

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

System včasného varování pro práci na železnici

Bc. Lukáš Laštůvka

Diplomová práce

2025

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Laštůvka**
Osobní číslo: **I23266**
Studijní program: **N0714A060018 Komunikační a radarové systémy**
Téma práce: **Systém včasného varování pro práci na železnici**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a rádiových systémů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh systému pro včasného varování pro pracovníky pohybující se po železničním svršku před blížícím se vlakem. Systém se bude skládat z osobních stanic (přenosné zařízení umístěné na pracovníkovi) s akusticko-optickou signalizací blížícího se vlaku. Detekčních stanic (umístěné podél kolejí) schopných detekovat projíždějící vlak. Centrální jednotky, zajišťuje přehled o funkčnosti uzlů, případně řídí komunikaci a slouží jako gateway pro případné propojení s nadřazenými informačními systémy. Diplomová práce provede podrobnou rešerši a porovnání dostupných rádiových technologií a protokolů vhodných pro řešení zadané problematiky, a to z hlediska dosahu, možnosti tvorby sítí, spotřeby, rychlosti odezvy, případně srovnání potenciální spolehlivosti. Praktická část se bude zabývat především návrhem rádiové sítě na zvoleném typu rádia a implementace zvoleného, či vytvořeného protokolu do ukázkového systému. Při tvorbě praktické části by měl být kladen důraz na implementace rádií a tvorby sítě, jednotlivé uzly stačí jako ukázkové detektory, osobní stanice, centrální jednotka ve stavu pro ověření parametrů zvoleného řešení.

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0132-2

PECHAČ, Pavel. *Šíření vln v zástavbě*. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 108 s. ISBN 80-730-0186-1.

KÜHNEL, Claus. *Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes: Ready-to-use devices and self-built Arduino nodes in the "The Things Network"*. Elektor-Verlag, 2022. ISBN 9783895764943.

Objevte svět IoT [online]. Pixman, 2022 [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/pripojeni-k-iot-siti-lorawan>

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Rozsival

Katedra elektroniky a rádiových systémů

Datum zadání diplomové práce:

8. listopadu 2024

Termín odevzdání diplomové práce:

23. května 2025

L.S.

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem *Systém včasného varování pro práci na železnici* jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze 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, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Bc. Lukáš Laštůvka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Pavlu Rozsívalovi za odborné vedení, cenné připomínky, věcnou kritiku a trpělivost během celého zpracování této diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří mé rodině za stálou podporu, pochopení a trpělivost, která mi umožnila práci zdárně dokončit.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací systému včasného varování pro práci na železnici. Systém využívá bezdrátovou komunikační technologii LoRa, mikrokontroler ESP32-S3 a centrální jednotku Raspberry Pi 5. Byla navržena hardwarová a softwarová architektura, včetně vlastního komunikačního protokolu a uživatelského rozhraní v prostředí Node-RED. Cílem je zajistit spolehlivé a energeticky úsporné varování pracovníků před blížícím se vlakem, nezávisle na vizuálních a akustických podmínkách.

Klíčová slova

železnice, včasné varování, LoRa, ESP32-S3, Raspberry Pi 5, IoT, bezpečnost práce, Node-RED

Title

Warning system for railway workers

Annotation

This thesis presents the design and implementation of an early warning system for railway maintenance workers. The system uses LoRa wireless communication, an ESP32-S3 microcontroller, and a Raspberry Pi 5 central unit. Both hardware and software architectures were developed, including a custom communication protocol and a Node-RED user interface. The aim is to provide reliable and energy-efficient alerts for workers about approaching trains, regardless of current visual or acoustic conditions.

Keywords

railway, early warning, LoRa, ESP32-S3, Raspberry Pi 5, IoT, occupational safety, Node-RED

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1 Problematika bezpečnosti práce na železnici	13
2 Přehled současných traťových bezpečnostních systémů	13
2.1 Kolejové obvody	13
2.2 Vlakový zabezpečovač	17
2.3 Systém traťového zabezpečení ETCS	19
2.4 GSM-R	21
2.5 FRMCS.....	22
2.6 Systémy sledování vlaků	23
3 Možnosti detekce blížícího se vlaku	25
3.1 Magnetická detekce	25
3.2 Vibrační senzory.....	25
3.3 Akustické senzory	26
3.4 Kamerové systémy nové generace	26
3.5 Hybridní přístupy detekce vlaků	27
4 Návrh a implementace vlastního systému	28
4.1 Volba bezdrátové komunikační technologie	28
4.2 Použité technologie a komponenty.....	30
4.2.1 Technologie LoRa	30
4.2.2 Mikrokontroler ESP32-S3	37
4.2.3 Centrální řídicí a komunikační jednotka RPi5	38
4.2.4 Architektura navrhovaného systému	39
4.3 Návrh a realizace HW.....	41
4.4 Návrh a realizace SW	49
4.5 Reálné testování funkčnosti systému.....	60
Závěr	63
Literatura	65
Příloha A – Schéma elektrického obvodu	68

Příloha B – Zapojení desky plošných spojů (Top Layer)	70
Příloha C - Zapojení desky plošných spojů (Bottom Layer)	71
Příloha D – 3D model osazené desky plošných spojů	72
Příloha E – Osazená vyrobená funkční prototypní deska	73
Příloha F – Kód projektu.....	74

Seznam zkratek

KO	Kolejový obvod
ZZ	Zabezpečovací zařízení
VZ	Vlakový zabezpečovač
TR	Transitní relé
ETCS	European Train Control Systém
ERTMS	European Rail Traffic Management Systém
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway
GSM	Global System for Mobile Communications
EIRENE	European Integrated Railway Radio Enhanced Network
MORANE	Mobile Radio for Railways Networks in Europe
VGCS	Voice Group Call Systém
VBS	Voice Broadcast Systém
LTE-R	Long-Term Evolution for Railways
FRMCS	Future Railway Mobile Communication Systém
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
RFID	Radio Frequency Identification
GPS	Global Positioning Systém
AI	Umělá inteligence
SIDAS	Systém inteligentní detekce a signalizace kolizních stavů pro zvýšení traťové bezpečnosti
Wi-Fi	Wireless Fidelity
BLE	Bluetooth Low Energy
LPWA	Low-Power Wide-Area
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network
LoRa	Long Range

CSS	Chirp Spread Spectrum
IoT	Internet of Things
SF	Spreading factor
CR	Code rate
LoRaWAN	Long Range Wide-Area Network
FEC	Forward Error Correction
BW	Šířka pásma
CRC	Cyclic Redundancy Check
PLL	Phase Locked Loop
FIFO	First In, First Out
CAD	Channel Activity Detection
AES	Advanced Encryption Standard
SHA	Secure Hash Algorithm
RSA	Rivest–Shamir–Adleman
ECC	Error Correction Code
RNG	Random number generator
FreeRTOS	real-time operating system kernel
IEEE	Electrical and Electronics Engineers
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
I ² C	Inter-Integrated Circuit
USB	Universal Serial Bus
OLED	Organic Light-Emitting Diode
LED	Light-Emitting Diode

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Princip zapojení sériového kolejového obvodu [1]	14
Obrázek 2 - Princip zapojení paralelního kolejového obvodu [1]	15
Obrázek 3 - Ukázka izolovaného styku [1]	15
Obrázek 4 - Použití jednopáskových KO pomocí kosé spojky [1]	16
Obrázek 5 - Použití dvoupáskových KO s použitím stykového transformátoru [1].....	16
Obrázek 6 - Kódové frekvence vlakového zabezpečovače [1].....	18
Obrázek 7 - Princip přenosu kódu [1]	18
Obrázek 8 - Znázornění funkce systému ETCS L1 [3]	19
Obrázek 9 - Znázornění funkce systému ETCS L2 [3]	20
Obrázek 10 – Znázornění funkce systému ETCS L3 [3].....	20
Obrázek 11 - Architektura systému 5G FRMCS [8]	23
Obrázek 12 - Systémy sledování vlaků [9].....	23
Obrázek 13 - Eurobalíza [10]	24
Obrázek 14 - 3D laserový detekční systém [16].....	27
Obrázek 15 - Celkové srovnání bezdrátových komunikačních standardů podle dosahu, energie a výkonu [24].....	30
Obrázek 16 - CSS modulace „chirp“ [25]	32
Obrázek 17 - CSS ukázka generování signálů „up-chirp“ a „down-chirp“ [25].....	32
Obrázek 18 - Rozmítaný signál CSS [25]	32
Obrázek 19 - LoRa paket [21]	34
Obrázek 20 - Výpočet CRC na straně vysílače (vlevo), dopočet na straně přijímače (vpravo)	35
Obrázek 21 - Architektura komunikačního systému	40
Obrázek 22 - Obvod konektoru USB-C	41
Obrázek 23 - Nabíjecí obvod TP4056 pro baterie s proudovým omezením 1A	42
Obrázek 24 Indikační LED diody pro signalizaci stavu nabíjecího obvodu a tabulka stavů	42
Obrázek 25 - Zapojení ochranného obvodu baterie DW01A	43
Obrázek 26 - Latching Power Switch Circuit.....	44
Obrázek 27 - Lineární napěťová stabilizovaný zdroj	44
Obrázek 28 - Vstupní filtrační obvody	44
Obrázek 29 - Centrální řídicí prvek, mikrokontroler ESP32-S3 a komunikační LoRa modul Ra-02	45
Obrázek 30 - Oscilační obvod nalděný na 40 MHz	46
Obrázek 31 - Tlačítka BOOT a RESET	46
Obrázek 32 - Ovládací obvod vibračního motoru	46
Obrázek 33 - Piezo-elektrická 4 kHz siréna	47
Obrázek 34 - Zapojení tlačítek včetně pull-up rezistorů a RC filtru	47
Obrázek 35 - Ukázka zákmitů tlačítek, při spínání, bez použití RC filtru [30].....	48
Obrázek 36 - Ukázka spínání tlačítek, s použitím RC filtru [30].....	48
Obrázek 37 - Indikační LED diody	48

Obrázek 38 - Napojení I2C rozhraní pro OLED monitor včetně pull-up rezistorů.....	49
Obrázek 39 - Rozšiřující RTC header	49
Obrázek 40 - Stavový digram komunikace mezi branou a uzly	54
Obrázek 41 - Stavový diagram celkové komunikace	55
Obrázek 42 - Stavový diagram autentizace UART a brány a následná komunikace	56
Obrázek 43 - Základní funkční diagram Node-RED komunikace	58
Obrázek 44 - Ukázka propojení nodů v Node-RED.....	59
Obrázek 45 - UI rozhraní Node-RED s možností povolení / zakázání kounikace se zařízením	59
Obrázek 46 - Testování komunikace - Přímá viditelnost 387 m	60
Obrázek 47 - Testování komunikace - Trasa vedoucí lesem 1,1 km.....	61
Obrázek 48 - Testování komunikace - Přímá viditelnost 2 km s převýšením 32m.....	61

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Různé rychlosti kodování v rámci LoRa.....	33
Tabulka 2 - Možné typy paketu	52
Tabulka 3 - Rámec pro komunikaci	52
Tabulka 4 - Výsledky reálného testování komunikace.....	62

Úvod

Železniční doprava představuje klíčový prvek národní i mezinárodní infrastruktury, zajišťující efektivní, hromadný a relativně ekologický způsob přepravy osob i zboží. Díky vysoké kapacitě, pravidelnosti a dlouhodobé udržitelnosti má železnice nezastupitelné místo v moderní dopravní síti. Současně však tato forma dopravy přináší i významná bezpečnostní rizika pro pracovníky vykonávající činnosti na železničním svršku či v jeho bezprostředním okolí.

Práce na trati se často odehrává v prostředí s omezenou viditelností, zvýšenou hlučností a v časově náročných podmínkách, kdy nelze zcela přerušit provoz. Největším rizikem bývá nedostatečné nebo opožděné varování před blížícím se vlakem, zejména při neplánovaných zásazích do infrastruktury, nouzových opravách nebo krátkodobých údržbových pracích. I přes existenci organizačních opatření a současných technických prostředků dochází k nehodám, jejichž příčinou bývá selhání lidského faktoru, nedostatečné technické vybavení nebo absence automatizovaných varovných mechanismů.

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh a realizaci **systemu včasného varování** využívajícího bezdrátovou komunikační technologii LoRa, mikrokontroler ESP32-S3 a centrální jednotku Raspberry Pi 5. Cílem je vytvořit modulární, energeticky úsporné a snadno přenosné řešení, které umožní spolehlivé upozornění pracovníků na blížící se vlak bez ohledu na aktuální vizuální či akustické podmínky. Návrh zahrnuje hardwarovou i softwarovou část systému, vlastní komunikační protokol a integraci uživatelského rozhraní s důrazem na možnost rozšiřitelnosti pro další aplikace v oblasti zabezpečení železniční dopravy.

1 Problematika bezpečnosti práce na železnici

Železniční doprava je páteří národní i mezinárodní přepravy a zajišťuje efektivní, hromadný a relativně ekologický způsob transportu osob i zboží. Se svou rozsáhlou infrastrukturou však přináší také značná rizika pro pracovníky vykonávající činnosti přímo na železničním svršku nebo v jeho bezprostředním okolí. Ti se během své práce pohybují v prostorách, kde hrozí střet s projíždějícími vlaky, často v prostředí s omezenou viditelností nebo akustickými rušivými vlivy.

Nejčastějším rizikem při práci na trati je *neinformovanost pracovníka o blížícím se vlaku* nebo jeho *nedostatečná včasná detekce*, a to i přesto, že existují určité organizační postupy (např. výluky, pracovníci s červenou zastávkou, plánování odstávek). Ne vždy jsou tyto prostředky dostatečné, zejména v případě neplánovaných nebo krátkodobých zásahů do infrastruktury. K selhání může dojít jak na straně lidského faktoru, tak z hlediska absence technických podpůrných systémů.

Právě s ohledem na rostoucí požadavky na zvýšení bezpečnosti a minimalizaci rizika smrtelných nehod vzniká potřeba vývoje systému včasného varování, který by dokázal pracovníky na kolejišti automaticky upozornit na blížící se vlak, a to i bez ohledu na aktuální akustické nebo vizuální podmínky. Takový systém by měl fungovat autonomně, být snadno přenosný a minimálně invazivní vůči stávající infrastruktuře.

2 Přehled současných traťových bezpečnostních systémů

2.1 Kolejové obvody

Kolejový obvod nám slouží jako důležitá součást zabezpečovacího zařízení dráhy, který umožňuje detekci volnosti nebo obsazenosti kolejového úseku a případně i k přenosu informací drážnímu vozidlu.

Kolejový obvod (KO) funguje na principu průchodu elektrického proudu přes kolejnici, dvojkolí drážních vozidel a kolejový přijímač (např. relé), jehož výstupní signály jsou zapojeny do navazujících zabezpečovacích zařízení (ZZ).

Původní kolejové obvody používaly stejnosměrné proudy, ale z důvodu možného vlivu například zpětnými proudy stejnosměrné trakce se postupně přešlo na využití proudu střídavého [1].

KO sestává ze 3. částí:

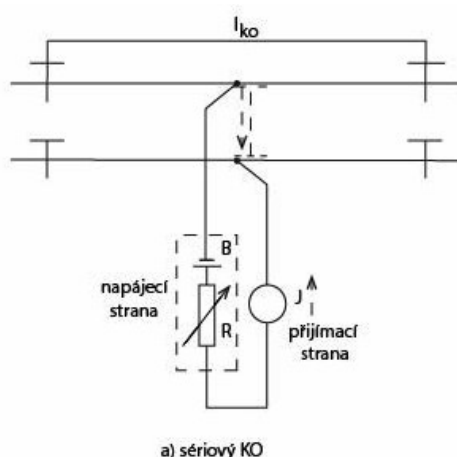
- napájecí strana
- snímací strana
- kolejnicové pásy, případně vymezené izolovanými styky (I_{KO})

V zásadě existují dva základní typy KO, a to sice *Sériové kolejové obvody* a *Paralelní kolejové obvody*.

a) Sériové kolejové obvody

Zapojení je zde provedeno jako sériové spojení železničního dvojkolí a kolejového přijímače. Tento typ obvodu slouží ke spolehlivé detekci obsazenosti nebo průjezdu kolejového úseku vlakem. Když je kolejový úsek obsazen vlakem, pak se zvýší proud protékajícím kolejovým přijímačem, což následně vede k jeho vybuzení.

V navazujícím zabezpečovacím zařízení se pak kontrolovaný kolejový úsek vyhodnotí jako obsazený. Sériové kolejové obvody se používají například při uvolňování závěru vlakové cesty případně ke kontrole, zda vlak projel prostorem přejezdu. Při poruše systém hlásí bezpečný stav poskytující informaci, že vlak kolejovým prostorem neprojel [1].

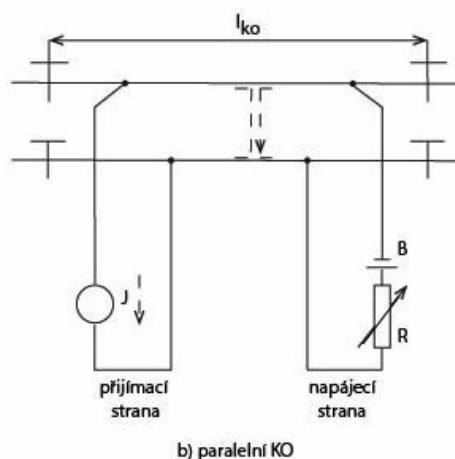


Obrázek 1 - Princip zapojení sériového kolejového obvodu [1]

b) Paralelní kolejové obvody

Tyto obvody fungují tak, že železniční dvojkolí a kolejový přijímač jsou zapojeny paralelně. Takový typ obvodu slouží k bezpečné detekci volnosti kontrolovaného kolejového úseku. V případě obsazení kolejového úseku vlakem nebo při případné uvažované poruše jež může představovat například lom kolejnice, se sníží proud protékající kolejovým přijímačem, což následně vede k jeho odbuzení.

V navazujícím zabezpečovacím zařízení se dotčený kolejový úsek vyhodnocuje jako obsazen. Paralelní kolejové obvody se používají výhradně k bezpečné detekovatelnosti volnosti koleje, protože v případě poruchy hlásí bezpečný stav nesoucí informaci obsazeno [1].



Obrázek 2 - Princip zapojení paralelního kolejového obvodu [1]

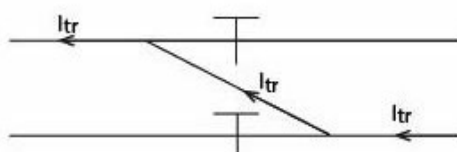
Izolované styky

U ohraničeného KO je délka vymezována izolovanými styky. Ten musí zajistit dvě základní funkce, a to sice zajištění hladkého přechodu kola z jedné kolejnice na druhou, ty musí být mechanicky pevné, dále pak musí mít vzájemně dobře provedenou izolaci pro obě kolejnice. Izolační materiál je mechanicky namáhán ohybem a působením otěru za jízdy vlaku včetně měnící se délky kolejnic při jejich dilataci. Z důvodu předejití vzájemného vlivu sousedních KO se provádí preventivní opatření. Jedním z opatření je střídání polarity, resp. fáze signálního proudu v sousedních obvodech, čímž při proražení dojde ke stejné výsledné informaci, ke které by došlo při obsazení vozidlem. Dále pak provádění pravidelné kontroly stavu izolovaného styku a kontrola činností KO za pomoci umělého zkratu tzv. *šuntem* [1].

