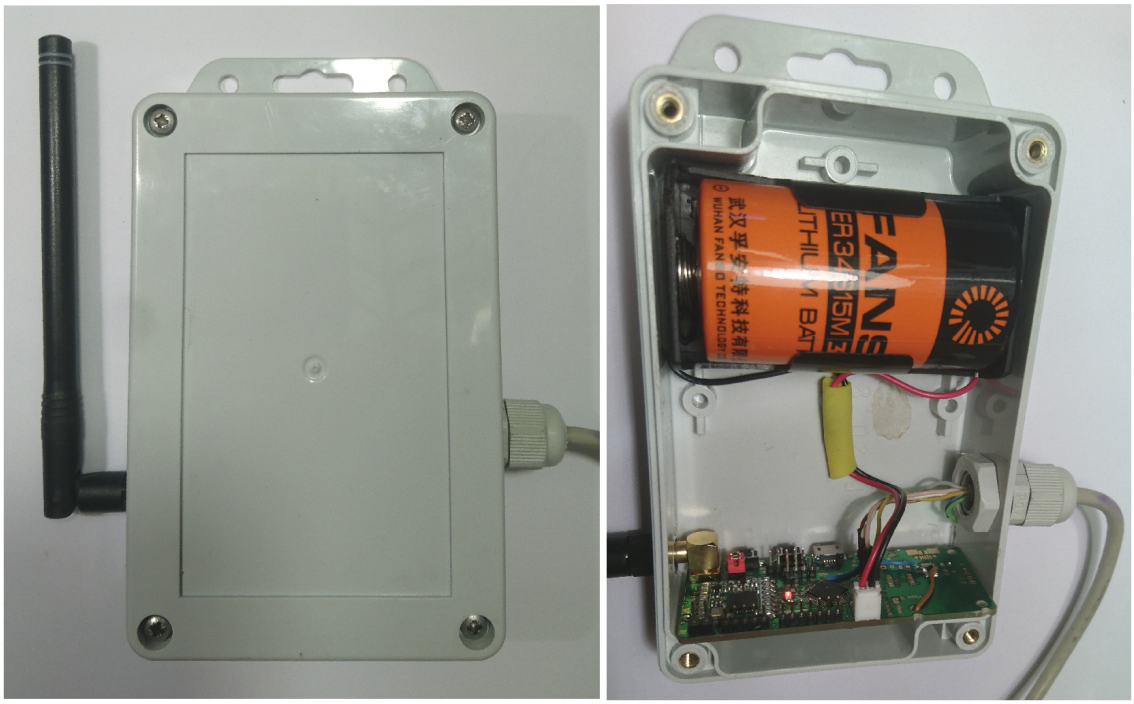
- Minimální odolnost IP65 (ochrana proti prachu a stříkající vodě - déšť)
- Opakovatelná rozebiratelnost (kovové závity)
- Úchyty na připevnění
- Materiál ABS pro svou vysokou teplotní odolnost

Podle požadavků byla vybrána univerzální průmyslová krabička výrobce Kradex o rozměrech $80 \times 120 \times 45$ mm s krytím IP65. Krabička je dostatečně velká pro dodatečné umístění průchodek na kabely k environmentálním senzorům. Pro vyvedení kabelů byly vybrány průchodky výrobce Pawbol s krytím IP67, umožňující vyvést a utěsnit kabel o průměru 3,5 až 6 mm. Vybraná krabička bude použita také jako základ konstrukce přijímače.

3.4.2 Konstrukce senzorické jednotky

Fotografie kompletní senzorické jednotky v krabičce je uvedena na obrázku 3.4. Rozměry plošného spoje byly zvoleny s ohledem na vybranou průmyslovou krabičku. Proto není nutné plošný spoj šroubovat

nebo lepit ke krabičce, stačí pouze nasadit víčko krabičky, do kterého se plošný spoj vlisuje, čímž je pevně fixován. Držák na článek byl přilepen pomocí chemoprénu. Dále byl do krabičky vyvrtán otvor pro průchodku na kabel k senzorům. Vzhledem k velikosti krabičky lze vyvést až čtyři průchodky stejného typu, které jsou na obrázku 3.4. Průchod antény skrze vyvrtaný otvor lze pro dosažení krytí IP65 utěsnit chemoprénem, silikonem nebo jiným lepidlem.



Obrázek 3.4: Senzorická jednotka s připojenou anténou a vyvedeným kabelem na senzor

Na snímku 3.4 lze vidět, že velikost senzorické jednotky je závislá zejména na rozměrech použité baterie.

3.4.3 Konstrukce přijímače

Fotografie přijímače v krabičce je součástí obrázku 3.5. Plošný spoj byl do krabičky umístěn stejným způsobem jako u koncového bodu. Průchodkou byl vyveden USB kabel pro komunikaci s PC, ze kterého je přijímač zároveň napájen. Červené tlačítko na boku slouží pro reset

MCU, což využijeme například při nahrávání firmwaru. Pro okamžitou indikaci stavu zařízení byl přední panel osazen led diodami. Svítí-li zelená dioda, přijímač přijímá data, žlutá dioda indikuje zpracování odesílání právě přijatých dat do PC. Součástí předního panelu je také displej z elektronického inkoustu s rozlišením 200 x 200 pixelů, na který lze vypisovat například nastavení komunikačních parametrů nebo chybové hlášky. Plošný spoj displeje je rozšířen o slot na MicroSD kartu, které lze využít pro zálohu přijatých dat. Více informací o použitém displeji viz [23].

Obrázek 3.5: Přijímač s připojenou anténou a vyvedeným USB kabelem pro připojení k PC

4. Testování senzorické jednotky

Kapitola dokumentuje maximální komunikační dosahy senzorické jednotky pro vybrané konfigurace vysílacích parametrů. Pro vybrané konfigurace vysílacích parametrů je pak predikována výdrž na baterii při konkrétní aplikaci.

4.1 Experimentální ověření komunikačního dosahu

Cílem je experimentálně ověřit komunikační dosahy pro vybrané konfigurace vysílacích parametrů fyzické vrstvy LoRa v podmínkách přímé a nepřímé viditelnosti. Ověřeny budou následující konfigurace vysílacích parametrů fyzické vrstvy LoRa:

- $BW = 125\,\text{kHz}$, CRC $= 4/5$, $SF = 7$
- $BW = 125\,\text{kHz}$, CRC $= 4/5$, $SF = 9$
- $BW = 125\,\text{kHz}$, CRC $= 4/5$, $SF = 12$

Vybrané konfigurace byly vybrány, protože představují kompromis mezi komunikační rychlostí a dosahem komunikace z nabízených možností konfigurací fyzické vrstvy LoRa.

Přenosové parametry na zmíněných konfiguracích budou měřeny pro tři vybrané módy vysílacího výkonu (5, 17 a 23), které umožňuje nastavit používaný modul RF95. Konkrétní proudové odběry odpovídající vybraným módům vysílacího výkonu jsou uvedeny v tabulce 4.3. Pro testování bude využito ISM kmitočtové pásmo g4, které omezuje maximální vysílací výkon na 500 mW a klíčovací poměr na maximálně 10 %[3]. Nosná frekvence bude nastavena na 869,5 MHz.

