

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



Bezdrátový monitoring vibrací budov

Diplomová práce

Studijní program: Inteligentní budovy

Vypracoval: Bc. Pavel Dytrych

Vedoucí práce: Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.

Datum: 25.5.2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dytrych** Jméno: **Pavél** Osobní číslo: **466738**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bezdrátový monitoring vibrací budov

Název diplomové práce anglicky:

Wireless Monitoring System for Measurement of the Buildings Vibrations

Pokyny pro vypracování:

Na základě rešerší a prací v předcházejících projektech vytvořte jednotku umožňující monitoring vibrací budovy, která bude napájena z baterie a bude bezdrátově komunikovat s nadřazeným systémem. Baterii bude možné dobíjet pomocí externího fotovoltaického panelu či síťového AC/DC adaptéru. Použijte vhodné bezdrátové komunikační rozhraní umožňující přenos malého množství dat na velké vzdálenosti. Jednotka bude primárně určena pro použití s analogovým tříosým akcelerometrem a musí být schopna analýzy vibrací v rozsahu alespoň do 500 Hz. V rámci práce řešte pouze číslicovou část jednotky s předpokladem vstupního analogového napětí v rozsahu vhodném pro použitý AD převodník. Vytvořte program, který kontinuálně měří vibrace budovy a v případě překročení nastavitelných úrovní odešle informaci na vzdálený server.

Seznam doporučené literatury:

- [1] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, O. Hersent: LoRaWAN Specification, 2015
- [2] ČSN 73 0040 Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva, 1996
- [3] ČSN ISO 2631 Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím, 1999

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D., katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: 25.5.2019

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2018/2019

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

10 -04- 2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace

Tato diplomová práce se zbývá návrhem bezdrátové monitorovací jednotky vibrací. Motivační část obsahuje stručný souhrn důvodů pro měření vibrací, jejich vliv na člověka a statiku budov a rešerši monitorovacích jednotek dostupných na trhu spolu s požadavky na vyvíjenou jednotku. Dále tato práce obsahuje popis zvolených součástek a technologií, obsahem této části je také popis komunikační sítě LoRaWAN. Poslední část této práce pak obsahuje popisy navrženého schématu, desky plošného spoje a také příslušných programů.

Klíčová slova

Měření vibrací, mikrokontroler, ARM, stm32, LoRa, LoRaWAN, bezdrátový přenos dat, monitorovací jednotka

Annotation

The diploma thesis deals with the design of wireless vibration monitoring unit. Motivation chapter consist a summary of reasons for vibration measuring, effects on human health and statics of buildings, this chapter also consist a research of measuring unit which are available on the market and requirements for designed monitoring unit. There is also description of chosen components and used technologies, part of this chapter is also description of communication network LoRaWAN. Last part of this diploma thesis consists descriptions of designed schematics, PCB and description of relevant software.

Key words

Vibration measurement, microcontroller, ARM, stm32, LoRa, LoRaWAN, wireless data transmit, monitoring unit

Čestné prohlášení autora práce:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Podpis autora práce

Poděkování:

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Mlejnkovi, Ph.D. za vedení mé práce, rady, připomínky.

Obsah

1.	Motivace k vývoji	7
1.1.	Zdravotní důvody	7
1.2.	Statika budov	8
1.3.	Příčiny vibraací	9
1.4.	Metody měření vibraací	11
1.5.	Měřicí jednotky dostupné na trhu	14
1.6.	Požadované parametry navrhovaného zařízení	19
1.7.	Porovnání s existujícími zařízeními	22
2.	Využití technologie a hardware	23
2.1.	A/D Převodník	23
2.2.	Mikrokontroler řídicí jednotky	24
2.3.	LoRaWAN	29
2.4.	Napájení	39
3.	Schéma monitorovací jednotky a DPS	41
3.1.	Schéma monitorovací jednotky	41
3.2.	DPS	43
4.	Firmware a ovládací program	46
4.1.	Firmware	46
4.2.	VibroMonitor	50
5.	Závěr	52
6.	Seznam zkratk	55
7.	Seznam obrázků	56
8.	Seznam tabulek	57
9.	Seznam příloh	58
10.	Seznam zdrojů	59

1. Motivace k vývoji

Původním impulzem k vývoji monitorovací jednotky vibraací, byla rekonstrukce budovy Národního muzea spolu s budovou Federálního shromáždění, kde se v rámci rekonstrukce prováděly velmi těžké stavební práce např. v podobě hloubení tunelu mezi jednotlivými budovami, vrtání pilot. Vibrace, které byly touto činností vyvolány následně mohly negativně ovlivňovat statiku obou budov.

Monitoring vibraací se však nemusí provádět jen za tak specifických podmínek jako je rekonstrukce, ale je vhodné vibrace sledovat i během běžného provozu budov, neboť dlouhodobé vystavení vibracím, byť i o mnohem nižší intenzitě, může mít nepříznivý vliv jak na již zmíněnou statiku budov, tak i na kvalitu životního prostředí v interiéru budovy.

Samotné nároky na vibrace v budovách pak upravuje několik norem, co se týče statiky budov, tak je to norma *ČSN 73 0040: Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva* [2], v případě zdravotních následků se jedná o normu *ČSN ISO 2631-1: Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 1: Všeobecné požadavky* [1], samotnou metodiku měření vibraací pak upravuje norma *ČSN ISO 4866: Vibrace a rázy - Vibrace pevně zabudovaných konstrukcí - Pokyny pro měření vibraací a hodnocení jejich účinků na konstrukce* [3].

1.1. Zdravotní důvody

Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, jedním z důvodů monitoringu vibraací je jejich možný nepříznivý vliv na člověka, čemuž je nutné přizpůsobit i měření, které je potřeba provádět na styčných plochách, kde dochází k přenosu vibraací mezi konstrukcí budovy a člověkem. Typicky se pak jedná například o podlahy místností, kde se předpokládá, že lidé budou většinou v poloze vstaje, pro místnosti, kde se předpokládá poloha osob převážně vsedě a vleže se pak příslušné měření provádí například na zádové opěrce židle. Dále je pak nutné zohlednit směry, kterými měřené vibrace vstupují do těla. [1]

Negativní vlivy na zdraví zahrnují zejména zvýšené zdravotní riziko v oblasti beder, kde vlivem expozice vibracím může docházet k nadměrnému namáhání páteře. Následkem mohou být až degenerativní změny meziobratlových destiček, což dále může vést např. k poškození kloubů, vzniku osteochondrózy atp. Dalšími možnými problémy jsou například poškození trávicí soustavy, močového ústrojí a ženských reprodukčních orgánů. [1]

Dalším z možných projevů vibraací je pak vliv na pohodlí. Výskyt vibraací může mít vliv jak negativní, kdy mohou vibrace znepříjemňovat pobyt v budově, například rušením vykonávaných činností, jako čtení a psaní, ale mohou mít i vliv pozitivní, kdy exponované osoby mohou vibrace považovat za osvěžující a příjemné [1]. Vliv vibraací na pohodlí člověka je tedy velmi subjektivní a liší se v závislosti na prostředí. [1]

Posledním z projevů dlouhodobého působení vibraací na člověka je vznik nemoci z pohybu neboli kinetózy (vjem pohybu vestibulárním systémem nesouhlasí s vizuálními vjemy). Nemoc z pohybu se však projevuje zejména na lodích a vzhledem k velikosti hodnot vibraací, kterým by musela být postižená osoba vystavena, je její výskyt v budovách velmi málo pravděpodobný. [1]

1.2. Statika budov

Druhým ze zmíněných důvodů provádění monitoringu vibraací, je vliv na statiku budov, který je ovlivňován velkým množstvím různých faktorů. Mezi tyto faktory patří zejména konstrukce budovy a s tím související materiál použitý na stavbu, dále pak vzdálenost od zdroje vibraací a typ podloží, které vibrace přenáší. [2]

Konstrukce budov se z hlediska odolnosti proti zatížení budovy vibracemi dají rozdělit do šesti tříd, kde nejméně odolné budovy jsou historické budovy z neopracovaného kamene, budovy s cihlovými klenbami ale i například budovy s rozsáhlou plastickou výzdobou, nejodolnější budovy jsou pak ocelové a železobetonové stavby převážně inženýrského charakteru a také kryty civilní obrany, ostění tunelů atp. [2]

V závislosti na třídě odolnosti budovy, velikosti a době, po kterou je budova vystavena vibracím, může dojít k poškození budovy. Poškození budovy je dle normy ČSN 73 0040 členěno do šesti stupňů v závislosti na velikosti poškození, které jsou v rozsahu od nulového poškození, kdy je plně zachována funkce budovy, až po úplnou destrukci objektu, kdy dojde ke zřícení zděných staveb a dochází i k trhlinám v železobetonu. [2]

1.3. Příčiny vibraací

Vznik vibraací může být přirozený, kdy dochází ke vzniku vibraací na základě procesů probíhajících v podloží, anebo mohou vibrace vznikat vlivem činnosti člověka.

Přirozený vznik vibraací je způsoben nejčastěji pohybem litosférických desek, kdy v průběhu let dojde k nahromadění elastické energie, která, pokud dojde k jejímu uvolnění, vyvolá zemětřesení. Další možné způsoby vzniku jsou propady podzemních prostor a sopečná aktivita.

Vzhledem k tomu, že se na území České Republiky díky její geografické poloze zemětřesení prakticky neobjevují (s výjimkou Chebska) a za posledních sto let mělo nejsilnější zemětřesení naměřenou intenzitu 4.6 Richterovy stupnice, což je klasifikováno jako slabé zemětřesení, a vzhledem k jejich naprosto nahodilému výskytu, nemá smysl se dále přirozenými zdroji vibraací zabývat. [20]

Lidskou činností způsobené seismické zatížení může mít velké množství příčin, mezi kterými jsou nejvýznamnější původci doprava, průmysl a stavební práce.

Seismické zatížení vyvolané dopravou je závislé na druhu dopravy a typu podloží, které přenáší vibrace. Příslušné zatížení, je dle související normy definováno jako zatížení nahodilé dlouhodobé, popř. krátkodobé. [2] V případě silniční dopravy dochází vlivem jízdy vozidel po nerovném povrchu ke generování otřesů o frekvenci v intervalu od 10 Hz do 80 Hz v závislosti na rychlosti vozidla a nerovnosti vozovky. Pro kolejovou dopravu je pak interval vyvolaných frekvencí mezi 10 Hz až 50 Hz.

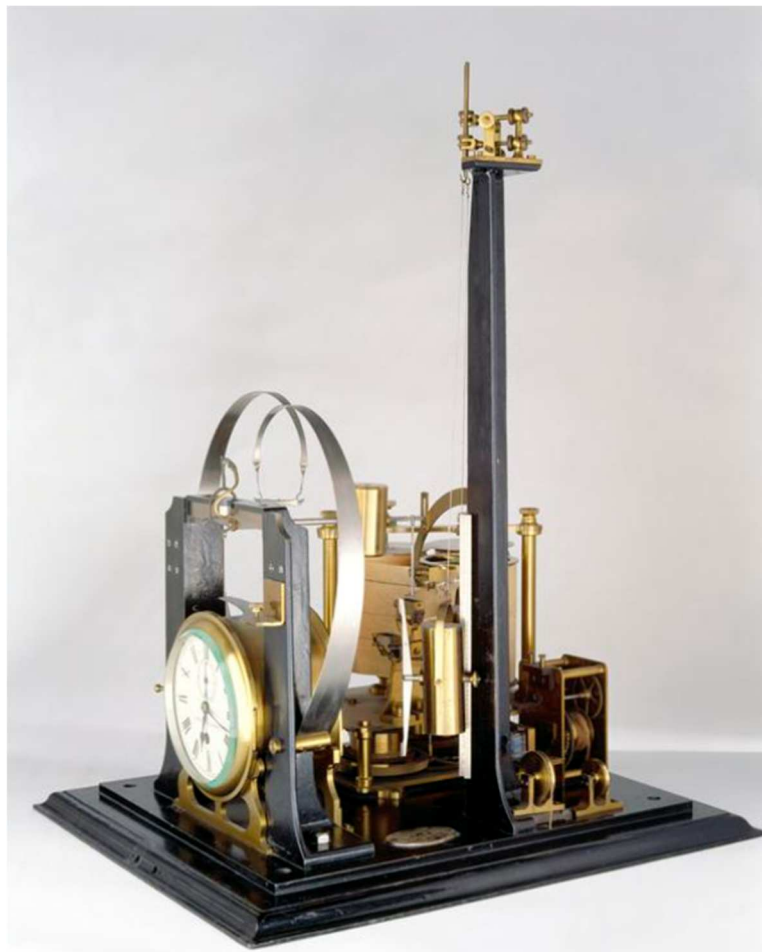
Dopravou vyvolané zatížení je třeba sledovat dlouhodobě, neboť se většinou jedná o zatížení dlouhodobého charakteru, a i když se svojí intenzitou nemusí rovnat intenzitám seismických zatížení vyvolaných jinými zdroji. Vliv dlouhodobého zatížení může vést ke značným škodám.

Dalším významným zdrojem seismického zatížení je průmyslová a stavební činnost. Zatížení vyvolané těmito činnostmi je dle příslušné normy hodnoceno jako zatížení nahodilé krátkodobé, popř. nahodilé mimořádné. [2] Velikost těchto otřesů velmi závisí na typu prováděné činnosti. Například v případě stavebních prací se zatížení může pohybovat ve velkém rozpětí od velmi slabých vibraací způsobených například vrtáním vrtačkou, přes silnější otřesy způsobené například lehčími bouracími pracemi se sbíječkou atp., nejsilnější vibrace jsou pak způsobeny velkými demoličními a trhacími pracemi.

V případě seismického zatížení vyvolaného průmyslovou činností, je pak rozsah intenzit opět velmi velký, nejslabší vibrace způsobují například špatně ustavené výrobní stroje, jimiž způsobené seismické zatížení má dlouhodobý charakter. Oproti tomu nejsilnější vibrace vyvolané průmyslovou činností jsou způsobeny trhacími pracemi například v podpovrchových dolech a lomech.

1.4. Metody měření vibrací

Prvním moderním zařízením schopným zaznamenávat vibrace byl Milne – Grayův seismograf, který zkonstruoval v roce 1880 v Japonsku geolog a seismolog John Milne. [4] Tento seismograf fungoval na principu kyvadla a byl schopen měřit jak směr, tak velikost otřesů.



Obr. 1: Milne – Grayův seismograf [6]

Senzory pro měření vibrací lze v současnosti rozdělit do dvou základní kategorií dle využití techniky měření, a to na senzory mechanické (kontaktní) a bezkontaktní. [7]

Mechanické senzory jsou senzory, které musí být pro svoji činnost pevně spojeny s tělesem, na kterém chceme měřit vibrace. Do této kategorie patří i již zmíněný Milne – Grayův seismograf, dále pak tato kategorie obsahuje geofony a akcelerometry.

Geofony se v současnosti využívají převážně pro měření seismické aktivity zemské kůry na pevnině, pro snímání otřesů pod vodou se využívají hydrofony. Geofony fungují na principu elektromagnetické indukce, kdy je ve volně zavěšené cívce indukován proud, který závisí na

kmitech cívky a jejich výstupem je rychlost kmitání. Hydrofony ke svojí funkci využívají piezokeramického snímače a reagují tak na změny tlaku ve vodě a jejich výstupem pak je změna tlaku za čas. [5]



Obr. 2: Elektrodynamický geofon [5]

Nejrozšířenějším typem senzoru vibraací jsou v současné době akcelerometry. Akcelerometry také patří do kategorie mechanických senzorů a měří přímo zrychlení, ke kterému dochází při jednotlivých kmitech. Nejvíce jsou rozšířené akcelerometry vyrobené technologií MEMS a dále pak akcelerometry pracující na principu piezoelektrického jevu.