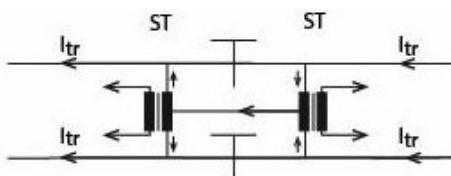


Obrázek 3 - Ukázka izolovaného styku [1]

Přes izolovaný styk musí procházet tzv. zpětný topný a trakční proud. To znamená, že se musí zajistit elektrické „rozizolování“ kolejíště na jednotlivé KO, ale zároveň s tím se musí vyřešit průchod zpětného proudu mezi elektrickou lokomotivou a rozvodnou napájení. V zásadě možným řešením je využití *jednopáskových* či *dvoupáskových* KO [1].



Obrázek 4 - Použití jednopáskových KO pomocí kosé spojky [1]



Obrázek 5 - Použití dvoupáskových KO s použitím stykového transformátoru [1]

Aktuální problémy a inovace

V současnosti se řeší několik problémů v návaznosti s KO. Možným problémem je například *hoření* izolovaných styků ohraničujících neutrální pole. Tento problém vzniká kvůli průtoku zpětného trakčního proudu, jež může způsobovat opalování izolovaných kontaktů.

2.2 Vlakový zabezpečovač

Vlakový zabezpečovač (VZ) je technické zařízení, které slouží ke zvýšení bezpečnosti železniční dopravy tím, že kontroluje strojvedoucího, zda dodržuje limitní parametry jízdy vlaku. V případě, kdy tyto parametry strojvedoucí nerespektuje, zařízení spouští rychločinné brždění.

Složení vlakového zabezpečovače

VZ se skládá z traťové a mobilní části. Traťová část je součástí železniční infrastruktury a zahrnuje prvky umístěné podél trati a kolejového vedení. Mobilní část, též zvaná palubní, je umístěna na hnacích vozidlech nebo na řídicích vozech a může sloužit k přenosu a zobrazování návěstí na stanoviště strojvedoucího [1].

V zásadě můžeme provést dělení VZ dle způsobu přenosu informace na hnací vozidlo. Prvním způsobem přenosu informace je systém bodový, ten umožňuje přenést informaci v okamžiku průjezdu vozidla přes přenosový bod. Výhodou je možnost přesně definovat vzdálenost k návěstidlu polohou bodu, ve kterém dochází k přenosu návěstí, avšak, jako jeho nevýhoda, je nemožnost záznamu změny návěstního znaku v průběhu jízdy od přenosového bodu k návěstidlu.

Tohoto problému lze předejít použitím druhého způsobu přenosu pomocí liniového systému. Ten dokáže přenášet návěst v celém úseku před návěstidlem a umí prakticky okamžitě zaznamenávat změny návěstního znaku na vozidle. Nevýhodou je zde ale problém nespecifikovatelnosti vzdálenosti k návěstidlu, který umí bodový systém.

Moderní vlakové zabezpečovače kombinují výhody obou historických systémů – liniový přenos informace spolu s přesným udáním polohy vozidla. Na řídicí stanoviště vlaku přichází celková informace o délce a rychlostním profilu úseku před vlakem, pro který je povolena další jízda. V případě blížícího se omezení rychlosti nebo konce úseku, zařízení zobrazuje maximální bezpečnou rychlost, která průběžně klesá dle tzv. brzdné křivky.

Je-li tato rychlost překročena, spouští se nouzové brždění, aby vlak neprojel za hranici úseku, pro který má povolenou jízdu [1].

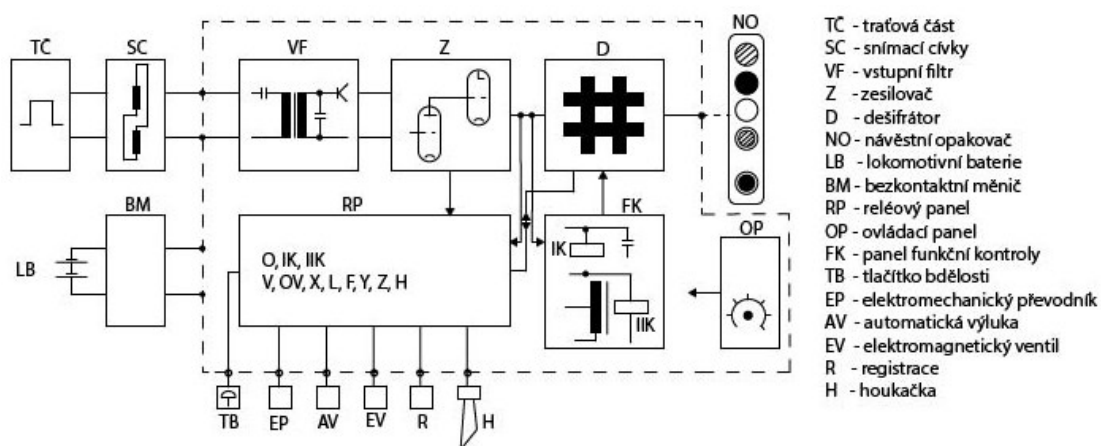
V České republice, kterou využívají i soukromí dopravci, se používá liniový systém, který pracuje se čtyřmi frekvenčními impulzními kódy. Kód vzniká díky pravidelnému přerušování napájecí frekvence KO, a to sice buď 50 Hz nebo 75 Hz. Frekvence je přerušována za pomoci motorového kodéru, resp. kontaktu jeho relé TR. V současnosti se používají i bezkontaktní relé [1].

Kódy použité pro vlakové zabezpečovače

- STŮJ – červené světlo
- RYCHLOST 40 km/h – žluté mezikruží
- VÝSTRAHA – žluté světlo
- VOLNO – zelené světlo



Obrázek 6 - Kódové frekvence vlakového zabezpečovače [1]



Obrázek 7 - Princip přenosu kódu [1]

2.3 Systém traťového zabezpečení ETCS

European Train Control System (ETCS) je evropský systém vlakového zabezpečení, který nahrazuje mnoho nekompatibilních systémů používaných evropskými železnicemi.

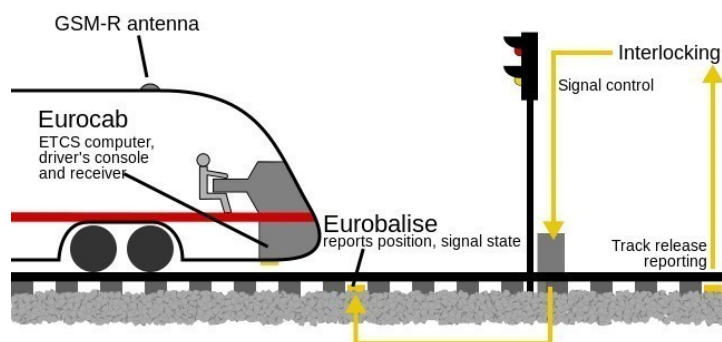
ETCS je součástí European Rail Traffic Management System (ERTMS) a skládá se z traťového a palubního vybavení. Umožňuje přenos všech traťových informací do kabiny strojvedoucího, což eliminuje potřebu traťových návěstidel a připravuje systémy na přechod do budoucího automatického provozu vlaků [2].

Úrovně ETCS

ETCS má několik úrovní, které se liší způsobem přenosu informací mezi tratí a vlakem [3].

a) ETCS L1

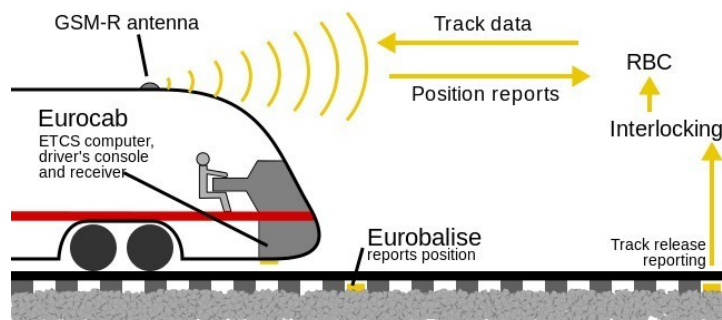
Zahrnuje kontinuální dohled nad pohybem vlaku pomocí palubního počítače, který neustále sleduje maximální povolenou rychlost a vypočítává brzdnu křivku. Komunikace mezi vlakem a tratí probíhá pomocí eurobalíz.



Obrázek 8 - Znárodnění funkce systému ETCS L1 [3]

b) ETCS L2

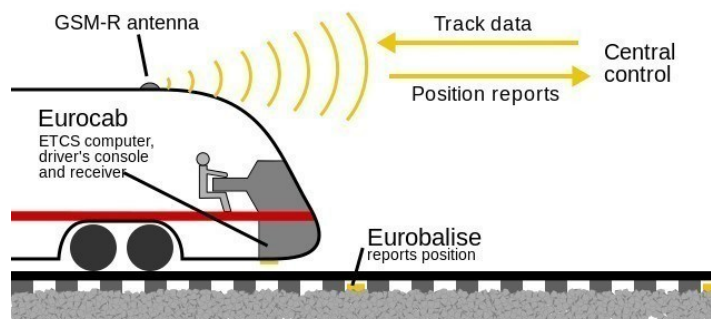
Tato úroveň obsahuje kontinuální dohled nad pohybem vlaku s konstantní komunikací za pomoci rádiového systému GSM-R. V rámci této úrovně jsou návěstidla volitelnou částí systému.



Obrázek 9 - Znáznění funkce systému ETCS L2 [3]

c) ETCS L3

Kombinovaný systém prvků L2 s možností sledování integrity vlaku bez nutné potřeby traťových detekčních systémů.



Obrázek 10 – Znáznění funkce systému ETCS L3 [3]

Systémy ETCS jsou vybaveny dvěma režimy provozu, které závisí na stavu traťového a palubního vybavení. Možným režimem je *Full Supervision*, ten představuje palubní vybavení, když jsou dostupná všechna data potřebná pro kompletní dohled nad vlakem. Druhý režim pak představuje *Automatic Driving*, kdy se aktivuje režim automatického řízení, který umožňuje automatického zastavení a startu vlaku [3].

Funkce ETCS

ETCS zajišťuje bezpečnou a efektivní jízdu vlaků a umožňuje budoucí automatický provoz vlaků [2; 3].

- **Bezpečnostní management** – zajištění bezpečnosti vlakového provozu tím, že monitoruje a kontroluje pohyby vlaků
- **Řízení a monitorování vlaků** – umožňuje přesné řízení a monitorování vlaků v reálném čase
- **Interoperabilita** – zajišťuje interoperabilitu mezi různými železničními systémy, což umožňuje přeshraniční železniční dopravu
- **Komunikace v reálném čase** – umožňuje komunikaci mezi vlakem a traťovým vybavením v reálném čase
- **Automatická ochrana vlaků** – poskytuje automatickou ochranu vlaků, což zvyšuje bezpečnost provozu

2.4 GSM-R

GSM-R je mezinárodní bezdrátový komunikační standard pro železniční komunikaci a aplikace. Je součástí ERTMS a slouží k zajištění komunikace mezi vlakem a řídicími centry železniční dopravy.

Je založen na technologii GSM a vychází ze specifikací EIRENE a MORANE, které zajišťují výkon při rychlostech až 500 km/h bez ztráty komunikace. Tento systém poskytuje bezpečnou platformu pro hlasovou a datovou komunikaci mezi železničními pracovníky, včetně strojvedoucích, dispečerů, členů posunovacích týmů, vlaky inženýrů a řídicích pracovníků stanic [4].

Hlavní funkce

- **Hlasové hovory** – GSM-R podporuje skupinové hovory (VGCS), hlasové vysílání (VBS), spojení založené na poloze a přednostní hovory v případě nouze [5]
- **Datová komunikace** – systém umožňuje aplikace jako sledování nákladu, video dohled ve vlacích a na stanicích a informační služby pro cestující [5]
- **Vysoká dostupnost a spolehlivost** – GSM-R je obvykle implementován pomocí dedikovaných základových stanic umístěných blízko železnice s pokrytím tunelů za pomoci směrových antén nebo „dřevých“ přenosových kabelů [5]

GSM-R byl vybrán 38 zeměmi po celém světě, včetně všech členských států Evropské unie a zemí v Asii a severní Africe. Specifikace GSM-R byly finalizovány v roce 2000 na základě projektu MORANE financovaného Evropskou unií. Standart je udržován projektem ERTMS [4].

GSM-R může být nahrazen systémem LTE-R. Tento systém nabízí vyšší kapacitu a schopnost ve srovnání s GSM-R, což je důležité pro moderní železniční aplikace [6].

2.5 FRMCS

Program FRMCS zvažuje přechod na technologii založenou na 5G vycházející ze specifikace 3GPP R15/16 (5G NR), čímž by se přeskočily hned dvě technologické generace. FRMCS je navržen tak, aby plně digitalizoval železniční provoz, byla zde zahrnuta podpora vyšší úrovně automatizace vlaků a vyžití možností, které nabízí právě 5G, aniž by vytvářel novou specifickou železniční síť. Tento přechod umožní železničním operátorům využívat širší šířku pásma, začlenění nové architektury a dlouhodobý vývoj jež bude založen na LTE a dalších technologiích [6].

Hlavní vlastnosti

a) Technologický pokrok

FRMCS využívá technologii 5G, což umožňuje vyšší kapacitu datového přenosu a lepší výkon ve srovnání s GSM-R [7].

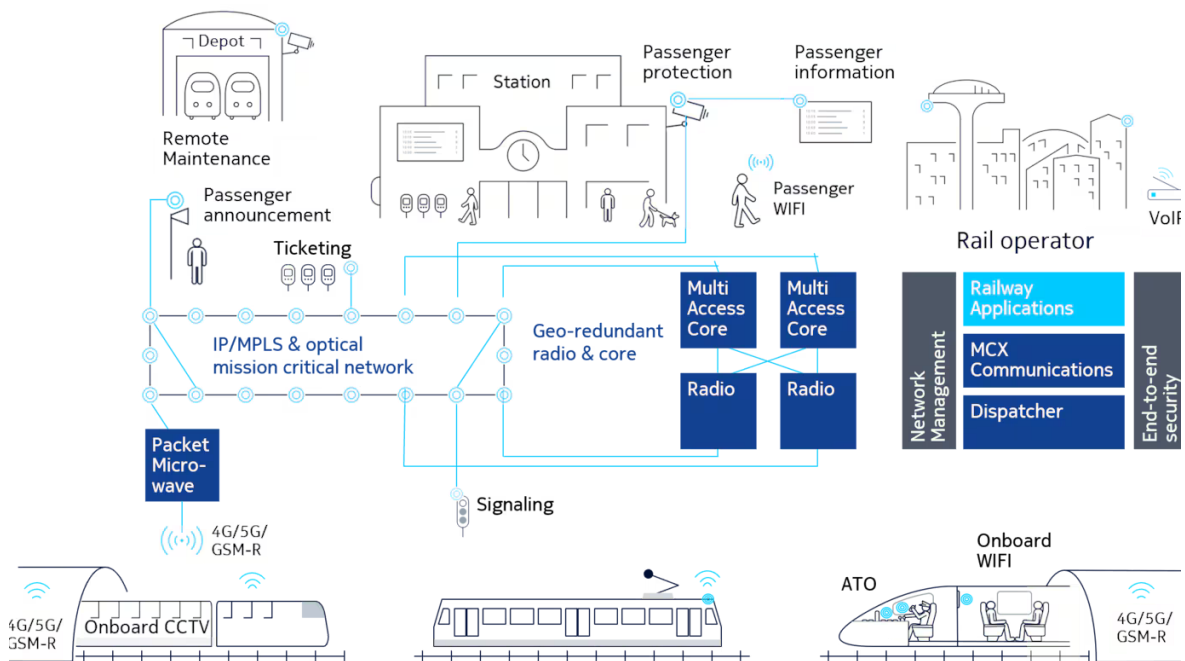
b) Interoperabilita

Systém zajišťuje interoperabilitu mezi různými železničními systémy, díky tomu je mnohem snazší přeshraniční komunikace železniční dopravy. Tento systém je navržen tak aby byl plně kompatibilní s již existujícími systémy železnice a umožnil hladký přechod na novou technologii.

c) Bezpečnost a spolehlivost

FRMCS poskytuje vysokou úroveň bezpečnosti a spolehlivosti díky pokročilým funkcím, jako je automatická ochrana vlaků a komunikace v reálném čase. Systém dále zajišťuje bezpečný provoz vlaků a minimalizuje riziko nehod.

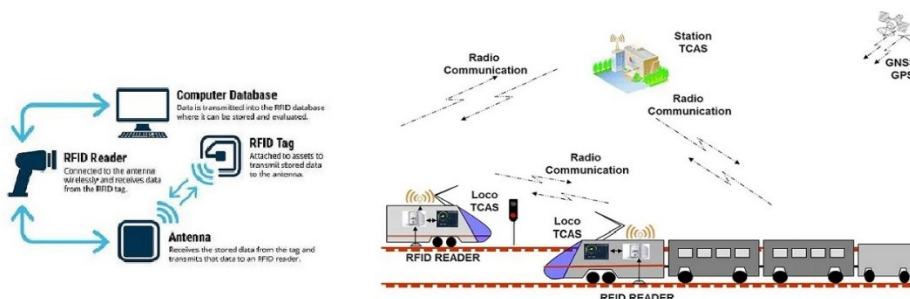
K možnosti implementace FRMCS je třeba zahrnout několik kroků ke kterým patří vývoj specifikace, testování technologie a následná příprava infrastruktury. Evropská komise stanovila, že členské státy Evropské unie musí zpřístupnit frekvence pro železniční aplikace a tím umožnit postupnou implementaci nového systému FRMCS. Některé evropské železniční společnosti již zahájily přípravy k přechodu na systém FRMCS, včetně testování této technologie na pilotních tratích [7].



Obrázek 11 - Architektura systému 5G FRMCS [8]

2.6 Systémy sledování vlaků

Sledování vlaků je klíčové k zajištění bezpečnosti, efektivity a spolehlivosti v železniční dopravě. Existuje hned několik technologií, které se používají k zajištění monitorování polohy a stavů vlaků, ke kterým patří např. balízy, RFID či GPS.



Obrázek 12 - Systémy sledování vlaků [9]

a) Balízy

Balízy jsou elektronické zařízení, které se umisťují na trať a která dokážou provádět komunikaci s vlakem při jeho průjezdu. Balízy jsou součástí systému ETCS a slouží k přenosu informací o poloze vlaku, jeho rychlosti a nezbytných důležitých údajů.

Balízy mohou být pasivní nebo aktivní, kdy pasivní balízy jsou napájeny díky elektromagnetickému poli, které je generováno vlakem, zatímco aktivní balízy mají vlastní zdroj napájení [2].