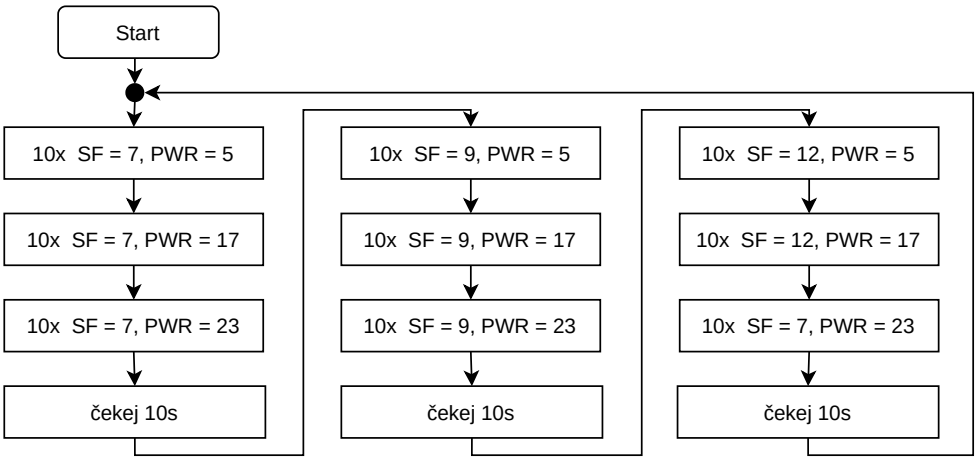
U přijímače i vysílače byla použita prutová anténa výrobce Amber wireless typ AMB1981 viz datový list [22].

4.1.1 Postup měření

Měření ve volném prostranství a v zalesněných oblastech bude provedeno následujícím způsobem. Strana vysílače bude připevněna na strom do výšky zhruba dva metry. Přijímač se bude postupně vzdalovat od vysílače. Na vybraných stanovištích budou měřeny kvalitativní parametry příchozího signálu $RSSI$, SNR a spolehlivost komunikace.

Spolehlivost komunikace bude ověřena tak, že na vybrané konfiguraci bude vždy odesláno 10 testovacích paketů. Spolehlivost udává počet přijatých paketů.

Funkce vysílací strany je znázorněna na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Vývojový diagram činnosti vysílače

Odesílané pakety o délce 10 B budou obsahovat informaci o vysílacím výkonu a počtu již odeslaných zpráv na dané konfiguraci vysílacích parametrů, pro hodnocení spolehlivosti komunikace. Prodleva mezi odesíláním testovacích paketů byla zahrnuta do programu pro pohodlné zapsání naměřených hodnot a přenastavení strany přijímače na další hodnotu SF.

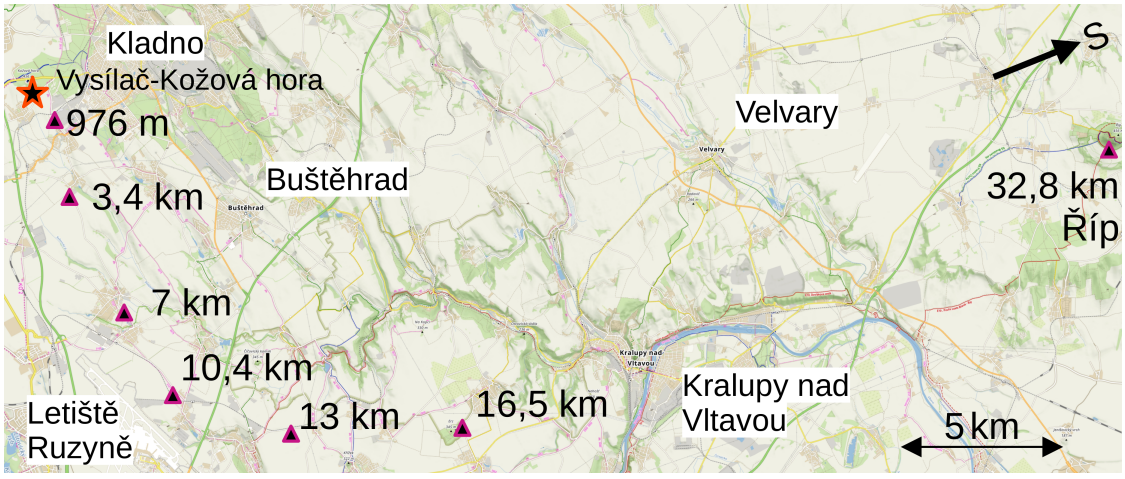
Strana přijímače byla naprogramována tak, aby do sériového portu vypisovala přijaté zprávy spolu s hodnotami $RSSI$ (dBm) a SNR (dB), které jsou vyčítány z registrů LoRa modulu RF95.

Přenastavování vysílacích parametrů bude realizováno skrze sériový port odesíláním konfiguračních zpráv.

Pro zobrazení přijatých dat v terénu bude použita aplikace serial USB terminal fungující pod OS Android.

4.1.2 Výsledky měření

Pro ověření komunikačního dosahu ve volném prostranství byla jako výchozí bod vybrána Kožová hora, na kterou byl umístěn vysílač. Na obrázku 4.2 je znázorněna mapa měření s očíslovanými stanovišti, kterým odpovídají vzdušné vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem, naměřené pomocí GPS zařízení (Garmin Fénix 3). Naměřené hodnoty komunikačních parametrů na vybraných stanovištích jsou zaneseny v tabulce 4.1.



Obrázek 4.2: Mapa s vybranými měřícími stanovišti, sever je označen šipkou v pravém horním rohu

Tabulka 4.1: Parametry naměřené na vybraných stanovištích zanesených v mapě 4.2

$SF = 7$									
	Mód výkonu = 5			Mód výkonu = 17			Mód výkonu = 24		
vzdálenost	N	RSSI	SNR	N	RSSI	SNR	N	RSSI	SNR
976 m	10	-119	0	10	-109	8	10	-105	9
3,4 km				10	-125	-2	10	-119	1
$SF = 9$									
976 m	10	-128	-4	10	-106	11	10	-105	9
3,4 km				10	-129	-5	10	-124	0
7 km							10	-136	-11
10,4 km									
13 km				6	-138	-13			
16,5 km							10	-135	-10
32,8 km							1	-140	-15
$SF = 12$									
976 m	10	128	-4	10	-108	8	10	-105	7
3,4 km	10	-139	-13	10	-122	0	10	-119	2
7 km				10	-140	-13	10	-135	-10
10,4 km				10	-142	-16	10	-135	-9
13 km				10	-143	-18	10	-140	-14
16,5 km				10	-135	-9	10	-130	-5
32,8 km				2	-143	-19	10	-143	-17

Pro ověření komunikačního dosahu v hustém lese zarostlém křovinami byla vybrána lokalita Chyňava okres Beroun viz mapa měření 4.3. Mapa byla úmyslně oddálena, aby bylo možné lokalizovat oblast měření. Naměřené hodnoty komunikačních parametrů na vybraných stanovištích v hustém zalesnění jsou zaneseny v tabulce 4.2.