Piezelektrické snímače

Piezelektrické senzory fungují na principu setrvačnosti, kdy je jádrem celého senzoru piezokeramická destička, ke které je pevně připojeno závaží (setrvačná hmota). Toto závaží svojí hmotností deformuje piezokeramickou destičku, ke které je připevněna a ta následně díky piezokrystalickému jevu emituje elektrický náboj. Ten je následně zesílen zesilovačem a zpracován. [7]

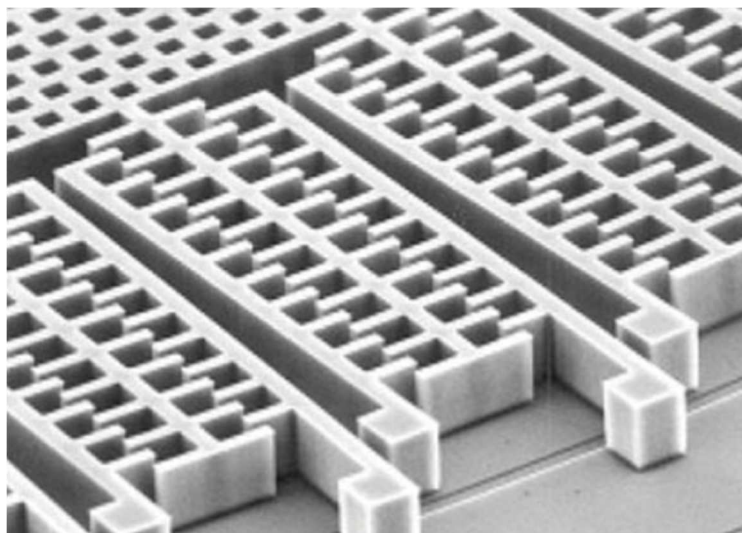


Obr. 3: Piezelektrický senzor KS823B [13]

Výhodou tohoto typu senzoru je jeho velmi velká mechanická odolnost a snadná instalace, díky čemuž se ve velkém využívá v průmyslu.

Snímače vyrobené technologií MEMS

Tento typ akcelerometrů využívá k výrobě technologii MEMS (z angl. Micro Electrical Mechanical System), která umožňuje výrobu velmi malých mechanických a elektronických struktur, díky čemuž je možné tyto senzory velmi miniaturizovat a integrovat do nich i elektroniku potřebnou ke zpracování signálu, díky tomu pak tyto senzory komunikují přímo za pomoci komunikačních sběrnic jako je SPI nebo I²C. [8]



Obr. 4: Vnitřní struktura MEMS akcelerometru [9]

Akcelerometry vyrobené MEMS technologií pracují na principu měření kapacity velmi malými elektrodami, které svojí vzájemnou polohou vytváří vzduchový kondenzátor. Vlivem zrychlení dochází k ohybu těchto elektrod, čímž dochází ke změně kapacity mezi elektrodami, tato kapacita je následně změřena pomocí obvodu s integrovaným A/D převodníkem a převedena na měřenou veličinu, která následně může být odeslána k dalšímu zpracování v nadřazeném systému. [8]

Díky velmi malým rozměrům pouzder, velmi nízké spotřebě elektrické energie a velmi snadnému použití, bez nároků na přídavnou elektroniku, jsou tyto akcelerometry pravděpodobně nejrozšířenějším typem senzoru vibraací.

1.5. Měřicí jednotky dostupné na trhu

Jak již bylo popsáno v kapitole 1.3, existuje velmi velké množství zdrojů vibraací, které mohou ovlivňovat jak statiku samotné budovy, tak pohodlí a zdravotní stav obyvatel budovy. Z tohoto důvodu tak již existuje několik monitorovacích jednotek k tomu určených. V následujícím přehledu uvádím čtyři z nich, a to včetně jejich parametrů.

SEQUOIA GEA system

Sequoia GEA system je kompletní kit pro monitoring vibrací v budovách, jehož výrobcem je italská firma Sequoia IT s.r.l. Jedná se o modulární systém, který se skládá ze tří základních částí: monitorovacího boxu, SyncHubu a samotného senzoru vibrací. [10]



Obr. 5: SEQUOIA GEA system [10]

Monitorovací box je v zásadě průmyslový linuxový počítač, na kterém běží vyhodnocovací software, samotný box umožňuje díky podpoře modulů různá rozšíření, jako je modem/router pro bezdrátovou komunikaci, relé moduly pro ovládání externích zařízení či výstražný majáček. [10]

Samotné senzory se k monitorovacímu boxu připojují pomocí tzv. SynHUBů, které slouží primárně jako zesilovače signálu, díky čemuž je možné připojit senzory i na vzdálenost až 1 km. K monitorovacímu boxu je možné připojit až čtyři SyncHuby z nichž každý umožňuje připojit čtyři senzory. [10]

GEA senzory existují dvojího typu, oba typy mají již integrován 24-bitový A/D převodník a jejich vzorkovací frekvence je 1024Hz, primární rozdíl mezi senzory spočívá v použitém snímači. Senzor GEA I využívá jako snímač trojosý MEMS akcelerometr a jeho minimální rozlišovací

schopnost je 0.05 mm/s, oproti tomu senzor GEA II využívá ke snímání hybridní trojosý MEMS-piezo snímač, který dosahuje minimální rozlišovací schopnosti až 0.0005 mm/s. [10]

RDL//VIBE

RDL//VIBE od výrobce Caption Data Limited je set speciálně konstruovaný pro měření vibrací v obtížných podmínkách jako jsou např. stavby a skládá se z řídicí jednotky a senzorů.



Obr. 6: RDL//VIBE [11]

Řídicí jednotka zpracovává naměřená data a díky integrovanému GSM modemu je může v reálném čase nahrát do speciálního úložiště CDLSmartHub, které slouží k vizualizaci dat a nastavení parametrů řídicí jednotky, dále pak jednotka umožňuje odesílání SMS zpráv nebo emailů, pokud dojde k překročení prahových hodnot. Vzhledem k tomu, že se předpokládá použití této jednotky v náročných podmínkách staveb, je tato řídicí jednotka napájena dvěma lithiovými články, které by měly jednotku udržet v provozu 1-2 měsíce v závislosti na pracovním režimu. [11]

K řídicí jednotce je možné připojit dvojici senzorů, které jako snímač využívají trojosé geofony s minimální rozlišovací schopností 0.18mm/s, které jsou schopny vzorkovat frekvence vibrací o rozsahu 4.5 Hz až 500 Hz. [11]

VMSet-23-P

Set VMSet-23-P je určený pro měření vibrací v budovách a je prodáván výrobcem IDS Innomic, který se specializuje na měření vibrací. Tento set se skládá ze dvou řídicích jednotek, jednoho akcelerometru, potřebného softwaru a kabeláže.



Obr. 7: VMSet-23-P [12]

Řídicí jednotka InnoBeamer® LX2 zde slouží primárně jako prostředník mezi senzory a řídicím počítačem na kterém běží monitorovací software InnoMeter se kterým komunikuje za pomoci sběrnice USB, má ale i možnost provozu i v autonomním režimu, kdy je kvůli komunikaci možné osadit řídicí jednotku bezdrátovým modulem. K této řídicí jednotce je možné připojit dva senzory, ze kterých jsou následně vyčítána data za pomoci 24 bitového A/D převodníku, přičemž vzorkovací frekvence může dosahovat až 3,2 kHz. [12]

Použitelných senzorů nabízí firma IDS Innomic několik druhů, ale v základní setu je dodáván piezoelektrický akcelerometr KS823B schopný pracovat v rozsahu -120 m/s^2 až 120 m/s^2 s přesností 5 %. [12]

01dB ORION

Posledním zařízením pro měření vibrací v tomto přehledu je 01dB ORION od výrobce ACOEM Group. Tato měřicí jednotka je přímo určena pro dlouhodobý terénní monitoring na stavbách, tunelech, demolicích atp. [13]



Obr. 8: 01dB ORION [13]

Jednotka 01dB ORION má integrovaný jeden tříosý akcelerometr, který pracuje v dynamickém rozsahu $0,5 \text{ mm/s}^2 - 100 \text{ mm/s}^2$. Dále umožňuje připojení dalšího externího akcelerometru či geofonu. Celá monitorovací jednotka je napájena bateriově a její maximální výdrž dosahuje až třiceti hodin. Naměřená data může jednotka odeslat za pomoci sítí Wi-Fi anebo 3G, popřípadě je možné naměřená data uložit na paměťovou kartu. Měřicí jednotka také obsahuje GPS senzor, a tak je možné naměřená data lokalizovat. [13]

Výrobce k této monitorovací jednotce také poskytuje podpůrný software dBTrait Expert a dále pak webovou službu, kterou je možné celou jednotku na dálku ovládat. [13]

Na závěr této kapitoly zde uvádím srovnávací tabulku jednotlivých monitorovacích jednotek.

Tab. 1: Přehled monitorovacích jednotek

Jméno jednotky:	Rozlišení:	Vzorkovací frekvence	Komunikační rozhraní:	Baterie	Výdrž
SEQUOIA GEA system	až 0.0005 mm/s	1024 Hz	Wi-Fi, ethernet	Ne	-
RDL/VIBE	0.18 mm/s	až 500 Hz	SMS, GSM	Ano	1-2 měsíce
VMSet-23-P	0.014 mm/s^2	až 3,2kHz	USB	Ne	-
01dB ORION	až 0.5 mm/s^2	výrobce neuvádí	Wi-Fi, 3G, USB	Ano	až 30 hodin

1.6. Požadované parametry navrhovaného zařízení

Z rozboru problematiky měření vibraací a podmínek, během kterých bude jednotka používána, vyplynulo několik vlastností, které by měla navrhovaná jednotka splňovat, aby nebyla v praxi omezena její funkčnost. V následujícím výčtu jsou tyto vlastnosti děleny do tří částí, a to měřicí část, komunikační část a napájení.

1.6.1. Měřicí část

Oproti fyzikálním veličinám jako je například teplota, nevykazuje zrychlení téměř žádnou setrvačnost, takže je pro získání nezkrivených údajů nutné udržovat vysokou vzorkovací rychlost. Vzhledem k tomu, že příslušné normy definují rozsah vibraací do 80 Hz, je dle Shannonova teorému nutné vzorkovat vstup z akcelerometru frekvencí minimálně 160Hz, což ale není dostatečné pro určení maximální amplitudy. Pro správné určení amplitudy s chybou maximálně 5 %, je nutné provádět vzorkování o minimálně desetinásobné frekvenci, než je frekvence signálu. [14]

Dalším z důležitých parametrů měřicí části monitorovací jednotky je její rozlišení, které by mělo být co nejvyšší, neboť určuje nejmenší možnou velikost amplitudy zachycených vibraací.

Celkově by monitorovací jednotka měla disponovat nejméně šesti analogovými vstupy, a to z důvodu možnosti připojení alespoň dvou tříosých akcelerometrů.

1.6.1.1. Zpracování dat

Vyvíjená monitorovací jednotka by měla být schopna jednoduchého vyhodnocení dat v reálném čase. Ve zjednodušené variantě jsou naměřená data prahována ve formě zrychlení v jednotlivých osách.

Ideální variantou je pak numerické integrování dat v reálném čase, čímž je z naměřených hodnot zrychlení získána rychlost, ve které jsou hodnoty vibraací definovány v normách. Takto upravená data by pak měla být porovnána s prahovými hodnotami, které jsou uloženy v zařízení

1.6.2. Komunikační část

U původní jednotky, která byla nasazena v Národním muzeu, byla pro komunikaci s okolním světem využita síť Ethernet. Toto řešení se však během nasazení ukázalo jako nepraktické, neboť vlivem stavebních prací docházelo k častému porušení přírodních kabelů a tím k odpojení monitorovací jednotky od sítě.

Z tohoto důvodu by nově navrhovaná monitorovací jednotka měla mít hlavní komunikaci s okolím zajištěnou bezdrátově. K tomuto účelu jsou v současnosti nejvíce využívány komunikační technologie Wi-Fi a GSM a nověji se také začíná prosazovat síť LoRaWAN, která je primárně určená pro Internet věcí.

GSM

Síť GSM (z angl. Global System fo Mobile Communication) je v současné době nejrozšířenější komunikační síť, která je primárně určená pro mobilní komunikaci a jejíž komerční provoz byl zahájen již v roce 1991.

Jejími hlavními výhodami je zejména signálové pokrytí, které například v České Republice dosahuje až 99.80 % plochy státu [15], další výhodou je pak možnost udržovat za pomoci služby GPRS (z angl. General Packet Radio Service) nepřetržité spojení a kontinuálně tak streamovat měřená data.

Nevýhodami jsou pak její čistě proprietární charakter a tedy to, že se za zařízení využívající tuto síť musí platit poplatek, obvykle závislý na objemu využitých služeb, další velkou nevýhodou je pak velká spotřeba energie a velmi malá přenosová rychlost, která je maximálně 100 kbit/s v případě čisté technologie GPRS, v současné době je však většinově využíváno EGPRS, což je součást novější implementace sítě založené na GSM s názvem EDGE, tato síť pak dosahuje maximálních rychlostí až 296 kbit/s.

Síť GSM je v současnosti postupně nahrazována sítěmi třetí generace, jako je například síť LTE, které poskytují o mnoho vyšší přenosové rychlosti, které dosahují teoretické maximální rychlosti až 300 Mbit/s.

Wi-Fi

Jako Wi-Fi se označuje několik komunikačních standardů založených na specifikaci IEEE 802.11, které umožňují realizaci bezdrátových komunikačních sítí. Tyto sítě jsou provozovány v bezlicenčních pásmech ISM (z angl. Industrial, Scientific and Medical radio bands), kde pracují na frekvencích 2,4GHz a 5GHz.

Výhodami Wi-Fi jsou pak zejména bezplatný provoz, pokud jsou provozovány na frekvencích ISM a velké přenosové rychlosti, které v případě nejnovější specifikace IEEE 802.11ax dosahují rychlostí až 10.53 Gbit/s. Velkou nevýhodou je pak opět velká spotřeba energie a zejména

velmi špatně realizovatelné pokrytí sítí, kdy zejména v budovách bývá signál velmi tlumen konstrukcemi, což je ještě umocněno v případě starých kamenných budov, ale také i v případě nejnovějších budov s železobetonovým skeletem.

LoRaWAN

Jednou z nejnovějších sítí, která se v těchto aplikacích uplatňuje, je síť LoRaWAN, která je detailně popsána v kapitole 2.3 LoRa. Tato síť funguje v pásmu ISM, a to na frekvencích 468MHz a 868MHz pro Evropu. Síť LoRaWAN není navržena na přenosy velkého množství dat a častou komunikaci v reálném čase. Její primární využití počítá spíše s občasným přenosem krátkých zpráv, jako například informace o stavu čidla, spuštění alarmu atp.

Jejími největšími výhodami jsou zejména velmi malá spotřeba elektrické energie, kdy samotné zařízení, které v této síti komunikuje spotřebovává energii pouze během této komunikace a dále pak otevřený standard, který umožňuje stavbu a provoz vlastní gateway, díky čemuž není nutné využívat komerčních LoRa sítí, jejichž pokrytí je v rámci naší republiky stále ještě velmi malé.

Nevýhodami jsou pak, kromě již zmíněného malého pokrytí, zejména většinová nemožnost komunikace směrem k zařízení a nutnost počkat na zahájení komunikace koncovým zařízením.

Vzhledem k tomu, že má být monitorovací jednotka napájena primárně z baterií, je jedním z hlavních parametrů zejména spotřeba energie, z předchozího výčtu v tomto ohledu vychází nejlépe síť LoRaWAN, která byla nakonec použita ve finálním výrobku.

Monitorovací jednotka by dále měla mít možnost komunikace za pomoci sběrnice USB, přes kterou by mělo být možné vyčítat měřená data a provádět nastavení, například prahových hodnot.

1.6.3. Napájení

Jak již bylo zmíněno, celá monitorovací jednotka má být primárně napájena z baterie, z čehož vyplývá, aby všechny osazené komponenty měly co nejmenší možný odběr a aby ideálně nespotřebovávaly energii, pokud nejsou zrovna využívány. Baterie se musí dát dobíjet nejenom za pomoci síťového adaptéru, ale musí být k dispozici i možnost dobíjení za pomoci solárního panelu.

1.7. Porovnání s existujícími zařízeními

Z měřících jednotek, které jsou uvedeny v kapitole č.1.5 Měřící jednotky dostupné na trhu, je navrhované jednotce nejvíce podobné jednotky RDL//VIBE od výrobce Caption Data a jednotka 01dB ORION od výrobce ACOEM.

Tyto jednotky jsou svými parametry velmi podobné navrhované jednotce, a to jak svým primárním určením, kterým je monitoring budov zejména v prostředí staveb, tak provedením, kdy se jedná o autonomní zařízení, které ke svému provozu nepotřebují žádné přívodní kabely a fungují po celou dobu na baterie. Doba, po jakou jsou schopny tyto zařízení pracovat bez externího zdroje napájení, je pro každé zařízení rozdílná, případě RDL//VIBE je výrobce udávaná výdrž až 2 měsíce, v případě 01dB ORION pak maximálně 30 hodin.

Obě tyto zařízení jsou schopny pracovat s dvojicí senzorů s tím, že v případě RDL//VIBE jsou jako senzory použity akcelerometry, v případě 01dB ORION je jako jeden senzor využit trojosý akcelerometr, který je napevno součástí monitorovací jednotky, druhý senzor lze k jednotce připojit, jako tento externí senzor může sloužit jak akcelerometr, tak i geofon.