Obrázek 13 - Eurobalíza [10]

b) RFID

Technologie RFID využívá rádiové vlny k identifikaci a sledování objektů. V železniční dopravě se RFID používá k monitorování polohy vlaků, sledování ujetých kilometrů a identifikaci vozů pro údržbu. RFID systémy mohou být instalovány na vozech, lokomotivách případně na infrastruktuře, k nimž patří např. mycí linky, které automaticky vybírají správný mycí program na základě identifikace vagonů.

RFID systémy také umožňují nepřetržitý příjem dat z různých RFID jednotek a jejich uložení v databázi pro statické vyhodnocování nebo automatizovaného řízení logistiky [11; 12].

c) GPS

GPS technologie využívá satelitní signály k určení přesné polohy vlaků. Tento systém je často integrován i s dalšími senzory, které zaznamenávají doplňkové údaje o rychlosti, směru pohybu a dalších provozních parametrech. Ty následně dokážou eliminovat případné problémy nepřesnosti GPS systému, případně brání selhání infrastruktury při výpadku systému GPS.

Tento systém umožňuje železničním operátorům monitorovat polohu vlaku v reálném čase a tím zvýšit bezpečnost provozu. Data z GPS lokátorů jsou odesílána do monitorovacího systému, kde jsou analyzována a využita k optimalizaci provozu včetně údržby [13].

3 Možnosti detekce blížícího se vlaku

Detekce blížícího se vlaku je klíčovým prvkem pro zajištění bezpečnosti a efektivity železniční dopravy. Různé technologie a systémy umožňují přesné monitorování polohy vlaků a včasné varování před jejich příjezdem. Tyto systémy jsou nezbytné pro prevenci nehod, optimalizaci provozu a zajištění plynulého chodu železniční dopravy.

Existuje několik hlavních metod detekce blížícího se vlaku, které se liší svými principy a použitím. Mezi tyto metody patří magnetická detekce, vibrační senzory, akustická detekce, kamerový systém s možnou implementací umělé inteligence AI, GPS sledování vlakových souprav nebo hybridní přístupy. Každá z těchto má své výhody a nevýhody a často se používají v kombinaci pro dosažení co nejvyšší spolehlivosti a přesnosti.

V následujících částech se podrobněji zaměříme na jednotlivé metody detekce blížícího se vlaku, jejich principy, výhody a nevýhody a příklady použití. Tento přehled nám poskytne komplexní pohled na současné technologie a jejich aplikace v železniční dopravě.

3.1 Magnetická detekce

Magnetická detekce je jednou z metod používaných k detekci blížícího se vlaku. Tato technologie využívá magnetické senzory, které detekují změny v magnetickém poli způsobené přítomností kovových částí vlaku. Magnetické senzory jsou umístěny podél trati a při průjezdu vlaku zaznamenávají změny v magnetické poli, což umožňuje přesnou detekci polohy vlaku.

Magnetické senzory fungují na základě detekce změn magnetického pole. Když se vlak přiblíží k senzoru, kovové části vlaku způsobí změnu v magnetickém poli, kterou senzor zaznamená. Tato změna je pak přenesena do monitorovacího systému, který analyzuje data a určuje polohu vlaku.

Magnetická detekce se používá v různých aplikacích, včetně detekce blížících se vlaků na přejezdech, monitorování polohy vlaků na trati a zajištění bezpečnosti na železničních křižovatkách [2; 3; 14].

3.2 Vibrační senzory

Vibrační senzory na železnici jsou klíčovou technologií pro zvýšení bezpečnosti a efektivity železniční dopravy. Tyto jsou umístěny přímo na kolejnicích a dokážou detekovat jakékoliv vibrace a vzruchy. Následně odesílají signál, který je vyhodnocen za pomoci umělé inteligence, případně pomocí systému strojového učení, což umožňuje včasné varování před potenciálními riziky, jako jsou opotřebení trati, praskliny nebo překážky na kolejích [15].

Takovéto senzory jsou schopné zachytit i velmi jemné vibrace, například poklepání na kolejnici kamenem. Po detekci vibrací sensor odešle signál, který je zpracován pomocí AI. Ta následně analyzuje signál a provede identifikaci potenciálního rizika.

Technologie byla původně zamýšlena jako doplněk prediktivní údržby, což by umožňovalo detekci změn v kolejišti dříve, než bude viditelné poškození. Takové senzory mohou varovat před nehodami například při zemětřesení nebo sesuvu půdy [15].

V současnosti se tento systém nachází v režimu výzkumu a testování. Na výzkumu se podílí tuzemští a tchajwanští partneři. Tchaj-wan, který je seizmicky aktivní, plánuje nasadit senzory do testovacího provozu, aby zvýšil bezpečnost na svých železnicích [15].

3.3 Akustické senzory

Akustické senzory k detekci vlaku využívají zvukové vlny k identifikaci přítomnosti vlků na trati, což jim umožňuje efektivní monitorování a řízení železniční dopravy.

Zaznamenané zvuky jsou analyzovány pomocí softwarových algoritmů, které dokážou rozlišit mezi běžnými provozními zvuky a zvuky, které signalizují přítomnost vlaku. Na základě analýzy jsou identifikovány vlaky, což zjednodušuje přesné sledování jejich pohybu.

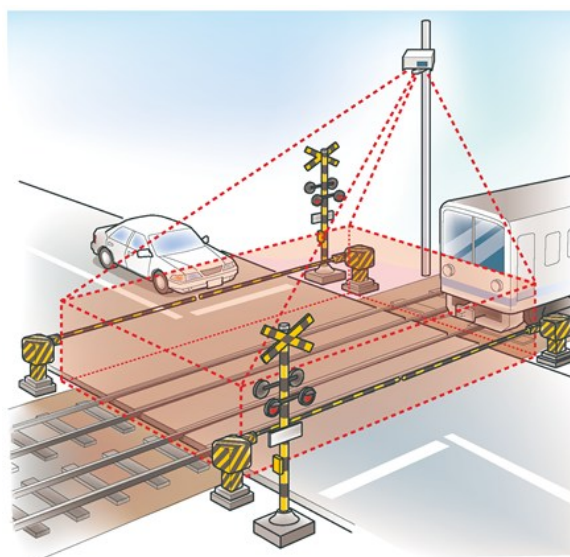
Systémy, které by využívaly akustických senzorů v současnosti není mnoho, větší důraz je kladen na systémy jiných druhů, kde tím nejpoužívanějším systémem je prozatím kombinace sestávající se z magnetické detekce, kamerového systému, GPS a rádio-komunikačních sítí.

3.4 Kamerové systémy nové generace

Moderním systémem detekce vlaků je využití kamerového detekčního systému s implementací strojového učení nebo AI. Tyto systémy využívají vysoce pokročilé kamery a algoritmy strojového učení k monitorování a analýze železniční infrastruktury.

Cílem tohoto systému je umístění kamer podél tratí, které zaznamenávají obrazové informace o projíždějících vlacích a okolí. Následné algoritmy analyzují zaznamenané obrazy a identifikují přítomnost nejen vlaků, ale i možných překážek nebo relevantních objektů. Na základě analýzy lze následně provádět včasné varování a provádění preventivních opatření [16].

Příkladem využití může být montování kamer s AI pro detekci přítomnosti vozidel nebo osob na přejezdech a varovat před blížícím se vlakem [16].



Obrázek 14 - 3D laserový detekční systém [16]

V České republice se výzkumem a implementací těchto technologií zabývají například společnosti jako CertiCon v rámci projektu SIDAS, které kombinují různé metodiky sensoriky počítačového vidění pro eliminaci vlivu rušivých elementů např. déšť, mlha, tma nebo sníh, na schopnost rozpoznat objekty na přejezdu a pohyb vlaků [17].

3.5 Hybridní přístupy detekce vlaků

Kombinací různých technologií lze docílit efektivního monitorování a řízení železniční dopravy. Tyto přístupy využívají kombinace kamerových systémů, akusticko-optických senzorů, GPS a mnoha dalších. Tím lze poskytnout komplexní obraz o pohybu vlaků a celkovém stavu železniční infrastruktury.

Předností tohoto řešení je vysoká bezporuchovost systému a tím je zajištěna i vysoká integrita bezpečnosti v železniční dopravě.

4 Návrh a implementace vlastního systému

V předchozích kapitolách byly popsány aktuální bezpečnostní systémy na železnici, včetně jejich výhod a nevýhod. Cílem této kapitoly je představit vlastní návrh jednoduchého systému detekce a přenosu informací mezi vzdálenými body, který je založen na technologii LoRa. Tento systém umožňuje efektivní a bezpečnou komunikaci například pro účely detekce blížícího se vlaku s možností rozšíření o další aplikace v oblasti zabezpečení železniční dopravy.

4.1 Volba bezdrátové komunikační technologie

Vzhledem k vlastnostem použití v rámci systému, bylo rozhodujících hned několik kritérií. Podstatné je, aby zvolená technologie pro komunikaci, pracovala spolehlivě bez výpadků a měla možnost fungovat i na bateriových zařízeních a byla jednoduchá na implementaci. Dále bylo nutné aby tato komunikační technologie měla ověřený a bezpečný přenos. V neposlední řadě rozhodují i pořizovací náklady a možnost rychlého nasazení.

Přehled kandidátních technologií

a) Wi-Fi (2,4/5 GHz)

Nabízí vysoké rychlosti, ale krátký dosah. Problémem je i vyšší spotřeba, což by znamenalo nutnost použití akumulátoru s vysokou kapacitou a tím i navýšení rozměrů přenositelné jednotky. Zároveň je tato komunikace citlivá na rušení a tím je nevhodnou pro liniové úseky s rozptylem desítek až stovek metrů mezi uzly [18].

b) Bluetooth Low Energy (BLE)

Velmi úsporné řešení avšak fungující pouze na krátké dosahy. Pro navýšení dosahu komunikace by bylo třeba vybudování mesh sítě s vysokou hustotou uzlů, což v rámci použití tohoto projektu nedává příliš smysl [18].

c) ZigBee / Thread (802.15.4)

Nízký příkon, datová rychlost 20 – 250 kbps (v závislosti pásma), ale běžný dosah je kratší a celá síť je tvořena topologií typu mesh. Využívá volná pásma na frekvenci 2,4 GHz, kde se objevuje i vyšší rušení. V rámci lineární infrastruktury (trať) je vhodnější použití technologií typu LPWA [19; 20].

d) LoRa (EU433, EU868)

Jedná se o zástupce LPWA technologie s modulací Chirp Spread Spectrum a mimořádnou citlivostí přijímače, typicky kolem -137 dBm až -148 dBm (v závislosti na zvolené šířky pásma a SF). Funguje v nelicencovaných ISM pásmech a zařízení mohou tvořit privátní síť bez nutnosti napojení na operátora. Díky využití nízkofrekvenčních pásem je možné zajistit komunikaci na velmi dlouhé vzdálenosti. Předností je i nízká cena samotného komunikačního modulu a snadná a rychlá implementace do systému. Tato komunikační technologie také dosahuje mimořádně nízké spotřeby potřebnou pro vysílání, je tedy možné provozovat komunikaci na baterie [21].

e) NB-IoT / LTE-M (celulární LPWA)

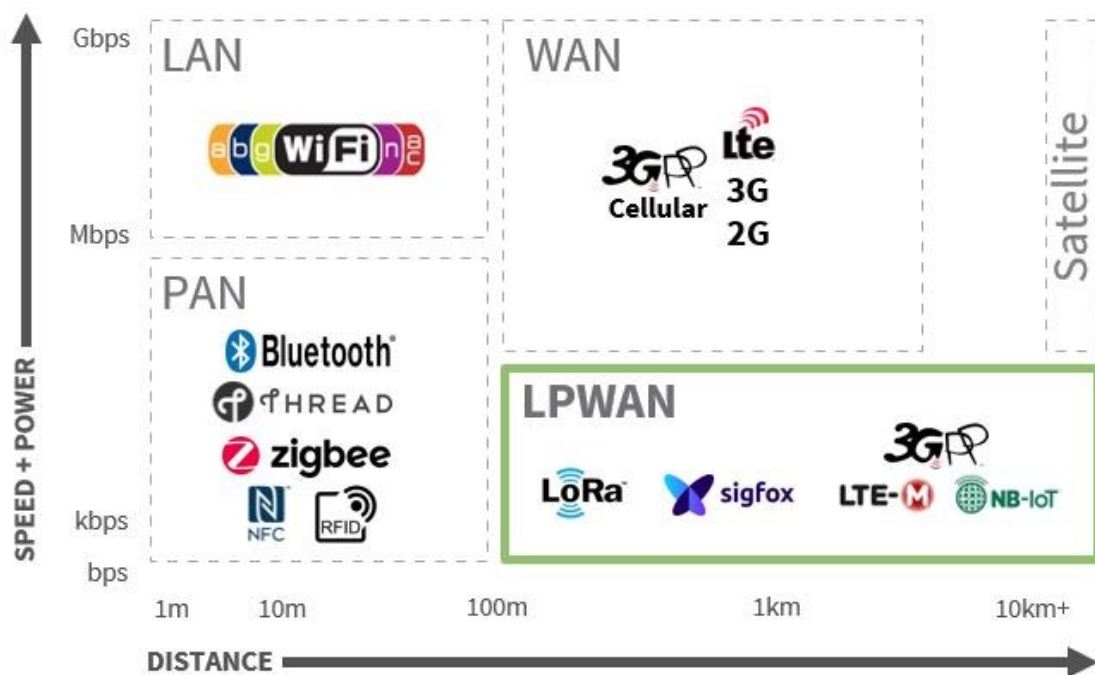
Nabízí výborné pokrytí makrosítí, teoretické MCL až 164 dB, což představuje velmi „hluboké“ pokrytí). Nevýhodou je závislost na operátorovi a latenci což u NB-IoT bývá kolem 1,6 – 10 s, což je pro nasazení v real-time varovném systému nevhodné. Navíc v odlehlých úsecích tratě nemusí být NB-IoT k dispozici [22].

f) TETRA / DMR (profesionální rádiové sítě)

Tyto komunikace jsou vhodné pro hlasové komunikace nebo dispečerské řízení. Datové rychlosti jsou nízké a vyžadují licencované kmitočty a vybudování infrastruktury. Pro rychlou datovou signalizaci v rámci nositelných zařízení je tato komunikace nevhodná [23].

g) GSM-R / FRMCS (železniční komunikační standard)

GSM-R je součástí dnešní páteřní komunikace pro železnici, ale samotná komunikace je určena pro traťové řízení v rámci systému ETCS případně pro hlasovou komunikaci. V budoucnu se očekává nahrazení novým standardem FRMCS (5G), což dle současných informací bude celková migrace dokončena okolo roku 2035. Pro lokální varovný systém je tento komunikační standard předimenzovaný a mimo působnost provozovatele infrastruktury [7; 8].



Obrázek 15 - Celkové srovnání bezdrátových komunikačních standardů podle dosahu, energie a výkonu [24]

Pro privátní systém bez operátora tedy dává smysl využití komunikační technologie LoRa.

4.2 Použité technologie a komponenty

4.2.1 Technologie LoRa

LoRa (zkratka pro „Long Range“) je moderní bezdrátová komunikační technologie určená zejména pro aplikace v oblasti sítí IoT, kde je kladen důraz na **velký dosah**, **nízkou spotřebu** a **nízké datové toky**. Byla vyvinuta společností Semtech a dnes je součástí celé řady komunikačních sítí, jež zahrnuje jak jednoduchá spojení point-to-point tak i rozsáhlá spojení sítí využívajících protokolů jako např. LoRaWAN.

Technologie využívá modulaci rozprostřeného spektra typu CSS (Chirp Spread Spectrum), která je odolná vůči šumu, rušení i vícecestného šíření signálu. To umožňuje komunikaci na kilometrové vzdálenosti i při relativně nízkých vysílacích výkonech [25].

V rámci projektu je použit komunikační LoRa modul Ra-02.

Frekvenční rozsah

Technologie LoRa pracuje v bezlicenčních tzv. ISM (Industrial, Scientific, Medical) pásmech. V rámci Evropy je možné provozovat komunikaci LoRa ve dvou pásmech [26].

- **EU433** – kanálový rozsah je dán rozmezím 433,05 – 434,79 MHz a šířka pásma BW se volí ze 125 kHz nebo 250 kHz.
- **EU868** – kanálový rozsah je dán v rozmezí 863–870 MHz s možností volit ze všech třech dostupných šířek pásma 125, 250 nebo 500 kHz.

Modulace Chirp Spread Spectrum (CSS)

Jedná se o jednu z forem modulace rozprostřeného spektra, která využívá „chirp“ signály – tedy krátké pulzy, jejichž frekvence během trvání pulzu lineárně roste („up-chirp“) nebo klesá („down-chirp“). V rámci jednoho „symbolu“ je tak informace zakódována do časové změny, nikoliv jen amplitudy či fáze.

Využití této modulace nám přináší několik zásadních výhod

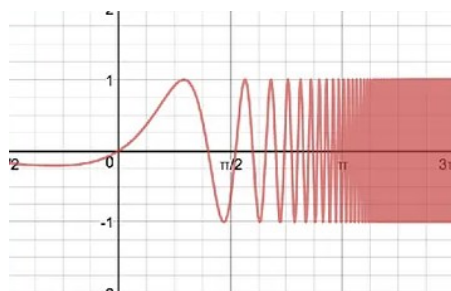
- **Odolnost vůči šumu a rušení** – Chirp signály lze snadno rozlišit i pod úrovní šumu, což umožňuje přijímat velmi slabé signály a to sice až do hodnot SNR – 20dB.
- **Velký dosah** – Díky tomu je možné na stejném vysílacím výkonu překonávat vzdálenosti v řádech desítek či až stovek kilometrů v závislosti na použité vysílací anténě a nastavení vysílacího výkonu.
- **Odolnost** – Předností je i odolnost vůči vícecestnému šíření (multipath) a Dopplerova jevu, což je důležité při použití v městském i průmyslovém prostředí.

