



SMART kolejnicový lepený izolovaný styk

FW10010065

Funkční vzorek

Vyhodnocovací a komunikační modul senzorického systému SMARTLIS

FW10010065-V3

ZPRÁVA O DOSAŽENÍ VÝSLEDKU

Autoři:

Ing. Ondřej Rubeš PhD

Ing. Jan Turčín PhD

Ing. Chalupa Jan

Ing. Černý Antonín

Ing. Hadraba Petr PhD

Lukáš Babic

Jiří Červinka

Ing. Ivo Stachiv PhD

V Brně dne 30.6.2026

1 Úvod

Tento dokument podrobně popisuje výsledek FW10010065-V3 s názvem „Vyhodnocovací a komunikační modul senzorického systému SMARTLIS“.

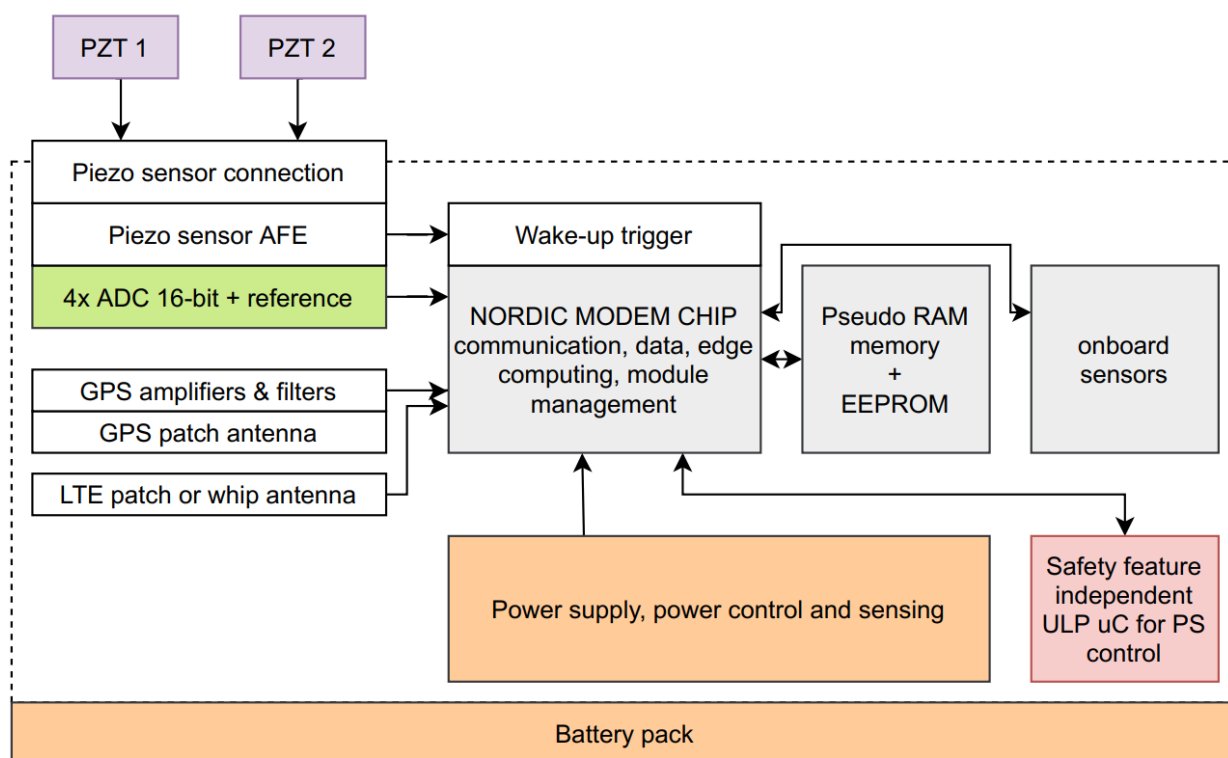
2 Obecný popis funkčního vzorku

Funkční vzorek FW10010065-V3 – Vyhodnocovací a komunikační modul senzorického systému SMARTLIS představuje autonomní elektronickou jednotku určenou pro sběr, zpracování a přenos dat získaných ze senzorického systému integrovaného do lepených izolovaných styků SMARTLIS. Hlavním účelem zařízení je digitalizace provozního chování lepeného izolovaného styku a zajištění podkladů pro kontinuální monitoring jeho technického stavu a implementaci metod prediktivní údržby.

Funkční vzorek je navržen jako nízkoenergetické IoT zařízení využívající princip edge computingu, kdy jsou naměřená data předzpracována a částečně vyhodnocena přímo v místě měření. Tento přístup umožňuje výrazně snížit objem přenášených dat, omezit energetickou náročnost systému a současně zachovat dostatečnou informační hodnotu pro další analýzy. Jednotka zpracovává signály z piezokompozitních MFC senzorů integrovaných do prototypů SMARTLIS a Ambulantní SMARTLIS a na základě vyvinutých algoritmů vyhodnocuje parametry související s mechanickým namáháním a stavem opotřebení lepeného izolovaného styku.

Součástí zařízení je bezdrátová komunikační infrastruktura umožňující přenos dat do cloudového prostředí, kde probíhá jejich další ukládání, analýza a vizualizace. Funkční vzorek dále zajišťuje lokalizaci zařízení, vzdálenou správu a podporu dlouhodobého autonomního provozu v podmínkách železniční infrastruktury. Vytvořené řešení představuje klíčový prvek celého systému SMARTLIS propojující fyzickou senzorku instalovanou na železniční trati s cloudovým řešením pro monitoring a prediktivní údržbu.

Blokové schéma funkčního vzorku je uvedeno na Obr. 1. Schéma zobrazuje základní architekturu zařízení a vzájemné vazby mezi jednotlivými hardwarovými a softwarovými komponentami. Zahrnuje senzorickou část pro snímání signálů z piezokompozitních MFC prvků, obvody pro zpracování a digitalizaci signálu, řídicí a vyhodnocovací jednotku realizující algoritmy edge computingu, komunikační rozhraní pro přenos dat do cloudového prostředí a napájecí subsystém. Jednotlivé komponenty funkčního vzorku a jejich funkcionalita jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.



Obr. 1 Blokové schéma funkčního vzorku

2.1 Piezo senzor AFE

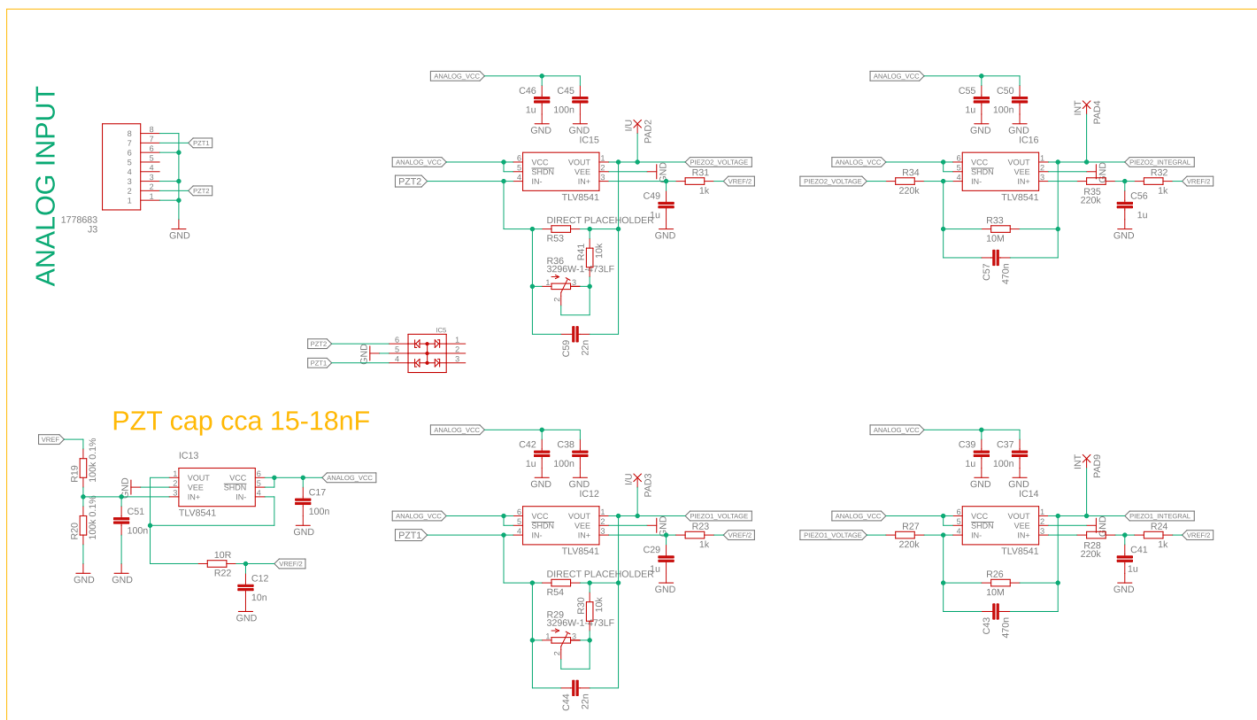
Piezo senzor AFE (Analog Front End) zajišťuje analogové přizpůsobení signálů generovaných piezoelektrickými MFC senzory. Jeho hlavní funkcí je převod elektrického náboje, resp. proudu vznikajícího při deformaci piezoelektrických prvků, na napěťové signály vhodné pro následnou digitalizaci a zpracování řídicí jednotkou. Blokové schéma analogového rozhraní je uvedeno na Obr. 2. Převod je realizován pomocí několika konfigurací operačních zesilovačů, které umožňují získat různé reprezentace měřeného signálu pro další analýzu.

Výstupní proud generovaný piezoelektrickými senzory je nejprve převáděn na napěťový signál, který je přiveden na vstup analogově-digitálního převodníku (ADC). Současně je tento signál integrován pomocí integračního článku, přičemž výstup integrátoru je rovněž digitalizován samostatným ADC kanálem. Tímto způsobem jsou získávány informace jak o okamžitých změnách deformace, tak o jejím dlouhodobějším průběhu.

Připojení senzorů k elektronice je realizováno prostřednictvím rozpojitelných pružinových svorkovnic, které umožňují jednoduchou instalaci, servisní zásahy i laboratorní testování jednotlivých konfigurací senzorického systému. Součástí analogového rozhraní je také obvod virtuální země, který vytváří referenční potenciál nezbytný pro správnou funkci operačních zesilovačů v systému využívajícím pouze jednodílné napájení. Toto řešení eliminuje potřebu symetrických napájecích zdrojů a přispívá ke snížení energetické náročnosti zařízení.

Mám k tomu obrázek Pro realizaci analogové části byly zvoleny ultra-nízkoenergetické operační zesilovače, jejichž celkový proudový odběr nepřesahuje 2,5 μA . Díky tomu má analogové rozhraní pouze minimální vliv na celkovou energetickou bilanci zařízení, což je klíčové pro dlouhodobý autonomní provoz funkčního vzorku napájeného z bateriového zdroje.

INPUT AFE



Obr. 2 Schéma piezo senzor AFE

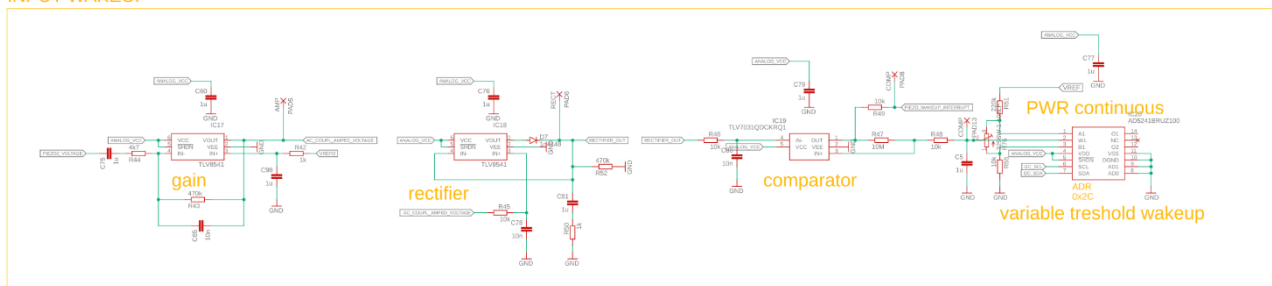
2.2 Wakeup Trigger

Wakeup Trigger představuje nízkoenergetický analogový detekční obvod určený pro automatickou detekci přijíždějících kolejových vozidel a aktivaci měřicí elektroniky pouze v okamžiku potřeby. Schéma detekčního obvodu je uvedeno na Obr. 3. Nasazení tohoto mechanismu významně přispívá ke snížení celkové spotřeby energie, protože většina elektroniky může zůstat v režimu s minimálním odběrem a aktivuje se pouze při detekci průjezdu vlaku.