K přenosu naměřených dat jsou obě tyto jednotky vybaveny technologií pro přenos dat pomocí mobilní sítě, u jednotky RDL//VIBE je to síť GSM a u jednotky 01dB ORION pak síť 3G, tato jednotka je dále vybavena technologií Wi-Fi.

Navrhovaná monitorovací jednotka by měla mít taktéž možnost pracovat se dvěma akcelerometry, dále by pak měla být napájena za pomoci baterie s ideální výdrží okolo týdne. Pro bezdrátovou komunikaci by měla jednotka využívat technologii LoRa.

Jednou z výhod navrhované monitorovací jednotky je možnost připojení jiného senzoru, což spolu s úpravou firmware řídicího mikroprocesoru je následně možné měřit i jiné veličiny, než jsou vibrace (teplota, mechanické namáhání, náklony apod.).

2. Využití technologie a hardware

Dle kapitoly 1.6 Požadované vlastnosti navrhované monitorovací jednotky, byly zvoleny potřebné technologie a komponenty, které zajišťují funkci celého zařízení. V této kapitole jsou uvedeny ty nejdůležitější, včetně případných alternativ, dále pak tato kapitola obsahuje rozbor funkce komunikační sítě LoRaWAN.

2.1. A/D Převodník

Hlavní částí která je zodpovědná za přesnost naměřených dat je A/D převodník, z požadovaných vlastností monitorovací jednotky a ze zadání diplomové práce vyplývá, že využitý A/D převodník by měl dosahovat čtecí frekvence minimálně 500Hz s co největší přesností/rozlišením, po konzultaci s vedoucím diplomové práce byly parametry A/D převodníku určeny na vzorkovací rychlost minimálně 100kSPS a rozlišení pak na 24 bitů a minimálně šest vstupních kanálů, dále by pak měl A/D převodník komunikovat za pomoci sběrnice I2C a nebo SPI a to z důvodu snazšího vývoje firmwaru.

Z nabídky A/D převodníků dostupných na trhu byl výběr zúžen na dva modely A/D převodníků. První variantou je A/D převodník MCP3913 [22], který vyrábí firma Microchip. Druhou variantou je A/D převodník CS5451A-ISZ od firmy Cirrus Logic [27]. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 2: Srovnání A/D převodníků

Typ ADC	Rozlišení	Vzorkovací frekvence	Počet kanálů	Napájecí napětí	Rozhraní	Cena
MCP3913	24 bit	125 kSPS	6	2.7 V–3.6 V	Serial/SPI	106Kč
CS5451A-ISZ	24 bit	512kSPS	6	2.7 V–3.6 V	Serial/4-wire	168Kč

Z tabulky vyplývá, že až na vzorkovací rychlost jsou parametry obou A/D převodníků stejné a vzhledem k tomu, že požadovaná minimální vzorkovací rychlost je splněna i u levnějšího MCP3913, byl pro finální aplikaci zvolen právě tento převodník.

Zvolený převodník je typu delta-sigma a jeho maximální měřicí rozsah je při použité interní napěťové referenci $\pm 600\text{mV}$. Na výstup napěťové reference je dále připojen operační zesilovač v režimu neinvertujícího zesilovače s dvojnásobným zesílením, pro případné přesné změření napěťové reference.

V případě vyvíjeného prototypu je však namísto převodníku MCP3913 použit převodník MCP3919, který je s původně zamýšleným A/D převodníkem totožný až na počet kanálů, který je snížen na tři. K této změně došlo z důvodu nedostupnosti MCP3919 na trhu v době osazování prototypu.

2.2. Mikrokontroler řídicí jednotky

Součástí, která je zodpovědná za kompletní řízení měřicí jednotky, sběr dat, jejich analýzu a případné odeslání výstražné zprávy v případě překročení prahových hodnot zrychlení je mikrokontroler.

Vzhledem k tomu, že se u vyvíjené měřicí jednotky počítá primárně s napájením z baterií, byla jedním z hlavních požadavků na mikrokontroler jeho co nejnižší spotřeba elektrické energie, dalšími kritérii pak byla zejména podpora komunikační sběrnic potřebných ke komunikaci s periferiemi, což jsou konkrétně sběrnice SPI ke komunikaci s A/D převodníkem a rozhraní UART ke komunikaci s bezdrátovým modulem LoRa. Dále zde byl požadavek, aby výsledná monitorovací jednotka umožňovala komunikaci s řídicím programem za pomoci USB sběrnice.

Pro finální aplikaci byla nakonec zvolena architektura procesoru ARM, a to zejména díky jejich dobrému poměru výkonu ku spotřebě energie. Nejrozšířenějšími mikroprocesory z rodiny ARM jsou v současnosti mikroprocesory s délkou slova 32 bitů, na trhu jsou však již i procesory s délkou slova 64 bitů a dříve se též vyráběly mikroprocesory s délkou slova 16 bitů. [16]

ARM je architektura Von Neumannova typu, což znamená, že mikroprocesor má sdílenou paměť jak pro data, tak pro programové instrukce, z čehož vyplývá, že běh programu je sekvenční. Instrukční sada je pak u tohoto typu procesorů redukována neboli RISC (z anglického Reduced Instruction Set Computing). [16]

Samotná volba mikroprocesoru byla také velmi ovlivněna zkušenostmi s použitím mikroprocesoru od dané společnosti. Z tohoto důvodu byl výběr zredukován na mikroprocesory od výrobců NXP a STMicroelectronics. Z nabídky společnosti STMicroelectronics požadované podmínky splňují zejména mikroprocesory řady STM32L0, z nabídky společnosti NXP pak mikroprocesory z řady KL0 [28]. Dva vhodné modely jsou spolu s důležitými parametry uvedeny v následující tabulce.

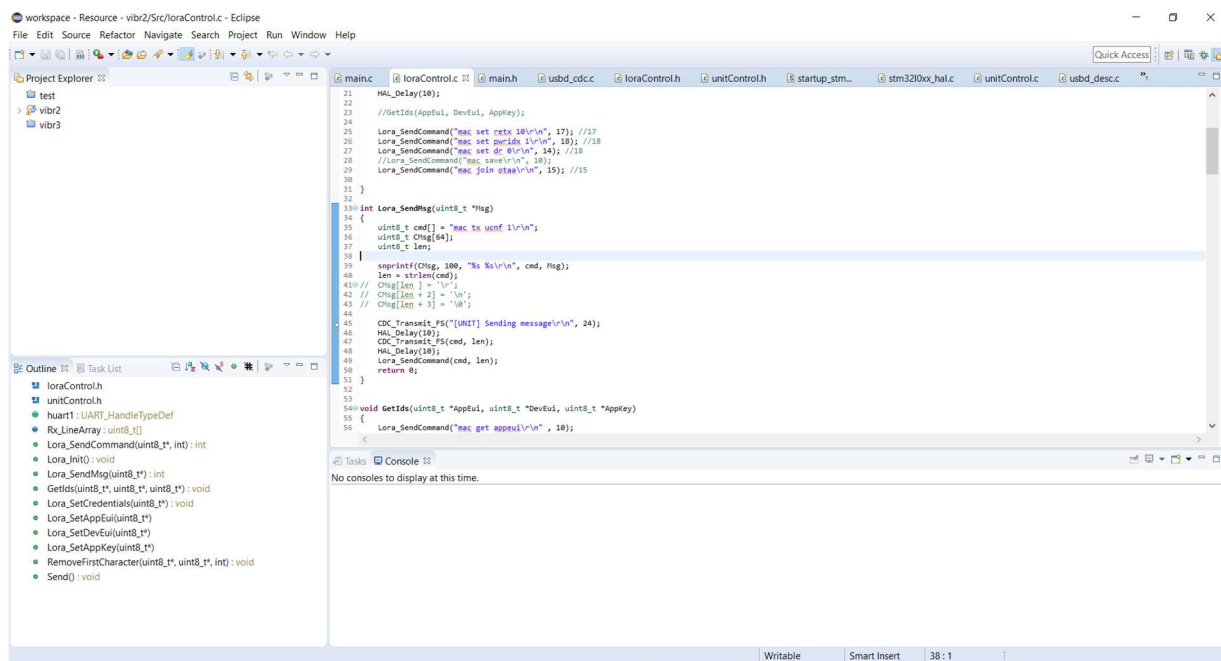
Tab. 3: Srovnání mikrokontrolérů

Typ	Frekvence interního oscilátoru	Velikost paměti	Komunikační rozhraní	Spotřeba elektrické energie	Cena
STM32L052K6T6	32 MHz	2 kB/64 kB data/program	SPI, I2C, UART, USB	2,8 mA	76 Kč
MKL24Z32VLH4	48 MHz	32 kB	SPI, I2C, UART	2,26 mA	110 Kč

Z přehledové tabulky vyplývá, že procesor od firmy NXP má nižší spotřebu energie a současně vyšší taktovací frekvenci, této spotřeby však lze dosáhnout pouze v režimu velmi nízké spotřeby, což by v případě vyvíjené monitorovací jednotky pravděpodobně znamenalo, že reálná spotřeba by byla o něco vyšší. Jeho největšími nevýhodami jsou pak menší paměť a vyšší cena. Z těchto důvodů by ke konečné aplikaci vybrán procesor STM32L052K6T6 [23], jedním z důvodů k volbě mikroprocesoru od firmy STM je také má větší zkušenost s programováním mikroprocesorů od této společnosti.

2.2.1. Programování

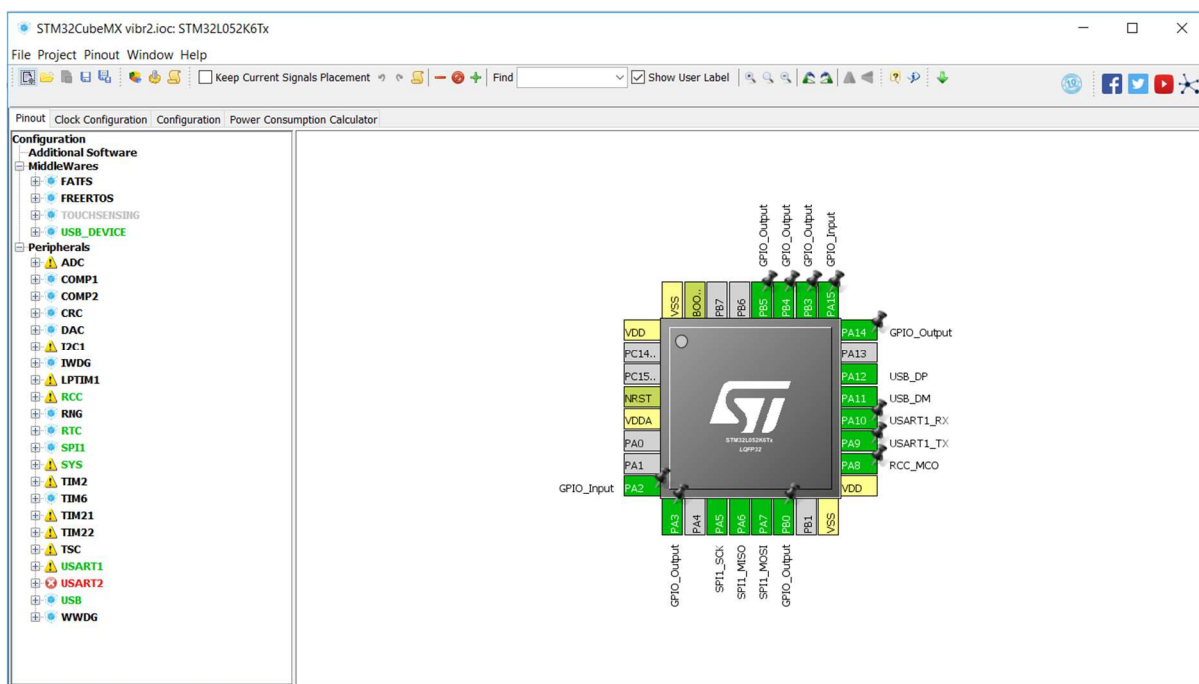
K programování příslušného mikroprocesoru je použit programovací jazyk C a k vývoji samotného firmwaru bylo využito IDE System workbench for STM32 (zkráceně SW4STM32), které je postaveno na vývojovém prostředí Eclipse.



Obr. 9: Vývojové prostředí System Workbench for STM32

Toto vývojové prostředí je vyvíjené samotným výrobcem mikroprocesoru společností STMicroelectronics. Vývojové prostředí SW4STM32 využívá ke kompilování zdrojového kódu kompilátor GCC, který je vyvíjen pod licencí GNU.

Další usnadnění vývoje pak přineslo využití programu STM32CubeMX, který je taktéž vyvíjen společností STMicroelectronics. STM32CubeMX je grafický konfigurátor, ve kterém je možné nastavit kompletně celý výchozí stav periferií mikrokontrolérů, jako je například nastavení GPIO pinů, aktivace sběrnic, nastavení zdrojů hodinového signálu atp. STM32CubeMX také kontroluje, zda je požadované nastavení v pořádku a nedochází například ke kolizím mezi piny, které potřebují různé sběrnic, následně pak umožňuje vygenerovat kompletní projekt pro zvolené IDE.



Obr. 10: Konfigurační nástroj STM32CubeMX

Takto vygenerovaný projekt automaticky obsahuje knihovnu HAL (z anglického Hardware Abstract Layer), která je taktéž vyvíjena společností STMicroelectronics. HAL knihovna obsahuje funkce, které obsluhují periferie mikroprocesoru, a není tak nutné přistupovat přímo k obslužným registrům mikroprocesoru.

Názvy funkcí v knihovně HAL se skládají z několika částí. První částí je označení, že jde o funkci z knihovny HAL, dále pokračuje jméno periferie, ke které má daná funkce přistupovat, na příkladu níže se jedná o vstupně výstupní piny mikroprocesoru, a nakonec pak samotný název funkce, který určuje její využití, na příkladu níže se tedy jedná o funkci TogglePin, která slouží k přepnutí stavu pinu mikroprocesoru, který je nastaven jako výstupní.

```
HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_3);
```

Obr. 11: Ukázka příkazu z knihovny HAL

Pro samotné programování mikroprocesoru se v původních rešeršních projektech počítalo s využitím předprogramovaného bootloaderu, který umožňuje naprogramovat mikroprocesor pomocí sběrnice SPI anebo pomocí sériového rozhraní UART. K nahrání programu do mikrokontroleru přes rozhraní UART slouží program Flasher-STM32, který je opět vyvíjen společností STMicroelectronics a který slouží k nahrání zkompilovaného programu do mikrokontroleru, dále pak může editovat jeho paměť, vymazat jí či zamknout, popřípadě stáhnout zkompilovaný program zpět do PC.



Obr. 12: Flashovací nástroj Flasher

Samotné programování původně probíhalo tak, že se přivedlo napětí na pin s označením BOOT0, který je mikrokontroleru vyveden jako pin číslo 31 a po následném restartu se mikroprocesor přepnul do self-programming módu, ve kterém do něj program Flasher-STM32 může zapsat požadovaná data. Přepnutí do režimu standardního běhu mikrokontroleru lze následně vyvolat z tohoto programu po zapsání firmwaru.

Tato metoda se však během vývoje ukázala jako velmi neefektivní, neboť bylo po každé změně nutné absolvovat celý proces znovu nahrání firmwaru a také tento postup neumožňuje pokročilý debugging jako je například krokování. Z těchto důvodů byl nakonec k vývoji využit klasický programátor ST-Link v2, který je možné ovládat přímo z prostředí SW4STM32a který díky již zmíněným funkcím jako je krokování velmi urychlil a usnadnil vývoj.

Tento programátor se k mikroprocesoru připojuje za pomoci pěti vodičů, které jsou popsány v následující tabulce.

VDD	Napájení programovaného mikroprocesoru
SWCLK	Hodinový signál určený k synchronizaci programátoru s mikroprocesorem
GND	Zem
SWDIO	Komunikační vodič
NRST	Reset pro programovaný mikrokontroler

Tab. 4: Popis vodičů programátoru ST-Link v2

Nevýhodou využití tohoto programátoru je, že piny SWCLK a SWDIO musí být vyhrazeny pouze pro programátor, což v případě prototypu není dodrženo, neboť se s využitím programátoru ST-Link V2 nepočítalo, a tak je na PIN PA14 připojen reset A/D převodníku a z tohoto důvodu není možné A/D převodník používat během programování pomocí tohoto programátoru.