Samotný chirp lze popsat matematicky takto

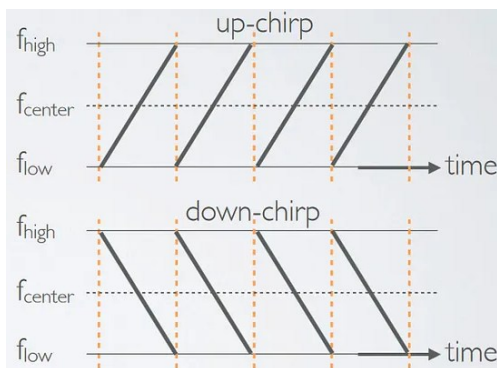
$$s(t) = A \cdot \cos \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{k}{2} t^2 \right) \right) \quad (4.1)$$

kde:

- A – amplituda
- f_0 – počáteční frekvence
- k – rychlost změny frekvence CR
- t – čas v intervalu jednoho symbolu

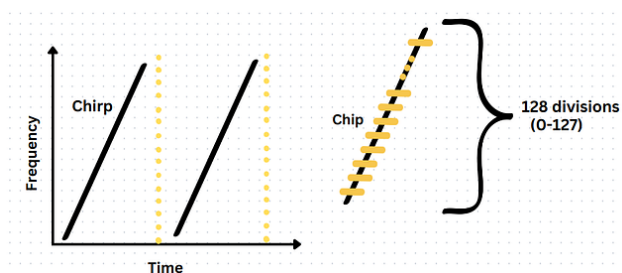


Obrázek 16 - CSS modulace „chirp“ [25]



Obrázek 17 - CSS ukázka generování signálů „up-chirp“ a „down-chirp“ [25]

Samotné rozmítání signálu pro LoRu lze rozdělit do hodnoty jež závisí na celkovém počtu bitů a s tím souvisejícím faktorem šíření SF . Z toho plyne, že při použití celkové délky symbolu o 7 bitech je faktor šíření $SF = 7$. Tedy lze teoreticky posílat symboly s hodnotami $0 - 2^{SF}$ ($0 - 128$) $_{SF=7}$. Platí že pro nižší SF je použití vhodné pro užší šířku pásma a vysokou rychlost přenosu, a vyšší SF je vhodné pro širší šířku pásma a nižší rychlost přenosu.



Obrázek 18 - Rozmítaný signál CSS [25]

Dopředný opravný kód a rychlost kódování

Aby bylo zajištěno, že se při příjmu dat korektně demodulují, využívá se korekce. K samotným datům se přidávají redundantní bity navíc, které usnadní obnovu bitů. Je pochopitelné, že přidáme-li více bitů sloužících k opravě, snížíme tím množství užitečné informace, což vede k celkovému nárůstu přenášených dat, tím se ale snižuje životnost baterie. Rychlost kódování nám pak udává onu míru přenášených dat, které skutečně nesou užitečnou informaci.

Pro LoRa systémy je povolena míra kódování udávaná vtažením

$$CR = \frac{4}{4 + CR_i} \quad (4.2)$$

kde:

CR_i – zvolený index podílu, pro LoRa systémy hodnota z rozsahu $\langle 1; 4 \rangle$

Tabulka 1 - Různé rychlosti kódování v rámci LoRa

CR_i	CR
1	$\frac{4}{5}$
2	$\frac{4}{6}$
3	$\frac{4}{7}$
4	$\frac{4}{8}$

Posledním z parametrů určujících kvalitu komunikace je nastavení šířky pásma BW . Pro systémy LoRa je typicky 125, 250 nebo 500 kHz. V neposlední řadě je nutné i zvolení vysílacího výkonu $TX Power$, ten je běžně u základních čipů okolo 10–17 dBm, lze ale využít „boost“ a navýšit tak výkon až na 20 dBm.

LoRa dělení dat do paketu

Pro systémy LoRa je označení „packet“ základní jednotkou přenášených dat bezdrátového spojení. Každý takový paket je sekvencí digitálních dat, která jsou přenášena mezi dvěma koncovými zařízeními např. uzlem a bránou. Struktura samotného paketu je určena použitým protokolem implementovaným nad LoRa fyzickou vrstvou – buď jednoduchý uživatelský rámec nebo standardizovaný protokol LoRaWAN.

Typické části paketu



Obrázek 19 - LoRa paket [21]

a) Preambule

Slouží k synchronizaci přijímače se začátkem přenosu. Délka preamble je možné konfigurovat ale typicky je dána 8-12 symboly. Samotná sekvence je složena z „up-chirpů“. Bitová reprezentace je složení 010101010...

b) Synchronizační slovo (SyncWord)

Jedná se o 2 bajty, které odlišují různé sítě nebo aplikace pracující na stejné frekvenci. Umožňuje přijímači zpracovávat pouze „vlastní“, nikoliv cizí zprávy.

c) Hlavička

Nachází se zde informace o délce uživatelských dat, typ FEC, zda je součástí CRC a další parametry. Samotná hlavička se dá rozdělit na dvě možnosti podle typu uspořádání dat.

Jednou z možností je **implicitní hlavička**, ta je kratší a méně flexibilní. Taková hlavička neobsahuje žádné informace o délce a ani o parametrech, což znamená že tyto parametry musí být předem znány a musí být identicky nastaveny jak na vysílači tak přijímači. Výhodou je kratší overhead (méně symbolů, které nenesou informaci, což může mít za následek menší spotřebu energie), ale za cenu menší flexibility.

Druhou možností je **explicitní hlavička**, která může obsahovat více metadat a je jednou z nejčastějších možností používaných v aplikacích. Hlavička přenáší veškeré důležité informace o vlastnostech paketu. Příkladem informace může být např. délka payloadu, použitý *CR* nebo příznak použití CRC. Tyto informace umožňují přijímači dynamicky rozpoznávat délku paketu i parametry FEC. Výhodou je větší flexibilita, protože každý paket pak může mít jinou délku a nastavení.

d) Payload

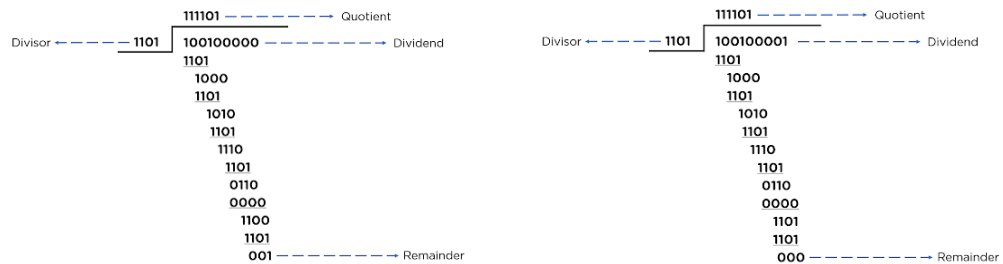
Uchovává přenášená data, jejich maximální délka je dána použitým *SF* a *BW*, což je typicky 255 bajtů. Data mohou být volně formátována nebo strukturována podle aplikačního protokolu.

e) FEC

Zde se nachází redundantní data generovaná podle zvoleného kódového poměru *CR*. Zvyšuje spolehlivost a odolnost přenosu vůči chybám.

f) CRC (Cyclic Redundancy Check)

Volitelný kontrolní součet pro detekci chyb v uživatelských datech a hlavičce paketu.



Obrázek 20 - Výpočet CRC na straně vysílače (vlevo), dopočet na straně přijímače (vpravo)

Komunikační režimy

LoRa moduly disponují několika pracovními režimy, které určují jak se chová rádio a jakým způsobem se přenášejí data. Přepínání mezi režimy se provádí pouhým nastavením příslušných registrů často označované jako „OpMode“ a ovlivňuje spotřebu, latenci i rychlost reakce [27].

1) Sleep mode

V tomto režimu má modul velmi nízkou spotřebu řádově μA tím, že všechny části rádia jsou vypnuté kromě napájení registrů. Tento režim je vhodný pro aplikace, kdy stačí aby se zařízení probouzelo pouze v určitém čase nebo při vyvolání přerušení. Při přechodu z tohoto režimu do jiného je třeba krátké inicializační doby, typicky 1–2 ms.

2) Standby mode

Rádio je zapnuté, ale nic se nevysílá ani nepřijímá. V rámci tohoto modu je oscilátor a základní logika aktivní stejně tak je i PLL uzamčeno. Uplatňuje se tam kde je třeba rychlé reakce na přepnutí do TX/RX a slouží tedy k přípravě na komunikaci. Spotřeba je již vyšší oproti Sleep režimu, ale stále nízká a to řádově okolo jednotek mA.

3) Transmit mode (TX)

Zde již rádio generuje LoRa modulovaný signál a vysílá jej na zvolené frekvenci. Samotný průběh lze rozdělit do tří samostatných celků.

- Zápis dat z payloadu do FIFO bufferu.
- Modul doplní preambuli, synchronizační slovo, zvolenou hlavičku, FEC a volitelné CRC.
- Po odvysílání dat modul přejde do režimu Standby (v případě že není nastaven jiný fallback režim).

Spotřeba tohoto režimu je vyšší a to v závislosti na zvoleném nastavení výstupního výkonu PA. Typická spotřeba činí 28–120 mA pro +20 dB.

4) Recieve mode (RX)

V rámci tohoto režimu lze rozlišovat dvě možnosti příjmu dat.

a) Continuous RX

Rádío nepřetržitě naslouchá na zvolené frekvenci, kdy je schopen okamžitě zachytit platný paket s odpovídajícím synchronizačním slovem. Z toho plyne, že nejvyšší výhodou je minimální latence při příjmu, ale nevýhodou je vysoká spotřeba (trvale běží RF část a digitální dekodér).

b) Single RX

Rádío přejde do příjmu jen na definovaný čas případně dokud není přijat paket. Následně se automaticky vrátí do Standby či Sleep režimu. Hlavní předností je tedy nižší spotřeba, ale nevýhodou může být promeškání paketů, pokud rádío není aktivní ve správný čas.

5) Channel Activity Detection mode (CAD)

Jedná se o specifickou techniku detekce příchozího paketu. Nejprve dochází ke krátkému „odposlechu“ kanálu pro detekci přítomnosti LoRa preamble, tzn. Rádío nemusí čekat na celý paket, ale pouze ověří, že kanál obsahuje LoRa signál. Tento režim je tedy jakýmsi kompromisem kontinuálního naslouchání na zvolené frekvenci. Při vyhodnocení resp. detekce příchodu preamble je možné přepnout na plnohodnotný režim RX, který přijme a zpracuje příchozí paket. Předností tohoto režimu je značné snížení spotřeby energie. Důležité je však zajištění dostatečně dlouhé preamble aby bylo možné provést detekci a přepnutí do RX režimu.

4.2.2 Mikrokontroler ESP32-S3

Aby byl systém funkční, bylo použito moderního vývojového jádra systému, mikrokontroler od firmy Espressif Systems, ESP32-S3, který je navržen pro aplikace v oblasti IoT, edge computing či embedded systémů. Jedná se o kombinaci vysokého výpočetního výkonu, nízké spotřeby a širokých možností připojení. Oproti předchozím generacím z řady ESP32, přináší vylepšený procesor, více periférií a speciální instrukce pro akceleraci umělé inteligence a DSP výpočtů [28].

Architektura

- CPU jádro zajišťuje 2x Xtensa 32-bit LX7 o frekvenci 240 MHz
- Paměť je rozdělena na 512 kB SRAM, podpora externí PSRAM a to až do velikosti 16 MB a interní flash (v závislosti na použitém čipu typicky 4 MB), případně externí SPI flash
- HW akcelerace kryptografie – AES, SHA, RSA, ECC, RNG
- Předností je podpora operačního systému FreeRTOS a multiprocesorového plánování

Konektivita

- Wi-Fi – IEEE 802.11 b/g/n na frekvenci 2,4 GHz a s rychlostí až 150 Mbps
- Bluetooth LE 5.0 (BLE) s podporou Bluetooth Mesh
- Výhodou je i možnost současného provozu Wi-Fi i BLE

Periferie a rozhraní

- SPI, I²C, UART, GPIO, PWM (LEDC), ADC, USB OTG, ...

Spotřeba energie

- **Active mode**

V rámci tohoto režimu je spotřeba nejvyšší možná, protože se uvažuje aktivní CPU jádro o maximální možné frekvenci až 240 MHz, a zapnuté Wi-Fi rádio. Celková spotřeba dosahuje okolo 80–240 mA.

- **Modem sleep mode**

CPU je stále aktivní ale je vypnuté rádio (Wi-Fi), díky tomu je spotřeba snížena na 3–20 mA.

- **Light-sleep mode**

Dochází k usnutí CPU a většiny periférií. Pochopitelností je i vypnutí rádia, avšak RTC obvody a paměť DRAM zůstávají zachovány. Zároveň GPIO si pamatuje svoje stavy. V rámci tohoto režimu je spotřeba cca 0,8 – 1 mA (v závislosti na konfiguraci). Výhodou je možnost velmi rychlého probouzení a uchování si obsahu v RAM paměti, z čehož plyne, že program může pokračovat tam, kde skončil.

- **Deep-sleep mode**

Většina systémů je vypnuta, zároveň dochází k odpojení DRAM, tím dochází ke ztrátě obsahu paměti RAM. Jedinou aktivní částí čipu je RTC doména a konfigurovatelné wake-up zdroje (časovač, GPIO či dotykový senzor). Udávaná spotřeba je okolo 20–150 μ A. Výhodou je tedy extrémně nízká spotřeba energie. Mezi hlavní nevýhody patří nutnost po probuzení plného restartu systému.

- **Wake-up mode**

Jedná se o proces, kdy se čip vrací z Light-sleep či Deep-sleep režimu do aktivního stavu.

4.2.3 Centrální řídicí a komunikační jednotka RPi5

Raspberry Pi verze 5 je nejnovější generace jednodeskového počítače vyvinutého nadací Raspberry Pi Foundation. Přináší výrazný posun ve výkonu oproti předchozí verzi 4 díky novému čipsetu BCM2712 a rozšířeným možnostem připojení periférií. V kombinaci s Linuxovým operačním systémem nabízí plnohodnotné prostředí pro serverové aplikace, sběr dat a jejich distribuci do sítí vyšší úrovně např. MQTT, http či LoRaWAN backend [29].

V rámci projektu slouží jako hlavní zpracovatelský a integrační prvek, propojující LoRa gateway s uživatelským rozhraním s pomocí podpory UART rozhraní a systému Node-RED.

Architektura

- Procesor BCM2712, ARM Cortex-A76 4-core na frekvenci 2,4 GHz
- 64bit architektura ARMv8-A
- 512 kB L2 cache na jedno jádro a integrovaná L3 cache
- Obsahuje GPU VideoCore VII na frekvenci 800 MHz s plnou podporou akcelerace H.264/H.265 pro dekodování i enkodování
- LPDDR4X SDRAM s volbou velikosti celkové kapacity 4, 8 či 16 GB
- Uložiště systému zajišťuje microSD slot, případně nová možnost připojení NVMe SSD, díky plnohodnotné PCIe komunikaci

Konektivita

- 2x mini-HDMI (až 4K@60Hz)
- 2x USB 3.0, 2x USB 2.0
- Gigabit Ethernet s podporou PoE
- Wi-Fi 5 - 802.11ac
- Bluetooth 5.0 / BLE
- PCIe 2.0 (v blízké době možná podpora verze 3.0)
- GPIO header (SPI, I²C, UART, ...)

Výhodou použití je dostatečný výkon pro real-time zpracování více datových toků, možnost rozšíření díky PCIe či USB. Plná podpora Linuxových knihoven a programovacích jazyků. Integrace Wi-Fi, Ethernetu a Bluetooth, což přináší snadné integrace do sítí LAN/WAN. Vhodnost použití pro nepřetržitý provoz v průmyslovém prostředí a nízká spotřeba okolo 7–12 W podle zátěže, což je mnohonásobně nižší než klasické PC, je tedy možné dlouhodobého provozu na akumulátoru [29].

4.2.4 Architektura navrhovaného systému

Navrhovaný systém včasného varování je koncipován jako modulární a škálovatelná síť jednotlivých uzlů a centrální jednotky. Propojení zajišťuje bezdrátová technologie LoRa.

Základní prvky systému

1) Senzorové uzly (detekční jednotky)

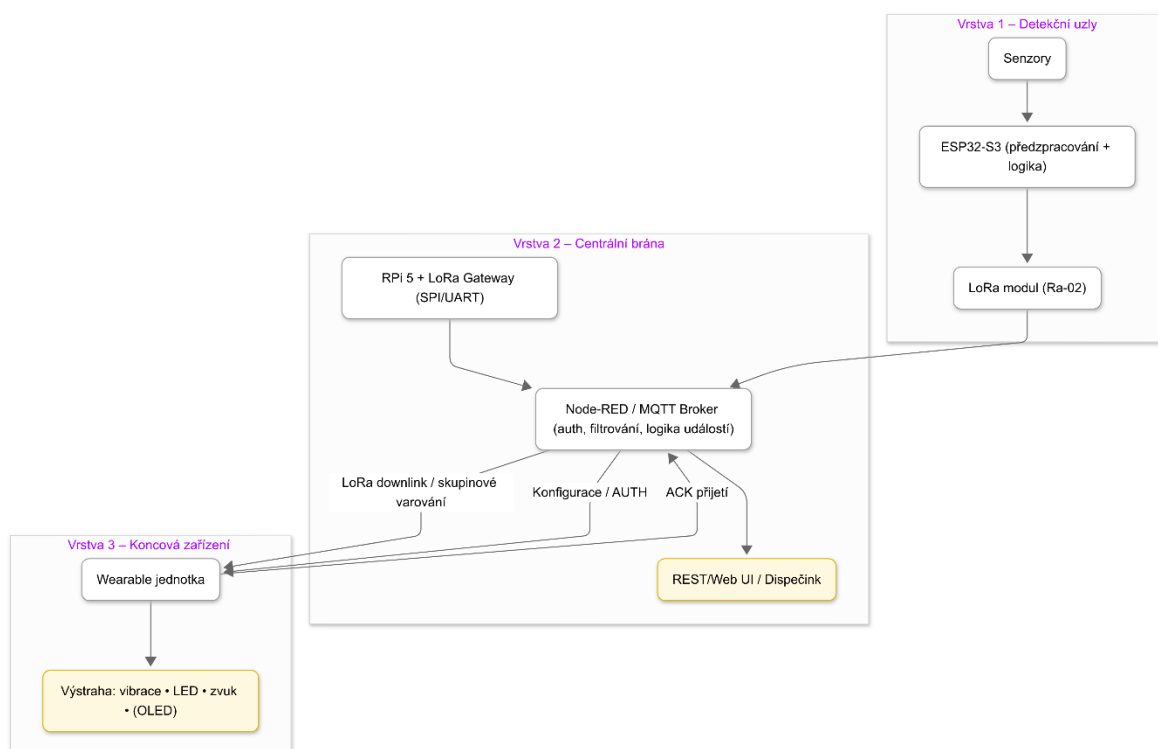
Jedná se o jednotky, jež mají za úkol sběr dat z připojených senzorů či napojeného detekčního systému, který má za úkol detekování blížícího se vlaku. Získaná data jsou předzpracována a následně odeslána pomocí LoRa komunikátoru na centrální komunikační bránu. V tomto projektu se nezabýváme provedením sběru dat ze senzorů, ale pouze daty samotnými a následným zpracováním, včetně odvysílání dat pomocí komunikační sítě. O to se stará mikrokontroler ESP32-S3 a připojený LoRa modul Ra-02.

2) Centrální komunikační brána

V rámci jednoduché implementace bylo použito mikropočítače RPi 5, který zajišťuje veškerou práci s daty, zajišťuje autorizaci a logování komunikace v rámci celé infrastruktury. K zajištění podpory napojení do LoRa sítě je k mikropočítači připojena základová deska, která obsahuje integrovaný LoRa modul Ra-02 a mikrokontroler ESP32-S3, který zde slouží jako prostředník komunikace mezi uzly. Spojení mezi základovou deskou a mikropočítačem je realizováno za pomoci UART rozhraní, na kterém je zprovozněn vlastní komunikační protokol.