Obrázek 4.3: Mapa s vybranými měřícími stanovišti v hustém lese

Tabulka 4.2: Parametry naměřené na vybraných stanovištích v hustě zalesněné oblasti

$SF = 7$									
	Mód výkonu = 5			Mód výkonu = 17			Mód výkonu = 24		
vzdálenost (m)	N	RSSI	SNR	N	RSSI	SNR	N	RSSI	SNR
50	10	-128	-6	10	-104	9	10	-101	9
100				10	-115	5	10	-112	7
150				10	-118	1	10	-116	4
200				10	-123	-1	10	-119	0
250				10	-133	-8	10	-127	-4
300				2	-135	-10			
$SF = 9$									
50	10	-129	-4	10	-107	11	10	-100	13
100	10	-130	-5	10	-113	8	10	-107	11
150	10	-135	-10	10	-119	1	10	-115	6
200	10	-138	-12	10	-119	1	10	-116	5
250				10	-129	-5	10	-128	-4
300				10	-130	-6	10	-127	-4
350				3	-140	-15	10	-137	-12
$SF = 12$									
50	10	-118	3	10	-107	8	10	-105	10
100	10	-135	0	10	-117	5	10	-104	9
150	10	-135	-8	10	-122	0	10	-125	5
200	10	-142	-16	10	-127	-1	10	-120	2
250	10	-146	-20	10	-130	-7	10	-129	-3
300	10	-147	-21	10	-138	-12	10	-130	-7
350				10	-141	-16	10	-138	-13
400				5	-146	-20	10	-141	-15
450							7	-145	-18

Z naměřených hodnot lze vyčíst, že nastavování SF v rámci jedné šířky pásma výrazně ovlivňuje prostupnost komunikace. V aplikacích, kde není vyžadován dlouhý komunikační dosah, lze využít nejrychlejší konfiguraci $SF = 7$. Maximální prostupnost dosáhneme s konfigurací $SF = 12$. Při této konfiguraci se podařilo přijmout i silně zarušený signál se $SNR = $-21 dB a $RSSI = $-147 dBm. Tato hodnota je na hranici fyzikálních možností technologie LoRa.

4.2 Predikce výdrže na baterii

V rámci podkapitoly budou sestaveny rovnice pro predikci výdrže, dále budou u senzorické jednotky změřeny proudové odběry pro různé módy operace. V závěru budou predikovány výdrže na baterii pro tři konkrétní nastavení vysílacích parametrů, u kterých byl v předchozí kapitole experimentálně ověřen dosah komunikace.

4.2.1 Rovnice pro odhad výdrže

Podkapitola navazuje na rovnice popisující rychlost komunikace fyzické vrstvy LoRa, uvedené v podkapitole 2.3.2.

Pro vykonání jedné periody funkce senzorické jednotky zahrnující probuzení, naměření dat a jejich odeslání, je potřeba dodat energii E_{cycle}, která je rovna součtu všech odebraných energií E_i během cyklu.

$$E_{cycle} = \sum_{i=m}^{n} E_i \tag{4.1}$$

Odhad uskutečnitelného počtu cyklů n_{cycles} bez ohledu na samovybíjení baterie lze vypočítat podle 4.2

$$n_{cycles} = \frac{E_{BATT}}{E_{cycle}} \tag{4.2}$$

kde E_{BATT} (J) představuje dostupnou energii v akumulátoru.
Do rovnice 4.2 je nutné za parametr E_{BATT} dosadit energii, kterou

lze vyčerpat než U_{BATT} poklesne pod hranici, kdy už zařízení nebude fungovat.

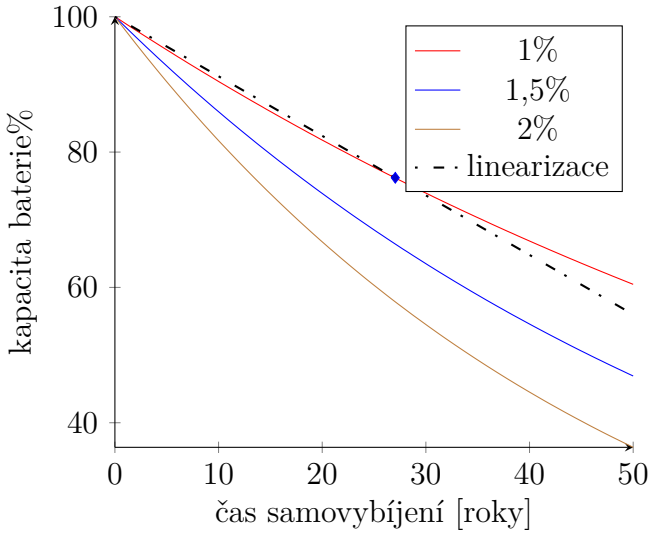
Celková výdrž zařízení $t_{function}$ (roky) je potom dána součinem nastavené periody probouzení t_{cycle} a počtem cyklů n_{cycles} viz 4.3

$$t_{function} = \frac{n_{cycles} \cdot t_{cycle}}{3600 \cdot 24 \cdot 365} \tag{4.3}$$

Konstanta ve jmenovateli je pro přepočet výdrže na roky.

Predikce výdrže zařízení s ohledem na samovybíjení baterie je podstatně složitější. Rychlost samovybíjení baterie výrazně ovlivňuje teplota a způsob odebírání proudu z baterie.

Například vybraná baterie pro senzorickou jednotku udává samovybíjení $< 1\,\%$ kapacity za rok při teplotě 25 °C.[18] Na obrázku 4.4 je znázorněna snižující se dostupná kapacita v závislosti na čase.



Obrázek 4.4: Dostupná energie v baterii během stárnutí

Křivku samovybíjení pro hodnotu 1% za rok na obrázku 4.4 lze pro účely odhadu považovat za lineární do 27. roku, viz průsečík s přímkou linearizace. Bude-li křivka samovybíjení uvažována jako lineární funkce, pak lze po dobu prvních 27 let vypočítat výkon $P_{selfdischarge}$,

kterým se baterie sama vybíjí, podle rovnice 4.4.

$$P_{selfdischarge} = \frac{E_{BATT} - E_{BATT(27.05)}}{27.05 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \tag{4.4}$$

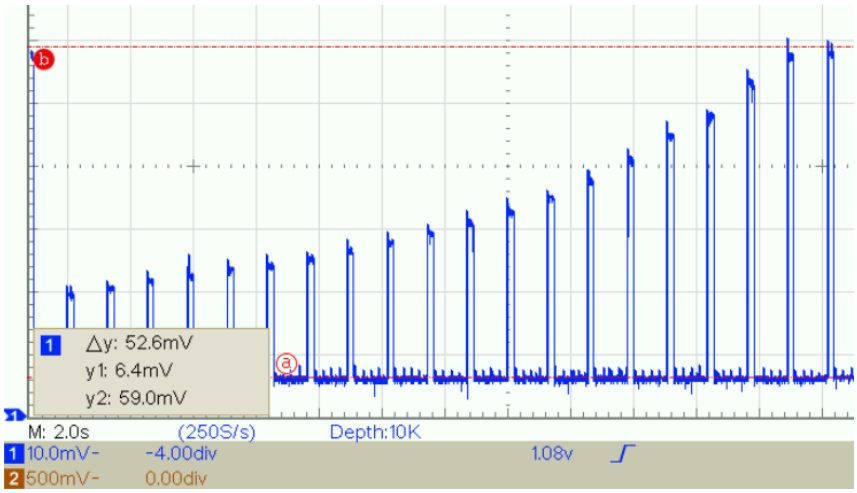
Hodnota 27,05 představuje časový průsečík linearizace s křivkou samovybíjení.

Pro zahrnutí samovybíjení baterie do rovnice odhadu výdrže je nutné k rovnici 4.2 přičíst energii, která byla odevzdána vlivem samovybíjení viz 4.5.

$$E_{cycle} = (\sum_{i=m}^{n} E_i) + P_{selfdischarge} \cdot t_{cycle} \tag{4.5}$$

4.2.2 Měření příkonu modulu LoRa

Příkony LoRa modulu pro jednotlivé konfigurace vysílacích výkonů byly změřeny pomocí úbytku napětí na rezistoru o hodnotě 0,5 Ω. Pro urychlení měření byla senzorická jednotka naprogramována tak, aby vystřídala všechny konfigurace vysílacího výkonu během jednoho přeběhu časové osy na osciloskopu viz 4.5.