2.3. LoRaWAN

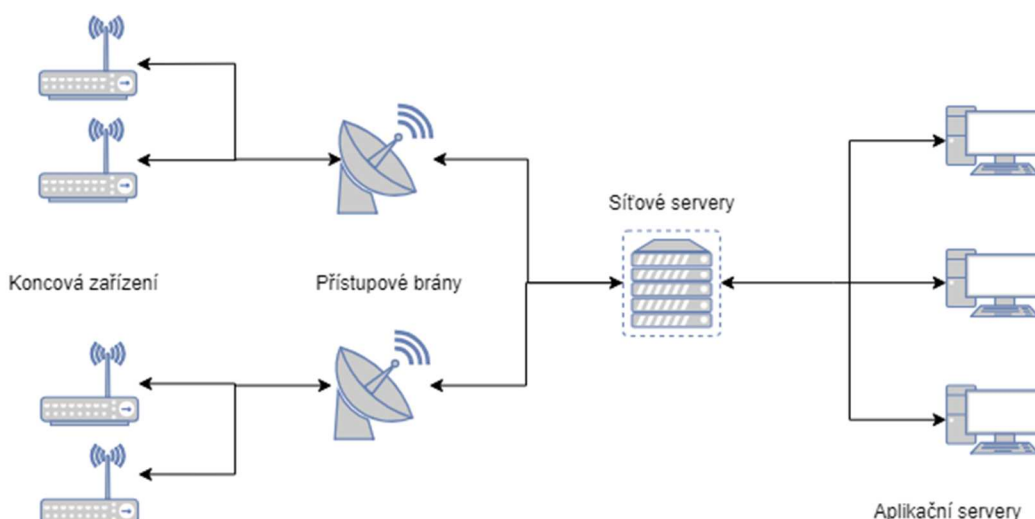
Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.6.2, která obsahuje zevrubnou rešerši možností bezdrátové komunikace monitorovací jednotky s okolím, byla pro finální podobu monitorovací jednotky zvolena technologie LoRaWAN. Obsahem této kapitoly tedy bude detailnější popis této sítě, který je z části převzat z Projektu č.1 [32].

Síť LoRaWAN (z anglického Long Range Wide Area Network) je otevřený standard nízkenergetické komunikační sítě, která je primárně určena k využití spolu s takzvaným Internetem věcí (IoT). Standard této sítě spravuje organizace LoRa Alliance, což je nezisková organizace, která je složena z více jak 500 společností. [17]

Protokoly samotné sítě LoRaWAN jsou definovány v druhé a třetí vrstvě OSI/ISO modelu tzn. v linkové a síťové vrstvě, z toho plyne určitá nezávislost na typu fyzické vrstvy, v reálném nasazení se ale využívají především dvě modulace, a to modulace FSK, která zajišťuje kompatibilitu se staršími zařízeními a dále pak nejvíce rozšířená modulace LoRa (z anglického Long Range) [17], která je využita i v případě této monitorovací jednotky. Tato modulace pracuje v rozprostřeném spektru typicky na frekvencích 868MHz a 433MHz pro Evropu, pro každou tuto frekvenci jsou pak definovány další tři komunikační kanály, například pro frekvenci 868MHz jsou to kanály 868.10, 868.30 a 868.50 MHz. [17] Dosah sítě se pak při využití této modulace pohybuje v rozmezí od několika desítek, či stovek metrů v husté zástavbě až desítky či dokonce stovky [18]

kilometrů v otevřeném prostranství. Přenosová rychlost se pohybuje v rozmezí od jednotek kBps až po desítky v závislosti na typu použitého transceiveru, vzdálenosti od přístupové brány a například hustotě zástavby. [21]

Standardy sítě LoRaWAN definují tři typy zařízení, a to síťové servery, přístupové brány a koncová zařízení, přičemž bezdrátová komunikace za pomoci LoRa modulace probíhá pouze mezi koncovými zařízeními a přístupovými bránami, které jsou následně připojeny k síťovým serverům za pomoci klasického IP protokolu. Síťová topologie je pak téměř výhradně typu star-of-stars, přičemž jako centrální uzly propojující jednotlivé segmenty sítě slouží právě síťové servery, které komunikují mezi s sebou a zprostředkovávají propojení mezi přístupovými bránami, které se chovají jako transparentní bridge, který slouží k překladu komunikace z bezdrátové komunikace za pomoci LoRa modulace na standardní IP protokol. Síťové servery dále zprostředkovávají komunikaci s aplikačními servery, které slouží ke zpracování přijatých dat, tyto servery již nejsou součástí standardu sítě LoRaWAN. [21]



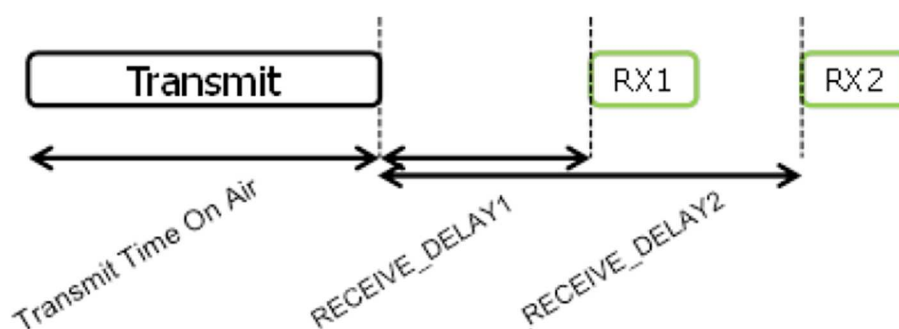
Obr. 13: Základní struktura sítě LoRaWAN

Rozdělení koncových zařízení

Koncová zařízení se dělí do několika tříd dle režimu komunikace s přístupovými bránami. Tyto třídy jsou označeny jako třídy A, B a C, přičemž všechny zařízení musí splňovat podmínky kategorie třídy A, třídy B a C povinné nejsou a jejich implementace je volitelná. [21]

Zařízení třídy A

Třída A je základní třídou, kterou musí splňovat všechna koncová zařízení, která jsou připojena do sítě LoRaWAN. Tato třída podporuje obousměrnou komunikaci, která pracuje na principu protokolu typu ALOHA, kdy jsou zprávy směrem od koncového zařízení k přístupovým bránám vysílány zcela náhodně na základě potřeby koncového zařízení, po přijetí zprávy síťový serverem je pak směrem ke koncovému zařízení odesláno potvrzení o příjmu, ke kterému je možné připojit data určená pro koncové zařízení. Pro příjem tohoto potvrzení otevírá koncové zařízení dvě příjmová okna, během kterých pak přístupová brána vyšle již zmíněné potvrzení. Tyto okna jsou na následujícím obrázku označena jako RX1 a RX2. [21]



Obr. 14: Příjmová okna koncového zařízení třídy A [21]

Tento způsob je jedinou možností, jak komunikovat směrem ke koncovým zařízením, což s sebou přináší jisté nevýhody, zejména nemožnost komunikovat s koncovým zařízením v době jeho nečinnosti v síti LoRa, tento problém řeší zbylé dvě třídy B a C. [21]

Výhodou zařízení třídy A je pak zejména jejich velmi malá spotřeba elektrické energie, neboť pokud zařízení nepotřebuje komunikovat může být komunikační modul LoRa sítě vypnut.

Zařízení třídy B

Zařízení třídy B jsou v zásadě pouze rozšířené zařízení třídy A o možnost komunikace směrem od serverů ke koncovému zařízení i v době, kdy koncové zařízení nevysílá.

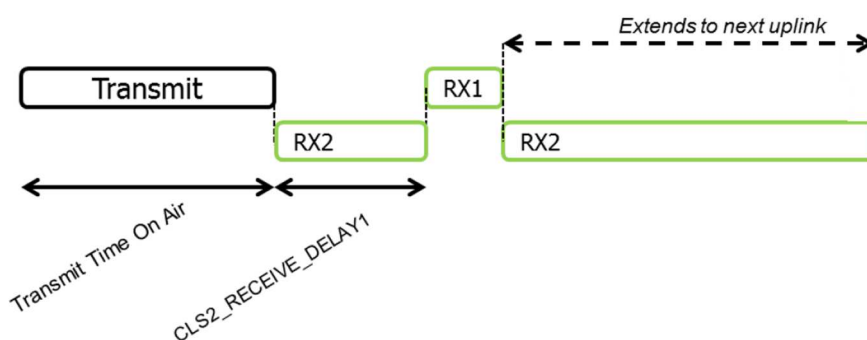
Komunikace koncového zařízení směrem k přístupovým bránám tedy probíhá zcela identicky jako v případě zařízení třídy A a to i s otevíráním příjmových oken. Pro umožnění příjmu dat koncovým zařízením i v době kdy nevysílají, jsou otevírána další příjmová okna v přesně daný čas. Otevírání těchto příjmových oken je řízeno za pomoci speciálního synchronizovaného signálu,

který periodicky vysílají přístupové brány a jeho základě dokáží koncová zařízení určit čas, kdy mají otevřít příjmová okna. [21]

Nevýhodou těchto zařízení je pak o něco vyšší spotřeba, která je způsobena právě periodickým otevíráním příjmových oken. [21]

Zařízení třídy C

Poslední třídou koncových zařízení jsou zařízení třídy C, která je opět rozšířením třídy A. Zařízení této třídy udržují otevřená příjmová okna téměř nepřetržitě, výjimkou jsou pouze chvíle, kdy samotné koncové zařízení potřebuje vysílat data. Celý proces je znázorněn na následujícím obrázku, ze kterého je patrné, že dochází ke klasické komunikaci dle třídy A je s tím rozdílem, že příjmové okno RX2 je udržováno po celou dobu do dalšího vysílání, a i mezi koncem vysílání a otevřením prvního příjmového okna. [21]



Obr. 15: Příjmová okna koncového zařízení třídy C [21]

Tento způsob komunikace umožňuje přístupovým bránám komunikovat se zařízením prakticky kdykoliv vyjma situací, kdy koncové zařízení vysílá a dosahuje tak nejmenších latencí. Velkou nevýhodou je pak zejména velmi zvýšená spotřeba elektrické energie, neboť koncové zařízení musí udržovat neustále aktivní komunikační LoRa modul, z tohoto důvodu jsou zařízení třídy C primárně zařízení, které mohou být permanentně připojeny ke zdroji elektrické energie. [21]

Popis komunikace v síti LoRaWAN

Začátek komunikace koncového zařízení s přístupovými brány sítě LoRaWAN musí být zahájen aktivací koncového zařízení, tato aktivace může probíhat dvěma způsoby, a to buď pomocí tzv. On The Air Activation neboli zkráceně OTAA anebo za pomoci Activation By Personalization neboli zkráceně ABP. [21]

Aktivace pomocí OTAA

Aktivaci koncového zařízení je nutné provést pouze před odesláním první zprávy a následně pokaždé po ztrátě signálu. K úspěšné aktivaci koncového zařízení za pomoci OTAA jsou potřeba tři identifikátory a to AppEUI, DevEUI a AppKey, které jsou popsány v následující tabulce:

Tab. 5: Identifikátory sítě LoRaWAN

AppEUI	Globální 64 bitový identifikátor entity zpracovávající požadavek na připojení.
DevEUI	Unikátní 64 bitový identifikátor který je přiřazen každému čipu jeho výrobcem, lze jej ale změnit.
AppKey	Šifrovací 128 bitový klíč specifický pro koncové zařízení, odvozuji se z něj klíče, které následně slouží k ověření komunikace a aplikačních dat.

Aktivace je řízena aplikačním serverem, což je, jak již bylo zmíněno, server, na kterém běží aplikace finálně zpracovávající přijatá data. Koncové zařízení nejprve odešle směrem koncovému serveru tzv. join-request, který má formát, jež je znázorněn na následujícím obrázku. [21]

Size (bytes)	8	8	2
Join Request	AppEUI	DevEUI	DevNonce

Obr. 16: Formát join-requestu zprávy sítě LoRaWAN [21]

Jak je z obrázku patrné, tak join-request obsahuje AppEUI a DevEUI a dále pak ještě hodnotu DevNonce, která je generována zcela náhodně. Hodnota DevNonce slouží jako ochrana proti registraci pomocí již jednou použitého join-requestu, který by případný útočník mohl odposlechnout. Z toho důvodu jsou na serveru uloženy všechny hodnoty DevNonce, které byly dříve použity a server následně ignoruje všechny join-requesty, které přijdou s již jednou použitou hodnotou DevNonce. [21]

Pokud je požadavek join-request přijat, odpovídá aplikační server zprávou join-accept, jejíž formát je zobrazen na následujícím obrázku a popis jednotlivých hodnot v tabulce níže. [21]

Size (bytes)	3	3	4	1	1	(16) Optional
Join Accept	AppNonce	NetID	DevAddr	DLSettings	RxDelay	CFList

Obr. 17: Formát join-accept zprávy sítě LoRaWAN [21]

Tab. 6: Význam součástí join-accept zprávy

AppNonce	24 bitová náhodná hodnota, která slouží k vygenerování hodnot NwkSKey a AppSKey
NetID	24 bitový síťový identifikátor
DevAddr	32 bitová adresa koncového zařízení
DLSettings	Obsahuje parametr RX1DRoffset, který určuje rozdíl rychlosti přenosu dat, který je mezi odesláním a příjmem v příjmové okně RX1, nativně = 0, druhým parametrem je pak RX2 Data rate, který určuje rychlost přenosu dat v příjmové okně RX2
RxDelay	Zpoždění mezi vysíláním a odezvou
CFList	Nepovinný seznam frekvencí jednotlivých kanálů

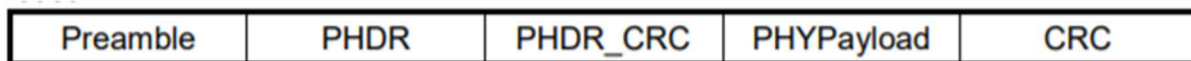
Aktivace pomocí ABP

V určitých specifických podmínkách je možné provést aktivaci pomocí ABP, kdy se obchází registrační proces, při kterém se generují hodnoty MwkSKey a AppSKey z údajů koncového zařízení. V tomto případě jsou tyto hodnoty vygenerovány staticky a následně nahrány rovnou do koncového zařízení, tento typ aktivace je určen zejména pro zařízení, u kterých se počítá pouze s připojením do jedné sítě, která zůstává neměnná. [21]

Komunikace v síti LoRaWAN

Po úspěšné aktivaci je možné zahájit komunikaci v síti. V síti LoRaWAN se rozlišují dva druhy zpráv, a to zprávy odchozí neboli *uplink messages* a zprávy příchozí neboli *downlink messages*. [21]

Komunikace směrem koncového zařízení směrem k aplikačním serverům probíhá u zařízení všech tříd identicky. Koncové zařízení nejdříve odešle *uplink* zprávu směrem ke všem dostupným přístupovým branám, čímž zvyšuje šanci na její doručení. Formát *uplink* zprávy je zobrazen na obrázku níže.



Obr. 18: Formát *uplink* zprávy sítě LoRaWAN [21]

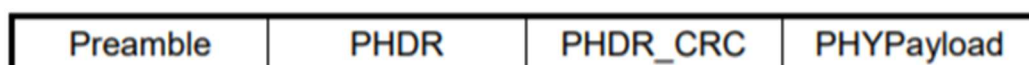
Z obrázku je patrné, že je *uplink* zpráva složena z několika parametrů, jejich význam je popsán v následující tabulce.

Tab. 7: Význam součástí *uplink* zprávy

Preamble	Preamble obsahující synchronizační údaje k síti LoRa
PHDR	Fyzická hlavička, která slouží k identifikaci koncového zařízení
PHDR_CRC	Kontrolní součet fyzické hlavičky
PHYPayload	Přenášená data
CRC	Kontrolní součet <i>uplink</i> zprávy

Poté co je *uplink* zpráva zachycena přístupovými branami, je těmito branami následně předána síťovému serveru, který následně na základě údajů v PHDR parametru vyhodnotí, na který aplikační server se má zpráva přeposlat a následně jí tam předá. Aplikační server po přijetí zprávy zpravidla (je možné vysílat i zprávy u kterých potvrzení nepožadujeme) vysílá potvrzovací zprávu typu *downlink*, kterou odešle na síťový server, který dle údajů v databázi na základě například kvality signálu dohledá nejvhodnější gateway, která následně zprávu odešle směrem ke koncovému zařízení.

Komunikace aplikačního serveru směrem ke koncovému zařízení se již liší dle třídy koncového zařízení. V části věnující se popisu zařízení třídy A již bylo zmíněno, že v případě této třídy je nutné, aby případnou *downlink* komunikaci iniciovalo nejprve koncové zařízení. Přenos následně probíhá stejně jako v případě odesílání *uplink* zprávy jen s tím rozdílem, že k potvrzovací *downlink* zprávě jsou připojeny ještě potřebná data. *Downlink* zpráva má pak formát zobrazený na následujícím obrázku.