Detekční obvod využívá signál z piezoelektrického senzoru PZT1, konkrétně napěťový výstup analogového rozhraní Piezo Sensor AFE. Vzhledem k rozdílnému technickému stavu železniční infrastruktury a různým úrovním vibrací generovaných přijíždějícími soupravami je detekční práh navržen jako dálkově nastavitelný parametr. Jeho změna je realizována pomocí digitálního potenciometru, který umožňuje optimalizovat citlivost detekce pro konkrétní lokalitu bez nutnosti fyzického zásahu do zařízení.

Analogová část obvodu se skládá ze zesilovače, přesného usměrňovače a komparátoru. Signál generovaný blížící se soupravou je nejprve zesílen, následně usměrněn a poté porovnán s nastavenou prahovou úrovní. V okamžiku překročení definované meze dojde ke změně stavu výstupu komparátoru, který generuje probouzecký signál pro mikrokontrolér a komunikační modem. Tím je zahájeno vlastní měření, ukládání dat a jejich následné zpracování.

Navržené řešení umožňuje spolehlivou detekci přijíždějících vlaků při minimální energetické náročnosti a současně poskytuje vysokou flexibilitu při přizpůsobení různým provozním podmínkám sledované železniční infrastruktury.



Obr. 3 Schéma wakeup trigger

2.3 ADC převodníky

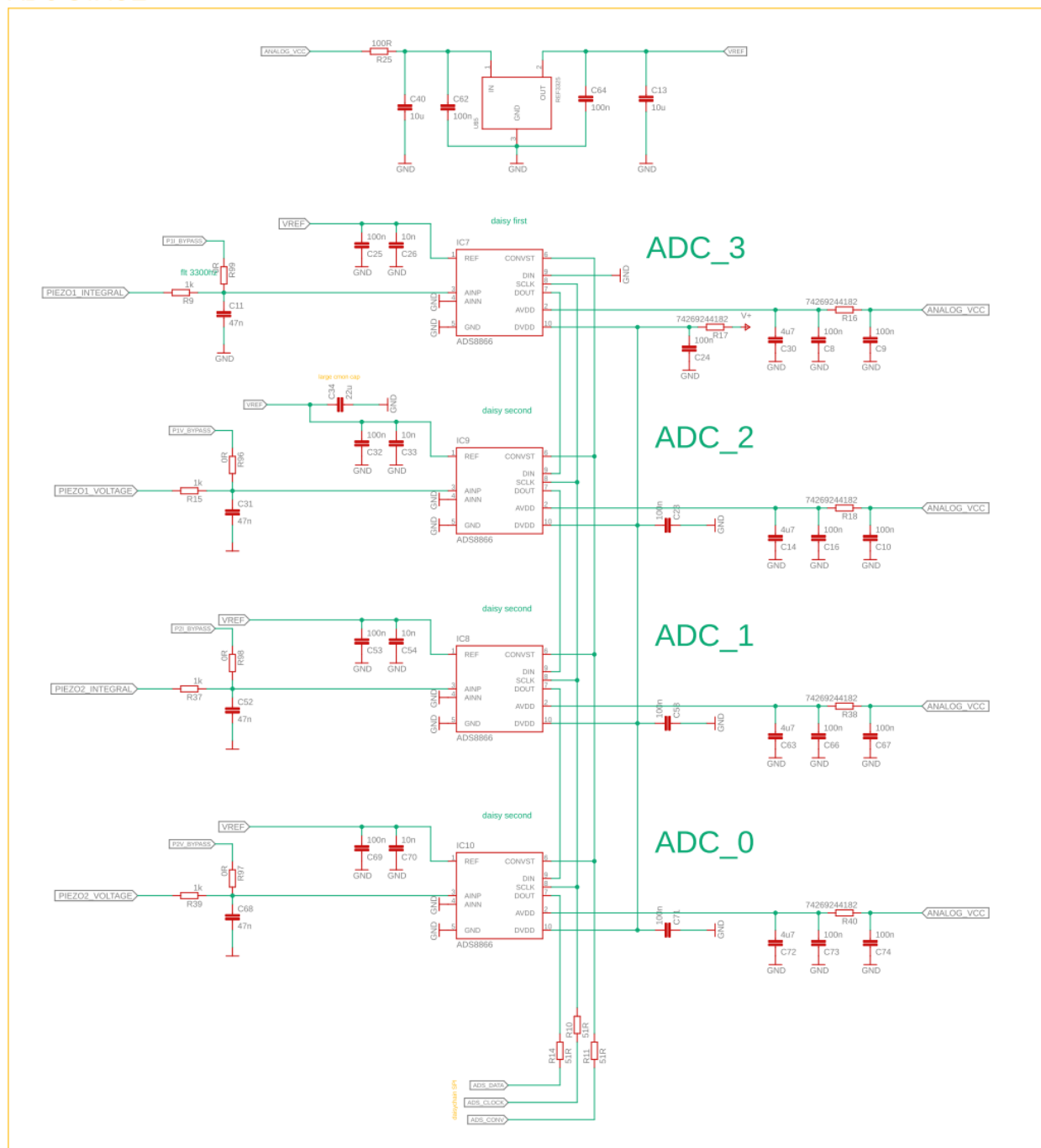
ADC převodníky zajišťují digitalizaci analogových signálů získaných z obvodů Piezo Sensor AFE. Schéma zapojení převodníků a jejich návaznost na ostatní části systému je uvedeno na Obr. X. Kvalita a rychlost digitalizace představují klíčový parametr celého měřicího řetězce, protože přímo ovlivňují přesnost následného vyhodnocení stavu monitorovaného lepeného izolovaného styku.

V průběhu vývoje byly ověřovány dvě varianty řešení. První z nich využívala integrované ADC převodníky komunikačního modulu, které byly nasazeny v prototypu Alfa. Toto řešení umožnilo rychlé ověření základních funkcionalit systému a realizaci prvních měření. Testování však ukázalo, že integrované převodníky narážejí při požadovaných měřicích úlohách na své limity, zejména z hlediska rychlosti vzorkování, přesnosti a možnosti současného snímání více vstupních kanálů. Toto chování odpovídá primárnímu určení použitého modemu, který je navržen především jako komunikační zařízení s doplňkovou podporou analogových vstupů, nikoliv jako specializovaný DSP systém pro sběr dat.

Integrované ADC převodníky jsou pro danou aplikaci použitelné zejména při využití oversamplingu a pro měření signálů s nižším frekvenčním obsahem, řádově do stovek hertzů. Pro potřeby pokročilejší analýzy dynamických jevů a přesnější charakterizace odezvy piezoelektrických senzorů však bylo navrženo řešení využívající externí ADC převodníky.

Externí převodníky představují technicky pokročilejší variantu, která umožňuje simultánní vzorkování více signálových kanálů, dosažení vyšších vzorkovacích frekvencí a zvýšení kvality digitalizovaných dat. Současně vykazují nižší energetickou náročnost při zachování požadovaných parametrů měření. Přestože toto řešení zvyšuje výrobní náklady zařízení, poskytuje výrazně kvalitnější datovou základnu pro algoritmy edge computingu a následné vyhodnocení stavu systému SMARTLIS. Proto bylo zvoleno jako preferované řešení pro finální podobu funkčního vzorku.

ADC STAGE



Obr. 4 Schéma ADC převodníků

2.4 Pseudo RAM

Pseudo RAM slouží jako rozšířená pracovní paměť určená pro ukládání surových měřených dat získaných během průjezdů vlaků. Její zapojení v architektuře zařízení je znázorněno na Obr. 5. Paměť poskytuje kapacitu 64 Mbit, která umožňuje ukládání rozsáhlejších časových průběhů signálů pro následné zpracování algoritmy edge computingu nebo jejich pozdější odeslání do cloudového prostředí.

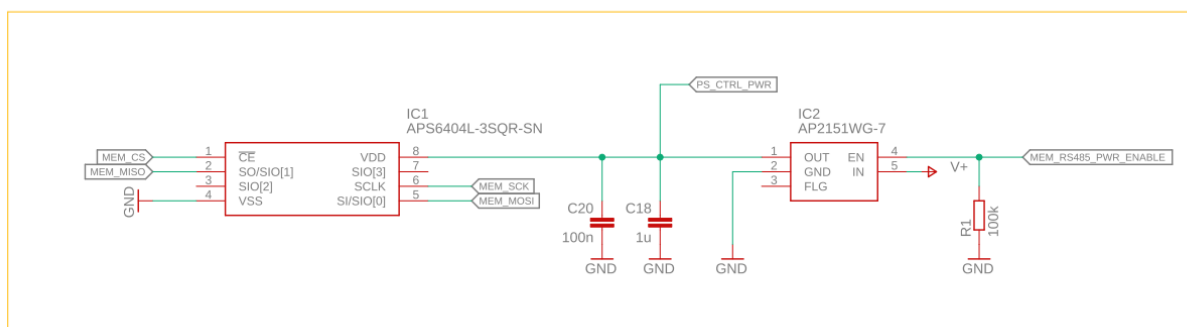
Hlavní výhodou použité paměti je možnost velmi rychlého zápisu dat bez významných latencí, které jsou typické například pro paměti typu Flash. Díky tomu je možné spolehlivě zaznamenávat

i rychlé změny měřených signálů při vyšších vzorkovacích frekvencích bez rizika ztráty dat. Další významnou vlastností je prakticky neomezený počet zápisových cyklů, což představuje zásadní výhodu oproti nevolatilním Flash pamětem, jejichž životnost je počtem zápisů omezená.

Paměť je z technologického hlediska založena na principu obdobném klasické operační paměti RAM. Pro zachování uloženého obsahu proto vyžaduje průběžné obnovování datových buněk, což vede k trvalému odběru energie i v obdobích, kdy neprobíhá vlastní zápis nebo čtení dat. Z tohoto důvodu byla do návrhu zařízení zahrnuta možnost řízeného odpojování napájení paměťového subsystému v režimech, kdy není rozšířená paměť využívána a je žádoucí maximalizovat energetickou efektivitu zařízení.

Nevýhodou použitého obvodu je absence specializovaných SPI příkazů umožňujících přechod do režimu hlubokého spánku (Power Down Mode). Energetické úspory jsou proto realizovány na úrovni napájecí infrastruktury zařízení, kdy je možné napájení paměti zcela odpojit a aktivovat pouze v okamžiku potřeby ukládání nebo zpracování většího objemu dat. Toto řešení umožňuje efektivně kombinovat výhody vysokorychlostního záznamu dat s požadavky na dlouhodobý bateriový provoz funkčního vzorku.

EXT PS RAM STORAGE



Obr. 5 Schéma zapojení pseudo RAM

2.5 GPS anténní obvod

GPS anténní obvod zajišťuje příjem, filtraci a zesílení signálů družicových navigačních systémů GNSS využívaných pro určování polohy zařízení a časovou synchronizaci systému. Schéma GPS přijímací části je uvedeno na Obr. 6. Návrh obvodu byl optimalizován s důrazem na dosažení dostatečné citlivosti přijímače při zachování minimální energetické náročnosti, která je klíčová pro dlouhodobý autonomní provoz zařízení.

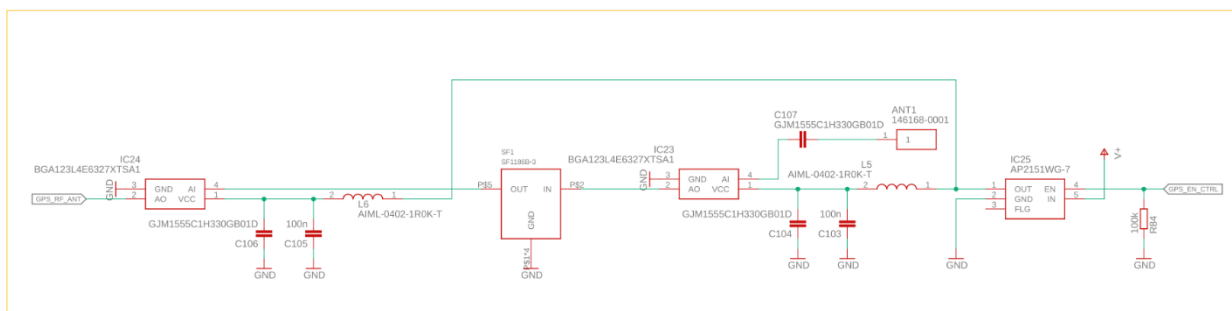
Pro zesílení přijímaného vysokofrekvenčního signálu byly použity ultra-low-power RF zesilovače, vybrané na základě porovnání parametrů dostupných komponent z hlediska zesílení, šumového čísla a spotřeby energie. Použité zesilovače patří mezi nejefektivnější komerčně dostupná řešení a poskytují velmi dobré radiofrekvenční parametry vzhledem ke své velikosti a použité výrobní technologii.