3) Koncová zařízení pracovníků (Výstražné jednotky)

Jde o koncové jednotky, které mají za úkol informovat pracovníky na blížící se nebezpečí. Zároveň mohou sloužit i jako bezpečnostní prvek v případě nouze, díky pokročilým funkcím protokolu. Samotná jednotka se skládá ze základové desky na které se nachází mikrokontroler, LoRa modul, informační OLED displej, indikační LED diody, vibrační motor, piezo-elektrická siréna, napájecí obvody včetně nabíjecího obvodu pro provoz na baterii, 5 funkcích tlačítek a plnohodnotné USB-C.



Obrázek 21 - Architektura komunikačního systému

4.3 Návrh a realizace HW

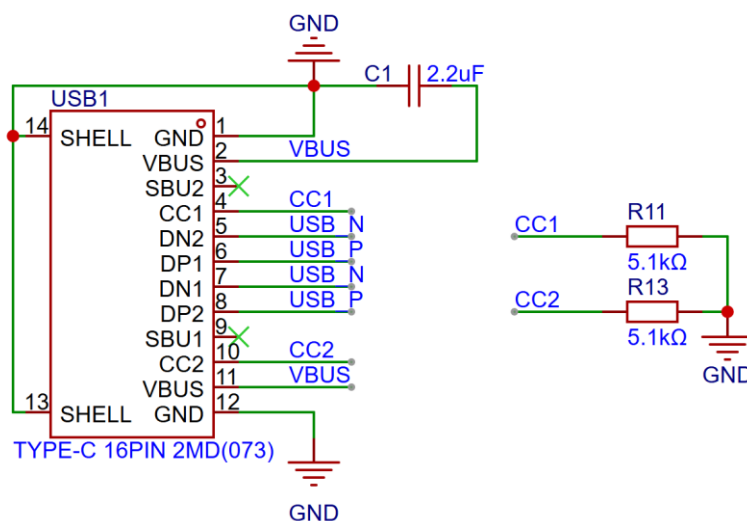
V rámci této práce nejprve bylo třeba navrhnout a realizovat prototypní hardware, který je založen na vlastním návrhu obvodového zapojení a následné promítnutí do výroby prototypovacích desek plošných spojů tzv. PCB. Aby byla výroba desek plošných spojů jednodušší, tak při návrhu se uvažovalo nad univerzálním návrhem, který by se dal použít v rámci každé vrstvy architektury systému, tedy aby bylo možné použít stejné PCB.

Elektrické propojení bylo navrženo ve specializovaném EDA (Electronic Design Automation) softwaru. Tento software usnadňuje práci s návrhem elektrického obvodu a to sice od prvotního návrhu elektrických schémat, identifikaci elektronických součástek, propojení s katalogem prodejců elektronických součástek až po generování návrhu samotného rozložení elektrického obvodu na desce plošných spojů a následný export ve formátu GERBER. Ten obsahuje výrobní data pro výrobce desek plošných spojů. Po dokončení návrhu bylo nutné provést kontrolu bezchybnosti návrhu nebo-li DRC (Design Rule Check), ten ověří shodnost návrhu schéma a PCB, a zda je výsledek možné realizovat podle definic výrobce. Po osazení komponent se PCB znovu testuje a následně je již připravena k ladění.

Schéma zapojení viz. [Příloha A](#). Deska plošných spojů viz. [Příloha B](#) a [Příloha C](#).

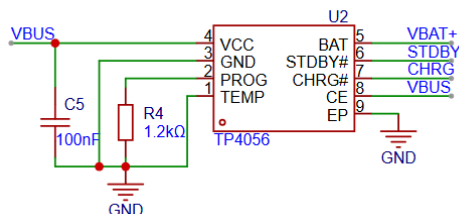
Napájecí obvody

Vstupní přívod napájení zajišťuje moderní konektor USB-C, který plní funkci přivedení 5V pro napájení celého systému a nabíjení akumulátoru. Další nedílnou funkcí je napojení s mikrokontrolerem a tím možnost programování bez nutnosti dalších převodníků komunikace. Rezistory o velikosti 5,1 k Ω zajišťují výběr 5V napájení.



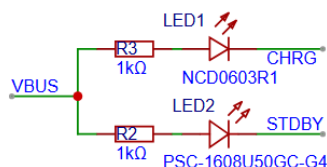
Obrázek 22 - Obvod konektoru USB-C

Napájecí napětí je přivedeno na nabíjecí obvod TP4056, který dokáže nabíjet baterie s možností volby maximálního nabíjecího proudu. K tomu slouží zvolení velikosti rezistoru připojeného na pin PROG. V tomto případě je proudový limit nastaven na 1A.



Obrázek 23 - Nabíjecí obvod TP4056 pro baterie s proudovým omezením 1A

Tento obvod disponuje dvěma kontrolními piny, které slouží k indikaci stavu nabíjení baterie. Pin označen jako STDBY nastaví logickou hodnotu 0 pokud je baterie nabíjena a druhý pin CHRG nastavuje logickou hodnotu 0 v případě nabití baterie. Oba piny jsou přivedeny na LED diody.



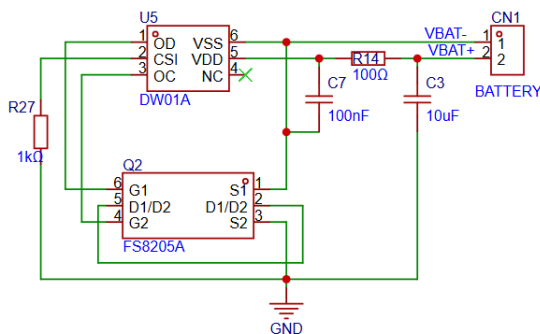
indicator light state

Charge state	Red LED CHRG	Green LED STDBY
charging	bright	extinguish
Charge Termination	extinguish	bright
Vin too low; Temperature of battery too low or too high; no battery	extinguish	extinguish
BAT PIN Connect 10u Capacitance; No battery	Green LED bright, Red LED Coruscate T=1-4 S	

Obrázek 24 Indikační LED diody pro signalizaci stavu nabíjecího obvodu a tabulka stavů

Díky použití těchto obvodů je možné systém provozovat několika režimy. Jedním z režimů, kdy je napájení realizováno pouze pomocí USB-C, dále pak napájení pouze z baterie, nebo hybridní automatický režim, přičemž v případě výpadku napájení z USB-C je zařízení provozováno pouze z baterie.

K ochraně baterie je použit obvod DW01A, který odpojí obvod od baterie v případě přebíjení nebo podvoltage baterie, což by mohlo vést nejen k nefunkčnosti samotné baterie, ale mohlo by dojít i v extrémních případech k výbuchu nebo samovznícení připojené baterie. Jako odpojovací člen je použito zapojení dvou MOSFET tranzistorů v jednom pouzdře obvodu FS8205A.



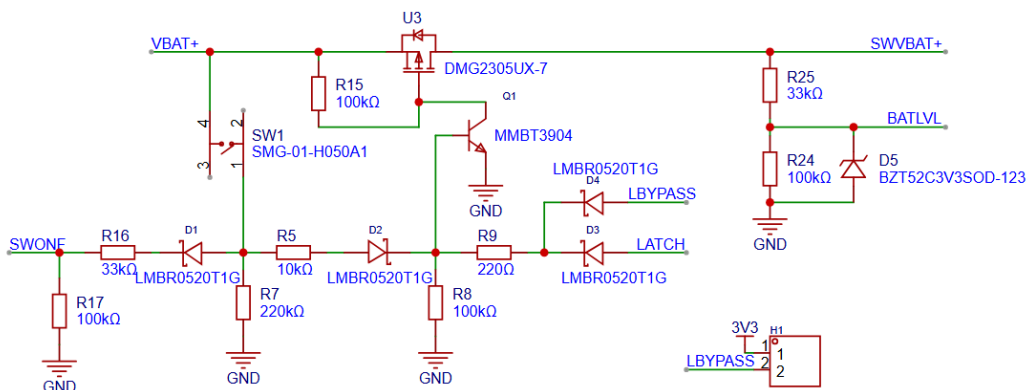
Obrázek 25 - Zapojení ochranného obvodu baterie DW01A

Další částí je obvod, který uvede zařízení do chodu. Možným řešením by mohlo být použití jednoduchého přepínače, který přivede napájení dále do obvodu. Takové řešení se dá jednoduše realizovat např. pomocí kolébkového spínače. Dalším moderním řešením je použití jednotlačítkového spouštěcího obvodu. Předností takového řešení je možnost velmi hlubokého usnutí v případě nečinnosti případně centrální vypnutí zařízení. To je dáno tím, že při použití kolébkového spínače se jedná o fyzické sepnutí obvodu, u tlačítka se jedná o zapínací / vypínací impuls, který je možné poslat např. z mikrokontroleru. Zapojení Tlačítkového spínače je oproti spínači složitější, ale je vhodnější pro bateriová zařízení.

Takové zapojení nese označení Latching Power Switch Circuit. Jedná se o primitivní obvod, který obsahuje výkonový spínací prvek, v tomto případě P-MOSFET, který je ovládán signálovou částí obvodu. K tomu slouží bipolární tranzistor typu NPN, s řídicími signály z tlačítka a blokovacího pinu z mikrokontroleru. Tento pin slouží pro řízení stavu sepnutí obvodu. Pokud je LATCH pin nastaven na logickou 1, obvod setrvává v sepnutém stavu, v opačném případě je napájení přerušeno a tím obvod vypnut. Pro programování byl přidán fyzický triggerovací vstup s označením LBYPASS, který má za úkol přemostit SW funkci pinu LATCH.

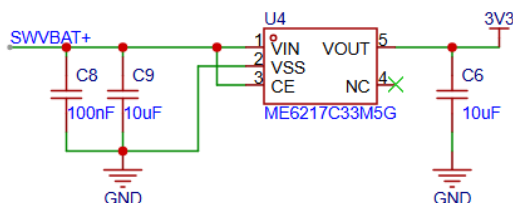
Aby mohl mikrokontroler detekovat žádost o vypnutí např. pomocí opětovného stisku zapínacího tlačítka, je signál z tohoto tlačítka přiveden na vstupní pin mikrokontroleru. V rámci obvodu se nachází i několik diod, které slouží pouze jako opatření a usměrnění signálů.

Zároveň v rámci tohoto obvodu je součástí i primitivní měřič úrovně výstupního napětí, které je přivedeno na patřičný vstupní pin mikrokontroleru.



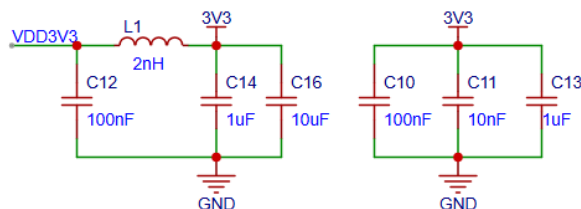
Obrázek 26 - Latching Power Switch Circuit

Poslední částí napájecího obvodu je DC/DC lineární napěťový stabilizovaný zdroj, který snižuje vstupní napětí z baterie na požadované napětí 3V3.



Obrázek 27 - Lineární napěťová stabilizovaný zdroj

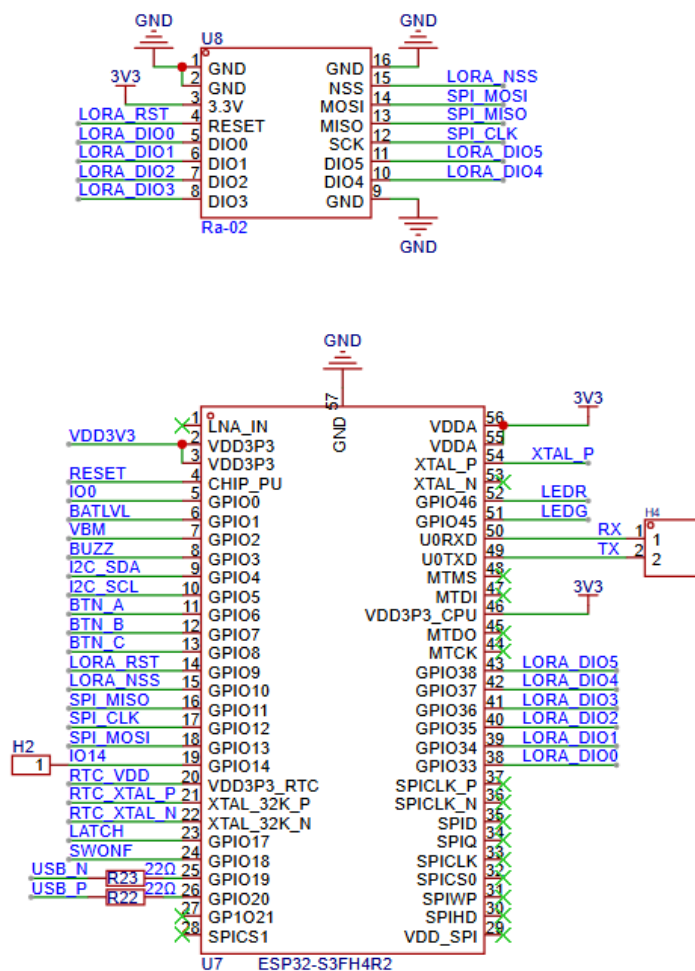
Následuje filtrační obvod, který se sestává z PI-filtru a filtračních kondenzátorů.



Obrázek 28 - Vstupní filtrační obvody

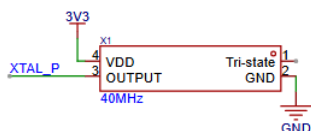
Řídící a komunikační obvody

Centrem řídicího obvodu je mikrokontroler ESP32-S3, ke kterému jsou připojeny veškeré ostatní periferie včetně komunikačního LoRa modulu Ra-02. Ten je propojen pomocí sběrnice SPI a pomocnými IO piny.

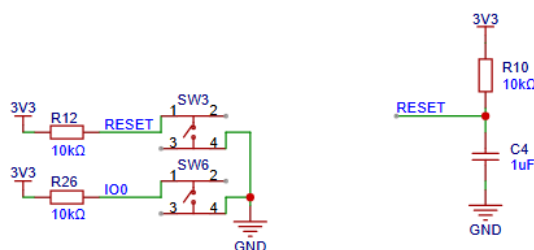


Obrázek 29 - Centrální řídicí prvek, mikrokontroler ESP32-S3 a komunikační LoRa modul Ra-02

Ke správné funkci mikrokontroleru je nutné připojení krystalu nebo oscilačního obvodu, který je naladěn na frekvenci 40 MHz. K zajištění naprogramování a možnosti resetu procesu je zapojení doplněno o dvě tlačítka, kdy u resetovacího tlačítka je ještě přidán RC filtr pro odfiltrování záskmitů tlačítka a tím odstranění problému s nežádoucím několikanásobným restartem procesoru.



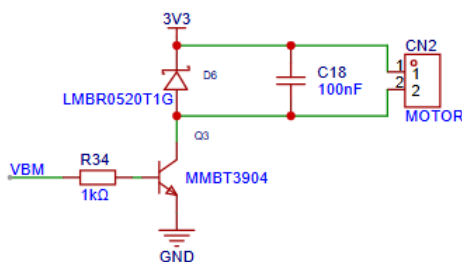
Obrázek 30 - Oscilační obvod naladěný na 40 MHz



Obrázek 31 - Tlačítka BOOT a RESET

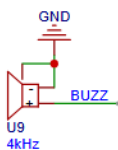
Periferní obvody

Jedním z obvodů je ovládání vibračního motoru. Ten je spínán pomocí jednoduchého obvodu složeného z bipolárního tranzistoru, který slouží jako spínač, ovládaného pomocí výstupního pinu mikrokontroleru. V obvodu je použit i filtrační kondenzátor a ochranná dioda, která slouží ke „zkratování“ negativních napěťových špiček vzniklé indukčností vinutí na motoru.



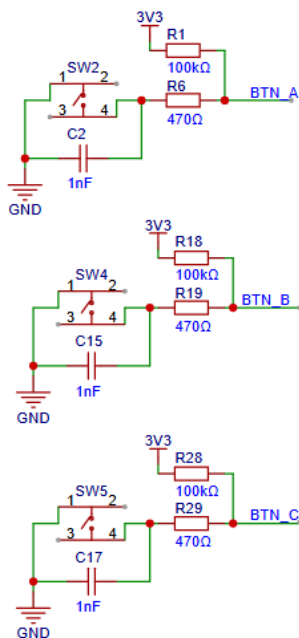
Obrázek 32 - Ovládací obvod vibračního motoru

Dalším prvkem obvodu je piezo-elektrická siréna, která je laděna na frekvenci 4 kHz. Ta je ovládána pomocí pulzně šířkové modulace (PWM) mikrokontrolerem.

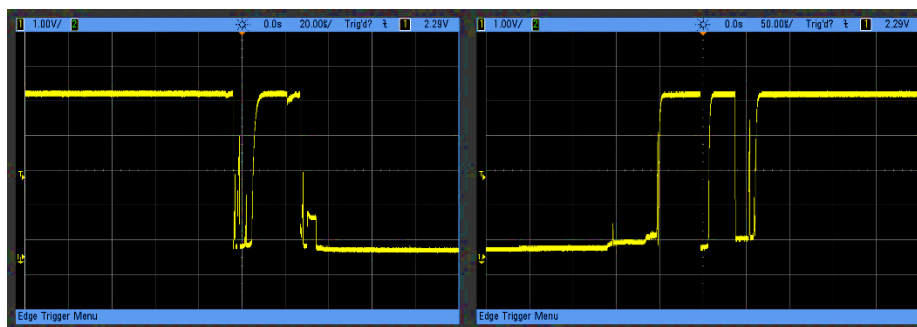


Obrázek 33 - Piezo-elektrická 4 kHz siréna

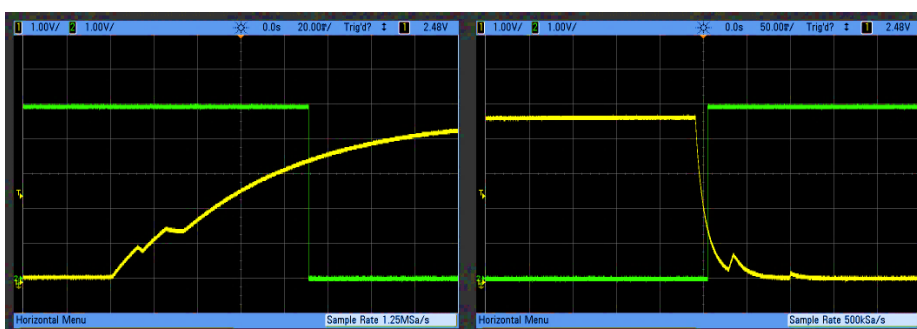
K ovládání systému zde slouží několik tlačítek, kdy každé z nich obsahuje pull-up tranzistor, který slouží k pevnému nastavení vypnutého stavu. Součástí je i jednoduchý RC filtr, který má za úkol zmírnění tzv. zákmitů tlačítek, které je způsobeno mechanickým spínáním.