Obr. 19: Formát *downlink* zprávy sítě LoRaWAN [21]

Strukturně je zpráva velmi podobná zprávě typu *uplink* jen s tím rozdílem, že *downlink* zpráva neobsahuje kontrolní součet CRC. Kontrolu integrity zprávy tohoto typu používají pouze přístupové brány, aby nedocházelo k přeposílání zjevně poškozených zpráv. Ke kontrole integrity *downlink* zpráv se používá tak zvaný MIC, neboli Message Integrity Check. Tato kontrola funguje na principu speciálního kontrolního kódu (message integrity check), který je počítán zvlášť pro každou *downlink* zprávu a který je následně připojen k vysílaným datům, které jsou ve formátu zprávy označeny jako *PHYPayload*. [21]

Tímto způsobem mohou komunikovat aplikační servery se zařízením jakékoliv třídy. V případě potřeby komunikovat s koncovým zařízením častěji, je možné využít zařízení třídy B. Jak již bylo napsáno v části zabývající se třídami koncových zařízení, v případě třídy B vysílají synchronizovaně všechny přístupové brány v síti speciální synchronizační signál tzv. beacon. Tento signál obsahuje časovou referenci na základě, které mohou koncová zařízení třídy B určit, kdy mají otevírat příjmová okna tzv. *ping slots*, které jsou pak využity k iniciaci otevření standardních příjmových oken v případě, že jsou potřeba. Četnost vysílání synchronizačního signálu je nastavitelná dle potřeby komunikace s koncovým zařízením. [21]

Pokud tedy aplikační server potřebuje zaslat *downlink* zprávu koncovému zařízení, předá tuto zprávu síťovému serveru, který z databáze předchozích komunikací určí nejvhodnější přístupovou bránu, která následně dle údajů o otevření ping slotů v koncovém zařízení zprávu odešle. Z toho důvodu je nutné poslat libovolnou zprávu z koncového zařízení směrem k aplikačnímu serveru pokaždé, když dojde k přesunu koncového zařízení, neboť je nutné, aby síťové servery aktualizovaly databázi. Koncové zařízení může rozeznat přesun na základě změny synchronizačních signálů a díky tomu může být tato aktualizace automatizována. Zařízení třídy B umožňují *multicast* vysílání, kdy je jedna *downlink* zpráva určena pro více koncových zařízení. [21]

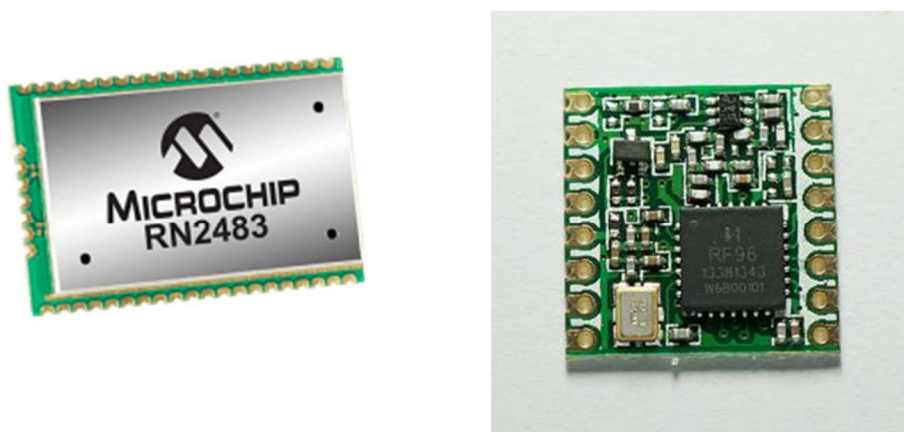
V případě, že je potřeba komunikovat s koncovým zařízením velmi často, je možné využít zařízení třídy C. V případě využití zařízení třídy C je možné komunikovat ze strany aplikačního serveru směrem ke koncovému zařízení téměř kdykoliv, kromě situací, kdy koncové zařízení samo vysílá. Zařízení třídy C umožňují, stejně jako zařízení třídy B, *multicast* příjem. [21]

Komunikační LoRa modul

V původním projektu č.1 [32] byla komunikační část měřící jednotky tvořena modulem RFM95W od firmy Hope Microelectronics. Tento modul dokáže kromě komunikace LoRa modulací komunikovat i za pomoci modulací FSK, GFSK, OOK a dalších. V případě modulace LoRa dokáže pracovat na frekvencích 868MHz a 915MHz, přičemž maximální vysílací výkon je 20dBm a citlivost

přijímače – 139dBm. Tento modul komunikuje s mikrokontrolerem po sběrnici SPI, popřípadě za pomoci GPIO pinů. [24]

Nevýhodou tohoto modulu je však jeho složitá implementace, neboť se jedná pouze o čistý transceiver, což znamená, že v řídicím mikrokontroleru musí bezpodmínečně běžet LoRaWAN *stack*, který se stará o jeho kontrolu a samotnou komunikaci. Toto řešení je velmi náročné na výkon řídicího mikrokontroleru. Z toho důvodu a z důvodu velmi komplikované implementace, byl tento modul nahrazen modulem RN2483 od společnosti Microchip, který již má LoRa *stack* implementován.



Obr. 20: Komunikační moduly RN2483 a RFM95W

Modul RN2483 umožňuje komunikaci s využitím modulace LoRa případně i s využitím starší modulace FSK. Pracuje na frekvencích 868 MHz a 433 MHz. S řídicím mikrokontrolerem komunikuje přes rozhraní UART pomocí textových příkazů. Existují tři typy těchto příkazů: příkazy systémové (*sys*), příkazy ovládající protokol LoRaWAN (*mac*) a příkazy sloužící k ovládní transceiveru (*radio*). Tyto příkazy dále doplňují parametry určující typ požadované operace a případně požadovaná data [29]. Kompletní přehled příkazů je uveden v souboru RN2483 LoRa Technology Module Command Reference User Guide [30], který poskytuje výrobce. Na obrázku níže je zobrazen příklad příkazu, který nastavuje appEUI. Na prvním místě se nachází příkaz *mac*, který slouží k určení práce s protokolem LoRaWAN, následuje parametr *set appEUI*, značící nastavení identifikátoru appEUI, za tímto parametrem již následují samotná data. Důležitým prvkem celého příkazu je jeho ukončení znaky `\r\n` (0x0D, 0x0A), bez kterých není modul schopen příkaz vyhodnotit.

```
mac set appeui xxxxxxxx\r\n
```

Obr. 21: Příkaz nastavující appEUI

Hlavní výhodou tohoto modulu je že obsahuje vlastní mikrokontroler, na kterém běží již zmíněný LoRaWAN stack a není nutné ho tedy implementovat do řídicího mikrokontroleru monitorovací jednotky. Dále je pak v modulu obsažena paměť, která umožňuje uložit základní identifikační údaje koncového zařízení jako AppEUI, DevEUI a AppKey a také je možné využít 14 GPIO pinů, ke kterým lze připojit například stavové diody, spínače, logické obvody atp.

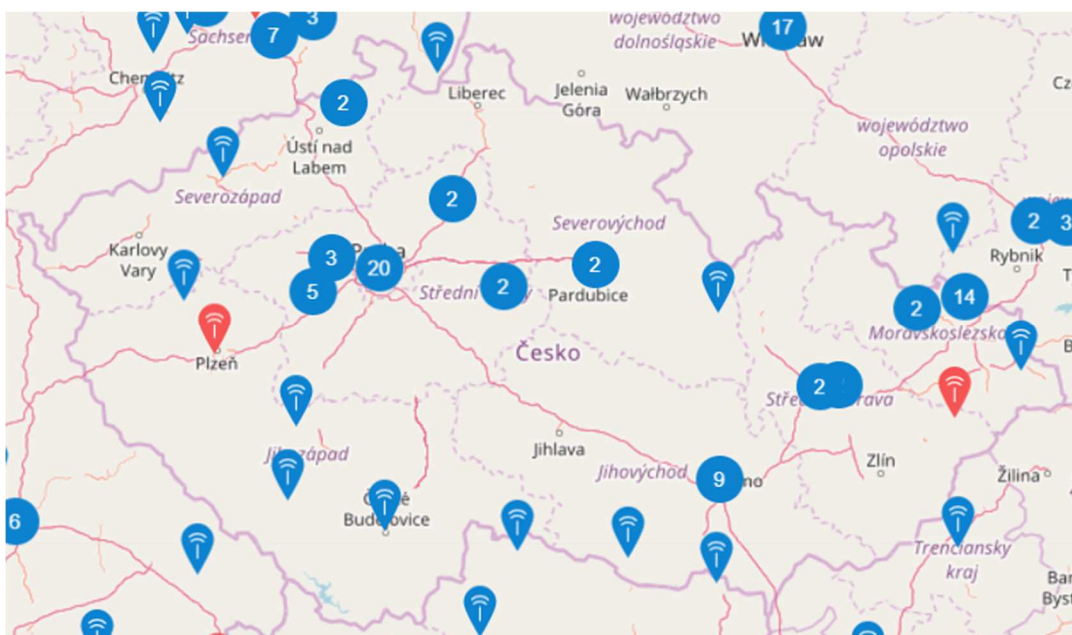
Jedním z důležitých parametrů je spotřeba elektrické energie modulu, která je závislá na výstupním výkonu a pohybuje se od 17.3 mA do 38.9 mA během vysílání. Pokud modul nevysílá lze jej odpojit od napájení a tím úplně vypnout.

Pokrytí LoRaWAN sítí v ČR

V České Republice je v současné době dostupných několik LoRaWAN sítí a další se budují. Mezi provozovatele největší LoRaWAN sítě patří pravděpodobně společnost České Radiokomunikace, která na konci roku 2017 pokrývala již velkou část České Republiky. Mezi další velké provozovatele pak patří společnost Starnet s.r.o.

Obě tyto sítě jsou komerčního charakteru a cena za jejich využití se pohybuje v řádu jednotek stokorun v závislosti na množství odeslaných/přijatých zpráv.

Kromě těchto komerčních sítí je možné využít ke komunikaci komunitní síť The Things Network, která je dostupná zcela zdarma. The Things Network je komunitní projekt, který propojuje provozovatele přístupových bran a vytváří tak velkou LoRaWAN síť zahrnující téměř čtyři tisíce přístupových bran a zasahující tak do velké části světa. Vzhledem k bezplatnému charakteru této sítě byla využita i pro vývoj popisované monitorovací jednotky.



Obr. 22: Rozmístění přístupových bran The Things Network v České Republice

Pokrytí signálem této sítě není v České Republice tak dobré jako v případě západních států Evropy a o plošném pokrytí se dá hovořit pouze v případě velkých měst jako je Brno a Praha.

2.4. Napájení

Vzhledem k tomu, že se počítá s tím, že vyvíjená monitorovací jednotka bude nasazena v náročném prostředí staveb, je jedním z požadavků její napájení z baterií a s tím související možnost nabíjení hlavního akumulátoru ze síťového adaptéru a případně pomocí solárního panelu.

Tato kapitola je proto členěna na dvě části, a to na část věnující se samotnému akumulátoru, jeho nabíjení a snížení napětí na požadovanou hodnotu 3.3 V, což je hlavní hodnota napětí pro celou monitorovací jednotku, druhá část se pak zabývá napájením měřených periférií, které lze připojit pomocí pěti pinových konektorů.

2.4.1. Akumulátor

K nabíjení je na monitorovací jednotce přítomen integrovaný obvod MCP73831T od firmy Microchip, který slouží jako integrovaná nabíječka Li-Ion a Li-Pol monočlánků.

Vstupní napětí této nabíječky 3,75 až 6 V a maximální nabíjecí proud je 500 mA. Nabíječku je možné napájet za pomoci konektoru micro USB anebo připojením solárního panelu do připraveného konektoru, popřípadě jakýmkoliv zdrojem stejnosměrného napětí o maximální velikosti 6 V. K nabíječce je ještě připojena LED dioda, která indikuje stav nabíječky. [25]

Standardní napájecí napětí se u Li-Ion a Li-Pol monočlánků pohybuje okolo 3.7 V až 4.2 V při plně nabitém akumulátoru. Vzhledem k tomu, že jako primární napájecí napětí pro celou desku bylo zvoleno 3,3V, bylo nutné napětí akumulátorů na tuto hodnotu snížit. K tomuto účelu je na monitorovací jednotce přítomen lineární stabilizátor s požadovaným výstupním napětím.

Byl zvolen stabilizátor MCP1802T-3302I/OT od firmy Microchip. Jedním z důležitých kritérií byl jeho velmi nízký úbytek napětí, který je maximálně 350mV. Maximální hodnota odebíraného proudu je pak 500 mA. Tato hodnota je dostatečná pro napájení celé monitorovací jednotky. [26]

2.4.2. Napájení periférií

Samotná monitorovací jednotka by měla být schopna poskytnout alespoň základní možnost napájení pro měřicí periferie. Požadované napájecí napětí bylo alespoň ± 12 V, popřípadě možnost ho nastavit.

Z tohoto důvodu je v jednotce přítomen integrovaný obvod LT1945IMSPBF od výrobce Linear Technology. Jedná se o duální DC/DC konvertor, s výstupními parametry v rozsahu 1,2V až 32 V pro kladný výstup a -1,2V až -32V pro výstup záporný. Tento step-up měnič je v tomto případě nastaven na výstup ± 12 V a zároveň jsou napěťové děliče nastavující výstupní napětí opatřeny odporovými trimery, takže je výstup dodatečně možné nastavit. [31]

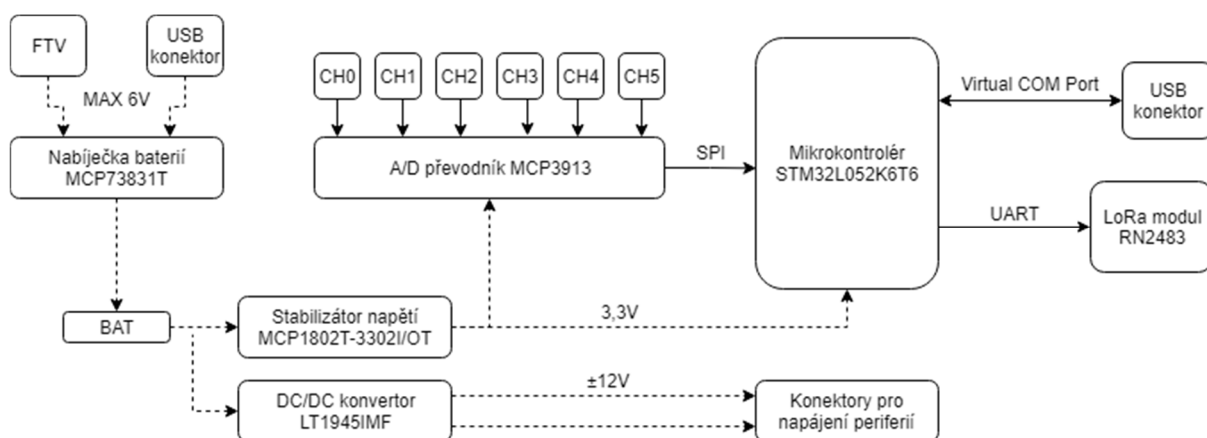
3. Schéma monitorovací jednotky a DPS

Hlavním cílem této kapitoly je popis celkového propojení všech prvků monitorovací jednotky a stručný popis hardwarových možností. Celkové schéma je zde uvedeno pouze ve zjednodušené formě jako blokové schéma a kompletní schéma je v příloze. Dále je v rámci této kapitoly uveden popis návrhu desky plošného spoje.

Zde popisované schéma a deska plošného spoje se částečně liší od vyrobeného prototypu, neboť postupem prací došlo k určitým změnám a úpravám, které byly provedeny až poté co byla vyrobena deska plošného spoje prototypu. Původní schéma, dle kterého je vyroben prototyp monitorovací jednotky, je vzhledem k velkému množství zaměněných pinů, součástí příloh.

3.1. Schéma monitorovací jednotky

Schéma samotné jednotky bylo navrženo v programu Eagle 8.3.2 od společnosti Autodesk (dříve CadSoft Computer). Blokové schéma je pak vytvořeno za pomoci online nástroje Draw.io. V blokovém schématu jsou všechny napájecí cesty znázorněny přerušovanými čarami, plné čáry pak představují logické propojení jednotlivých součástek s mikrokontrolerem.



Obr. 23: Blokové schéma monitorovací jednotky

Jako napájecí napětí celé monitorovací jednotky je zvoleno napětí 3,3V, které je stabilizováno pomocí napěťového stabilizátoru MCP1802T-3302I/OT a následně rozvedeno ke všem potřebným součástkám. A/D převodník a LoRa modul jsou k napájení připojeni pomocí MOSFET tranzistorů kvůli možnosti jejich odpojení v případě, že jich není zrovna potřeba. Stabilizátor je napájen z připojeného akumulátoru, který je připojena pomocí dvoupinového konektoru a je nabíjen z integrované nabíječky MCP73831T. K nabíječce je připojena LED dioda sloužící k indikaci probíhajícího nabíjení. Jako napěťový vstup této nabíječky je možné využít buď napětí z microUSB konektoru anebo z fotovoltaického panelu, který je možné připojit za pomoci

klasické svorkovnice, do této svorkovnice je možné připojit také variantně jakýkoliv zdroj napětí o maximální velikosti 6V, jako je například fotovoltaický panel WS-5/6V [19].