Součástí přijímacího řetězce je rovněž pasivní SAW filtr (Surface Acoustic Wave), který je určen přímo pro aplikace satelitní navigace. Tento filtr plní funkci pásmové propusti, která propouští pouze signály v požadovaném frekvenčním pásmu GNSS systémů a současně potlačuje nežádoucí signály mimo sledované spektrum. Tím dochází ke zvýšení odstupu signálu od šumu a ke zlepšení kvality přijímaných navigačních dat.

Jako přijímací anténa byla zvolena patch anténa s kruhovou polarizací a vysokým ziskem, která je vhodná pro příjem slabých signálů přicházejících z družic na oběžné dráze. Kombinace kvalitní antény, kaskády nízkošumových zesilovačů a selektivního SAW filtru vytváří přijímací řetězec schopný zajistit stabilní a spolehlivý příjem GNSS signálů i v náročných podmínkách železniční infrastruktury.

Výstupem GPS anténního obvodu jsou zesílené a filtrované vysokofrekvenční signály přivedené do GNSS přijímače integrovaného v komunikační části systému. Získané informace o poloze a přesném čase jsou následně využívány pro identifikaci instalovaného zařízení, synchronizaci měření a správnou časovou orientaci zaznamenaných událostí.

GPS AFE



Obr. 6 Schéma GPS

2.6 Onboard Sensors

Onboard Sensors představují skupinu pomocných senzorů a diagnostických obvodů integrovaných přímo na desce zařízení. Jejich zapojení v rámci systému je uvedeno na Obr. 7. Úkolem této části je poskytovat doplňující informace o stavu samotné jednotky i o podmínkách prostředí v místě instalace, které mohou významně ovlivňovat chování senzorického systému a kvalitu získávaných dat.

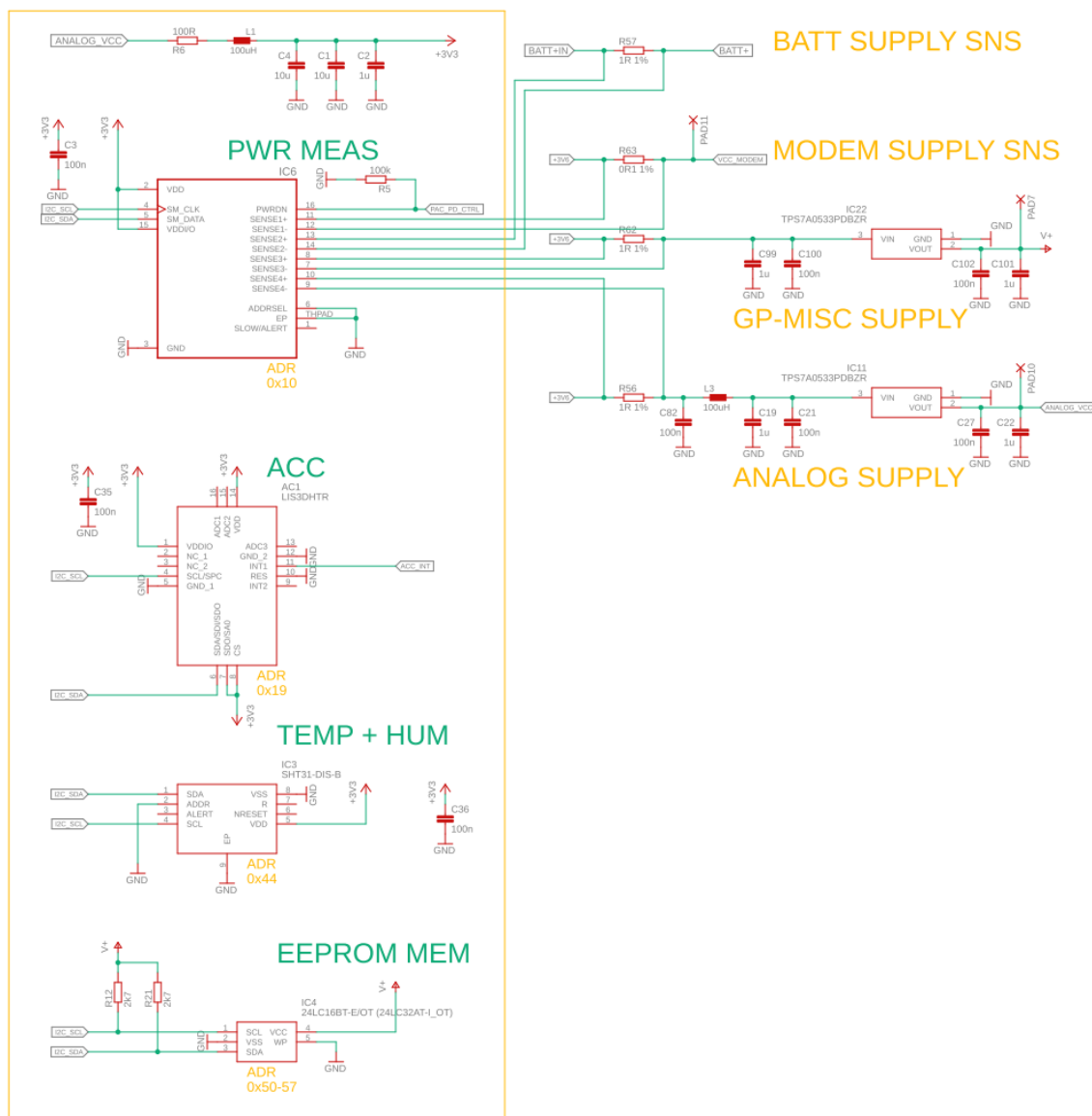
Součástí bloku jsou senzory teploty a relativní vlhkosti vzduchu, které umožňují dlouhodobě sledovat environmentální podmínky v místě instalace. Tyto informace mohou být využity jak pro diagnostiku zařízení, tak pro pozdější analýzu závislosti provozních dat na okolních podmínkách, jelikož vlastnosti železniční infrastruktury i elektroniky mohou být teplotou a vlhkostí významně ovlivněny.

Do systému byl dále integrován tříosý akcelerometr, který poskytuje možnost budoucího rozšíření diagnostických funkcí systému SMARTLIS. Akcelerometr může být využit například pro analýzu vibrací konstrukce nebo jako doplňkový zdroj dat při hodnocení stavu lepeného izolovaného styku. Současně slouží jako záložní mechanismus pro probuzení mikrokontroléru a může být použit také pro detekci neoprávněné manipulace se zařízením. Umožňuje tak identifikovat například servisní zásahy, chybnou manipulaci během údržby nebo případné projevy vandalismu.

Významnou součástí tohoto bloku je obvod pro monitorování napětí a proudů jednotlivých napájecích větví zařízení. Celkem jsou sledovány čtyři samostatné napájecí větve, což umožňuje detailní přehled o energetickém chování systému. Získaná data slouží pro diagnostiku správné funkce elektroniky, sledování energetické náročnosti jednotlivých subsystémů a identifikaci případných poruchových stavů. Tyto informace jsou rovněž důležitým podkladem pro optimalizaci spotřeby energie a odhad zbývajících životnosti bateriového napájení.

Součástí bloku je také nevolatilní paměť určená pro ukládání kalibračních konstant, servisních parametrů a individuální konfigurace zařízení. Díky tomu je možné uchovávat důležitá provozní nastavení nezávisle na napájení a zajistit jejich zachování po celou dobu životnosti zařízení.

SENSORS + MEM



Obr. 7 Schéma onboard senzorů

2.7 Modem s procesorem a jeho zapojení

Modem s procesorem tvoří hlavní výpočetní a komunikační část zařízení a zajišťuje řízení měřicího procesu, zpracování dat, obsluhu periférií i komunikaci s cloudovým prostředím. Schéma zapojení modemu a jeho podpůrných obvodů je uvedeno na Obr. 8. Použitý modem integruje většinu potřebných funkcí přímo ve svém pouzdře, čímž výrazně zjednodušuje návrh elektroniky a snižuje počet externích součástek.

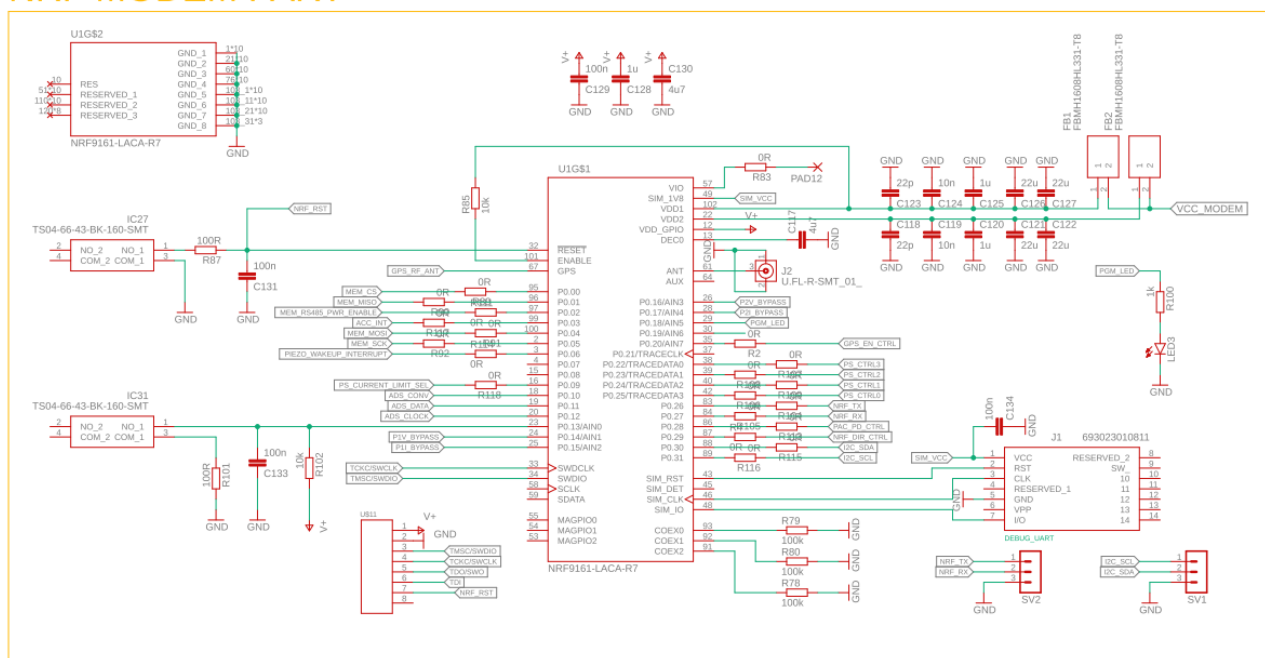
Z hlediska návrhu hardwaru je klíčové především správné blokování napájecích větví. Komunikační modul během přenosu dat generuje krátkodobé proudové špičky dosahující řádově stovek miliampérů a současně představuje významný zdroj vysokofrekvenčního elektromagnetického rušení. Napájecí infrastruktura je proto doplněna vhodně dimenzovanými

blokovacími a filtračními prvky, které zajišťují stabilní provoz modemu a minimalizují ovlivnění citlivých analogových částí zařízení.

Připojení jednotlivých signálových linek je realizováno prostřednictvím rezistorů s nulovou hodnotou odporu (0 Ω). Toto řešení významně usnadňuje vývoj, debugování a laboratorní testování zařízení, jelikož umožňuje jednoduché připojení měřicích sond, galvanické oddělení jednotlivých částí zapojení nebo realizaci konstrukčních úprav bez zásahu do desky plošných spojů. Vzhledem k předpokládanému dalšímu rozvoji a experimentálnímu využití systému SMARTLIS byly tyto prvky zachovány i ve finální verzi funkčního vzorku.

Komunikační modul je doplněn o slot pro SIM kartu, který umožňuje připojení do mobilních sítí využívaných pro přenos dat do cloudového prostředí. Pro účely vývoje, konfigurace a aktualizace firmware je zároveň integrován programovací a servisní konektor umožňující přímý přístup k zařízení během vývoje i servisních zásahů. Celá architektura modemu je navržena s důrazem na dlouhodobý autonomní provoz, vysokou spolehlivost komunikace a možnost budoucího rozšiřování funkcionality systému.

NRF MODEM PART



Obr. 8 Schéma zapojení modemu s procesorem

2.8 Napájení

Napájecí obvody zajišťují napájení všech subsystémů funkčního vzorku a byla navržena s důrazem na dosažení maximální energetické účinnosti při dlouhodobém bateriovém provozu. Schéma napájecí části je uvedeno na Obr. 9. Hlavní palubní napětí zařízení bylo zvoleno na úrovni 3,6 V, což poskytuje dostatečnou rezervu pro činnost lineárních regulátorů použitých v dalších částech elektroniky a současně odpovídá jmenovitému napětí použitých primárních článků.