Obrázek 4.5: Snímek osciloskopu s naměřenými úbytky napětí pro jednotlivé módy vysílacích výkonů, časové měřítko 2 s/div

Vypočítané příkony pro vybrané konfigurace vysílacího výkonu jsou zaneseny do tabulky 4.3, kde I_{LoRa} je proudový odběr a P_{LoRa} je

vypočtený příkon modulu RF95. Příkon byl vypočítán pomocí vztahu $P_{LoRa} = U_{STAB} * I_{LoRa}$, kde $U_{STAB} = 3\,V$.

Tabulka 4.3: Příkony modulu RF95 vypočtené z naměřených hodnot

Tx PWR mode	$\Delta\ U_R\ (mV)$	$I_{LoRa}\ (mA)$	$P_{LoRa}\ (mW)$
5 (nejnižší výkon)	13,4	27,07	81,2
9	17,4	35,15	105,5
14	24,2	48,89	146,7
23	57,4	114.8	344,4

Kompletní tabulka naměřených příkonů je z důvodu úspory místa uvedena jako příloha C.

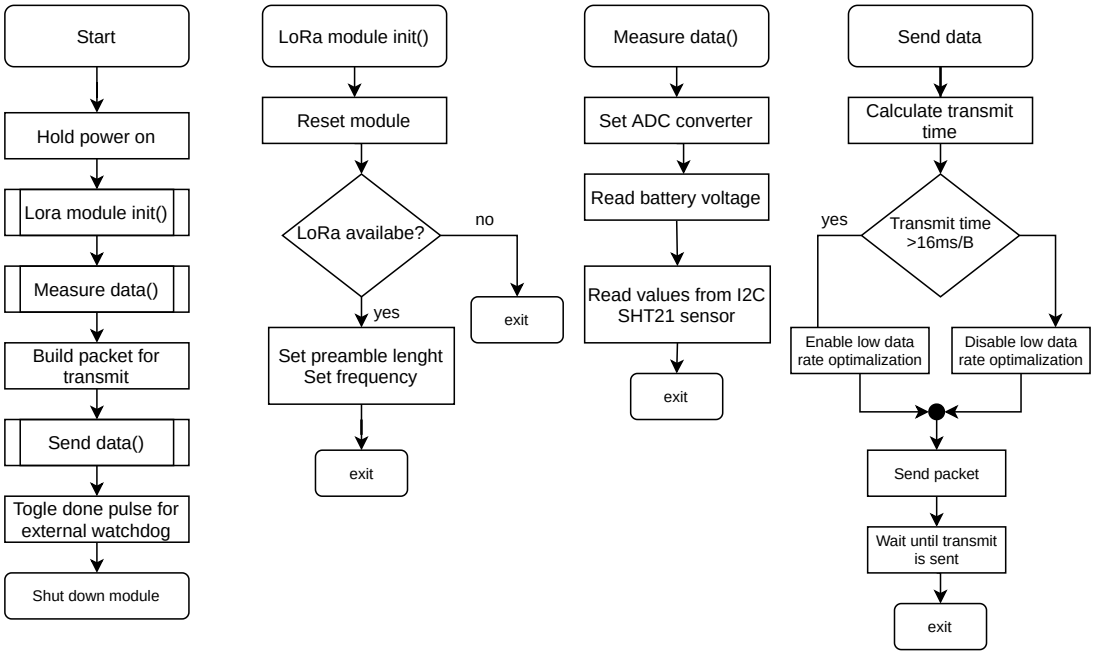
4.2.3 Konkrétní odhad výdrže

Odhad výdrže pro konkrétní navrženou jednotku je ovlivněn nastavením vysílacích parametrů a dobou spánku. Kalkulace odhadu byla provedena pro tři konfigurace nastavení, jejichž dosahy byly testovány v podkapitole 4.1.

- $BW = 125kHz$, $SF = 7$ (nejrychlejší konfigurace)
- $BW = 125kHz$, $SF = 9$
- $BW = 125kHz$, $SF = 12$

Odhady energetické náročnosti budou provedeny pro paket s užitečnou zprávu o délce $10B$, se zvoleným $CRC = 4/5$. Každý paket bude dále obsahovat preamble o délce $8B$. Vysílací výkon bude nastaven na maximální hodnotu modulu RF95 viz tabulka C.

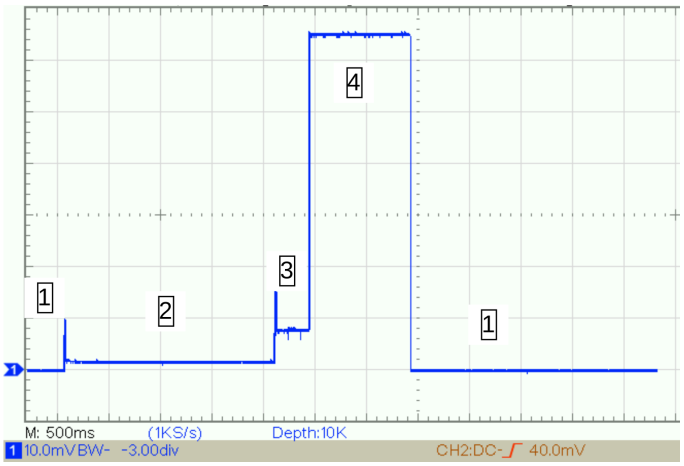
Výdrž senzorické jednotky bude predikována pro následující scénář viz 4.6, který lze jednoduše popsat jako probuzení jednotky, naměření dat ze senzorů a jejich odeslání.



Obrázek 4.6: Vývojový diagram činnosti senzorické jednotky

Pro simulaci reálného použití byl k senzorické jednotce přes I^2C sběrnici připojen senzor SHT21 umožňující měřit teplotu a vlhkost více viz [26].

Funkce senzorické jednotky byla naprogramována dle vývojového diagramu na obrázku 4.6. Úbytky napětí reprezentující proudové odběry v jednotlivých částech jedné periody funkce lze vidět na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Naměřený úbytek napětí reprezentující proud během jedné periody funkce senzorické jednotky, časové měřítko 500 ms/div

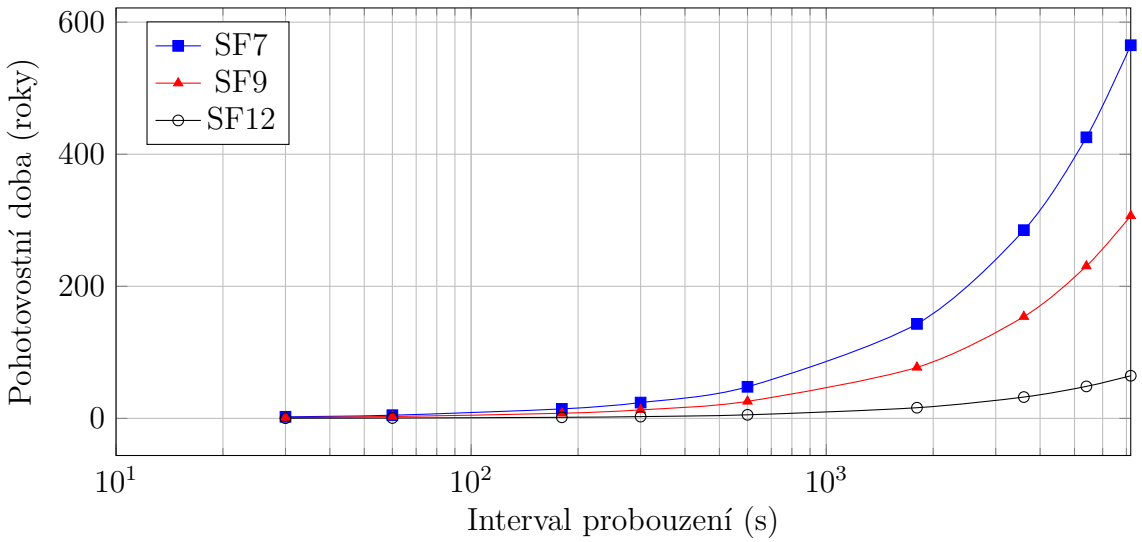
Naměřené úbytky napětí na obrázku 4.7 reprezentují:

- Bod 1 - Jednotka v režimu spánku aktivní je pouze externí časovač s proudovým odběrem $I_{TPL5010} = 35\,\text{nA}$
- Bod 2 - MCU v režimu bootloaderu. V tomto bodě byl měřen proudový odběr $I_{bootloader} = 2,6\,\text{mA}$ po dobu 2040 ms.
- Bod 3 - Měření a zpracování dat z externích senzorů. V tomto bodě byl měřen proudový odběr $I_{measure} = 15\,\text{mA}$ po dobu 330 ms.
- Bod 4 - Odesílání paketu s nejvyšším možným nastavením vysílacího výkonu. Energie potřebná pro odeslání paketu bude označena jako E_{TX}

Je nutné uvědomit si, že odebraná energie v úsecích 2 a 3 na obrázku 4.7 zůstane konstantní, protože čas provádění je vždy stejný. Mění se jen energie odebraná při spánku E_{sleep} a výše rozebíraná energie E_{TX}, která je závislá na nastavení vysílacích parametrů.

Celková energie pro jeden cyklus funkce senzorické jednotky E_{cycle} je dána součtem všech energií, které lze díky vhodnému průběhu počítat jednoduše, protože se jedná o integrály konstantní funkce viz 4.7.

Pro kalkulaci energetické náročnosti budou použity rovnice z předchozí kapitoly, do kterých budou dosazeny výše naměřené hodnoty energetických odběrů pro konkrétní funkci zmíněnou v 4.6. Dostupná kapacita použité baterie je podle výrobce 13 Ah. Pro účely odhadu bude kalkulováno s kapacitou 10 Ah, protože zařízení nevyužije celý napěťový rozsah baterie (3,6–2) V, kterému odpovídá kapacita 13 Ah. Kalkulace bude provedena nejprve pro ideální baterii viz 4.8



Obrázek 4.8: Odhad výdrže zařízení pro různé periody probouzení jednotky bez započtení samovybíjení

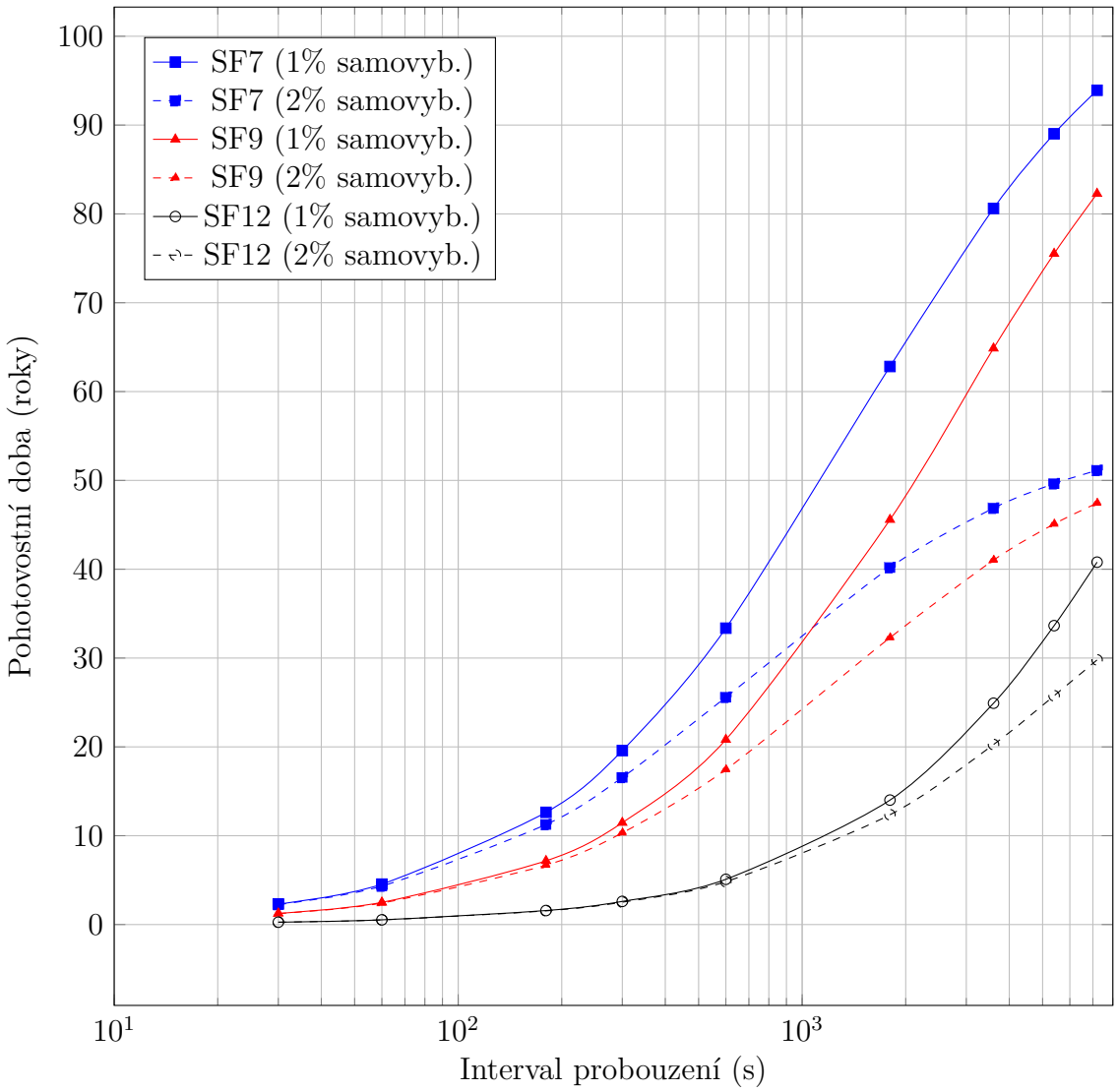
Odhady výdrže pro ideální baterii viz 4.8 nemají vypovídací hodnotu, zejména pro dlouhé intervaly probouzení. Pokud pro vykreslení grafu 4.8 nepoužijeme logaritmické měřítko na ose x, bude patrné, že výdrž baterie je lineárně závislá na intervalu probouzení.

Odhad výdrže se započtením samovybíjení byl proveden pro dvě rychlosti samovybíjení 1 % a 2 % za rok, viz obrázek 4.9.

Z grafu 4.9 lze vyčíst, že samovybíjení článku silně ovlivňuje pohotovostní dobu zařízení.

Například hojně rozšířené Lithium-iontové akumulátory, které jsou používány v noteboocích, telefonech apod. mají hodnotu samovybíjení 1% až 2% za měsíc, tyto články by při stejné aplikaci vydržely fungovat řádově jednotky let. Pro přehlednost byla vytvořena tabulka 4.4, do které byly zaneseny vybrané body grafu 4.9.