. Celá jednotka může být napájena z microUSB konektoru pouze v případě, že je k monitorovací jednotce připojen akumulátor. Pokud akumulátor připojena není, není možné jednotku takto napájet, neboť nabíječka rozezná, že akumulátor není připojen a napětí nepřepne na výstup.

K akumulátoru je také připojen DC/DC konvertor napětí LT1945IMF, který vytváří napětí ± 12 V, které je určeno pro napájení připojených senzorů. Toto napětí je vyvedeno na pětipinové konektory, na kterých jsou zároveň vyvedeny vstupy pro A/D převodník zajišťující čtení z připojených senzorů.

Ústřední součástí celé monitorovací jednotky je pak mikrokontrolér STM32L052K6T6, který se stará o komunikaci se všemi logickými obvody monitorovací jednotky. K tomuto mikrokontroleru je za pomoci sběrnice SPI připojen A/D převodník MCP3913, jehož vstupy jsou, jak již bylo zmíněno, vyvedeny na pětipinové konektory. Tyto vstupy jsou plně diferenční. V případě potřeby však lze jeden vstup uzemnit a měřit napětí proti zemi. Referenční napětí A/D převodníku je operačním zesilovačem MCP6001T-I/OT v režimu neinvertujícího zesilovače se zesílením 2, impedančně odděleno a vyvedeno na dvoupinový konektor. Lze jej využít pro některé senzory jako vstupní referenční či napájecí napětí. Mikrokontrolér také slouží jako zdroj hodinového signálu pro A/D převodník.

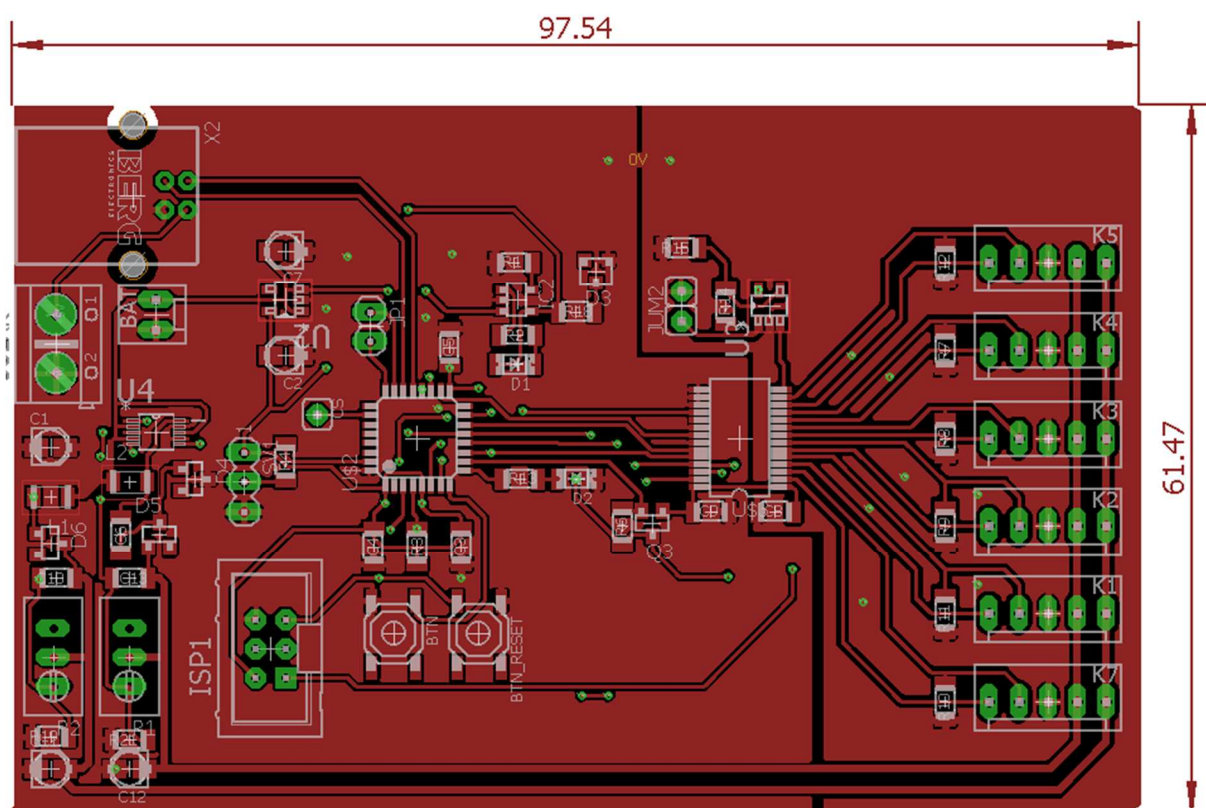
Další z důležitých součástí, která je k mikrokontroleru připojena, je modul obstarávající komunikaci v síti LoRaWAN. Tento modul s mikrokontrolérem komunikuje za pomoci rozhraní UART. V případě vyrobeného prototypu je modul připojen pomocí externího konektoru, protože během realizace byl použit jiný modul (viz. kap. 2.3). LoRa modul v této verzi dokáže data pouze vysílat, v případě potřeby obousměrné komunikace by bylo potřeba udělat drobné změny ve firmwaru.

Dále může mikrokontrolér komunikovat pomocí USB, které je zde vyvedeno v podobě microUSB konektoru. Jeden vstupní pin je také vyhrazen pro detekci připojeného externího napájení. Tato detekce je realizována pomocí zenerovy diody, která externí napájení, které může mít maximální hodnotu až 5V, usměrňuje na 3,3 V. K mikrokontroleru je ještě připojena kontrolní LED dioda, dále pak testovací tlačítko a tlačítko sloužící pro reset mikrokontroleru. Toto tlačítko nebylo zahrnuto ve vyrobeném prototypu a bylo proto k obvodu připájeno až dodatečně.

Dále jsou vyvedeny konektory SWD, který slouží k programování mikrokontroleru za pomoci programátoru ST-Link V2, konektor AVR ISP, na kterém je vyvedena sběrnice SPI a konektor s vyvedeným pinem BOOT0, který slouží k přepínání mezi režimy programování a běhu programu.

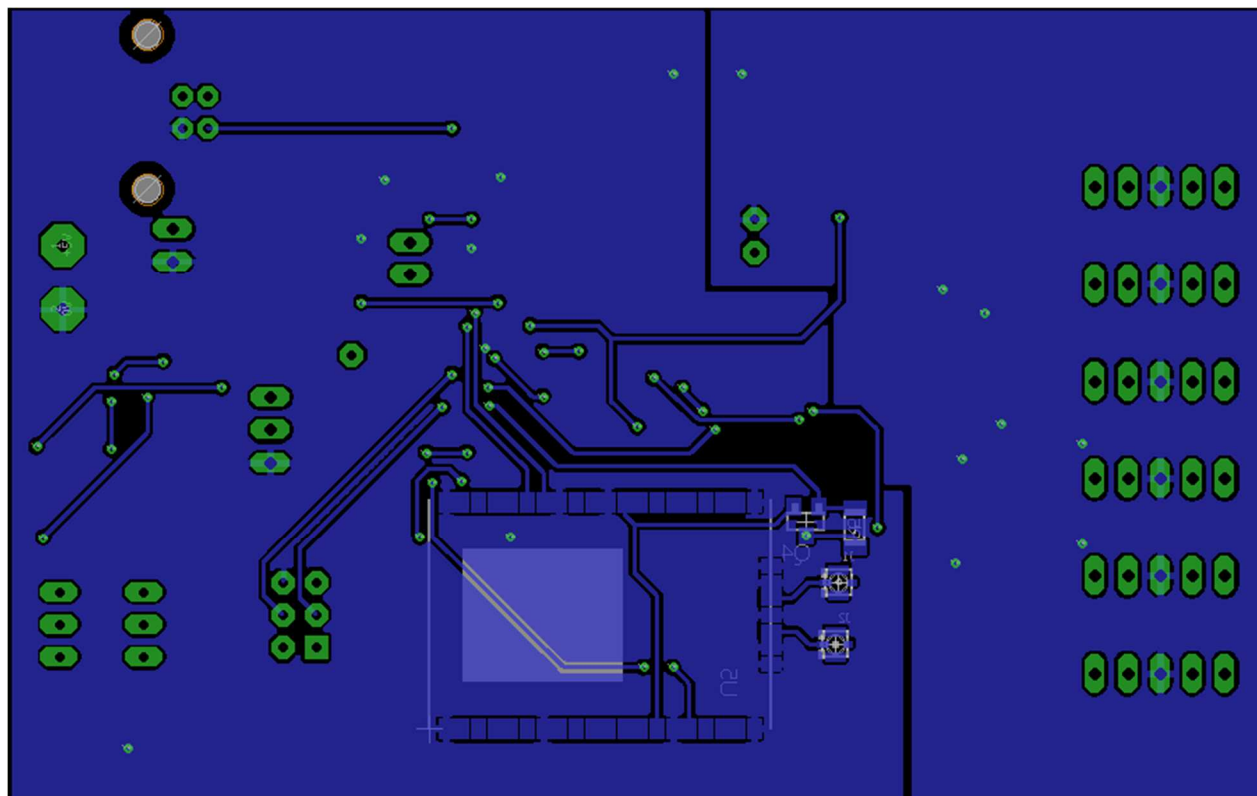
3.2. DPS

Návrh desky plošné spoje byl stejně jako schéma vytvořen v programu Eagle 8.3.2. Deska plošného spoje je koncipována jako dvouvrstvá s většinou součástek v horní vrstvě, v dolní vrstvě se nachází pouze LoRa modul a tranzistor ovládající jeho napájení.



Obr. 24: Vrchní vrstva DPS (rozměry jsou uvedeny v mm)

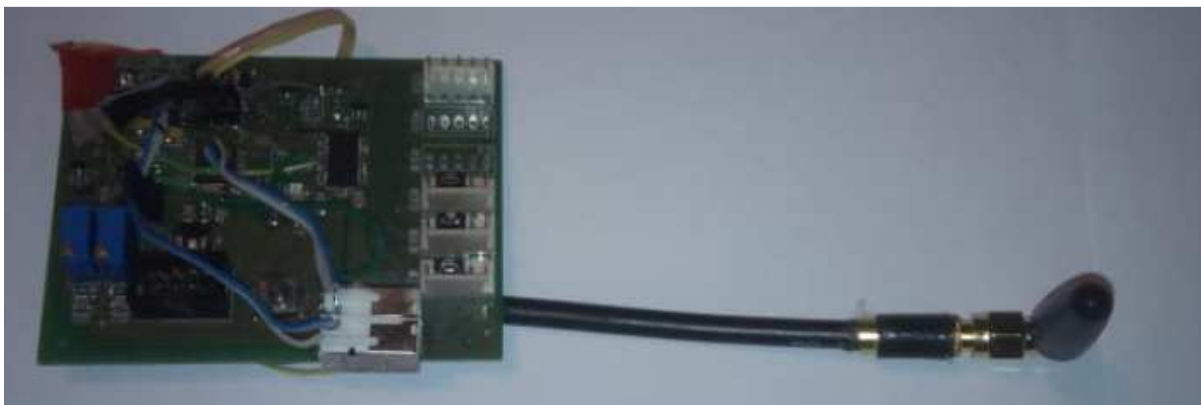
Deska plošného spoje je rozdělena na dvě části: digitální, která se na přiložených obrázcích nachází na levé straně a na část analogovou, která je na obrázku vpravo. V digitální části se nachází samotný řídicí mikrokontrolér a obvody sloužící k napájení celé monitorovací jednotky včetně vstupních konektorů napájení, dále jsou zde vyvedeny všechny komunikační konektory, a to konektor microUSB, konektor rozhraní UART a AVR ISP konektor se sběrnici SPI. V analogové části na pravé straně se pak nachází polovina A/D převodníku spolu s pětipinovými konektory, jejichž kompletní popis je uveden u popisu schématu a také operační zesilovač.



Obr. 25: Spodní vrstva DPS

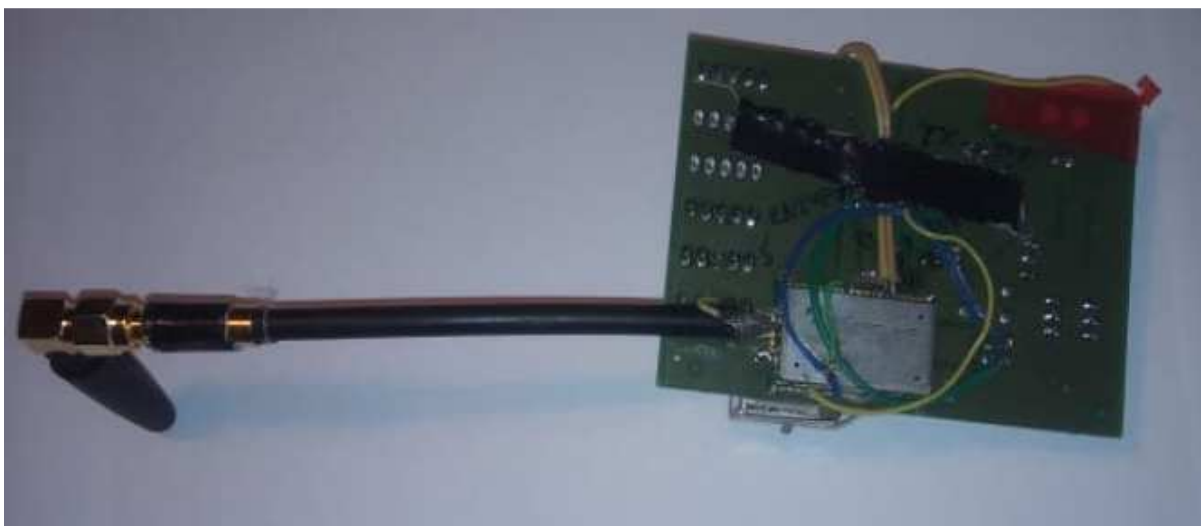
Jak je vidět na obrázku č.24, na spodní straně DPS se nachází pouze komunikační modul LoRa a tranzistor ovládající jeho napájení. Takto navržená deska byla následně zpanelizována a zadána do výroby společnosti Pragoboard v počtu dvou kusů.

Posledním krokem ve výrobě prototypu pak bylo osazení DPS součástkami a následné otestování funkčnosti všech periférií. Bohužel se během testování ukázalo, že původní schéma prototypu monitorovací jednotky obsahovalo několik návrhových chyb, které musely být na DPS opraveny za pomoci přídatných vodičů. Opravy jsou již zaznamenány v aktualizovaných schématech v příloze. Na následujícím obrázku fotografie výsledného prototypu po všech úpravách. I přes všechny tyto chyby v návrhu je jednotka funkční.



Obr. 26: Vrchní strana osazeného DPS

Na spodní straně DPS, která je zobrazena na obrázku níže, je komunikační modul RN2483, se kterým se však při návrhu této DPS nepočítalo, a tak je za pomoci přídatných vodičů připojen k mikrokontroleru. Ke komunikační jednotce je dále připojena externí anténa, která měla být v původním návrhu součástí komunikačního modulu, který se měl vkládat do slotu pro SIM kartu.