Jádrum napájecí části je spínaný DC/DC měnič LTC3130 s topologií buck-boost, který byl zvolen zejména díky velmi nízkému klidovému odběru a vysoké účinnosti. Klidový proud měniče dosahuje přibližně 1,2 μ A a účinnost převodu může v závislosti na provozním režimu překračovat

95 %. Díky vysoké spínací frekvenci a možnosti optimalizace regulační smyčky pomocí kompenzačních členů je měnič schopen spolehlivě reagovat i na rychlé změny zatížení způsobené činností komunikačního modulu, přičemž dochází pouze k minimálním poklesům napájecího napětí.

Významnou vlastností použitého zdroje je možnost digitálního řízení provozních parametrů, zejména nastavení střední hodnoty proudu protékajícího výkonovou indukčností. Tím lze optimalizovat provoz zdroje podle aktuálního režimu zařízení a dále snižovat jeho energetickou náročnost. Vlastní modem obsahuje interní napěťové regulátory určené pro napájení jednotlivých částí integrovaného obvodu, což přispívá k dosažení vysoké účinnosti a stability napájení.

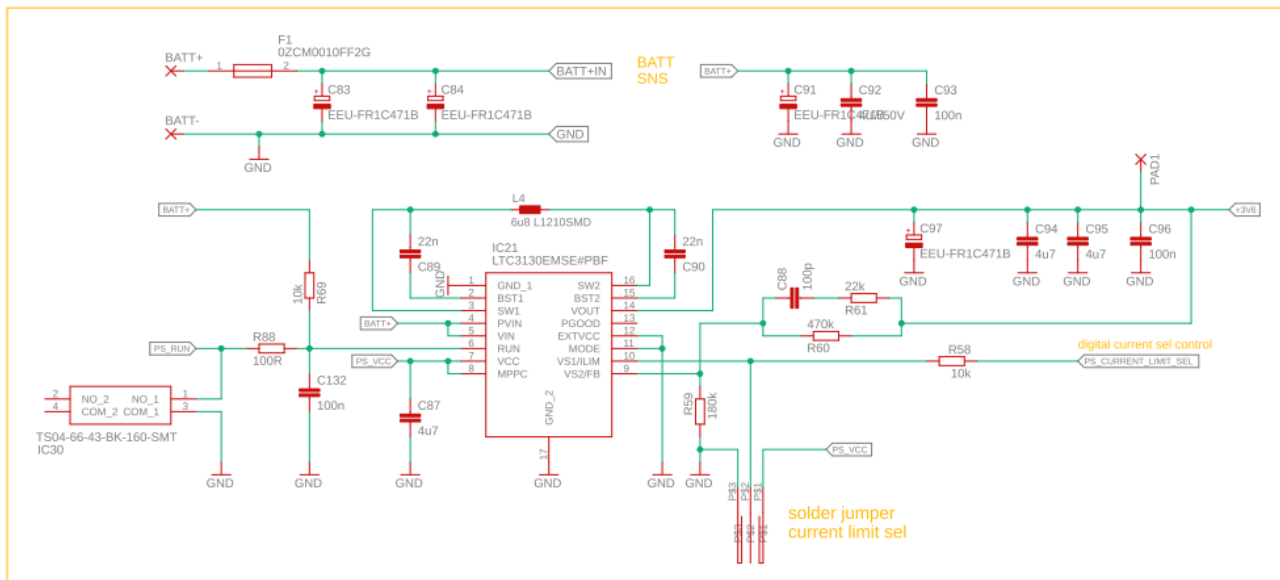
Pro pokrytí krátkodobých proudových špiček vznikajících během bezdrátového přenosu dat je napájecí systém doplněn elektrolytickými kondenzátory s dostatečnou kapacitou. Tyto zásobníky energie kompenzují zvýšenou impedanci baterií při nízkých teplotách i během pozdějších fází jejich životnosti, kdy dochází k postupnému nárůstu vnitřního odporu článků.

Jako primární zdroj energie byly zvoleny lithiové články SL-2870 společnosti Tadiran Batteries (Obr. 10). Použité baterie poskytují jmenovité napětí 3,6 V, kapacitu 8,5 Ah a jsou určeny pro dlouhodobý provoz v širokém teplotním rozsahu od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Konstrukce zařízení umožňuje osazení dvou až čtyř článků, přičemž lze využít sériové i sérioparalelní konfigurace podle požadované kapacity a předpokládané životnosti zařízení.

Použití více článků zapojených do série přináší několik výhod. Dochází ke snížení proudového zatížení jednotlivých článků, což vede ke zvýšení efektivně využitelné kapacity baterií. Současně je zachována dostatečná napěťová rezerva i při pokročilém stupni vybití, což umožňuje pokračování provozu elektroniky i při postupné degradaci článků. Měnič LTC3130 je schopen stabilizovat výstupní napětí i při poklesu vstupního napětí až na úroveň přibližně 2,4 V, což umožňuje velmi efektivní využití dostupné energie uložené v bateriích.

V závěrečných fázích životnosti baterií lze sice očekávat zvýšený vnitřní odpor článků a s tím související problémy při vysílacích špičkách komunikačního modulu, nicméně systém by i za těchto podmínek mohl nadále zajišťovat záznam a lokální zpracování dat. Tím by bylo možné zachovat základní funkčnost zařízení v režimu autonomního dataloggeru s podporou edge computingu. Tento provozní scénář však nebyl v rámci funkčního vzorku implementován a slouží pouze jako potenciální možnost dalšího rozvoje systému.

POWER SUPPLY



Obr. 9 Schéma napájení



Obr. 10 Použitá primární baterie

2.9 Nezávislý ULP kontrolní obvod

Nezávislý ULP (Ultra Low Power) kontrolní obvod slouží k zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení i v situacích, kdy dojde k neočekávanému selhání hlavního řídicího systému. Schéma zapojení kontrolního obvodu je uvedeno na Obr. 11. Hlavním účelem tohoto subsystému je detekce nedefinovaných stavů komunikačního modulu a provedení řízeného restartu zařízení prostřednictvím úplného odpojení a opětovného připojení napájení.

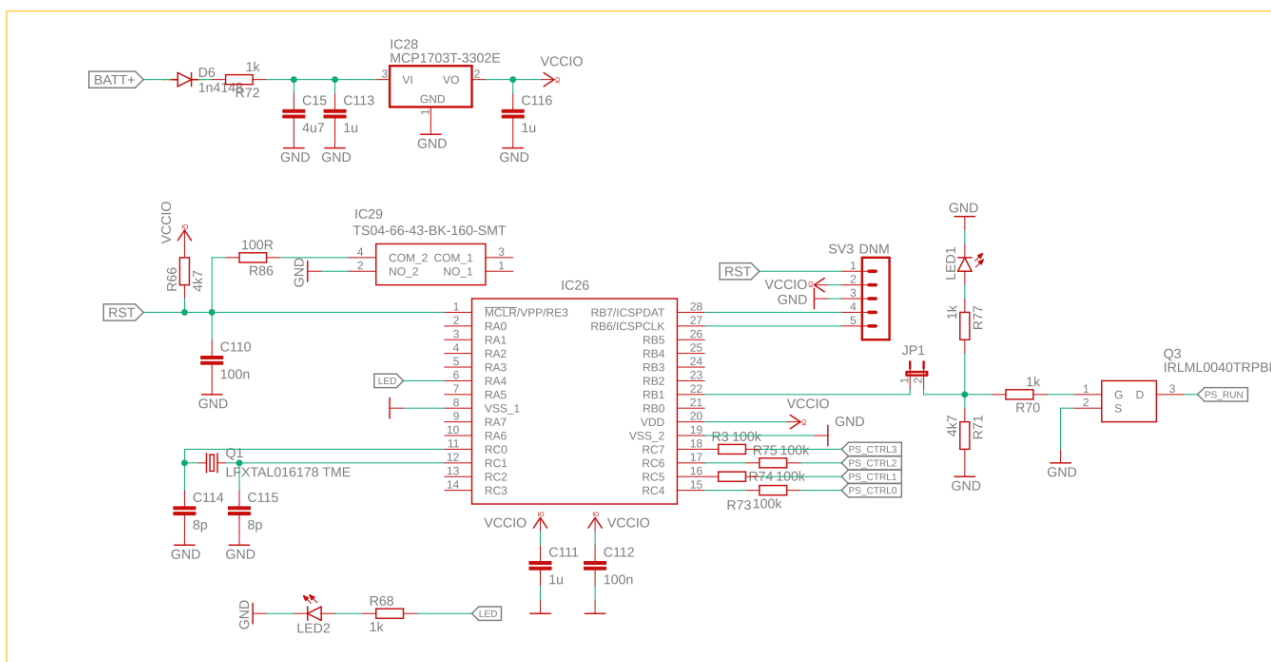
Během vývoje alfa verze zařízení byly zaznamenány případy, kdy se modem s integrovaným ARM procesorem dostal do stavů, které nebylo možné odstranit standardním watchdog resetem ani softwarovou inicializací. Obnova správné funkce byla možná pouze prostřednictvím úplného odpojení napájení a následného restartu systému. Z tohoto důvodu byl do finálního návrhu zařazen nezávislý dohledový obvod umožňující automatické provedení tzv. power-cyclingu. Tento postup je obecně doporučován i po programování některých ARM mikrokontrolérů a komunikačních modulů, kdy zajišťuje korektní inicializaci všech interních periférií.

Jádrem obvodu je mikrokontrolér PIC18F26Q10T-I, který pracuje zcela nezávisle na hlavním modemu. Komunikace mezi oběma procesory je realizována prostřednictvím čtyř signálových linek. Firmware pomocného mikrokontroléru je záměrně velmi jednoduchý a zaměřuje se výhradně na dohled nad definovanou sekvencí stavových signálů. Pokud se očekávané změny stavů přestanou objevovat, vyhodnotí kontrolér situaci jako potenciální poruchu.

V první fázi je hlavní modul upozorněn změnou logické úrovně na vyhrazeném signálu. Pokud modem na tuto událost nereaguje a dojde k překročení definovaného časového limitu, pomocný mikrokontrolér aktivuje tranzistor Q3, kterým na stanovenou dobu odstaví hlavní napájecí zdroj zařízení. Po uplynutí této doby je napájení opět obnoveno a modem provede kompletní restart do posledního funkčního režimu.

Návrh obvodu byl optimalizován z hlediska minimální energetické náročnosti. Dohledový mikrokontrolér pracuje na velmi nízké taktovací frekvenci a jeho vlastní proudový odběr se pohybuje přibližně v rozmezí 2–3 μA . Celý subsystém včetně podpůrných obvodů vykazuje příkon nepřesahující 48 μW při napájecím napětí 12 V. Díky tomu představuje energeticky zanedbatelnou část zařízení, přičemž významně zvyšuje jeho provozní spolehlivost a odolnost vůči neočekávaným poruchovým stavům.