Reálná výdrž se může podstatně lišit, protože rychlost samovybíjení je závislá na teplotě. Pokud bude zařízení pracovat ve vysokých teplotách, doba funkčnosti se kvůli rychlejšímu samovybíjení zkrátí.



Obrázek 4.9: Odhad výdrže zařízení pro různé periody probouzení se zahrnutím samovybíjení baterie

Tabulka 4.4: Odhady výdrže v rocích pro různé intervaly probouzení jednotky pro samovybíjení 1 % a2 % kapacity za rok

Perioda (s)	SF 7, 1%	SF 7, 2%	SF 9, 1%	SF 9, 2%	SF 12, 1%	SF 12, 2%
30	2,32	2,25	1,26	1,23	0,26	0,26
60	4,55	4,33	2,49	2,41	0,53	0,52
180	12,63	11,26	7,17	6,68	1,57	1,54
300	19,58	16,56	11,46	10,32	2,6	2,52
600	33,36	25,58	20,81	17,44	5,09	4,82
1800	62,82	40,18	45,57	32,29	14,01	12,35
3600	80,61	46,87	64,86	41,02	24,91	20,26
7200	93,91	51,12	82,28	47,43	40,79	29,79

Konkrétnější odhady výdrže zahrnující teplotu baterie nelze provést, protože výrobce uvádí jen jednu hodnotu samovybíjení. Hodnoty samovybíjení baterií typu $LiSOCl_2$ pro různé teploty byly hledány v datových listech jiných výrobců (Tekcel, Ultralife, Saft atd...), bohužel nebyly nalezeny.

Pro kalkulaci odhadů byl použit tabulkový procesor, se kterým lze provést odhady i pro jiné vysílací konfigurace. Vstupními parametry tabulky pro odhad jsou: SF, BW, mód vysílacího výkonu, CRC, délka zprávy, délka preamble, kapacita baterie a rychlost samovybíjení.

5. Diskuze

V rámci práce byly měřeny komunikační dosahy pro vybrané konfigurace vysílacích parametrů. Úspěšně byly ověřeny dosahy řádově desítek kilometrů pro volné prostranství a řádově stovky metrů pro velmi husté zalesnění. Podobné komunikační dosahy byly naměřeny i v jiných publikacích, například [8].

Komunikační dosah pro nepřímé viditelnosti nelze jednoznačně určit, je totiž silně závislý na velkém množství faktorů (uspořádání terénu, počasí, okolní rušení). Pro maximální spolehlivost komunikace je velmi důležité zvolit vhodné komunikační parametry. Jako ideální postup se nabízí odeslat zprávu v co nejkratším časovém úseku, s nejnižším vysílacím výkonem tak, aby byla zpráva na druhé straně komunikace úspěšně přijata. Rychlost při odesílání je důležitá, protože doba odesílání jednoho koncového bodu je limitována zákony, které určují tzv. klíčovací poměr (duty cycle). Ten se v rámci subpásem ISM pohybujue od 0,1 % do 10 %. Například, pokud bychom chtěli použít subpásmo ISM 868,0-868,6 Mhz, musíme dodržet 1% klíčovací poměr. V praxi to znamená, že můžeme vysílat pouze 1 % času v rámci jedné hodiny, tedy 36 s. Při jednoprocentním klíčovacím poměru lze odesílat informaci každých 10 s, za předpokladu odesílání jednoho paketu po dobu 0,1 s. Pokud by odesílání jednoho paketu trvalo dvě sekundy, bylo by možné odesílat zprávu každých 200 s. Z toho plyne, že používání pomalých konfigurací zvyšuje komunikační zpoždění mezi vysílačem a přijímačem.

Výdrž zařízení na baterii lze z pohledu uživatele ovlivnit nastavením intervalu probouzení a konfigurací senzorické jednotky. V zá-

vislosti na nastavení zmíněných parametrů se predikovaná výdrž pohybuje od jednotek měsíců po řádově desítky let u nejúspornějších konfigurací viz 4.4. Zárukou dlouhé výdrže zařízení je použití baterie s minimálním samovybíjením (okolo 1 % ročně) a vysokou kapacitou 13 Ah. Použití jiného typu elektrochemického článku by neumožnilo dosáhnout takové výdrže ani při stejné nebo vyšší kapacitě článku. Důvodem je vysoká míra samovybíjení. Například akumulátor typu Li-ion má v závislosti na provozní teplotě a odebíraném proudu samovybíjení 1-2 % za měsíc, což představuje zhruba 40% úbytek dostupné energie v baterii za dva roky, aniž by energii odebíralo zařízení.

Dlouhá výdrž je dále zaručena použitím ultranízkopříkonového externího časovače TPL5010 s proudovým odběrem 35 nA, který senzorickou jednotku periodicky probouzí. Pokud by probouzení senzorické jednotky bylo řízeno integrovaným časevačem MCU, byl by v režimu spánku proudový odběr zhruba desetkrát až stokrát vyšší než u použitého časovače. Například u velmi úsporného MCU EFM32 Gecko v režimu spánku s aktivním časovačem výrobce udává proudový odběr 0,9 μA [27].

Navrženou konstrukci lze optimalizovat zejména z ekonomického hlediska. Pro aplikace, které nevyžadují dlouhou výdrž na baterii, lze použít baterii s menší kapacitou a nižší cenou. Výdrž na baterii senzorické jednotky lze v budoucnu prodlužovat obměnou použitých komponent za modernější a úspornější. V případě venkovního použití stojí za úvahu integrace alternativního zdroje energie (sluneční záření, proudění vzduchu), čímž by bylo možné dosáhnout energetické soběstačnosti.

6. Závěr

V první části práce byly popsány a navzájem porovnány dostupné bezdrátové komunikační technologie pro LPWAN. Bylo zjištěno, že technologii LoRa lze jako jedinou z popisovaných technologií využít bez poplatků poskytovateli za používání cizí radiové sítě, proto byla vybrána pro konstrukci senzorické jednotky.

Dále byly stanoveny požadavky na konstrukci senzorické jednotky, hlavním kritériem byla dlouhá výdrž na baterii a široká škála připojitelných senzorů. Pro zajištění dlouhé výdrže byla vybrána koncepce zapojení s ultranízkopříkonovým externím časovačem s programovatelným intervalem probouzení. Výhodou tohoto řešení je, že v režimu spánku odebírá energii pouze externí časovač, s proudovým odběrem 35 nA. Jako napájecí zdroj byl vybrán průmyslový lithiový článek s objemem 13 Ah a velmi nízkým samovybíjením 1 % za rok.

Na základě průzkumu trhu byly vybrány zbylé komponenty, které byly zahrnuty do návrhu elektronického schématu zapojení. Následně byl navržen a profesionálně vyhotoven čtyřvrstvý plošný spoj, který byl osazen, naprogramován a s úspěchem otestován. Nad rámec zadání byl návrh koncipován tak, aby bylo možné beze změny použít tentýž plošný spoj v režimu přijímače. V aplikacích, kde je kladen nárok na rozměry senzorické jednotky, lze odlomením části plošného spoje zredukovat jeho velikost na 30×46 mm. Pro senzorickou jednotku bylo vybráno zapouzdření, které poskytuje krytí IP65 a je dostatečně velké pro vyvedení až čtyř kabelů k senzorům skrze vodotěsné průchodky s maximálním průměrem 6 mm. Díky bočním lemům lze krabičku se senzorickou jednotkou jednoduše připevnit bez nutnosti zásahu do kon-

strukce na libovolné místo.