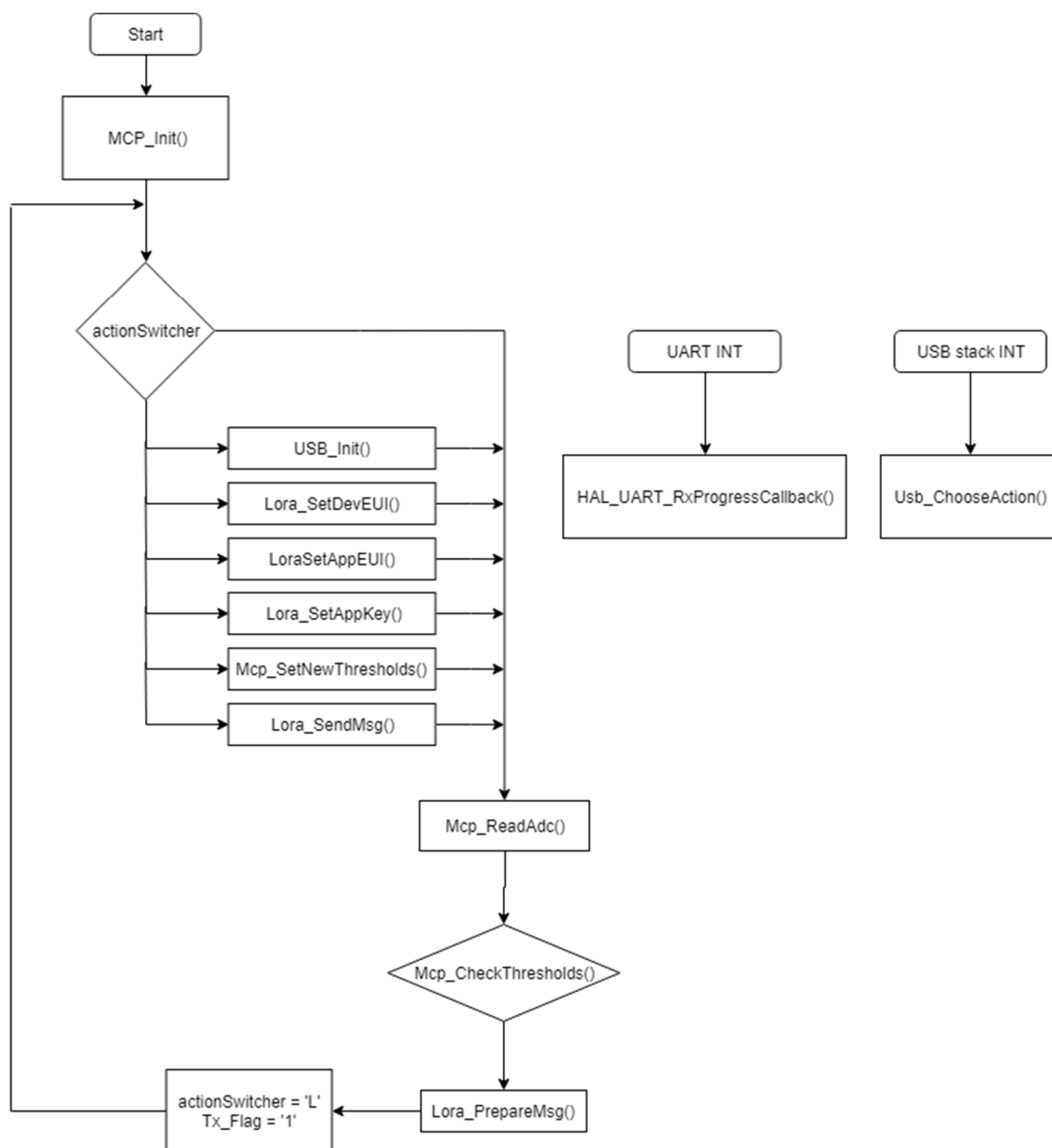
Obr. 27: Spodní strana osazeného DPS

4. Firmware a ovládací program

Obsahem této kapitoly je popis funkce FW monitorovací jednotky a ovládacího programu VibroMonitor.

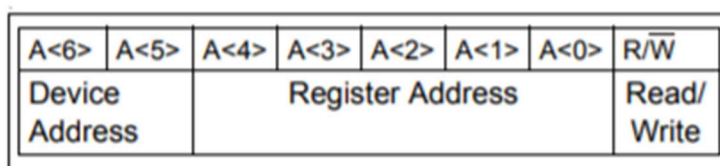
4.1. Firmware

Firmware monitorovací jednotky je, jak již bylo zmíněno v kapitole věnující se výběru mikrokontroleru, napsán v jazyce C s využitím knihovny HAL. Běh samotného programu začíná připojením napájení k monitorovací jednotce nebo stiskem tlačítka Reset.



Obr. 28: Vývojový diagram firmwaru monitorovací jednotky

Po spuštění nejprve proběhne inicializace A/D převodníku (této inicializaci předchází ještě nastavení samotného mikrokontroleru, což je ale součástí projektu vygenerovaného programem STM32CubeMX a tak není v tomto popise a vývojovém diagramu zahrnuto), během které se v A/D převodníku provedou potřebná nastavení (vzorkovací frekvence, kontinuální režim vyčítání z registrů, formát dat). K tomuto nastavení je využita funkce HAL_SPI_TransmitReceive (), která slouží k obsluze sběrnice SPI. A/D převodník se ovládá pomocí jednoho kontrolního bytu, následovaného novým nastavením registru. Kontrolní byte má formát zobrazený na obrázku níže, první dva bity značí adresu zařízení (nativně 01), dalších pět bitů obsahuje adresu požadovaného registru a poslední bit označuje operaci čtení/zápis.



Obr. 29: Struktura kontrolního bytu [21]

Adresy registrů A/D převodníku a případně jejich nastavení je uloženo v souboru mcpCommads.h a popis jednotlivých registrů je uveden v dokumentaci A/D převodníku MCP3913 Data Sheet.

Po inicializaci následuje vstup do nekonečné smyčky, kde jako první dochází ke kontrole stavu proměnné *actionSwitcher*, která následně slouží k volání funkcí sloužících ke komunikaci monitorovací jednotky s ovládací programem VibroMonitor a LoRa modulem. Popisy možných stavů proměnné *actionSwitcher* a na jejím základě volaných funkcí jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 8: Stavů proměnné *actionSwitcher* a následně volané funkce

Stav <i>actionSwitcher</i> u	Volaná funkce	Účel funkce
I	Usb_Init()	Inicializace VibroMonitor, zasílá informace z monitorovací jednotky
A	Lora_SetAppEUI()	Nastavuje AppEUI v LoRa modulu
D	Lora_SetDevEUI()	Nastavuje DevEUI v LoRa modulu
K	Lora_SetAppKey()	Nastavuje AppKey v LoRa modulu
T	Mcp_SetNewThresholds()	Nastavuje nové prahové hodnoty a ukládá je do datové flash paměti.
S	Lora_SendMsg()	Odesílá zprávu pomocí sítě LoRaWAN
L	Lora_Init()	Inicializuje LoRa modul

Takto volané funkce slouží téměř všechny ke komunikaci s ovládacím programem a patřičné nastavení je prováděno ve funkci `Usb_ChooseAction()`, která je volána v rámci funkce `CDC_Receive_FS()`, což je funkce obsluhující přerušení vyvolané USB stackem při příchozí komunikaci ze strany PC, během tohoto přerušení dojde k zavolání funkce `Usb_ChooseAction()`, která na základě prvního bytu přijatých dat nastaví požadovanou hodnotu proměnné `actionSwitcher`. Výjimkou jsou funkce `Lora_SendMsg ()` a `Lora_Unit ()`, které jsou volány samotnou monitorovací jednotkou a patřičné nastavení proměnné `actionSwitcher` probíhá v přerušení od rozhraní UART, tyto mechanismy jsou detailněji popsány níže.

Poté co dojde k vyhodnocení proměnné `actionSwitcher`, případně k provedení požadované funkce následuje čtení z A/D převodníku. To se děje na základě stavu Data ready pinu A/D převodníku, pokud jsou data připravena, dojde k zavolání funkce `Mcp_ReadAdc ()`, která z A/D převodníku vyčte požadovaných 9B, (vždy 3B na vstupní kanál). Ve skutečnosti je z A/D převodníku vyčítáno 10 B kvůli implementaci HAL funkce pro čtení z SPI rozhraní.

Po získání dat z A/D převodníku jsou data odeslána pomocí USB (v případě, že je připojen PC), děje se tak za pomoci virtuálního sériového portu, k čemuž je využita knihovna CDC (Communication Device Class, tato knihovna je součástí projektu vygenerovaného programem STM32CubeMX). Kvůli nízké rychlosti vyčítání dat z virtuální sériové linky v programu VibroMonitor se neposílají všechny vzorky.

Po získání dat z A/D převodníku je dále volána funkce `Mcp_CheckThresholds ()`, která provádí jednoduché zpracování výsledků, v rámci, kterého jsou naměřené hodnoty naprahovány. Prahování probíhá na datech v "surovém" stavu, kdy jsou porovnány s hodnotami v globálních proměnných `threshold_x`, `threshold_y` a `threshold_z`, které obsahují prahové hodnoty pro jednotlivé osy. Tyto proměnné jsou nahrány z datové flash paměti vždy po zapnutí monitorovací jednotky, popřípadě jsou aktualizovány vždy při jejich novém nastavení funkcí `Mcp_SetNewThresholds()`.

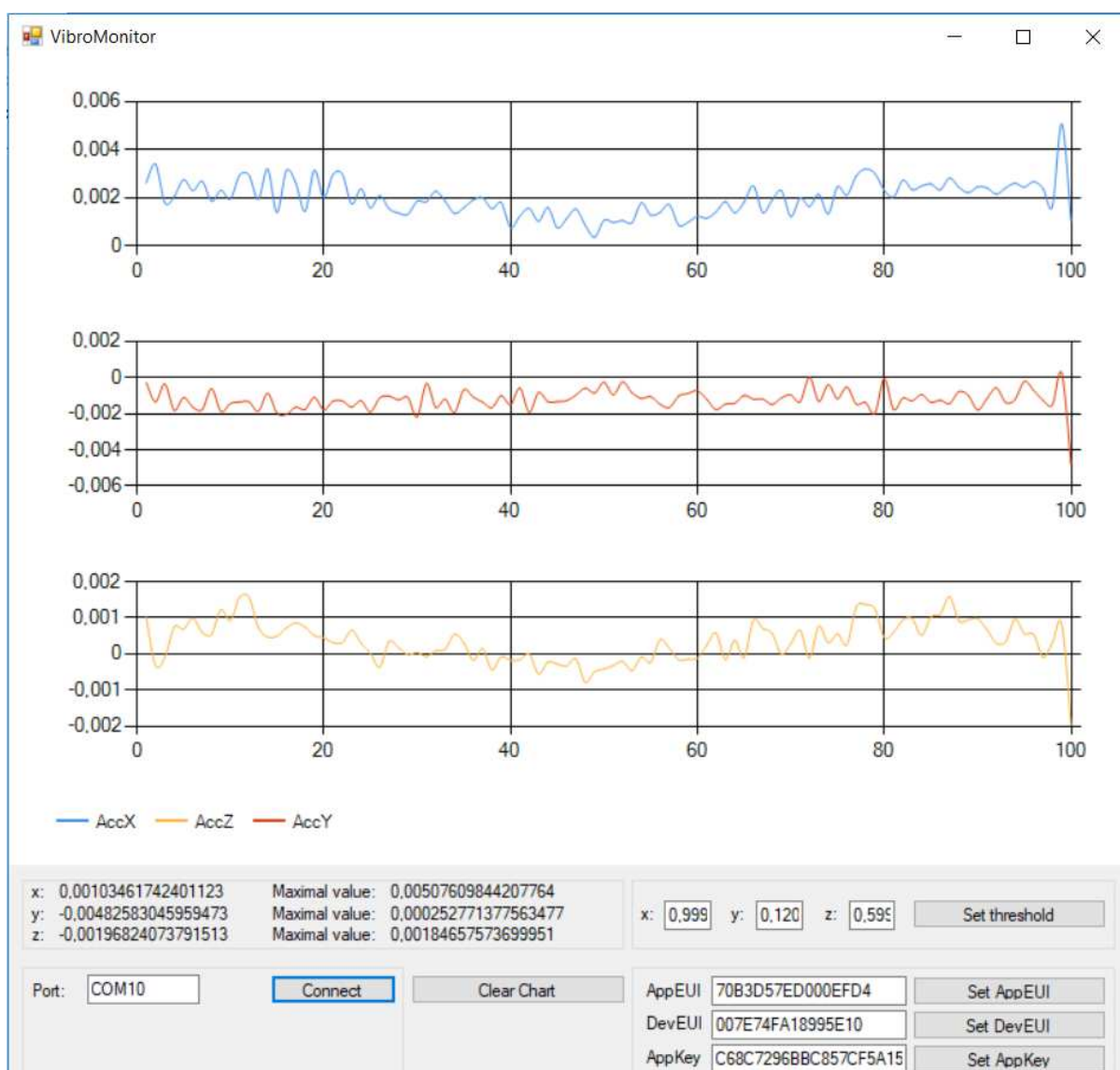
Pokud prahové hodnoty nebyly překročeny, vrací se program na začátek smyčky. Pokud dojde k jejich překročení, je zavolána funkce `Lora_PrepareMsg ()`, která sestaví zprávu a nastaví proměnnou `actionSwitcher` do stavu L, takže v dalším cyklu vyhodnocení stavu této proměnné, dojde k inicializaci LoRa modulu, dále se pak nastaví `Tx_Flag` do hodnoty 1, značící zprávu čekající na odeslání. Pokud je inicializace úspěšná a komunikační modul se úspěšně připojí k LoRaWAN síti, dojde k přepnutí proměnné `actionSwitcher` do stavu S a v další cyklu dojde k jejímu odeslání, a to pouze v případě, že již uplynulo minimálně pět minut od posledního pokusu o odeslání. Pokud je inicializace neúspěšná, opakuje se iniciační proces ještě třikrát, pokud se i přesto jednotka k síti LoRaWAN nepřipojí, další pokusy již neprobíhají.

Odeslání probíhá za pomoci funkce `Lora_SendCmd()`. Pokud je odeslání zprávy úspěšné nastaví se `Tx_Flag` na hodnotu 0. V případě, že byl pokus o odeslání neúspěšný, následují další dva pokusy o odeslání, pokud se zpráva neodešle ani během těchto opakovaných pokusů, další pokusy již neprobíhají a `Tx_Flag` je nastaven na hodnotu 0.

4.2. VibroMonitor

V rámci vývoje monitorovací jednotky byla vyvinuta i ovládací aplikace VibroMonitor, která nabízí základní vizualizaci dat z monitorovací jednotky a její základní nastavení pomocí grafického rozhraní.

Ovládací program zobrazuje v jednoduchém grafu naměřené hodnoty z monitorovací jednotky. Z hodnot uvedených v grafu dále počítá maximální hodnotu. Program dále umožňuje provést nastavení prahových hodnot v monitorovací jednotce a také nastavení identifikátorů sítě LoRaWAN v komunikačním modulu.



Obr. 30: Grafické rozhraní programu VibroMonitor

Aplikace je napsána v programovacím jazyce C# s pomocí knihovny Windows Forms. Komunikace s monitorovací jednotkou probíhá pomocí virtuálního COM portu, kterým zasílá monitorovací jednotka potřebná data. Přijatá data musí vždy začínat znakem, který označuje typ dat a musí být ukončena znakem \n (0x0A), který značí konec zasílaných dat, stejný formát dat je pak použit i pro data odeslané z ovládací aplikace do monitorovací jednotky. Data jsou ze sériové linky vyčítána za pomocí timeru, který je volán každých 20 ms, kdy také dochází k aktualizaci grafu.