ULP INDEPENDENT HARD PS ON/OFF FAULT CTRL



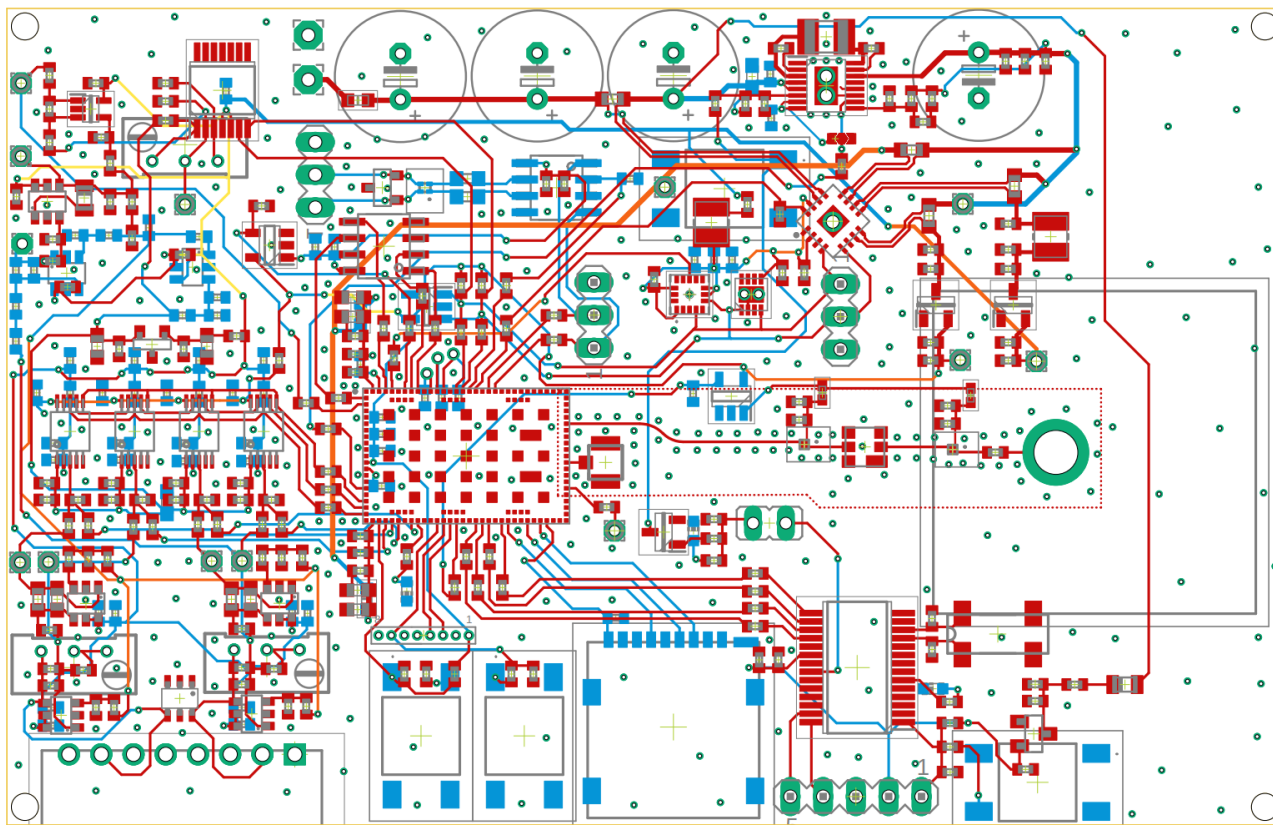
Obr. 11 Schéma kontrolního obvodu

3 Výroba hardwaru

Na základě návrhu jednotlivých funkčních bloků popsaných v předchozích kapitolách byla realizována návrhová a výrobní fáze hardwaru funkčního vzorku. Návrh elektroniky zahrnoval rozmístění součástek na desce plošných spojů, návrh napájecích a signálových propojení a optimalizaci jednotlivých částí s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu, energetickou účinnost a požadavky na zástavbu do konstrukce SMARTLIS.

Návrh plošného spoje probíhal iterativním způsobem, kdy docházelo k opakovanému přesouvání součástek a úpravám vedení spojů s cílem minimalizovat rušení mezi vysokofrekvenčními, analogovými a digitálními částmi systému. Zvláštní pozornost byla věnována návrhu vysokofrekvenčních cest používaných pro LTE-M komunikaci a GNSS příjem. Všechny RF části byly navrženy jako impedančně přizpůsobené vedení s charakteristickou impedancí $50\ \Omega$, čemuž bylo přizpůsobeno také vrstvení a materiálové složení desky plošných spojů.

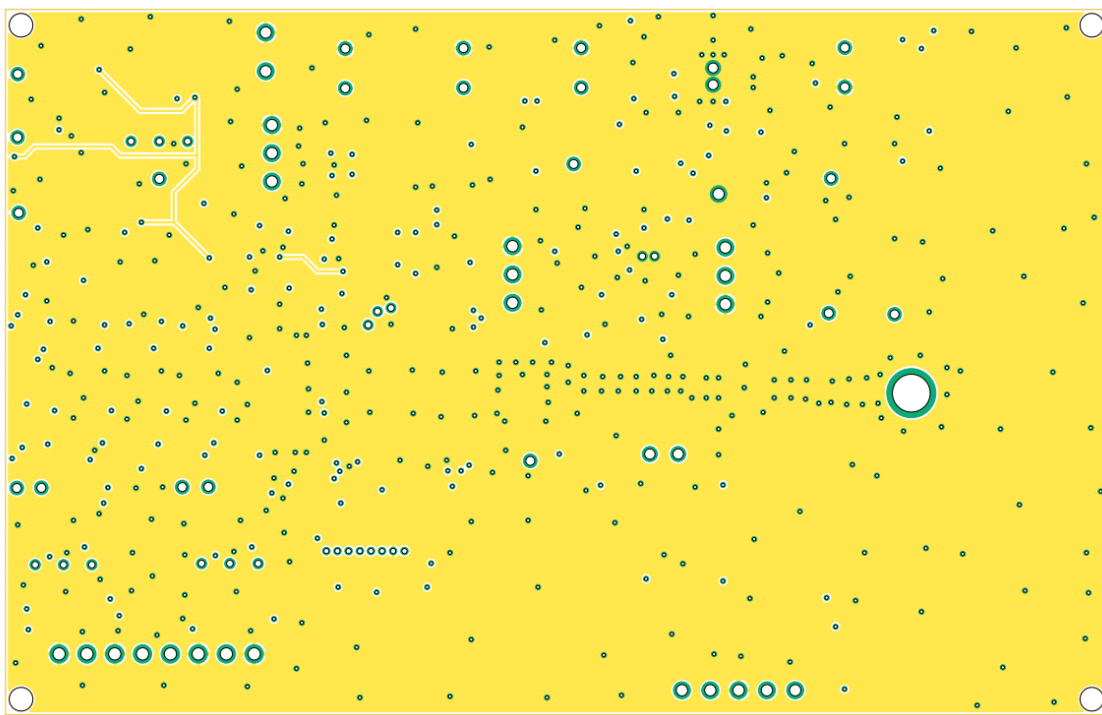
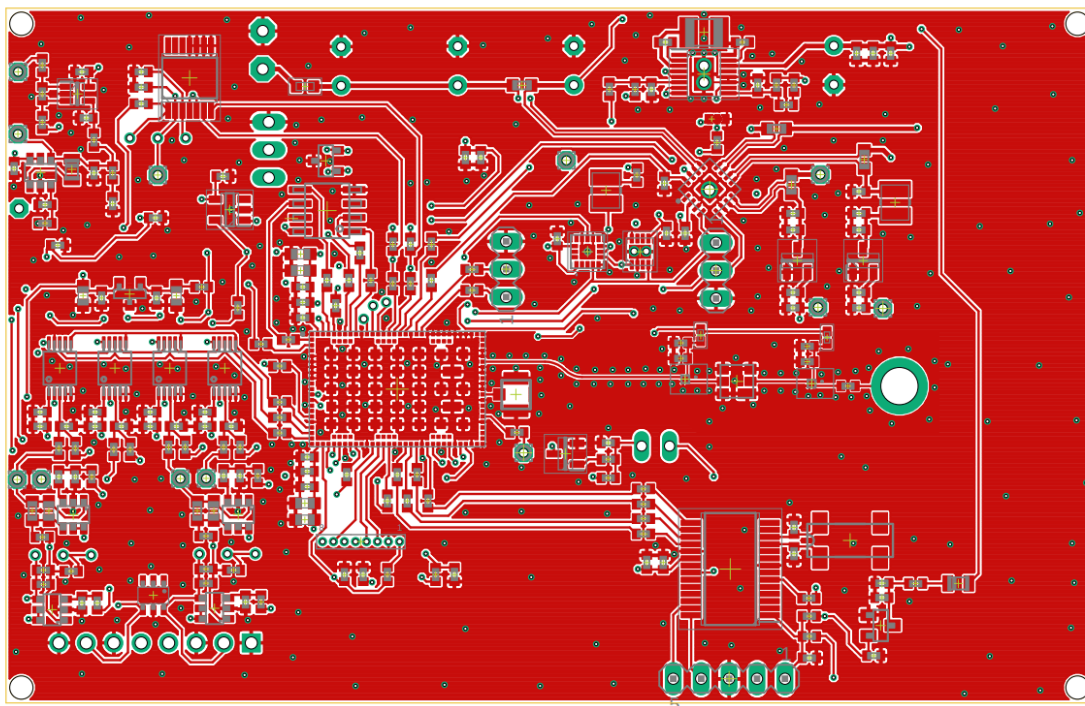
Pro realizaci byl zvolen čtyřvrstvý plošný spoj, který poskytuje dostatečný prostor pro oddělení napájecích, analogových, digitálních a vysokofrekvenčních částí zařízení. Průmět všech vrstev desky plošných spojů je uveden na Obr. X.

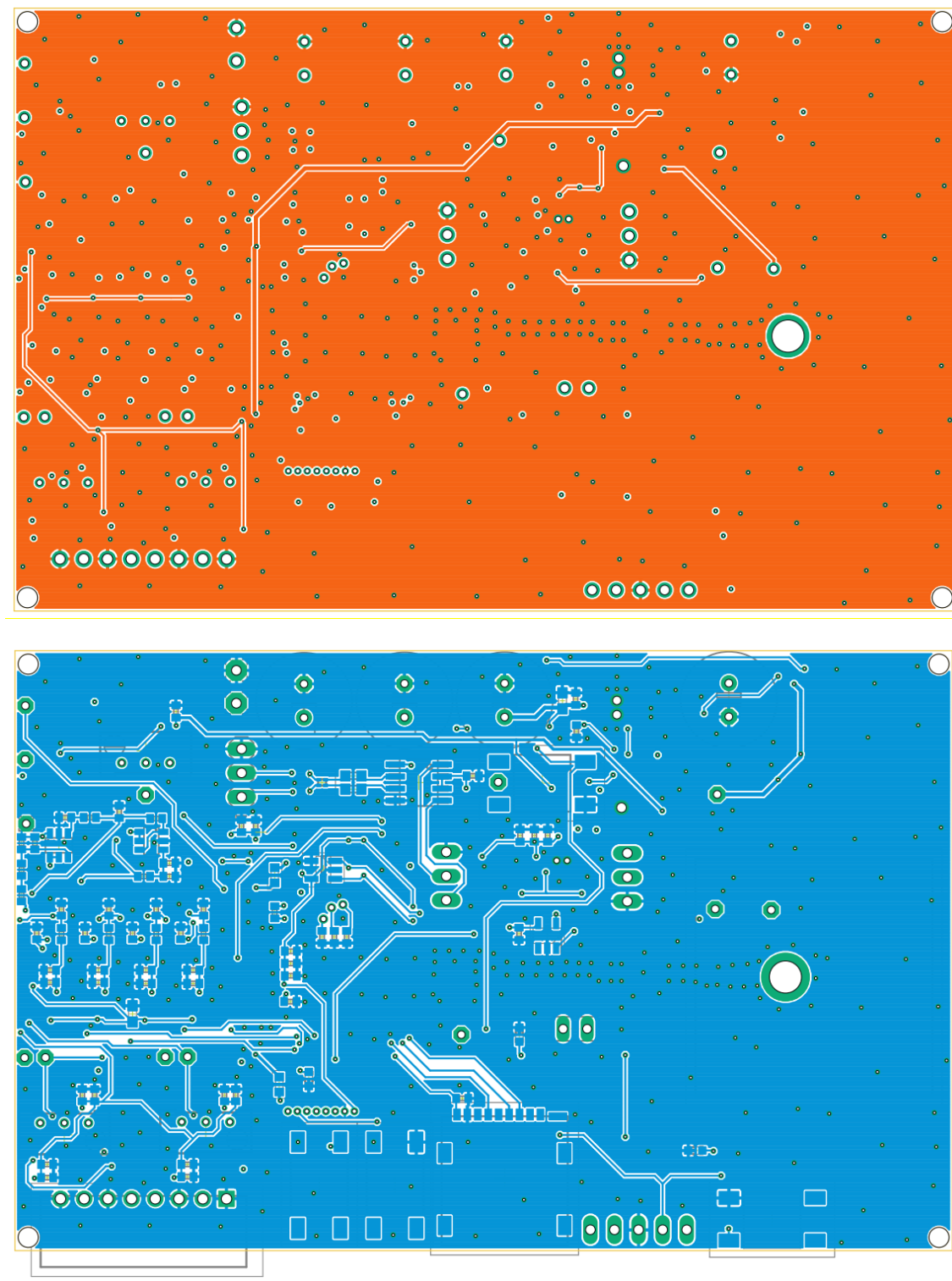


Obr. 12 Průmět všech vrstev navrženého plošného spoje.

Charakteristické rozměry výsledné desky plošných spojů jsou přibližně 99×63 mm. Celkově je plošný spoj osazen 312 elektronickými součástkami, které vytváří kompletní senzorickou, komunikační, výpočetní a napájecí infrastrukturu zařízení.

Rozložení jednotlivých vrstev plošného spoje je uvedeno na Obr. 13. Návrh jednotlivých vrstev respektuje požadavky na minimalizaci elektromagnetického rušení, správné vedení návratových proudů a zajištění kvalitní zemnicí roviny pro analogovou i RF část zařízení.