Obrázek 34 - Zapojení tlačítek včetně pull-up rezistorů a RC filtru

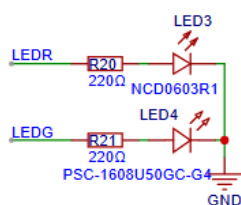


Obrázek 35 - Ukázka zákmitů tlačítek, při spínání, bez použití RC filtru [30]



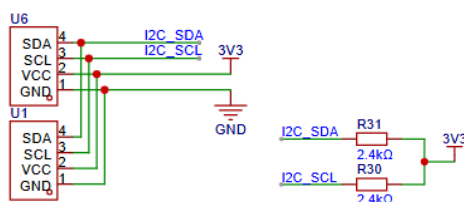
Obrázek 36 - Ukázka spínání tlačítek, s použitím RC filtru [30]

Pro indikaci jsou připojeny dvě LED diody, kdy jedna vyzařuje červené světlo a druhá zelené. Diody jsou ovládány pomocí pulzně šířkové modulace, což má za následek možnost lineárního nastavení požadovaného jasu. Interval pulzů je zvolen tak, aby lidské oko nezaznamenalo jednotlivé pulzy.



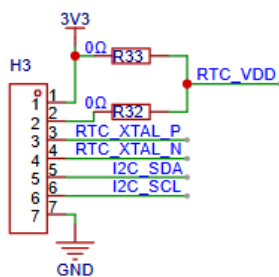
Obrázek 37 - Indikační LED diody

Poslední částí je připojení OLED monitoru pomocí I²C rozhraní. Součástí zapojení jsou i pull-up 2,4 k Ω rezistory, které tato komunikace vyžaduje.



Obrázek 38 - Napojení I2C rozhraní pro OLED monitor včetně pull-up rezistorů

K možnosti budoucího rozšíření a k možnosti externího napájení vnitřního RTC obvodu mikrokontroleru je vyveden rozšiřující GPIO header.



Obrázek 39 - Rozšiřující RTC header

4.4 Návrh a realizace SW

Software (firmware) zajišťuje funkčnost celého systému, koordinuje činnost hardwarových modulů a umožňuje komunikaci s okolím. V případě použité platformy ESP32 je firmware programován v jazyce C, využívající ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) s podporou real-time operačního systému FreeRTOS pro více vláknové zpracování.

Základní principy návrhu SW

- **Modulární architektura**

Oddělení jednotlivých funkčních celků (komunikace přes UART, LoRa, ovládání OLED, buzzer, tlačítka, ...).

- **Ošetření chyb použitím ladících výpisů**
- **Použití struktury protokolů**

Pro přenos dat mezi moduly a zařízením (v tomto případě využití vlastního sériového protokolu s implementací kontrolního součtu typ CRC8).

- **Správa událostí a front**

FreeRTOS úlohy, semaforey a fronty pro zajištění bezpečného předávání dat mezi vlákny.

Firmware je navržen jako systém dvou rolí

- **GATE (brána)**

Centrální jednotka, která přijímá data od nadřazených uzlů (node) a předává je dál přes sériové rozhraní do např. Node-RED.

- **NODE (uzel)**

Koncová zařízení, která provádí měření (detektory) nebo komunikuje s bránou přes LoRa a dokážou reagovat na callbackové akce.

Volba výběru role se provádí nastavením definice `{4.1}` v hlavním souboru `main.c`.

```
» | #define GATE                                     {4.1}
   | // #define NODE
```

Struktura projektu

Projekt využívá standardizovaného rozložení složek, dle využitého ESP-IDF. Obsahuje složku `components/`, kde jsou umístěny veškeré vlastní knihovny (moduly) a ovladače k periferiím. Samotná složka knihovny obsahuje adresář s hlavičkovými soubory `include/`, `*.c` soubory a konfiguraci pro sestavení v souboru `CmakeLists.txt`.

Vlastní knihovny

Dle konceptu je pro každou periférii vytvořena vlastní knihovna s vlastními drivery.

1) Komunikace a paket (*ws_serial*, *ws_serial_packet*)

Zabývá se nastavením sériové komunikace UART, která slouží k propojení mezi centrálním zařízením (gate) a monitorovacím zařízením (Node-RED). Obsahuje definice parsování pro příchozí či odchozí rámce, sestavování paketů pro odesílání, kontrolu integrity dat pomocí CRC8 a samotné zpracování zpráv.

2) LoRa (*ws_lora*)

Implementuje komunikační zpracování v rámci LoRa modulu Ra-02. Obsahuje driver, který dokáže obsluhovat nastavení modulu, přepínat mezi režimy a odesílat nebo přijímat data. Nad tímto se pak nachází funkční části, které mají za úkol sestavení paketu, který obsahuje samotná data, vytvoření vlákna pro příjem, které naslouchá na rádiu, parsuje pakety a ukládá je do fronty. Dále vytváří samostatné vlákno, které má za úkol předávání dat registrované obslužné rutině.

3) OLED (*ws_oled*)

Obsahuje řízení pro OLED displej SSD1306, který využívá komunikačního rozhraní I²C. Funkce umožňují vykreslovat text z databáze symbolů, čísla, grafické symboly a chybová hlášení.

4) Tlačítka (*ws_buttons*)

Slouží k ovládání fyzických tlačítek. Definuje piny, včetně jejich nastavení a možností detekce různých režimů stisků (krátký, dlouhý, dvojitý, ...). Při stisku tlačítka vyvolá callback, který je předán do vyšších vrstev kódu. Pro zajištění bezchybného chodu, je použit oficiální Espressif externího ovladače pro tlačítka *iot_button* [31].

5) Buzzer (*ws_buzzer*)

Nastavuje řízení piezo bzučáku. V rámci inicializace probíhá nastavení volby parametrů tónu a nastavuje interní PWM generátor signálu.

6) Utility a inicializace GPIO pinů (*ws_utils*, *ws_board*)

Obsahuje pomocné funkce k usnadnění a zpřehlednění kódu. V rámci knihovny *ws_board* je možná konfigurace desky a všech použitých GPIO pinů pro jednotlivé moduly.

Komunikační protokol

Pro přenos dat mezi bránou a uzly je použit vlastní binární protokol, který se skládá z paketů (rámců) binárních dat. Sjednocuje přenos dat pro UART komunikaci a LoRa komunikaci mezi bránou a uzly. Logika zpráv (typy, adresování, kontrolní součet) je stejná na obou linkách. Liší se pouze v obsahu přenášené zprávy, kdy LoRa vždy přenáší obě adresy (GMAC i NMAC), zatímco UART použití obou adres vyžaduje pouze pro rámce typu CMD nebo DATA. Každá zpráva má pevnou strukturu polí a proměnných v rámci payloadu.

Formát rámce (paketu)

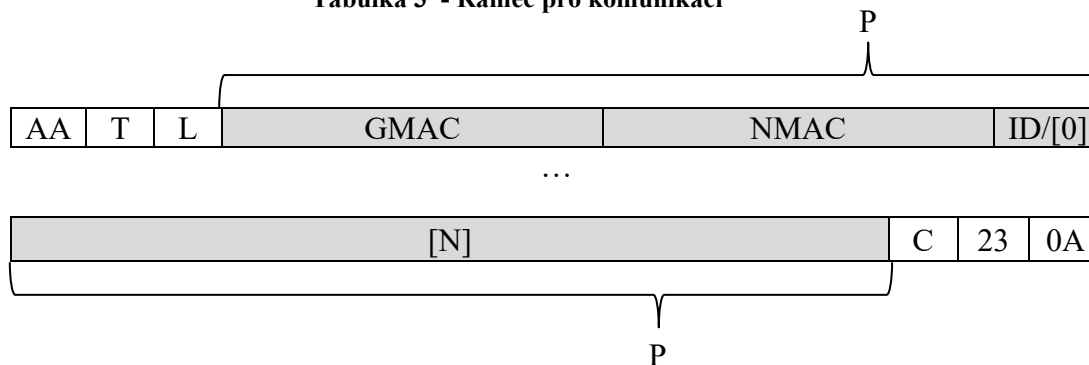
- **1B** – Hlavička paketu, která obsahuje vždy hodnotu $0xAA_{16}$
- **1B** – Označení typu paketu

Tabulka 2 - Možné typy paketu

HEX	Název	Funkce
01	AUTH	Autentizace pomocí sdíleného klíče
02	DATA	Aplikační vrstva, slouží k přenosu obecné informace
05	MAC	MAC adresa, používá se při autentizaci uzlu
06	CMD	Příkaz (1B + volitelná data)
07	WELCOME	Úvodní typ, který je poslán při startu UART
FE	ACK	Potvrzení přijetí
FF	NACK	Zamítnutí / odmítnutí zprávy

- **1B** – Délka obsahu dat v bajtech
- **0–n B** – Payload (data) v závislosti na vybraném typu
- **1B** – CRC8 (typ||délka||payload)
- **1B** – Ukončovací byte END0 (, # ' / $0x23_{16}$)
- **1B** – Ukončovací byte END1 (, \n ' / $0x0A_{16}$)

Tabulka 3 - Rámec pro komunikaci



Celkový overhead se skládá z 6 bajtů (hlavička + typ + CRC + END0 + END1) s maximální velikostí rámce 255 bajtů, což představuje přibližně 237 bajtů užitečných dat.

Kontrolní součet CRC8

Použitým algoritmem je CRC8 (8bit) s polynomem $0x07_{16}$ a počáteční hodnotou 0. Vstupem pro výpočet jsou části hlavičky paketu (typ + délka) a data z payload. Implementace v rámci SW je využita interní funkce *esp_crc8_le* ESP-IDF.

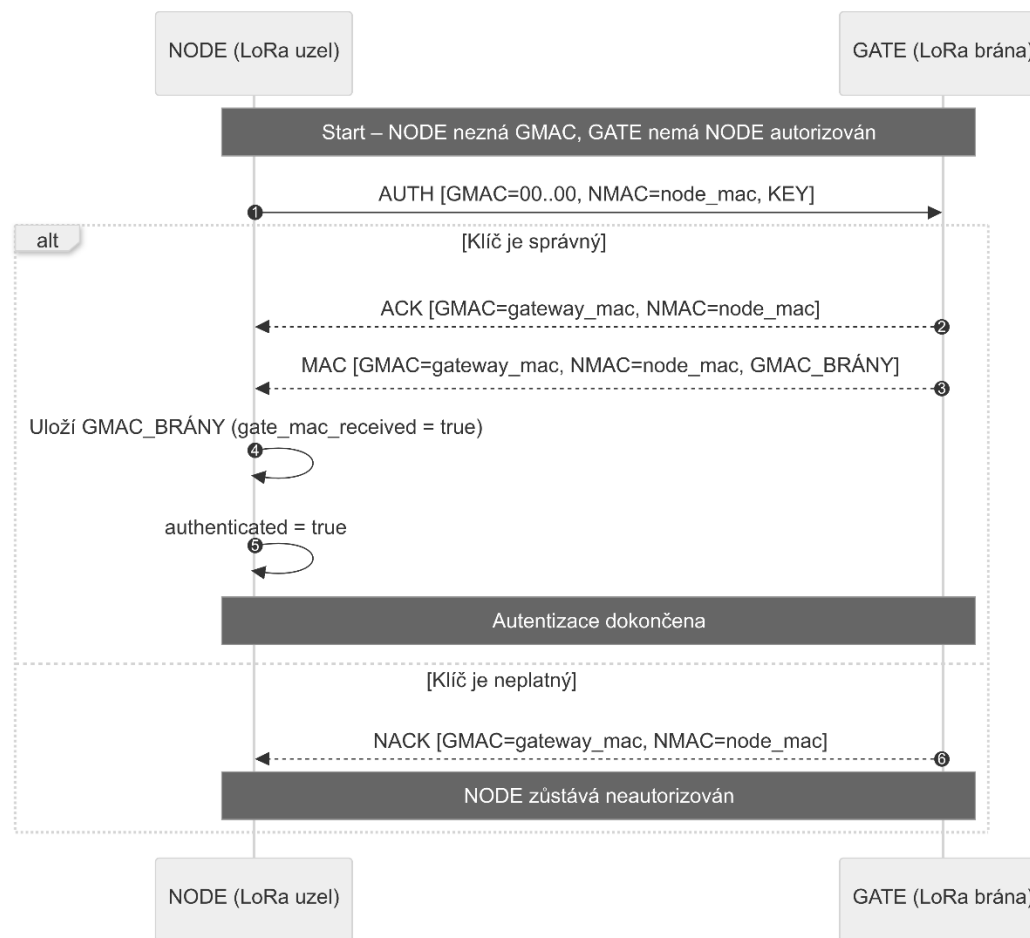
Adresování (GMAC, NMAC)

LoRa zprávy vždy obsahují na začátku payloadu dvojici 6 bajtů, určujících MAC adresy odesílatele a příjemce.

- **GMAC** – Označuje MAC adresu brány
- **NMAC** – Označuje MAC adresu uzlu

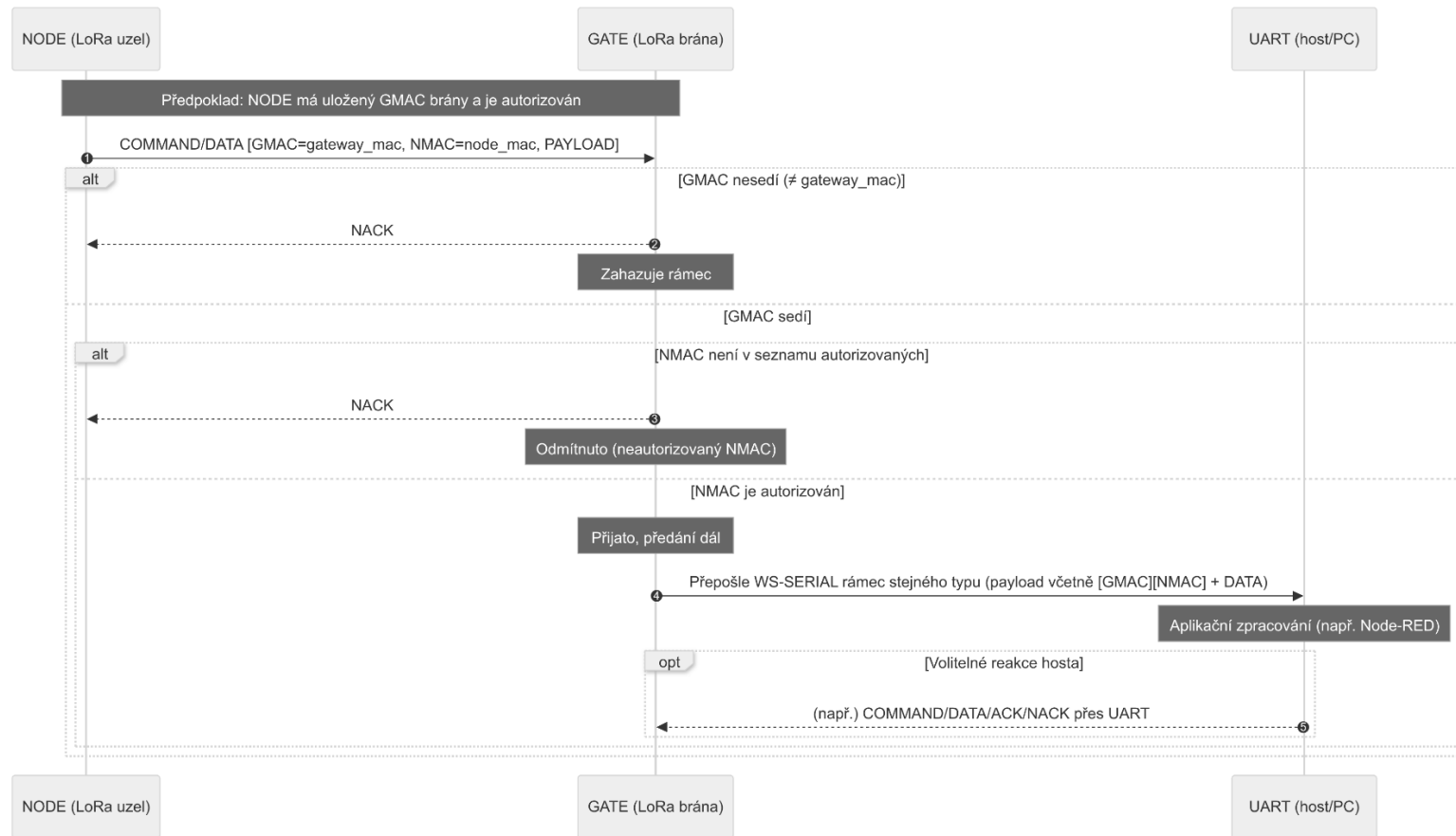
Pro UART zprávy je povinný obsah obou MAC adres pouze pro typy CMD a DATA. U ostatních typů není vyžadováno, z důvodu znalosti MAC adresy brány a uzlů, které jsou zjištěny při autorizaci.

Stavový diagram komunikace



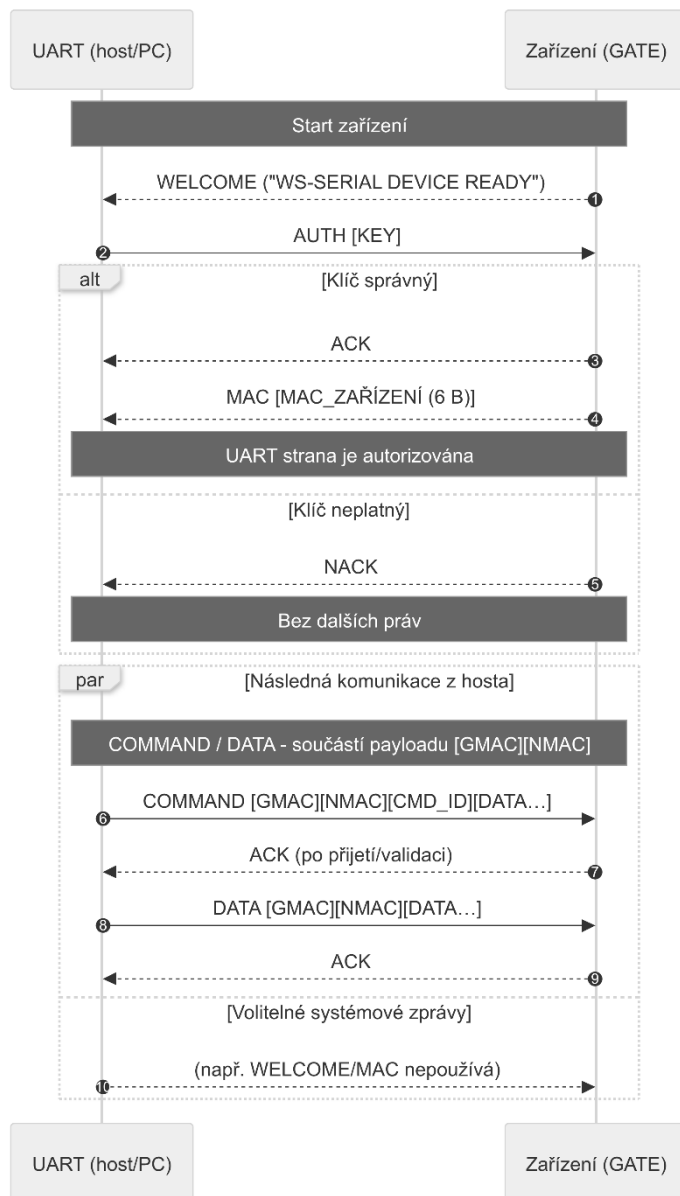
Obrázek 40 - Stavový digram komunikace mezi branou a uzly

Stavový digram komunikace



Obrázek 41 - Stavový diagram celkové komunikace

Stavový diagram komunikace



Obrázek 42 - Stavový diagram autentizace UART a brány a následná komunikace

Každý připojený a autorizovaný uzel, posílá každých 30 s PING zprávu na centrální jednotku. Ta získá údaj o rssi a pošle ACK zpět na uzel. Díky tomu je možné detekovat výpadek spojení infrastruktury a případně zareagovat na straně klienta nebo centrálního systému.