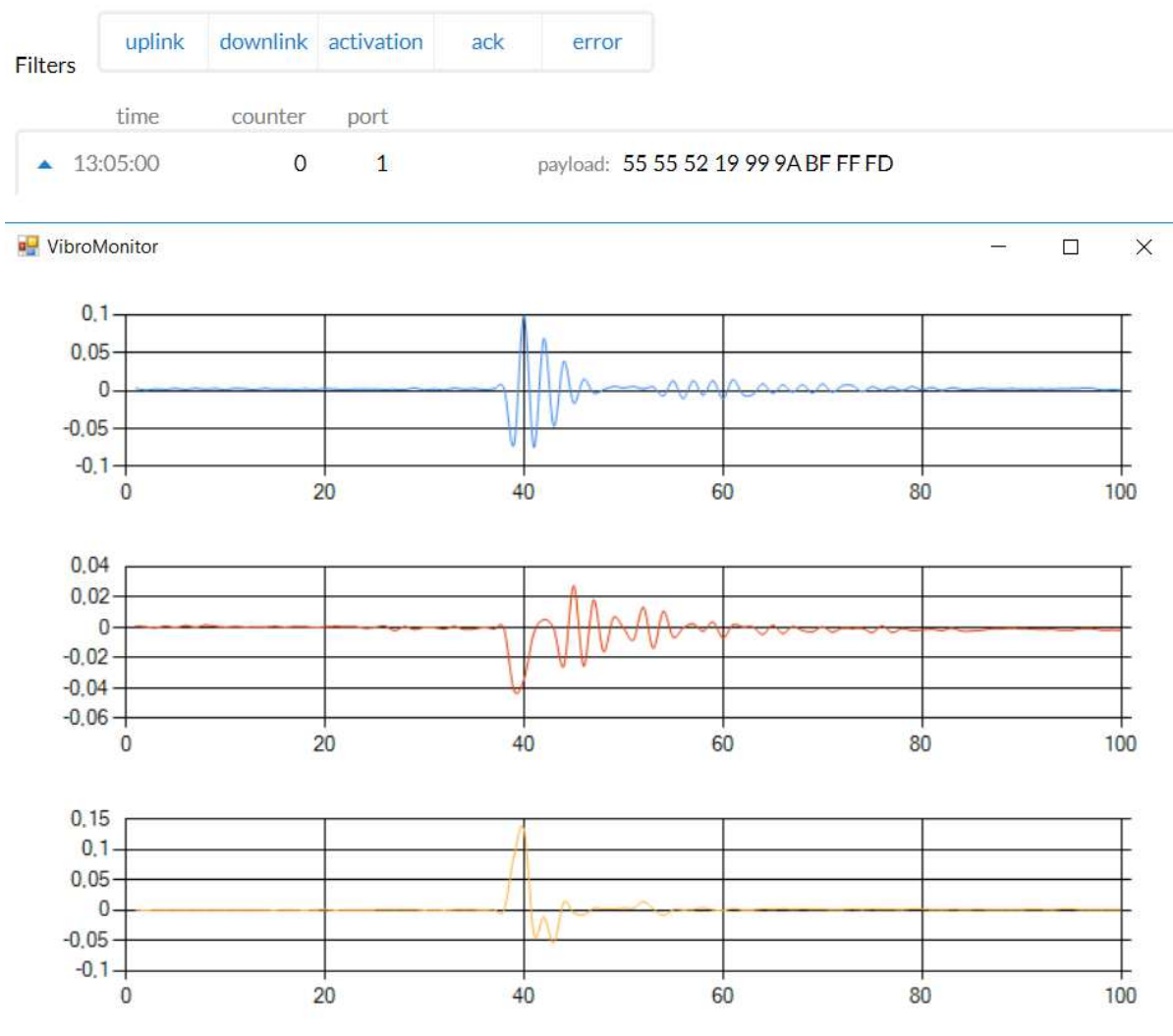
5. Závěr

Cílem této práce byl návrh bateriově napájené monitorovací jednotky vibraací s minimální vzorkovací frekvencí 500 Hz, která má schopnost komunikovat pomocí bezdrátového rozhraní. Dále měla být navrhovaná jednotka schopna dobíjení z připojeného adaptéru, popřípadě ze solárního panelu. Dále měl být pro jednotku napsán příslušný firmware, který nepřetržitě měří data a v případě překročení prahových hodnot dojde k odeslání zprávy přes bezdrátové rozhraní LoRa.

V rámci této práce byla navržena jednotka, která splňuje uvedené požadavky a vyroben její prototyp. Prototyp obsahuje mikrokontrolér STM32L052K6T6, který slouží k řízení celé jednotky, data z připojených akcelerometru jsou pak vyčítána pomocí A/D převodníku MCP3913, který poskytuje rozlišení 24 bitů, které při rozsahu referenčního napětí $\pm 0,6V$ a převodní konstantě 1 V/1 g (9,81 m/s²) umožňuje teoretické měření s přesností až na $0,07\mu g$ (cca $0,7 * 10^{-7}$ m/s²), což je pro měření vibraací toho typu dostatečné. Jednotka vzorkuje frekvencí 3,9 kHz, což znamená, že požadovaná hodnota vzorkovací frekvence je dodržena a několika násobně překročena.

Spotřeba samotné monitorovací jednotky se dle měření pohybuje okolo hodnoty 13,5 mA ve stavu čtení a zpracování hodnot, v případě vysílání do LoRa sítě stoupá spotřeba na cca 51,5 mA. Tato hodnota příliš nezasahuje do celkové výdrže, neboť samotný přenos trvá pouze velmi krátkou chvíli (a jen v případě překročení prahových hodnot) a je tak v celkové spotřebě téměř zanedbatelná.

Program monitorovací jednotky kontinuálně měří vibrace z připojeného akcelerometru a v případě překročení prahových hodnot, odešle tuto informaci pomocí sítě LoRaWAN, tato situace je zobrazena na následujícím obrázku, v jehož horní části je záznam v ovládací konzoli webového serveru theinternethings.com a v dolní části pak výstup z programu VibroMonitor.



Obr. 30: Záznam o odeslané zprávě při překročení prahových hodnot.

V případě neúspěchu při odesílání dojde k dalším dvě opakování a pokud ani poté nedojde k úspěšnému odeslání, další odeslání se již neopakuje.

Vývoj monitorovací jednotky byl provázen větším množstvím problémů, z nichž velká část byla způsobena chybným prvotním návrhem schématu a dále pak změnami, které prvotní návrh, dle kterého byla vyrobena deska plošného spoje současného prototypu, nemohl reflektovat. Největší změnou bylo použitého jiného komunikačního modulu.

Z posledně uvedené změny také pravděpodobně vyplývá občasné komplikované připojení monitorovací jednotky k síti LoRaWAN, neboť původní návrh počítal s konektorem pro anténu umístěným přímo na komunikačním modulu. Provizorně připojená anténa tak nedosahuje takových výsledků, a i v blízké vzdálenosti od přístupové brány dosahuje dle ovládací konzole na webové stránce theithingsnetwork.com síla signálu průměrně okolo -100 dB a poměr signálu ku šumu SNR se velmi často pohybuje v záporných hodnotách. Z tohoto důvodu není monitorovací jednotka občas schopna zachytit potvrzovací zprávu od přístupové brány.

Všechny tyto problémy jsou v nejnovější verzi schématu i desky plošného spoje již opraveny. Nový prototyp nebyl však z časových důvodů vyroben.



Obr. 31: Hotový prototyp monitorovací jednotky

6. Seznam zkratek

- A/D - Analogově digitální převodník
- ABP - Activation By Personalization
- ARM - architektura procesorů používaných díky své nízké spotřebě elektrické energie zejména v mobilních zařízeních
- COM - je původní název pro rozhraní sériového portu
- ČSN - chráněné označení českých technických norem
- DC/DC - DC/DC-měnič nebo také stejnosměrný měnič se obvykle označuje elektronický měnič napětí určený pro změnu velikosti stejnosměrného napětí
- DPS - deska plošných spojů
- EDGE - technologie Enhanced Data Rates for Global Evolution Více
- FSK - klíčování frekvenčním posuvem (anglicky Frequency-shift keying, FSK)
- GPRS - General Packet Radio Service (GPRS) je služba umožňující uživatelům mobilních telefonů GSM přenos dat a připojení k Internetu
- GSM - GSM (Globální Systém pro Mobilní komunikaci, původně však francouzsky „Groupe Spécial Mobile“) je nejrozšířenější standard pro mobilní telefony
- HAL - Hardware abstraction layer, část software nabízející jednotné rozhraní na různě fungující hardware
- I²C - Inter-Integrated Circuit, je multi-masterová počítačová sériová sběrnice
- IDE - vývojové prostředí (zkratka IDE, anglicky Integrated Development Environment) je software usnadňující práci programátorů
- IEEE - IEEE, plným názvem Institute of Electrical and Electronics Engineers (česky „Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství“)
- IP - IP adresa (anglicky IP address) je v informatice číslo, které jednoznačně identifikuje síťové rozhraní v počítačové síti, která používá IP protokol
- ISM - bezlicenční pásma ISM (z angl. Industrial, Scientific and Medical radio bands)
- LED - LED (anglicky Light-Emitting Diode, česky elektroluminiscenční dioda)
- Li-Ion - lithium-iontová baterie je druh nabíjitelné baterie
- Li-Pol - lithium-polymerový akumulátor (je relativně nový typ elektrického akumulátoru)
- LoRa - rozšířená modulace (z anglického Long Range)[
- LoRaWAN - (Long Range Wide Area Network) otevřený standard nízkoenergetické komunikační sítě, která je primárně určena k využití spolu s takzvaným Internetem věcí (IoT)
- MEMS - systémy s mikrorozměry, ve kterých jsou čidla, ovladače a/nebo elektrické obvody integrovány na čipu pomocí polovodičových procesů
- MIC - Message Integrity Check, kontrolní součet zprávy
- MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, je polem řízený tranzistor, 41
- OTAA - On The Air Activation
- PC - osobní počítač (Personal Computer)
- RISC - mikroprocesory s redukovanou instrukční sadou (Reduced Instruction Set Computing)
- SNR - vztah mezi úrovní signálu a hladinou šumu (Signal to Noise Ratio)
- UART - zařízení pro sériovou komunikaci, které lze nastavit buď pro asynchronní režim (SCI – např. pro linky RS232 resp. RS485), anebo pro synchronní režim (běžně označovaný jako SPI (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter)
- USB - univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
- WiFi - standardy IEEE 802.11

7. Seznam obrázků

- Obr. 1: Milne – Grayův seismograf [6]
- Obr. 2: Elektrodynamický geofon [5]
- Obr. 3: Piezoelektrický senzor KS823B [13]
- Obr. 4: Vnitřní struktura MEMS akcelerometru [9]
- Obr. 5: SEQUOIA GEA system [10]
- Obr. 6: RDL/VIBE [11]
- Obr. 7: VMSet-23-P [12]
- Obr. 8: 01dB ORION [13]
- Obr. 9: Vývojové prostředí System Workbench for STM32
- Obr. 10: Konfigurační nástroj STM32CubeMX
- Obr. 11: Ukázka příkazu z knihovny HAL
- Obr. 12: Flashovací nástroj Flasher
- Obr. 13: Základní struktura sítě LoRaWAN
- Obr. 14: Příjmová okna koncového zařízení třídy A [21]
- Obr. 15: Příjmová okna koncového zařízení třídy C [21]
- Obr. 16: Formát join-requestu zprávy sítě LoRaWAN [21]
- Obr. 17: Formát join-accept zprávy sítě LoRaWAN [21]
- Obr. 18: Formát uplink zprávy sítě LoRaWAN [21]
- Obr. 19: Formát downlink zprávy sítě LoRaWAN [21]
- Obr. 20: Komunikační moduly RN2483 a RFM95W
- Obr. 21: Příkaz nastavující appEUI
- Obr. 22: Rozmístění přístupových bran The Things Network v České Republice
- Obr. 23: Blokové schéma monitorovací jednotky
- Obr. 24: Vrchní vrstva DPS (rozměry jsou uvedeny v mm)
- Obr. 25: Spodní vrstva DPS
- Obr. 26: Vrchní strana osazeného DPS
- Obr. 27: Spodní strana osazeného DPS
- Obr. 28: Vývojový diagram firmwaru monitorovací jednotky
- Obr. 29: Struktura kontrolního bytu [21]
- Obr. 30: Grafické rozhraní programu VibroMonitor
- Obr. 30: Záznam o odeslané zprávě při překročení prahových hodnot.
- Obr. 31: Hotový prototyp monitorovací jednotky

8. Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled monitorovacích jednotek

Tab. 2: Srovnání A/D převodníků

Tab. 3: Srovnání mikrokontrolerů

Tab. 4: Popis vodičů programátoru ST-Link v2

Tab. 5: Identifikátory sítě LoRaWAN

Tab. 6: Význam součástí *join-accept* zprávy

Tab. 7: Význam součástí uplink zprávy

Tab. 8: Stavy proměnné `actionSwitcher` a následně volané funkce

9. Seznam příloh

- 1) Návrh schématu: vib.sch
- 2) Schéma prototypu: vib-old.sch
- 3) Návrh DPS: vib.brd
- 4) Zdrojové kódy firmwaru: fw.zip
- 5) Zdrojové kódy programu VibroMonitor: VibroMonitor.zip

10. Seznam zdrojů

- [1] ČSN ISO 2631-1: Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím – Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [2] ČSN 73 0040: Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [3] ČSN ISO 4866: Vibrace a rázy: Vibrace pevně zabudovaných konstrukcí – Pokyny pro měření vibrací a hodnocení jejich účinků na konstrukce. 2010. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [4] GODSMARK, Kate. John Milne. International seismological centre [online]. 2012 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://www.isc.ac.uk/about/history/milne/>
- [5] KLANICA, Radek. Měření v seismických metodách. Užité geofyzika [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://geofyzika.webz.cz/merseism.php>
- [6] Gray-Milne seismograph. Science Museum Group Collection [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://collection.sciencemuseum.org.uk/objects/co53910/gray-milne-seismograph-and-carton-of-parts-seismograph>
- [7] WEIGL, Martin. MĚŘENÍ VIBRACÍ. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MARTIN MUSIL, Ph.D.
- [8] ANDREJAŠIČ, Matej. MEMS ACCELEROMETERS. Ljubljana, 2008. Seminar. University of Ljubljana. Vedoucí práce doc. dr. Igor Poberaj.
- [9] ANSSLE, Jack. A Designer's Guide to MEMS Sensors. Digikey.com [online]. 7.12.2012 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jul/a-designers-guide-to-mems-sensors>
- [10] GEA. Sequoia IT [online]. Moncalieri [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: http://www.sequoia.it/wp/en/?page_id=46
- [11] Caption Data. RDL//VIBE | REMOTE VIBRATION MONITORING SYSTEMS [online]. Worcester [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.captiondata.com/rdlvibe-vibration-monitoring-system/>
- [12] Measurement of Building Vibrations acc. to DIN 4150-3. Innomic [online]. Salzwedel [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: https://www.innomic.com/en/applications/building_vibrations/measurement_kit/buildings.html
- [13] Monitorovací terminál vibrací 01dB ORION [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.trinstruments.cz/monitorovaci-terminal-vibraci-01db-orion#&panel1-1>
- [14] Endevco.com [online]. Myford [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://endevco.com/news/newsletters/2014_02/f_ate.html#.Ws-lfYhuZPa
- [15] The World Bank: TCdata360 – Mobile network coverage [online]. 2016 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://tcdata360.worldbank.org/indicators/entrp.mob.cov?country=CZE&indicator=3403&viz=line_chart&years=2012,2016
- [16] VÁŇA, Vladimír. ARM pro začátečníky. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-246-6.
- [17] LoRa Alliance: About LoRa Alliance. LoRa Alliance [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>

[18] LIST, Jenny. THE THINGS NETWORK SETS 702 KM DISTANCE RECORD FOR LORAWAN. Hackaday [online]. 11.9.2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2017/09/11/the-things-network-sets-702-km-distance-record-for-lorawan/>

[19] Fotovoltaický solární panel WS-5/6V [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/fotovoltaicky-solarni-anel-ws-5-6v>

[20] V minulosti zasahovala území Česka zemětřesení o síle 6,5 stupně. Kde hrozí dnes? — ČT24 — Česká televize. Česká televize[online]. Copyright © [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/veda/2252992-v-minulosti-zasahovala-uzemi-ceska-zemetreseni-o-sile-65-stupne-kde-hrozi-dnes>

[21] SORNIN, N., M. LUIS, T. EIRICH, T. KRAMP a O. HERSENT. LoRaWAN Specification [online]. San Ramon, CA 94583, 2016 [cit. 2017-06-14]. Dostupné z: <https://www.lora-alliance.org/>

[22] MCP3913 - Mixed Signal - Energy Measurement. Home | Microchip Technology Inc. [online]. Copyright © Copyright 1998 [cit. 14.06.2017]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP3913>

[23] STM32L052K6T6 STMicroelectronics | Integrated Circuits (ICs) | DigiKey. DigiKey Electronics - Electronic Components Distributor [online]. Copyright © 1995 [cit. 14.06.2017]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/product-detail/en/stmicroelectronics/STM32L052K6T6/STM32L052K6T6-ND/5051358>

[24] RFM95W 868/915Mhz RF Transceiver Module – LoRa module – HOPE MicroElectronics. Professional RF IC&modules and Digital Sensor designer and manufacturer – HOPE MicroElectronics [online]. Copyright ©2016 HOPE Microelectronics CO., Ltd. All rights reserved. [cit. 14.06.2017]. Dostupné z: http://www.hoperf.com/rf_transceiver/lora/RFM95W.html

[25] MCP73831 – Battery Management and Fuel Gauges – Battery Management and Fuel Gauges – Battery Chargers. Home | Microchip Technology Inc. [online]. Copyright © Copyright 1998 [cit. 14.06.2017]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en024903>

[26] MCP1802 datasheet [online]. Copyright © [cit. 14.05.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22053b.pdf>

[27] CS5451A-ISZ Datasheet [online]. Copyright © [cit. 21.05.2018]. Dostupné z: https://statics.cirrus.com/pubs/proDatasheet/CS5451A_F4.pdf

[28] L24P80M48S Datasheet [online]. Copyright © [cit. 21.05.2018]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/ref_manual/KL24P80M48SF0RM.pdf

[29] RN2483 [online]. Copyright © [cit. 21.05.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346C.pdf>

[30] RN2483 LoRa Technology Module Command Reference User's Guide [online]. Copyright © [cit. 21.05.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001784F.pdf>

[31] LT1945IMS [online]. Copyright © [cit. 21.05.2018]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/LT1945IMS%23PBF-Linear-Technology-datasheet-13172396.pdf>

[32] DYTRYCH, Pavel. *Projekt 1: Bezdrátový monitoring budov*. Praha, 2017.