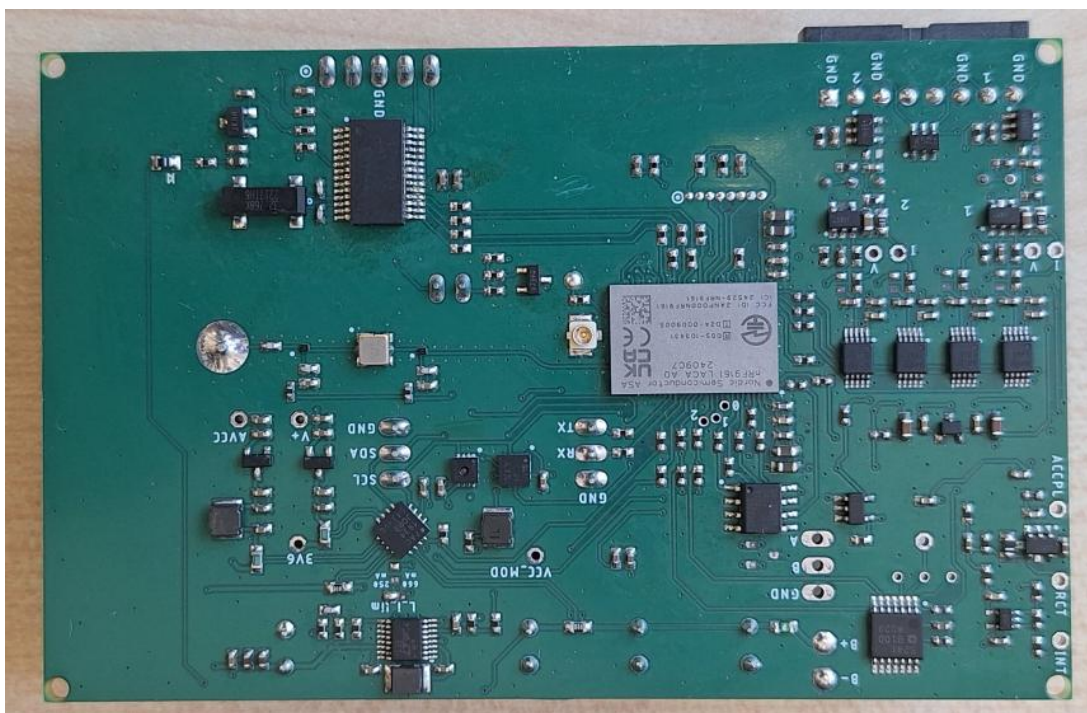




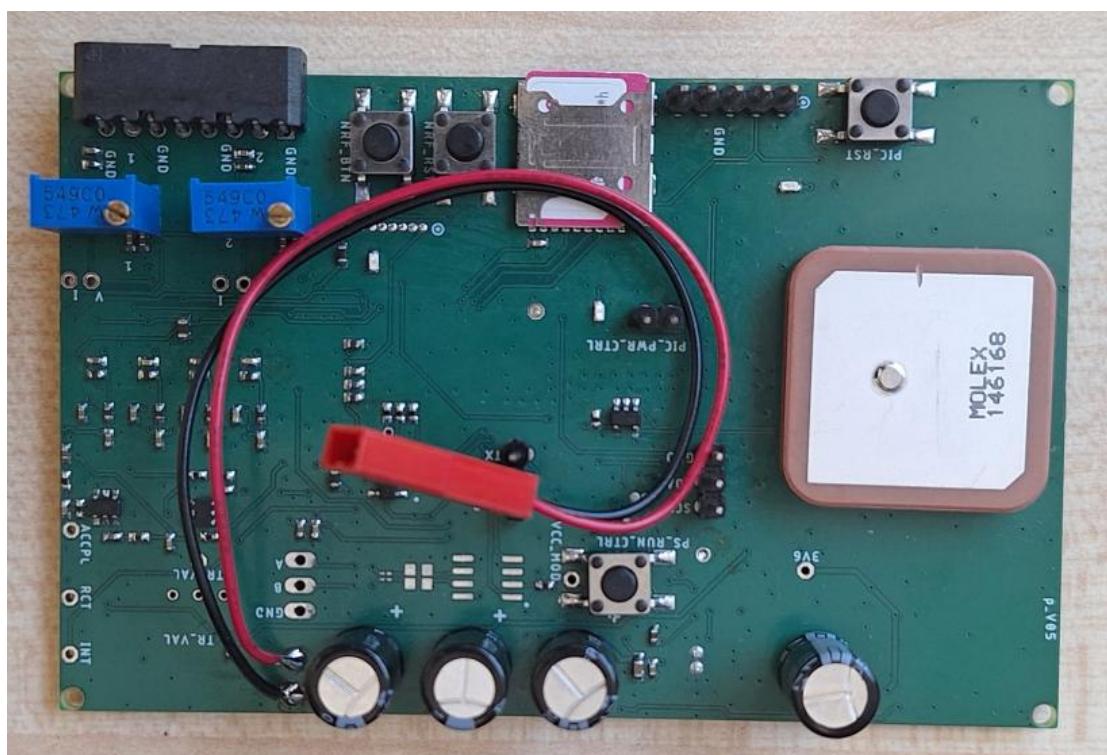
Obr. 13 Layout jednotlivých vrstev desky plošných spojů.

Po výrobě desek plošných spojů následovalo osazení elektronických součástek. Vzhledem k prototypovému charakteru zařízení bylo osazování realizováno kombinací ruční montáže a reflow pájení pomocí horkovzdušné pájecí komory. Tento postup umožnil pružně reagovat na dílčí konstrukční změny během vývoje a současně ověřit montovatelnost navrženého řešení.

Výsledná osazená elektronika funkčního vzorku je zobrazena na Obr. 14 a Obr. 15.

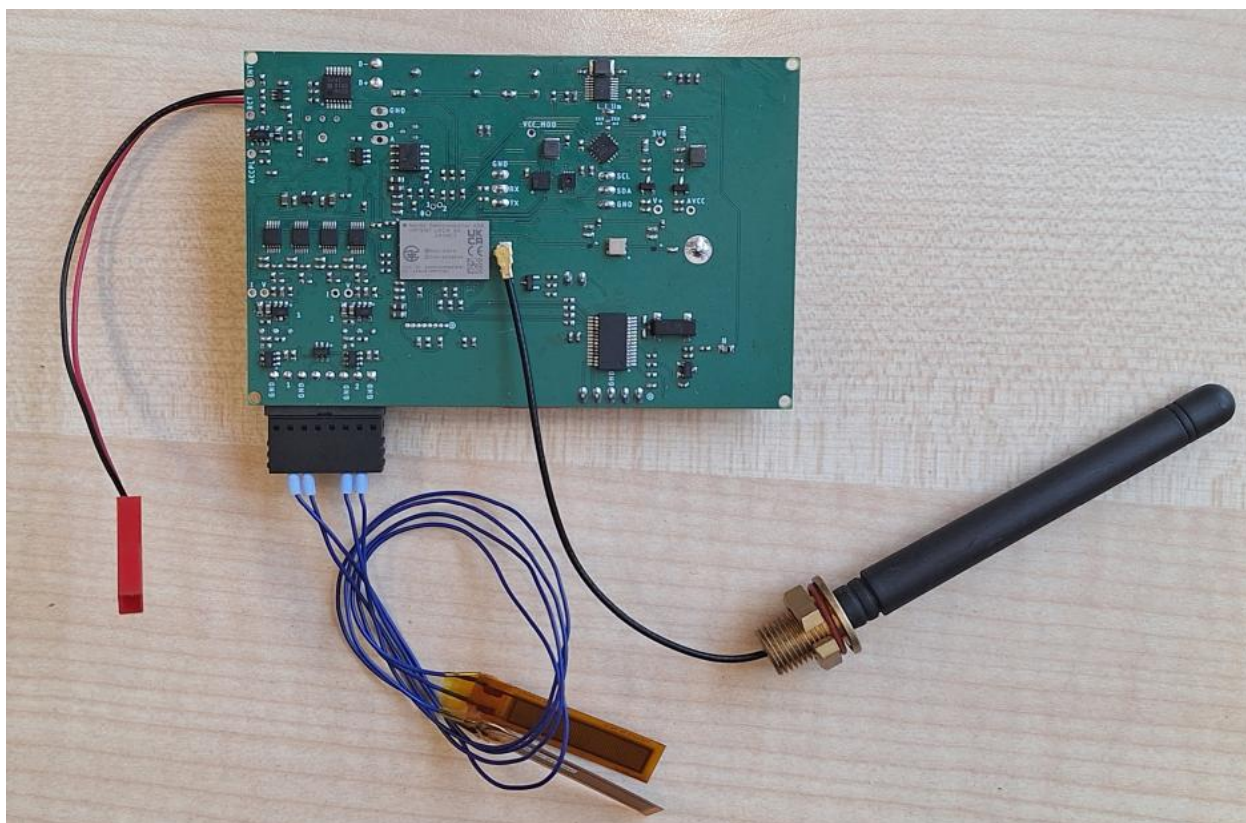


Obr. 14 Osazená elektronika funkčního vzorku V3 – zadní strana



Obr. 15 Osazená elektronika funkčního vzorku V3 – přední strana

V rámci funkčních zkoušek byla elektronika doplněna o LTE-M anténu, piezoelektrické senzory a externí bateriový zdroj. Kompletní sestava použitá při laboratorním a provozním ověřování je uvedena na Obr. 16. Tato konfigurace umožňovala ověřit správnou činnost všech klíčových částí zařízení včetně analogového snímání signálů, zpracování dat, bezdrátové komunikace a napájecího systému.



Obr. 16 Funkční vzorek V3 s připojenou LTE-M anténou, piezoelektrickými senzory a bateriovým napájením.

Elektronika byla od počátku navržena s ohledem na budoucí integraci do mechanické části systému SMARTLIS. Celá sestava je určena pro instalaci do speciálně navrženého 3D tištěného pouzdra, které umožňuje bezpečné upevnění k příložce lepeného izolovaného styku a současně poskytuje ochranu elektroniky před mechanickým poškozením a vlivy okolního prostředí. Realizovaný hardware tak tvoří kompaktní základ pro dlouhodobé provozní nasazení systému SMARTLIS na železniční infrastrukturu.

4 Firmware

Firmware funkčního vzorku V3 představuje software zajišťující kompletní řízení vyhodnocovací a komunikační jednotky systému SMARTLIS. Jeho úkolem je řízení procesu měření, zpracování dat ze senzorů, správa energetických režimů zařízení, bezdrátová komunikace, vzdálená konfigurace a implementace metod edge computingu. Firmware byl vyvíjen průběžně během celého projektu a jeho výsledná podoba vznikla na základě zkušeností získaných při laboratorním i provozním testování systému SMARTLIS.

Použitý komunikační modul obsahuje základní systémový firmware výrobce zajišťující podporu hardwarových periférií, bezdrátové komunikace a provozního prostředí nRF Connect SDK. Pro finální funkční vzorek byla použita verze firmware modemu 2.0.2 kompatibilní s verzí SDK 2.9.0. Vlastní aplikační firmware byl vyvinut v rámci projektu SMARTLIS a tvoří nadstavbu nad systémovým softwarem modemu.

Vývoj firmware probíhal ve dvou hlavních vývojových etapách označovaných jako prototyp Alfa a prototyp Beta. Prototyp Alfa byl zaměřen především na získávání reálných dat z piezoelektrických senzorů instalovaných na železniční infrastruktuře. V průběhu jeho vývoje byly postupně implementovány mechanismy pro záznam signálů, vzdálenou konfiguraci zařízení, ukládání dat do externí paměti a přenos naměřených dat prostřednictvím mobilní sítě. Současně byly vyvíjeny metody detekce průjezdu vlaku a optimalizovány postupy spouštění a ukončování měření.

Na zkušenosti získané během provozu prototypu Alfa navázal firmware prototypu Beta, který představuje finální architekturu funkčního vzorku V3. Do firmware byla doplněna podpora vzdálených aktualizací firmware (FOTA), pokročilé diagnostické funkce, podpora externích periférií a implementace algoritmů edge computingu. Současně došlo k oddělení časově kritických měřicích úloh od komunikačních procesů, což vedlo ke zvýšení kvality získávaných dat a odstranění negativního vlivu bezdrátové komunikace na přesnost měření.

Softwarová architektura je navržena jako stavově řízený systém kombinující nízkoenergetický provoz s automatickou aktivací při průjezdu kolejového vozidla. Firmware umožňuje dlouhodobý autonomní provoz zařízení, ukládání dat do externí paměti, jejich lokální vyhodnocení a následný přenos do cloudového prostředí. Součástí řešení je také sada servisních funkcí umožňujících vzdálenou konfiguraci systému, získávání provozních logů a bezpečnou aktualizaci firmware bez nutnosti fyzického zásahu do zařízení.