Frontendové řešení centrálního systému

Pro rychlou a snadnou ukázkou funkčnosti systému byl použit vizuální nástroj Node-RED pro propojení zařízení, API a služeb pomocí tzv. „flow-based programming“. Vývoj započal původně v týmu IBM, ale dnes se jedná o open-source projekt, který běží na Node.js.

Hlavní vlastnosti Node-RED

- **Grafické prostředí**

Skládání „bloků“ (nodes) a „toků“ (flows), které definují zpracování dat.

- **Rychlý prototyping**

Ideální pro IoT, integrace různých protokolů, API i databází.

- **Rozšiřitelnost**

Existují tisíce doplňkových modulů, mezi nejčastější patří např. modbus, mqtt, dashboard, seriál, http, ...

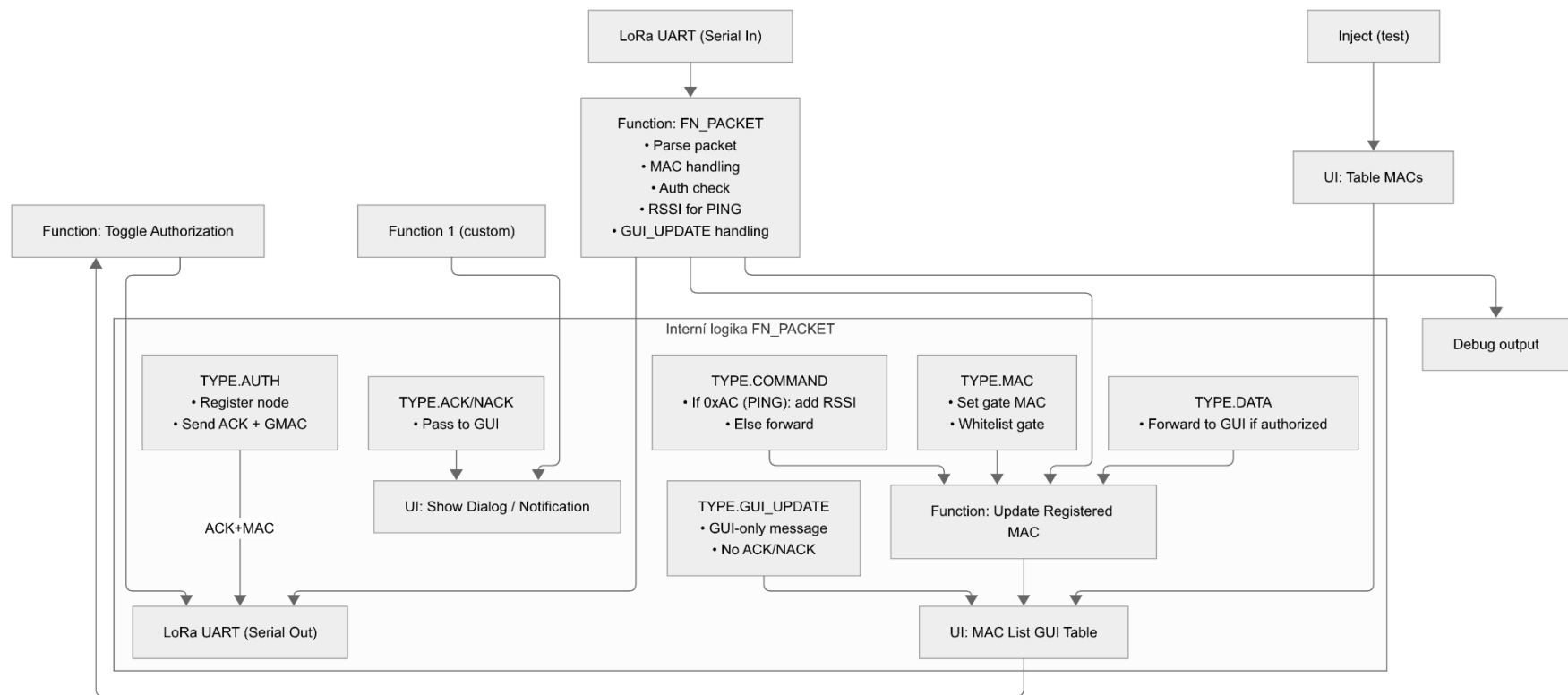
- **Event-driven**

Každý node reaguje na příchozí zprávy (*msg* objekty) a předává je dál.

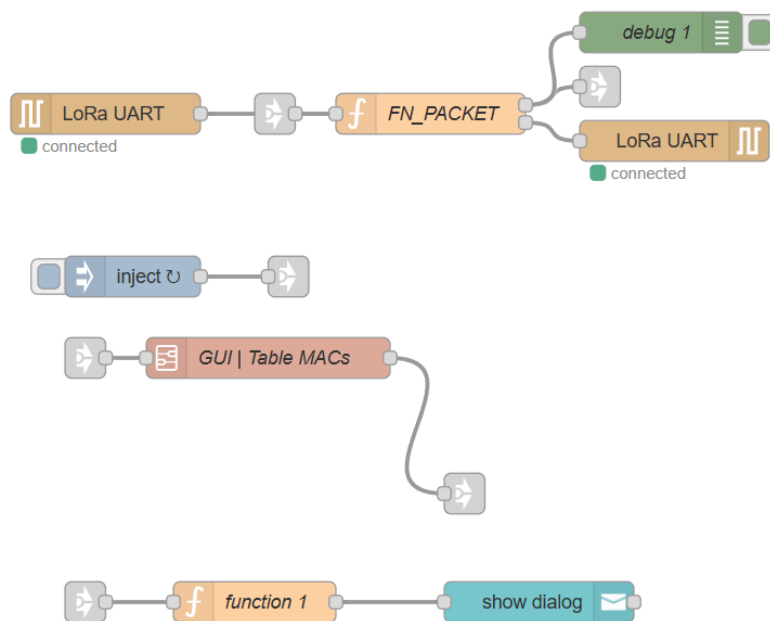
- **Persistovaný stav**

Data lze ukládat do *flow contextu* nebo *global contextu*. K tomu slouží funkce *flow.set()* nebo *global.set()*.

V rámci tohoto projektu implementace Node-RED slouží jako řídicí a monitorovací rozhraní pro LoRa gateway a nody. Komunikaci UART a zobrazování grafického výstupu pomocí dashboard, což umožňuje povolovat / zakazovat zařízení, připojená k bráně, a reagovat na události. Podstatnou funkcí je i parsování binárního protokolu, ukládání seznamu autorizovaných zařízení a funkční odpovídání ACK / NACK.



Obrázek 43 - Základní funkční diagram Node-RED komunikace



Obrázek 44 - Ukázka propojení nodů v Node-RED

Info				
Registered				
MAC	Status	Flags	RSSI	Last Seen
98:3d:ae:f0:1d:90	<input type="checkbox"/>	G		5:35:49 PM
98:3d:ae:f0:1d:94	<input checked="" type="checkbox"/>	N	-24	6:18:10 PM

Obrázek 45 - UI rozhraní Node-RED s možností povolení / zakázání kounikace se zařízením

4.5 Reálné testování funkčnosti systému

Po úspěšném dokončení návrhu HW a SW bylo provedeno reálné testování prototypu v terénu. Cílem bylo ověřit skutečné dosahy bezdrátové komunikace prostřednictvím technologie LoRa a posoudit vliv překážek (les, terén) na kvalitu signálu.

Metodika

Centrální jednotka byla umístěna na výchozím bodě *Start*. Nositelná jednotka pracovníka byla postupně přemísťována po vyznačené trase, kde byly definovány testovací body. V rámci testování byla naměřena teplota ovzduší okolo 23 °C a vlhkost vzduchu s hodnotou 56 %. Během měření každého bodu došlo k vyhodnocení několika parametrů.

- Možnost navázání spojení
- Kvalita signálu (RSSI)
- Poměr signál–šum (SNR)
- Stabilita přenosu paketu

Testování komunikace

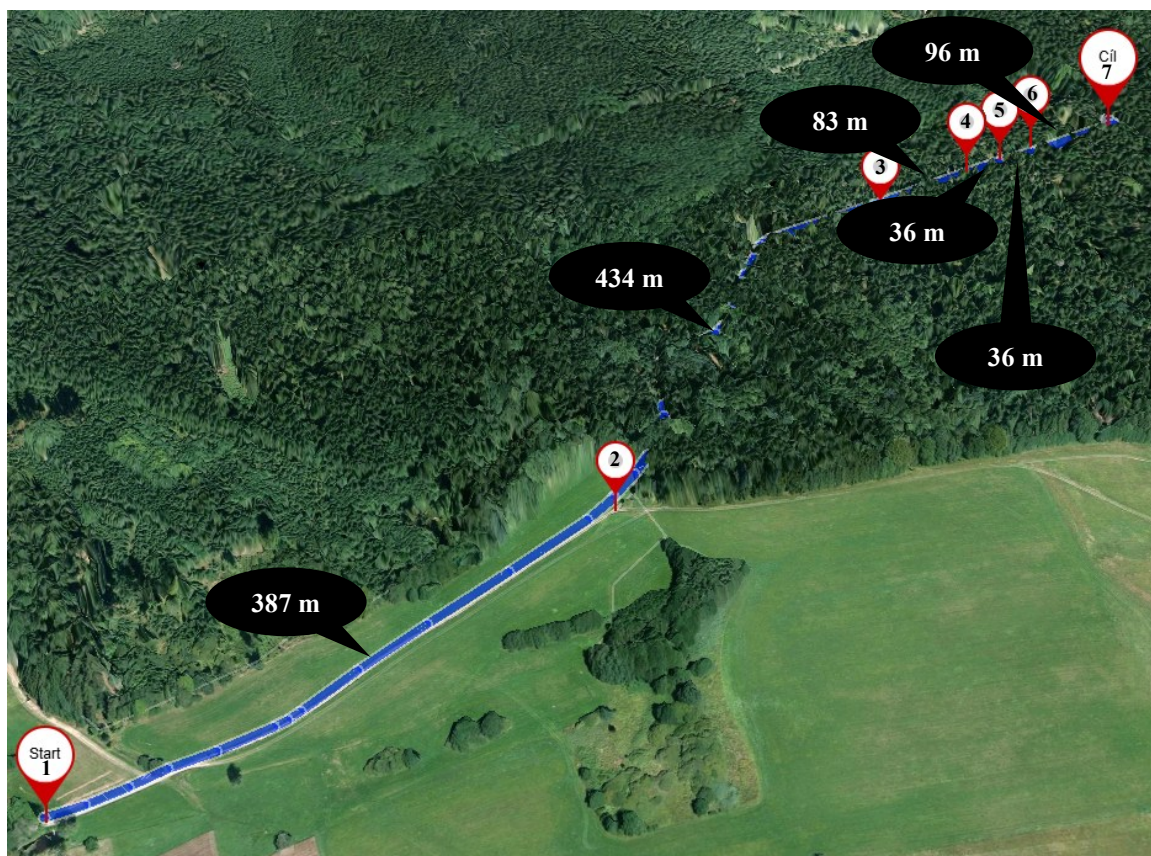
Celkové testy byly rozděleny na tři samostatné úseky.

- Otestování prvotní funkce komunikace v rámci přímé viditelnosti.



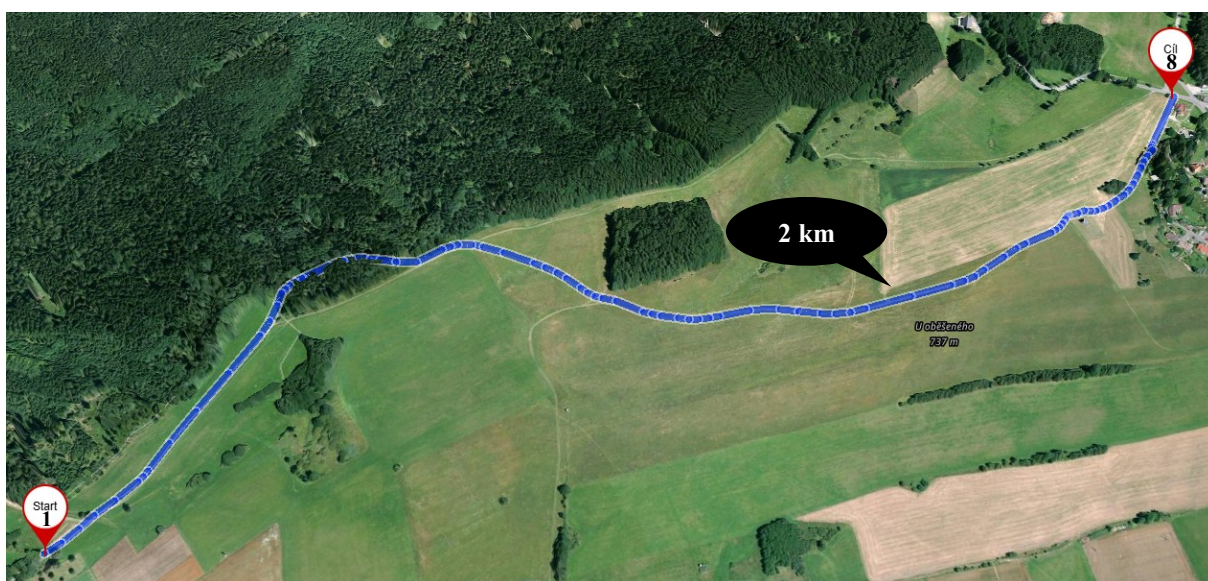
Obrázek 46 - Testování komunikace - Přímá viditelnost 387 m

- Test komunikace v lese.



Obrázek 47 - Testování komunikace - Trasa vedoucí lesem 1,1 km

- Otestování dostatečné vzdálenosti komunikace 2 km, na přímé viditelnosti.



Obrázek 48 - Testování komunikace - Přímá viditelnost 2 km s převýšením 32m

Výsledky testování

Prováděné testy jasně ukázaly rozdíl mezi šířením signálu v otevřeném prostředí a v prostředí s překážkami (les). V otevřeném terénu s přímou viditelností bylo dosaženo spolehlivého spojení na vzdálenost až 2 km, což plně pokrývá plánované použití systému. Naopak v hustém lese byla komunikace dosažena pouze do cca 1 km, kde již docházelo k častým výpadkům. Optimální vzdálenost v rámci terénu s překážkami je přibližně 904 m.

Tabulka 4 - Výsledky reálného testování komunikace

	RSSI	SNR	STABILITA	SPOJENÍ	KOMUNIKACE
TRASA A - B					
BOD 1 (START)	-	-	-	-	-
BOD 2 (387 M)	-72 dBm	9 dB	Stabilní	Bez výpadků	Vynikající
BOD 3 (821 M)	-85 dBm	6 dB	Stabilní	Bez výpadků	Dobrá
BOD 4 (904 M)	-92 dBm	4 dB	Dobrá	Občasné výpadky	Zpoždění paketů
BOD 5 (940 M)	-97 dBm	2 dB	Nízká	Časté výpadky	Opětovné navazování komunikace
BOD 6 (976 M)	-101 dBm	0,8 dB	Špatná	Stálé výpadky	Většina paketů nebyla doručena
BOD 7 (1,1 KM)	-110 dBm	0 dB	Žádná	Nenavázáno	Ztráta komunikace
TRASA C					
BOD 8 (2 KM)	-88 dBm	6 dB	Stabilní	Bez výpadků	Zpoždění paketů

Tyto výsledky potvrzují vhodnost technologie LoRa pro plánovanou aplikaci, přičemž je nutné brát v úvahu terénní překážky a tomu přizpůsobit rozmístění jednotlivých jednotek.

Závěr

V rámci této diplomové práce byl navržen a realizován funkční prototyp systému včasného varování pro pracovníky pohybující se na železniční trati. Hlavním cílem bylo vytvořit řešení, které dokáže včas a spolehlivě informovat o blížícím se vlaku bez ohledu na aktuální vizuální či akustické podmínky, a to s minimálními požadavky na stávající infrastrukturu a nízkou spotřebou energie.

Navržený systém využívá bezdrátovou technologii **LoRa** pro komunikaci na velké vzdálenosti s nízkým příkonem, mikrokontroler **ESP32-S3** jako výkonné a přitom úsporné řídicí jádro a **Raspberry Pi 5** jako centrální komunikační a řídicí jednotku. Byla provedena analýza dostupných komunikačních technologií, přičemž LoRa byla vybrána pro svou spolehlivost, dosah, nízkou spotřebu a nezávislost na provozovateli telekomunikačních sítí.

Na základě požadavků byly navrženy hardwarové bloky pro napájení, řízení periferií a signalizaci, a to včetně nabíjecího a ochranného obvodu baterie, vibrační signalizace, akustické výstrahy a OLED displeje pro zobrazení informací. Návrh desky plošných spojů byl zpracován v EDA nástroji, ověřen metodou DRC a následně realizován jako plně funkční prototyp.

V softwarové části byl vyvinut modulární firmware v jazyce C s využitím frameworku ESP-IDF a operačního systému FreeRTOS. Implementován byl vlastní binární komunikační protokol s kontrolním součtem CRC8 a mechanismem autentizace uzlů. Systém byl otestován v laboratorních podmínkách, ověřena stabilita přenosu, reakční doba na události a spolehlivost v různých režimech spotřeby energie. Centrální jednotka Raspberry Pi 5 byla vybavena uživatelským rozhraním v prostředí **Node-RED**, které umožňuje monitorovat stav uzlů, přijímat a vizualizovat data a vzdáleně ovládat výstražné jednotky.

Výsledky ukázaly, že systém splňuje požadavky na nízkou spotřebu (provoz na baterii v řádu dnů až týdnů), dlouhý dosah komunikace (řádově kilometry v závislosti na prostředí) a rychlou odezvu. Architektura je modulární a umožňuje snadnou adaptaci na jiné aplikace v oblasti bezpečnosti železniční dopravy.