U zkonstruovaného řešení byly provedeny testy komunikačního dosahu pro volné prostranství a hustě zalesněnou oblast. Ve volném prostranství se dosah pohyboval řádově v jednotkách až desítkách kilometrů, v hustém křovinatém lese byl ověřen dosah řádově stovky metrů v závislosti na konfiguraci vysílacích parametrů. Pro testované konfigurace byl vytvořen reálný scénář použití, pro který byly predikovány doby výdrže zařízení na baterii. Pro energeticky nejnáročnější konfigurace vysílacích parametrů a časté probouzení senzorické jednotky byla predikována výdrž v řádu měsíců. Energeticky úspornější konfigurace a delší periody probouzení senzorické jednotky posouvají výdrž na vyšší jednotky až desítky let. U dlouhých výdrží je předpokládáno, že doba funkce bude omezena životností použité baterie, která je podle údajů výrobce odhadována na 20 let.

Pro simulaci reálného použití byl k senzorické jednotce přes I^2C sběrnici připojen senzor SHT21 umožňující měřit teplotu a vlhkost. Senzorickou jednotku lze rozšířit i o další vybrané senzory připojené skrze sběrnice SPI nebo UART. Dále lze využít integrovaný 12bit A-D převodník pro připojení senzorů s analogovým výstupem.

Na práci lze navázat návrhem systému pro sběr zpracování a uchování dat z vlastní senzorické sítě, postavené z navržených senzorických jednotek. Navržený systém by bylo možné využít například pro monitorování libovolných parametrů v místech, kde nejsou k dispozici komerční sítě, například podzemní prostory, studny, hluboké lesy. Využití v biomedicíně vidím například v monitorování koncentrace CO_2 v budovách nebo v telemonitoraci biologických parametrů.

Seznam použitých zdrojů

[1] Mekki, Kais Bajic, Eddy Chaxel, Frédéric Meyer, Fernand. Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT [online]. 2018, 2018 [cit. 2021-03-15]. Dostupné na:10.1109/PERCOMW.2018.8480255

[2] Sigfox.com [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné na: https://www.sigfox.com/en/sigfox-story

[3] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2007-4 [online]. ČTÚ, 2007-[cit. 25.března 2021]. Dostupné na: https://www.ctu.cz/vseobecne-opravneni

[4] Sigfox: Technical Overview. In: Sigfox. [Online]. 2017 [cit. 2021-25-3]. Dostupné na: https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf

[5] Sigfox.com coverage [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné na: https://www.sigfox.com/en/coverage

[6] Y. -. E. Wang et al., "A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things,"in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, March 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM.

[7] AUGUSTIN, Alos, Jiazi YI, Thomas CLAUSEN a William TOWNSLEY. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors [Online]. 2016, 16, 1466- [cit. 2021-3-30]. Dostupné na DOI: 10.3390/s16091466.

[8] Liando, Jansen & Gamage, Amalinda & Tengourtius, Agustinus & Li, Mo. (2019). Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large-scale Measurement Study. ACM Transactions on Sensor Networks.10.1145/3293534. [cit. 2021-3-30]. Dostupné na 10.1145/3293534.

[9] AN1200.22 LoRaTM Modulation Basics [online]. 2015 [cit. 2021-03-3]. Dostupné na: https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf

[10] Www.hoperf.com [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné na: https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html

[11] A technical overview of LoRa® and LoRaWAN® [online]. 2015 [cit. 2021-02-4]. Dostupné na: https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan

[12] Microchip Technologies Inc. *SAM D21/DA1 Family* [online katalogový list]. [cit. 1. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATsamd21g18

[13] STMicroelectronics *STWD100* [online katalogový list]. [cit. 7. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.st.com/en/reset-and-supervisor-ics/stwd100.html

[14] Texas Instruments Inc. *TPS3431 Standard programmable watchdog timer with enable* [online katalogový list]. [cit. 7. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.ti.com/product/TPS3431

[15] Maxim Integrated Inc. *MAX6369 Pin-Selectable Watchdog Timers* [online katalogový list]. [cit. 7. prosince 2020]. Dostupné na: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6369-MAX6374.pdf

[16] Texas Instruments Inc. *TPL5010 Ultra-low power timer with watchdog functionality and manual reset Standard programmable watchdog timer with enable* [online katalogový list]. [cit. 7. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.ti.com/product/TPL5010

[17] JACOBS, Sol. *Low-Battery Self-Discharge: The Key to Long-Life Remote Wireless Sensors.* Embedded-computing [online]. 2019 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://www.embedded-computing.com/guest-blogs/low-battery-self-discharge-the-key-to-long-life-remote-wireless-sensors

[18] FANSO *ER34615M/S* [online katalogový list]. [cit. 8. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.tme.eu/Document/60a9fbaea176c79faa8253e6f6d5f8aa/FANSO-ER34615M.pdf

[19] Adafruit Feather M0 Radio with LoRa Radio Module. *Adafruit.com* [online]. [cit. 9. prosince 2020]. Dostupné na: https://learn.adafruit.com/assets/32914

[20] Hoperf *RFM96W RF Transceiver* [online katalogový list]. [cit. 13. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html

[21] RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors. Airspayce.com [online]. 14.4.2014 [cit. 2021-04-05]. Dostupné na: https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/

[22] AMBER Wireless *Half Wave Dipol Antenna* [online katalogový list]. [cit. 12. dubna 2021]. Dostupné na: http://www.farnell.com/datasheets/2548890.pdf

[23] Adafruit *1.54"Monochrome eInk / ePaper Display with SRAM - 200x200 with SSD1608* [online katalogový list]. [cit. 13. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.adafruit.com/product/4196

[24] Diodes Incorporated *600MA CMOS LDO Regulator with ENABLE* [online katalogový list]. [cit. 13. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP2112.pdf