4.1 Architektura firmware

Finální firmware funkčního vzorku V3 vychází z architektury vytvořené během vývoje prototypu Beta a je navržen jako modulární aplikace umožňující oddělení měřicích, komunikačních, diagnostických a servisních funkcí. Hlavní aplikační logika je implementována v modulu `main.c`, který zajišťuje řízení stavového automatu zařízení a koordinaci jednotlivých funkčních bloků systému. Konfigurační konstanty, datové struktury a hranice jednotlivých algoritmů jsou definovány v souboru `main.h`.

Komunikační vrstva je realizována samostatným modulem `mqtt_connection.c`, který zajišťuje komunikaci s MQTT brokerem a zprostředkovává výměnu dat mezi jednotkou SMARTLIS a cloudovým prostředím. Perzistentní ukládání konfiguračních parametrů je řešeno pomocí emulované EEPROM implementované v modulu `eeeprom_emul.c`. Pro podporu výpočtů a zpracování dat byly vytvořeny pomocné knihovny implementující například CRC kontrolu,

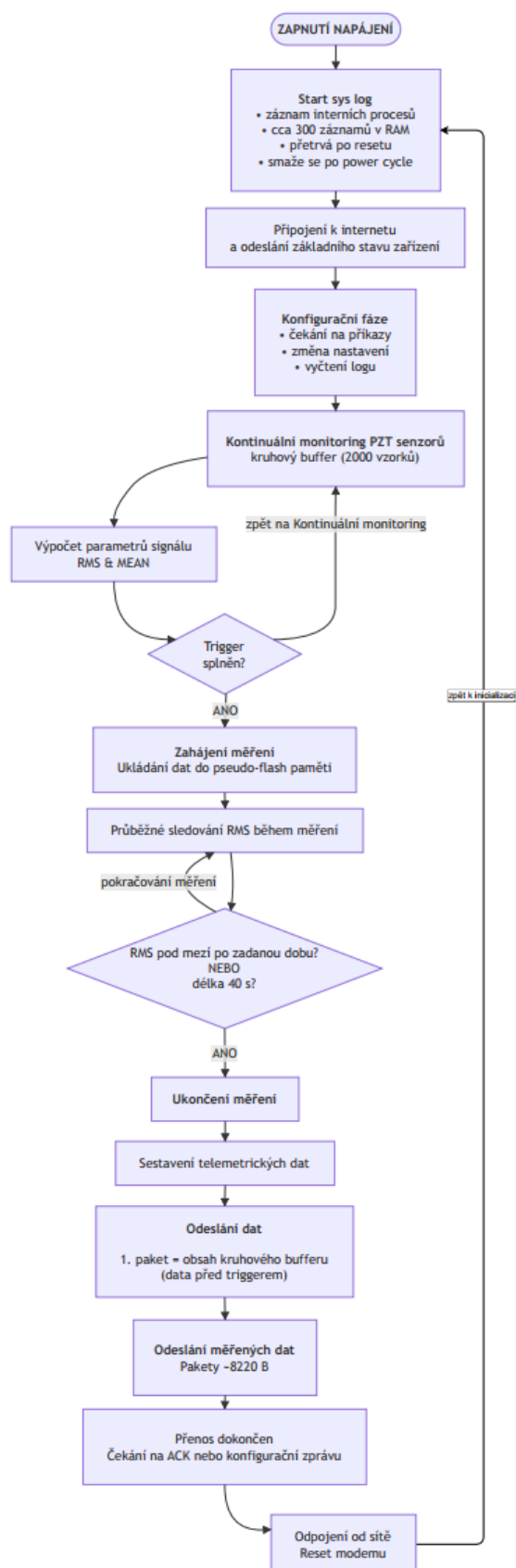
saturaci a další pomocné funkce.

Samostatné ovladače byly vytvořeny rovněž pro jednotlivé hardwarové komponenty systému, zejména pro externí paměť APS6404L, akcelerometr LIS3DH, monitorovací obvod PAC1934, digitální potenciometr, externí ADC převodníky a teplotně-vlhkostní senzory. Tato modularita umožňuje snadné rozšiřování firmware a zjednodušuje budoucí údržbu a vývoj systému.

V rámci návrhu byl kladen důraz zejména na oddělení časově kritických měřicích úloh od síťové komunikace. Veškeré měření probíhá nezávisle na LTE-M komunikaci a MQTT provozu, přičemž získaná data jsou nejprve ukládána do lokální paměti a teprve následně odesílána do cloudové infrastruktury. Tento přístup výrazně zvyšuje kvalitu měřených dat a současně eliminuje rušivé vlivy vznikající při bezdrátové komunikaci.

4.2 Stavový model programu

Firmware je navržen jako stavový automat, jehož jednotlivé stavy odpovídají provoznímu cyklu zařízení od inicializace až po odeslání dat a návrat do úsporného režimu. Grafické znázornění stavového modelu programu je uvedeno na Obr. 17.



Obr. 17 Grafické znázornění stavového modelu programu

Po spuštění zařízení probíhá inicializace hardwaru, kontrola integrity systému a spuštění

bezpečnostních mechanismů. Následuje konfigurační fáze zahrnující připojení do LTE-M sítě, navázání MQTT komunikace, synchronizaci času, případnou inicializaci GNSS modulu a kontrolu dostupnosti aktualizací firmware. Současně jsou zpracovány případné vzdálené konfigurační požadavky a provedena kalibrace vstupních měřicích kanálů.

Po ukončení konfigurační fáze přechází zařízení do úsporného režimu, ve kterém čeká na hardwarový trigger generovaný analogovým detekčním obvodem při příjezdu vlaku. Po aktivaci triggeru dochází k probuzení systému a ke spuštění měřicí sekvence.

Po dokončení záznamu následuje lokální zpracování dat pomocí algoritmů edge computingu, vyhodnocení diagnostických parametrů a vytvoření telemetrických paketů. Následně je znovu aktivován modem, navázáno LTE-M připojení a všechna relevantní data jsou odeslána do cloudového prostředí.

Součástí stavového modelu jsou rovněž servisní režimy umožňující vzdálené čtení logů, konfiguraci zařízení, restart systému nebo vzdálenou aktualizaci firmware. Po dokončení všech operací dojde k odpojení od sítě, vypnutí periférií a přechodu zařízení do režimu s minimální spotřebou energie.

4.3 Akvizice a zpracování dat

Proces měření je realizován pomocí přesně synchronizovaného časovače pracujícího se vzorkovací frekvencí 2 kHz. Časovač generuje periodické události, které řídí proces digitalizace dat z externích ADC převodníků. Naměřené hodnoty jsou následně ukládány a průběžně zpracovávány přímo v zařízení.

Systém využívá čtyři měřicí kanály odpovídající připojeným piezoelektrickým senzorům. Pro každý vzorek je proveden výpočet základních statistických parametrů a současně probíhá aplikace filtračních algoritmů. Firmware zajišťuje průběžný výpočet krátkodobých i dlouhodobých charakteristik signálu, které jsou následně využívány pro rozhodování o zahájení a ukončení záznamu.

Na začátku měřicí sekvence je prováděna automatická kalibrace vstupních kanálů formou výpočtu offsetu jednotlivých vstupních větví. Tím je eliminován vliv driftu analogových součástek a teplotních změn na výsledná data. Kalibrační hodnoty jsou následně využívány po celou dobu měření.

Vyhodnocení ukončení měření je založeno na sledování RMS hodnoty signálu. Pokud efektivní hodnota odezvy po stanovenou dobu klesne pod definovanou mez, je měření automaticky ukončeno. Zároveň je definována maximální délka záznamu, která slouží jako ochrana proti nekonečně dlouhým událostem.

Během ukládání dat je pro každý vzorek vytvářena kontrolní CRC informace zajišťující integritu dat. Při následném čtení z paměti probíhá kontrola správnosti záznamu a případná detekce poškozených datových bloků. Tento mechanismus zajišťuje vysokou spolehlivost ukládaných měření i při dlouhodobém provozu zařízení.

4.4 Komunikační vrstva

Komunikační vrstva firmware je založena na technologii LTE-M a protokolu MQTT. Po aktivaci modemu je navázáno spojení s mobilní sítí a následně s MQTT brokerem, který zprostředkovává komunikaci mezi jednotlivými zařízeními SMARTLIS a cloudovou infrastrukturou.

Veškeré zpracování komunikace probíhá asynchronně. Firmware obsahuje mechanismy automatického navázání spojení, opakovaného připojení po výpadku a průběžné kontroly dostupnosti komunikační infrastruktury. Součástí komunikační vrstvy je rovněž podpora GNSS lokalizace, která umožňuje na vyžádání získat aktuální polohu zařízení a doplnit ji do telemetrických dat.

Centrálním prvkem komunikace je obslužná smyčka MQTT, která zajišťuje příjem konfiguračních příkazů, zpracování servisních požadavků, přenos telemetrie a koordinaci procesu vzdálených aktualizací firmware. Díky této architektuře je možné zařízení vzdáleně spravovat bez nutnosti fyzické návštěvy místa instalace.

4.5 Konfigurace, telemetrie a logování

Firmware umožňuje vzdálenou konfiguraci provozních parametrů prostřednictvím MQTT zpráv. Mezi nastavitelné parametry patří především meze RMS triggerů, délky měřicích intervalů a parametry používané algoritmy edge computingu. Veškerá konfigurace je ukládána do perzistentní paměti a zůstává zachována i po restartu nebo výpadku napájení.

Telemetrické pakety obsahují informace o stavu zařízení, výsledcích měření a provozních podmínkách. Přenášeny jsou zejména údaje o čase průjezdu, stavu baterií, odběrech jednotlivých napájecích větví, environmentálních podmínkách, stavu LTE-M spojení, verzích firmware a hardwaru a případně také GNSS souřadnice.

Pro účely diagnostiky a vzdáleného ladění je implementován rozsáhlý systém logování. Během provozu jsou zaznamenávány informace o průběhu programu, připojování do sítě, zpracování dat i případných chybových stavech. Logy mohou být na vyžádání přeneseny do cloudového prostředí, kde slouží k analýze provozu zařízení a řešení případných problémů.

4.6 FOTA aktualizace firmware

Významnou součástí firmware je podpora vzdálené aktualizace firmware (Firmware Over The Air – FOTA). Tento mechanismus umožňuje nasazování nových verzí aplikace bez nutnosti fyzického přístupu k zařízení.

Řešení využívá bootloader MCUboot a dvojici paměťových slotů. Nová verze firmware je nejprve stažena do sekundárního paměťového prostoru, kde je ověřena její integrita. Teprve po úspěšném dokončení stahování a kontrole dat je při následujícím restartu aktivována nová verze aplikace.

Pro zvýšení bezpečnosti je využíván mechanismus automatického návratu k předchozí funkční verzi. Pokud nově nainstalovaný firmware po restartu nepotvrdí svou správnou funkci, bootloader automaticky obnoví předchozí ověřenou verzi systému. Tím je minimalizováno riziko znefunkčnění zařízení během provozu.

Spolehlivost celého procesu dále zvyšuje nezávislý ULP kontrolér, který monitoruje činnost hlavního procesoru a v případě problémů dokáže provést řízený power-cycle celého systému. Tento mechanismus významně přispívá k robustnosti vzdálené správy zařízení.

4.7 Edge computing

Jednou z klíčových funkcionalit vyvinutého firmware je implementace metod edge computingu, jejichž cílem je provádět základní analýzu naměřených dat přímo v místě měření a omezit tak objem dat přenášovaných do cloudového prostředí. Vývoj algoritmů probíhal na základě reálných dat získaných během dlouhodobých měření na lokalitách Olomouc a Svitavy. Pro potřeby vývoje byly zaznamenané průběhy ukládány do externí pseudoflash paměti a následně analyzovány offline, což umožnilo ověřit funkčnost a robustnost jednotlivých metod ještě před jejich implementací do firmware jednotky.

V průběhu řešení bylo zjištěno, že automatizované vyhodnocování stavu lepeného izolovaného styku (LIS) představuje značně komplexní úlohu. Naměřené signály totiž obsahují nejen odezvu samotného styku, ale také vlivy projíždějících vozidel, jejich technického stavu, typu soupravy, provozních podmínek i okolního prostředí. Analýza dlouhodobých dat navíc ukázala významný vliv teploty a ročního období na charakter měřených signálů. Z tohoto důvodu nebylo možné spolehlivě určit technický stav LIS pouze na základě jednoho průjezdu vlaku.

Získané zkušenosti vedly k závěru, že pro hodnocení stavu LIS je nezbytné zohlednit typ projíždějícího vozidla a ideálně pracovat pouze s průjezdy bezvadných vlaků stejné kategorie. Jako nejvhodnější se ukázalo sledování prvních náprav lokomotivy, jejichž parametry jsou ve srovnání s nákladními nebo osobními vozy výrazně stabilnější. Namísto hodnocení jednotlivých průjezdů je proto vhodnější sledovat dlouhodobý trend vývoje diagnostických parametrů získaných z obdobných vlakových souprav.