Významnou předností použití mikrokontroleru ESP32-S3 je jeho **hardwarová podpora kryptografických algoritmů** (AES, SHA, RSA, ECC, RNG). Díky tomu lze do systému bez výrazného navýšení zátěže procesoru a spotřeby energie doplnit **AES (Advanced Encryption Standard)** pro šifrování přenášených dat a zajištění důvěrnosti komunikace mezi jednotlivými komponentami systému. To představuje zásadní krok k posílení odolnosti vůči neoprávněným zásahům, podvrženým zprávám a případnému odposlechu. V praxi by tak systém mohl být provozován i v prostředích, kde jsou zvýšené nároky na kybernetickou bezpečnost.

Do budoucna se nabízí následující směry rozvoje:

- **Rozšíření detekčních metod** – integrace GPS, vibračních, magnetických či akustických senzorů pro přesnější a spolehlivější detekci.
- **Pokročilé zpracování dat** – využití algoritmů strojového učení pro predikci pohybu vlaků a filtrování falešných poplachů.
- **Síťová škálovatelnost** – možnost tvorby rozsáhlejší sítě uzlů s automatickým směrováním zpráv a redundancí.
- **Bezpečnostní vrstva** – plná implementace AES šifrování, autentizace pomocí digitálních certifikátů a kontrola integrity zpráv.
- **Polní testování** – dlouhodobé nasazení v reálném provozu pro vyhodnocení spolehlivosti v různých klimatických a provozních podmínkách.

Navržený systém tak představuje flexibilní a efektivní řešení, které může výrazně přispět ke zvýšení bezpečnosti práce na železnici a být základem pro další inovace v oblasti inteligentních traťových zabezpečovacích systémů.

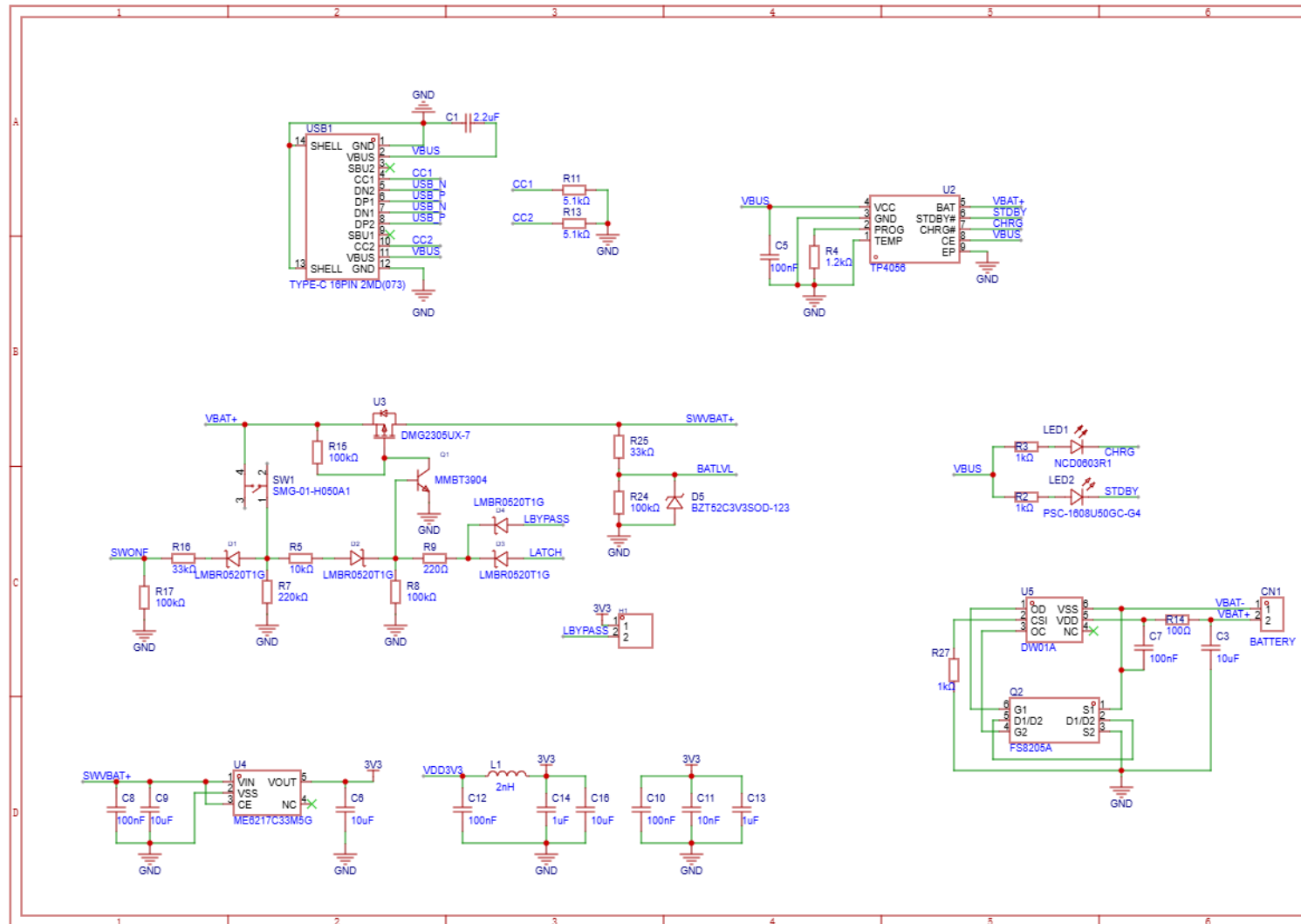
Literatura

- [1] PAVLAS, Jiří. *Zabezpečovací technika v dopravě*. Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-17-5.
- [2] HASSAN. European Train Control System. *Travel Pander* [online]. 2024, 2024-10-15 [cit. 2025-04-04]. Dostupné z: <https://travelpander.com/what-is-european-train-control-system/>
- [3] ETCS Levels and Modes. *Mobility and Transport - European Commission* [online]. [cit. 2025-04-04]. Dostupné z: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/etcs-levels-and-modes_en
- [4] GSM-R. *UIC* [online]. 2022, 2022-05-18 [cit. 2025-04-04]. Dostupné z: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/gsmr>
- [5] BRANDEJSKÝ, Tomáš a Vu T. DINH. *GSM-R and CDMA Network System for the Railway Industry* [online]. [cit. 2025-08-14]. Dostupné z: doi:10.5507/tots.2009.002
- [6] LTE for rail: Finding a successor to GSM-R. *Critical Communications Today* [online]. 2016, 2016-10-08 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://www.criticalcomms.com/content/features/lte-for-rail-finding-a-successor-to-gsm-r>
- [7] FRMCS. *UIC* [online]. 2023, 2023-09-19 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs>
- [8] Architecture 5G FRMCS. In: *NOKIA* [online]. [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://www.nokia.com/sites/default/files/2023-01/frmcs-end-to-end-arch.png>
- [9] RFID in Indian Railways. In: *Indian Railway* [online]. [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://rfid.indianrailways.gov.in/assets/dist/images/rfid-technology.jpg>
- [10] *Eurobalise - Český Brod* [online]. In: . [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Eurobalise_A%C5%BDD_-_%C4%8Cesk%C3%BD_Brod%2C_the_Czech_Republic_%282025%29.jpg
- [11] TURCK S.R.O. Sledování vagonů, nákladu a operací údržby. *Elektro Průmysl* [online]. 2023, 2023-06-20 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/sledovaci-a-databazovy-rfid-system-vilant>
- [12] RFID na kolejích. *SICK* [online]. 2020, 2020-11-16 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/sick-sensor-blog/rfid-na-kolejich/w/blog-rfid-railroads/>

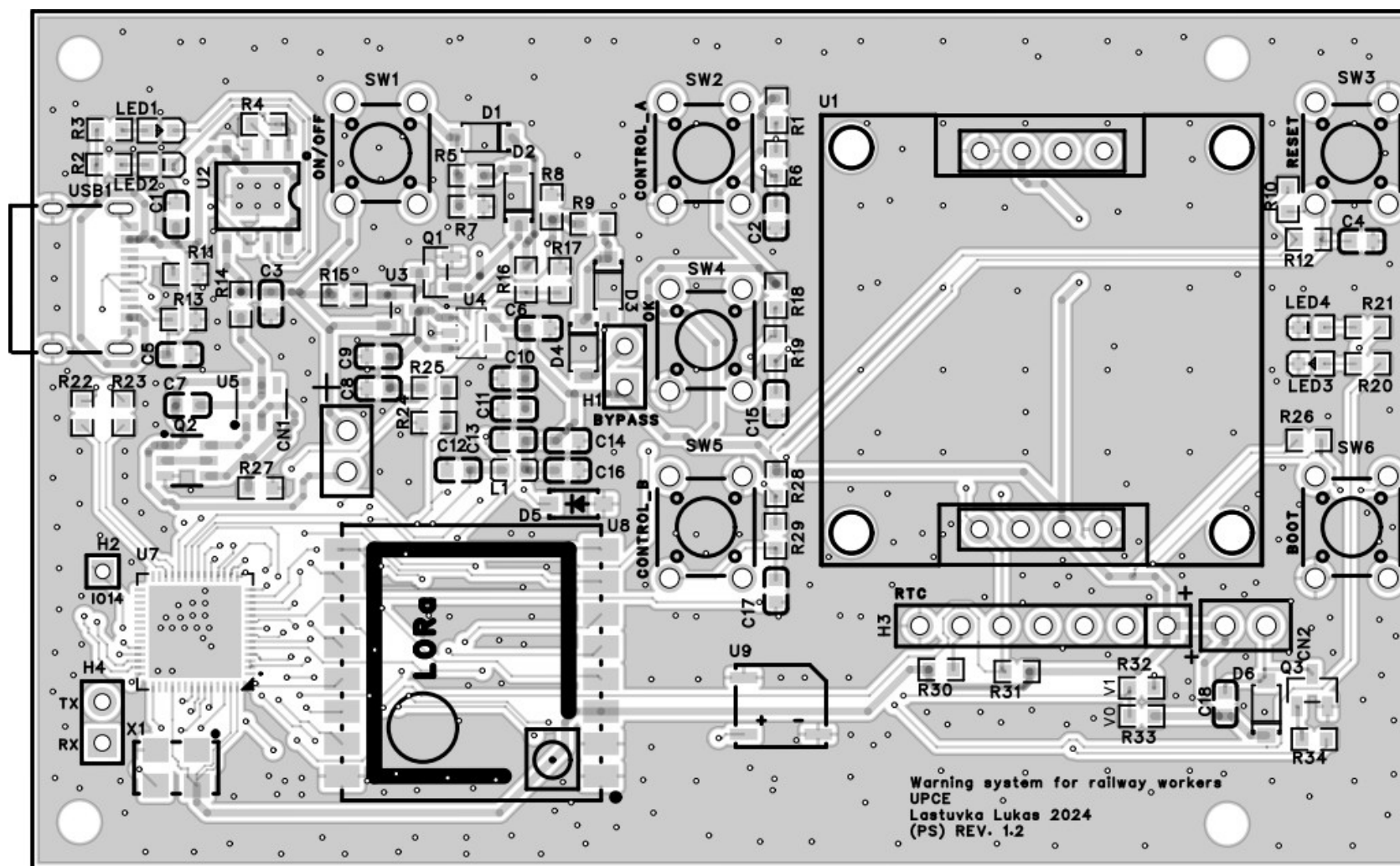
- [13] Nová řešení monitorování kolejových vozidel pro skupinu PKP. *ELTE Group* [online]. 2019 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://eltegroup.eu/cs/case-studies/nova-reseni-monitorovani-kolejovych-vozidel-pro-skupinu-pkp/>
- [14] *Reportér*. 2019.
- [15] Železničním neštěstím by mohly zabránit chytré senzory. *VUT* [online]. 2021, 2021-04-28 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vut/aktuality-f19528/zeleznicnim-nestestim-by-mohly-zabranit-chytre-senzory-cesti-vedci-je-otestuji-na-tchaj-wanu-d211956>
- [16] 3D detekce překážek na vlakových přejezdech. *Automatizace HW* [online]. 2020, 2020-10-06 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/3d-detekce-prekazek-na-vlakovych-prejezdech.html>
- [17] SIDAS. *CertiCon* [online]. 2016-10-01 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://www.certicon.cz/inovace-a-vyzkum/sidas/>
- [18] GHARAT, Vighnesh. BLE or Wi-Fi: what you need to know. *Ela Innovation* [online]. 2023, 2023-12-20 [cit. 2025-08-11]. Dostupné z: <https://elainnovation.com/en/ble-vs-wi-fi-what-you-need-to-know/>
- [19] Zigbee vs Thread: A Comparative Analysis of IoT Protocols. *RFWirelessWorld* [online]. [cit. 2025-08-11]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/zigbee-vs-thread>
- [20] LPWA network technologies and low-power standards. *I-SCOOP* [online]. [cit. 2025-08-11]. Dostupné z: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iot/lpwan/>
- [21] SOLÉ, Joan Miquel, Roger Pueyo CENTELLES, Felix FREITAG a Roc MESSEQUER. *Implementation of a LoRa Mesh Library* [online]. In: . s. 113158 - 113171 [cit. 2025-08-08]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2022.3217215
- [22] CHEN, Min, Yiming MIAO, Yixue HAO a Kai HWANG. Narrow Band Internet of Things. In: *IEEE Access* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017, s. 20557-20577 [cit. 2025-08-11]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/access.2017.2751586
- [23] KUNAVUT, Kunagorn. An Overview of Digital Trunked Radio: Technologies and Standards. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)* [online]. 2014, 2014-01-01, **10**(2), 111-121 [cit. 2025-08-11].
- [24] WANG, Jim. An introduction to wireless technologies in IoT- LPWAN. *Allion Labs* [online]. [cit. 2025-08-11]. Dostupné z: <https://www.allion.com/iot-lpwan/>

- [25] KANAGARAJ, bhuvaneshwari. WHAT HAPPENS IN LORA/LoRaWAN COMMUNICATION? *Medium* [online]. 2023, 2023-07-11 [cit. 2025-08-08]. Dostupné z: <https://medium.com/kgxperience/what-happens-in-lora-lorawan-communication-ab32d56dfc71>
- [26] LoRaWAN Regional Parameters. *LoRa Alliance* [online]. 2016 [cit. 2025-08-10]. Dostupné z: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1_0-20161012_1397_1.pdf
- [27] SX1278 Datasheet. *Semtech* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/2R0000001Rc1/QnUuV9TviODKUgt_rpBIPz.EZA_PNK7Rpi8HA5..Sbo
- [28] Technical Reference Manual for ESP32-S3. *Espressif* [online]. [cit. 2025-08-09]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf
- [29] Raspberry Pi 5, product brief. *Raspberry Pi Datasheets* [online]. 2025, 2025-01-01 [cit. 2025-08-09]. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi5/raspberry-pi-5-product-brief.pdf>
- [30] WILLIAMS, Elliot. Debounce Your Noisy Buttons. *Hackaday* [online]. 2015, 2015-12-09 [cit. 2025-08-13]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2015/12/09/embed-with-elliott-debounce-your-noisy-buttons-part-i/>
- [31] Button. *ESP IoT Solution* [online]. [cit. 2025-08-13]. Dostupné z: https://docs.espressif.com/projects/esp-iot-solution/en/latest/input_device/button.html

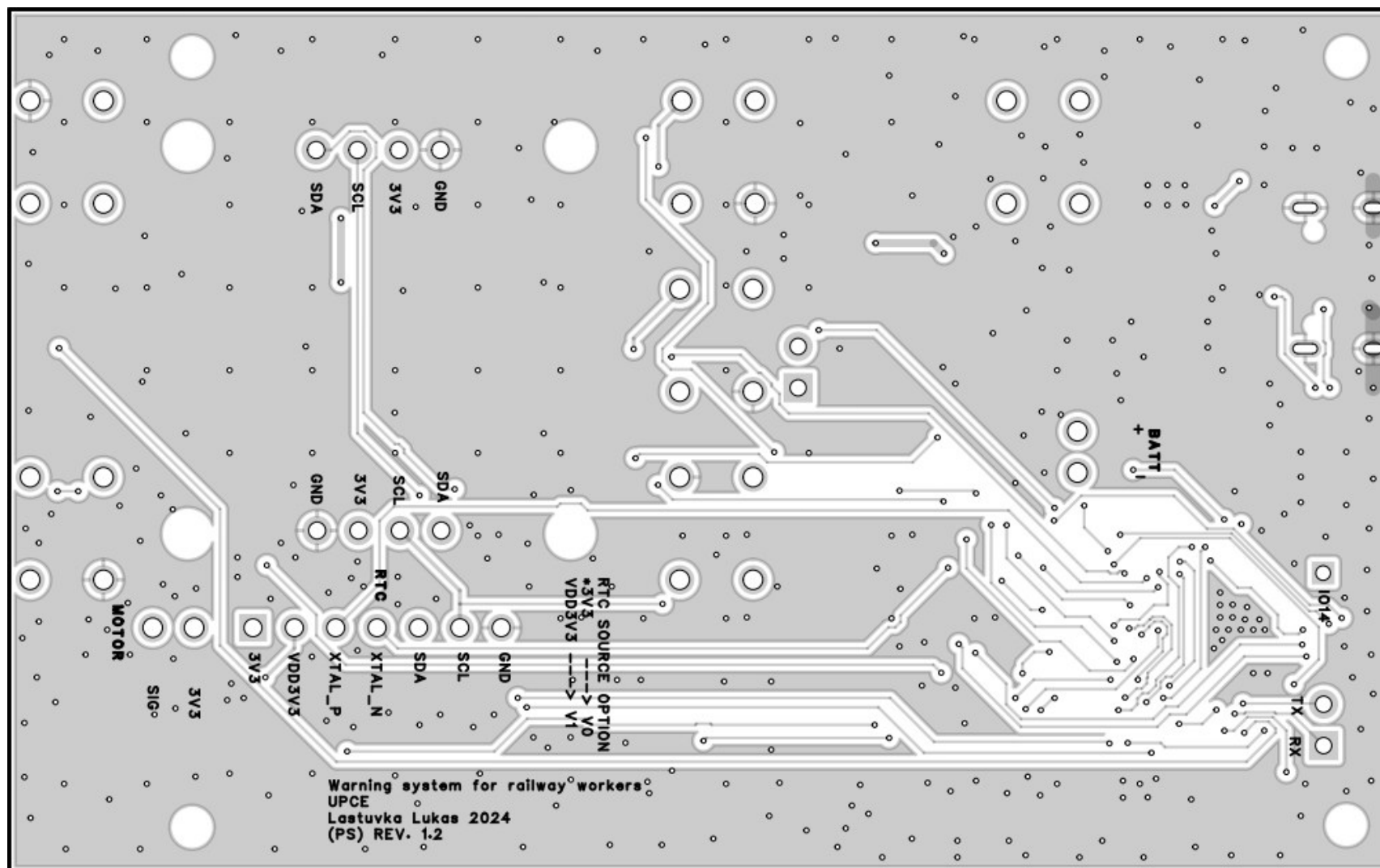
Příloha A – Schéma elektrického obvodu



Příloha B – Zapojení desky plošných spojů (Top Layer)



Příloha C - Zapojení desky plošných spojů (Bottom Layer)



Příloha E – Osazená vyrobená funkční prototypní deska



Příloha F – Kód projektu

[Příloha - Kod](#)