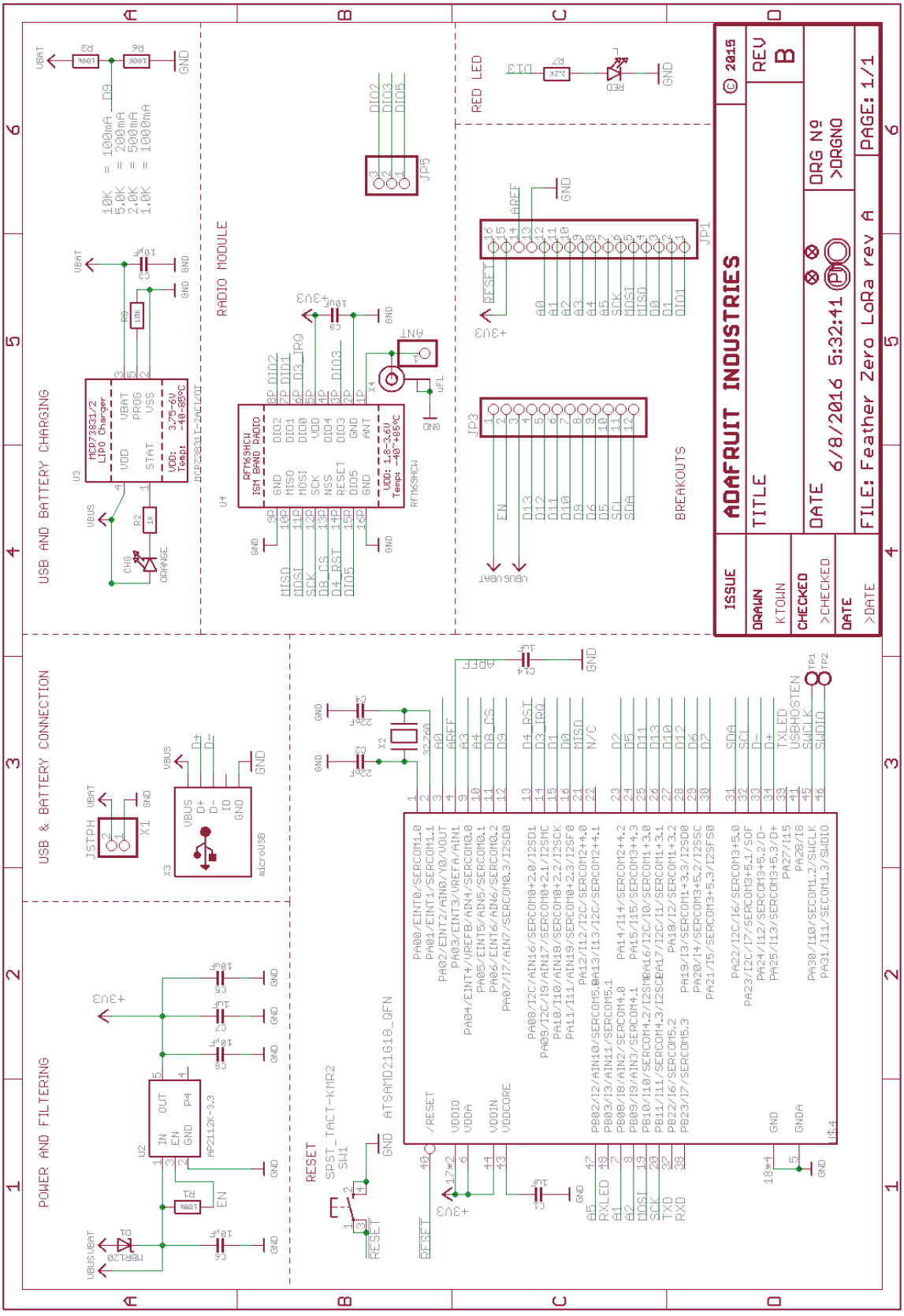
[25] Diodes Incorporated *LOW QUIESCENT CURRENT, FAST TRANSIENT LOW DROPOUT LINEAR REGULATOR* [online katalogový list]. [cit. 30. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP7331.pdf

[26] Sensirion *Digital Humidity Sensor SHT2x (RH/T)* [online katalogový list]. [cit. 30. prosince 2020]. Dostupné na: https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-temperature-sensor-sht2x-digital-i2c-accurate/

[27] Silicon labs *EFM32 Tiny Gecko Series* [online katalogový list]. [cit. 3. května 2020]. Dostupné na: https://www.silabs.com/mcu/32-bit/efm32-gecko

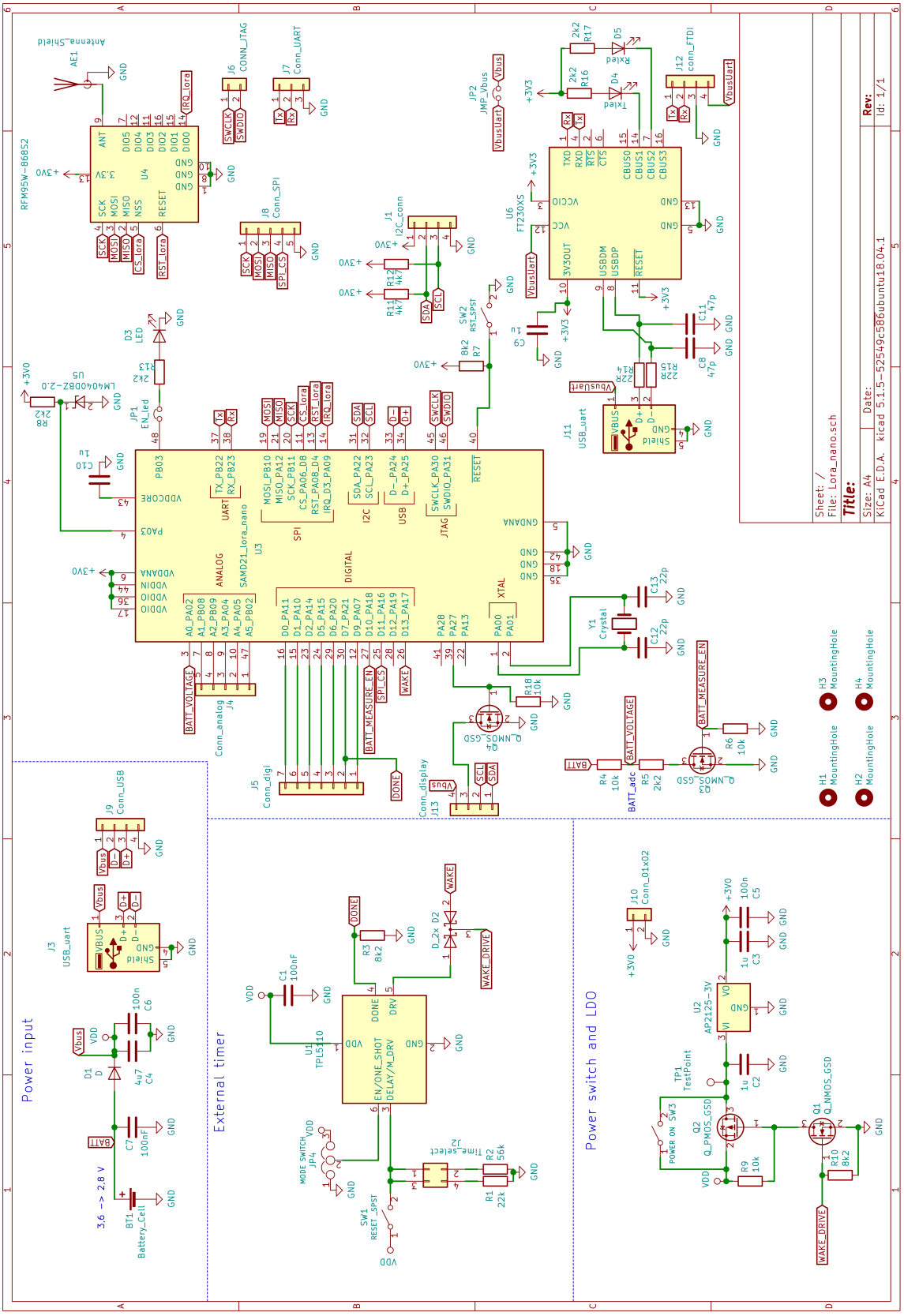
Přílohy

A. Schéma modulu m0 LoRa



Obrázek A.1: Schéma modulu m0 LoRa [17]

B. Schéma senzorické jednotky



Obrázek B.1: Schéma senzorické jednotky

C. Naměřené příkony modulu RF95

Tabulka C.1: Příkon modulu RF95 vypočtený z naměřených hodnot

Tx PWR mode	$\Delta\, U_R\ (mV)$	$I_{LoRa}\ (mA)$	$P_{LoRa}\ (mW)$
5 (nejnižší)	13,4	27,07	81,2
6	14,4	29,09	87,3
7	15,8	31,92	95,8
8	16,8	33,94	101,8
9	17,4	35,15	105,5
10	18,6	37,58	112,8
11	19,8	40,00	120
12	21	42,42	127,3
13	22,8	46,06	138,2
14	24,2	48,89	146,7
15	26,4	53,33	160
16	27,8	56,16	168,5
17	30,4	61,41	184,2
18	33	66,67	200,1
19	36	72,73	218,2
20	40,4	81,62	244,8
21	43,2	87,27	261,8
22	48,2	97,37	292,1
23	57,4	114,8	344,4