Dlouhodobá měření realizovaná v lokalitě Olomouc nepotvrdila významné změny technického stavu sledovaného LIS. Tento závěr byl následně potvrzen i vizuální kontrolou styku přímo v terénu. Odlišná situace byla pozorována v lokalitě Svitavy, kde byly sledované styky ve výrazně horším technickém stavu a v naměřených datech se začala projevovat řada dalších jevů vyžadujících detailnější analýzu. Vzhledem ke kratší době měření však zatím nebylo možné jednoznačně určit dlouhodobé trendy degradace.

Návrh algoritmů byl proveden s ohledem na omezený výpočetní výkon mikrokontroléru a omezenou velikost operační paměti. Vlastní zpracování proto probíhá nad daty uloženými v externí paměti a využívá výpočetně efektivní postupy vhodné pro embedded platformu.

4.7.1 Předzpracování signálu

Prvním krokem zpracování je předzpracování vstupních dat. Nejprve dochází k časovému zarovnání obou měřicích kanálů na společnou délku a fázi. Tento krok je důležitý zejména z důvodu rozdílného umístění jednotlivých senzorů na konstrukci styku. Vzniklý časový posun mezi kanály může být následně využit také pro odhad rychlosti projíždějící soupravy.

Následně jsou detekovány a odstraněny neplatné vzorky, případně jsou doplněna chybějící data na okrajích záznamu pro algoritmy využívající klouzavá okna. Současně je provedeno odstranění stejnosměrné složky signálu, čímž vzniká datová sada vhodná pro další filtraci a analýzu.

4.7.2 Filtrace a rozdělení signálu

Po předzpracování je signál rozdělen do dvou samostatných frekvenčních větví. První větev představuje nízkofrekvenční složku (0–50 Hz), která obsahuje dominantní průjezdovou odezvu kolejnice a slouží zejména pro detekci jednotlivých náprav a jejich časovou indexaci. Druhá větev

představuje vysokofrekvenční složku (150–1000 Hz), ve které se objevují lokální dynamické jevy a rázové odezvy související se stavem kola, kolejnice a samotného styku.

Pro filtraci byly využity biquad filtry, Butterworthovy IIR filtry druhého řádu a v offline analýzách také obousměrná filtrace typu filtfilt, která eliminuje fázový posun vznikající při klasické IIR filtraci. Výsledkem je dvojice frekvenčně oddělených signálů určených pro další samostatné zpracování.

4.7.3 Segmentace a detekce náprav

Dalším krokem je segmentace průjezdu a detekce jednotlivých náprav. Nejprve probíhá detekce aktivních částí záznamu a oddělení relevantních úseků od klidových pasáží. V nízkofrekvenční větvi jsou následně pomocí vyhledávání lokálních extrémů identifikovány jednotlivé nápravy projíždějící soupravy.

Poloha detekovaných náprav je následně zpřesněna pomocí vysokofrekvenční větve, ve které se v okolí každé detekované nápravy hledá dominantní lokální špička. Tím je dosaženo vysoké přesnosti časové lokalizace jednotlivých náprav a vytvořen základ pro následný výpočet diagnostických parametrů.

4.7.4 Výpočet diagnostických metrik

Kolem každé detekované nápravy je vytvořeno lokální vyhodnocovací okno, ve kterém jsou vypočítány diagnostické metriky charakterizující dynamickou odezvu systému. Mezi základní parametry patří efektivní hodnota RMS vysokofrekvenční složky, která popisuje intenzitu dynamického namáhání. Dále je vypočítáván impulzní faktor definovaný jako poměr maximální amplitudy a střední absolutní hodnoty signálu, který umožňuje identifikovat výskyt nárazových dějů.

Další skupinu parametrů tvoří špičkatost, činitel výkyvu a rozptyl, které jsou citlivé na vznik ojedinělých impulsních událostí. Součástí vyhodnocení je také MFC poměr, který porovnává amplitudové charakteristiky vysokofrekvenční a nízkofrekvenční složky signálu. V případě potřeby je prováděna také analýza frekvenční oblasti pomocí spektrální hustoty výkonu (PSD), která umožňuje identifikovat anomálie projevující se ve specifických frekvenčních pásmech.

4.7.5 Robustní statistické vyhodnocení

Vypočtené metriky jsou následně podrobeny robustnímu statistickému zpracování založenému na modifikovaném Z-skóre. Tento přístup využívá medián a mediánovou absolutní odchylku (MAD), díky čemuž je odolný vůči výskytu extrémních hodnot. Metoda umožňuje porovnávat odezvy jednotlivých náprav v rámci jednoho průjezdu a identifikovat nápravy vykazující významně odlišné chování bez nutnosti využití trénovacích dat nebo předem připravených klasifikačních modelů.

4.7.6 Odhad parametrů vozidla

Vedle analýzy samotného LIS firmware poskytuje také základní informace o projíždějící soupravě. Na základě časových rozestupů mezi detekovanými nápravami a známé geometrie vozidel je možné odhadnout rychlost jízdy a v některých případech rovněž identifikovat typ hnacího vozidla. Tato informace následně umožňuje zpřesnit interpretaci diagnostických metrik a porovnávat průjezdy pouze mezi odpovídajícími kategoriemi vlaků.

Výstupem edge computingu je přesně indexovaný soubor detekovaných náprav doplněný o vypočtené diagnostické metriky a metadata popisující průjezd. Tato data jsou následně serializována do struktury `edge_packet_t` a odeslána do cloudového prostředí, kde slouží jako vstup pro dlouhodobé sledování stavu infrastruktury a budoucí implementaci metod prediktivní údržby.

4.8 MQTT servisní backend

Pro účely komunikace se zařízeními SMARTLIS, vzdálené správy jednotek a ukládání naměřených dat byl vytvořen servisní backend založený na technologii MQTT. Architektura backendu je zobrazena na Obr. X. Backend slouží jako centrální bod pro sběr telemetrie, měřicích dat a diagnostických informací jak z jednotek SMARTLIS instalovaných na železniční infrastruktuře, tak i z pomocných měřicích a monitorovacích zařízení umístěných v rozvaděčích využívaných během vývoje a dlouhodobých měření.

Implementace backendu je realizována v programovacím jazyce Python. Komunikace se zařízeními probíhá prostřednictvím MQTT brokeru, přičemž během vývoje byl využíván veřejný broker `shiftr.io`. Architektura systému však není vázána na konkrétního poskytovatele a umožňuje využití libovolného MQTT brokeru, případně provoz vlastního brokeru například na VPS serveru nebo v rámci podnikové infrastruktury.

Celý backend je koncipován jako samostatná aplikace, kterou lze provozovat nezávisle nebo souběžně s webovou aplikací systému SMARTLIS. Jeho hlavním úkolem je příjem dat z terénních jednotek, jejich validace, ukládání do vhodných datových formátů a poskytování rozhraní pro servisní a diagnostické operace.

Po spuštění hlavního programu prostřednictvím skriptu `main.py` dochází k vytvoření potřebné adresářové struktury, inicializaci výstupních souborů a vytvoření komunikačních front. Následně je navázáno spojení s MQTT brokerem a spuštěna tři samostatná pracovní vlákna zajišťující zpracování zpráv ze zařízení ESP32, zpracování zpráv přicházejících z jednotek SMARTLIS a obsluhu odchozích MQTT příkazů. V průběhu běhu programu současně probíhá kontrola časových limitů při skládání vícedílných datových paketů přijímaných z jednotek SMARTLIS.

4.8.1 MQTT vrstva

Komunikaci s MQTT brokerem zajišťuje modul `mqtt_client.py`, který představuje základní komunikační vrstvu backendu. Jeho úkolem je navazování spojení s brokerem, odběr zpráv z jednotlivých MQTT témat a distribuce přijatých dat do příslušných zpracovatelských modulů. Současně poskytuje rozhraní pro odesílání konfiguračních a servisních příkazů směrem k terénním jednotkám.

Veškeré parametry související s MQTT komunikací, včetně adresy brokeru, přístupových údajů a názvů komunikačních kanálů, jsou uloženy v konfiguračním souboru `config.py`, který slouží jako centrální místo pro správu parametrů celé aplikace.

4.8.2 Zpracování zpráv zařízení ESP32

Vyhodnocení dat přicházejících z pomocných zařízení založených na platformě ESP32 je realizováno modulem `esp_processor.py`. Tento modul přijímá JSON zprávy publikované zařízeními ESP32, provádí jejich dekódování a interpretuje jednotlivé položky obsažené v datovém payloadu. Získané údaje jsou následně ukládány do CSV souborů určených pro

pozdější analýzu a současně jsou zobrazovány základní provozní informace na konzoli aplikace.

4.8.3 Zpracování zpráv jednotek SMARTLIS

Nejdůležitější část backendu představuje modul `nrf_processor.py`, který zajišťuje zpracování dat přicházejících z jednotek SMARTLIS. Tento modul identifikuje typ přijatých zpráv, dekoduje telemetrické informace, zpracovává výsledky edge computingu a sestavuje vícedílné přenosy do kompletních datových struktur.

Součástí modulu je rovněž assembler paketů, který umožňuje skládání rozsáhlých měřicích dat přenášených ve více navazujících MQTT zprávách. Po úspěšném dokončení přenosu dochází k vytvoření výsledných datových souborů určených k dalšímu zpracování. Modul současně řeší problematiku časových limitů nekompletních přenosů a vyhodnocuje stavové zprávy generované firmwarem jednotek SMARTLIS.

Datové struktury a assembler používané při skládání datových paketů jsou implementovány v modulu `models.py`, který definuje všechny používané datové modely a pravidla jejich serializace a deserializace.

4.8.4 Lokální ukládání dat

Trvalé ukládání dat zajišťuje modul `persistence.py`, který vytváří a spravuje datové soubory používané backendem. Modul zajišťuje vytváření CSV souborů pro ukládání telemetrických informací, provozních událostí a logů zařízení. Současně poskytuje rozhraní pro ukládání kompletních měřicích dat získaných z jednotek SMARTLIS.

Naměřené průběhy jsou ukládány ve formátech NPY a MAT, které umožňují jejich snadné využití v prostředích Python, MATLAB a dalších nástrojích používaných při následném vývoji diagnostických algoritmů a metod prediktivní údržby. Tento přístup umožňuje efektivní archivaci i další offline analýzu dlouhodobě získávaných dat.

Veškeré důležité provozní parametry backendu jsou soustředěny v konfiguračním souboru `config.py`, ze kterého čerpají jednotlivé moduly aplikace. Centralizace konfigurace významně usnadňuje správu systému, nasazování nových verzí a případné úpravy komunikační infrastruktury bez nutnosti zásahů do zdrojových kódů jednotlivých částí backendu.

5 Závěr

Funkční vzorek FW10010065-V3 – Vyhodnocovací a komunikační modul senzorického systému SMARTLIS byl v rámci řešení projektu SMART kolejnicový lepený izolovaný styk úspěšně navržen, realizován a experimentálně ověřen. Výsledné zařízení představuje autonomní IoT jednotku určenou pro dlouhodobý monitoring lepených izolovaných styků s využitím integrované piezoelektrické senzoriky, lokálního zpracování dat a bezdrátové komunikace s cloudovou infrastrukturou.

V průběhu vývoje byla navržena a realizována kompletní hardwarová platforma zahrnující analogové obvody pro zpracování signálů piezoelektrických senzorů, systém automatické detekce příjezdějího vlaku, externí převodníky analogových signálů, rozšířenou paměť pro ukládání dat, GNSS přijímač, nízkoeenergetické napájecí obvody, nezávislý dohledový systém a komunikační modul využívající mobilní síť LTE-M. Současně byl vyvinut firmware zajišťující měření, ukládání dat, vzdálenou správu zařízení, bezpečné aktualizace firmware a implementaci metod edge computingu.

Významnou součástí výsledku je implementace metod lokální analýzy dat, které umožňují zpracovávat měřené průběhy přímo v místě instalace. Tím dochází ke snížení objemu přenášených dat a současně k zachování dostatečné informační hodnoty pro následné vyhodnocování technického stavu monitorovaných styků. Vyvinuté metody byly ověřeny na reálných datech získaných při dlouhodobých měřeních na železniční infrastruktuře a prokázaly schopnost identifikovat charakteristické projevy průjezdu vozidel a kvantifikovat jejich odezvu.

Součástí výsledku je rovněž servisní backend založený na MQTT komunikaci, který umožňuje vzdálený sběr telemetrie, archivaci naměřených dat, správu zařízení a podporu vývoje navazujících cloudových služeb. Funkční vzorek tak vytváří nezbytný technologický základ pro realizaci výsledku V4 – Cloudové řešení systému monitorování a prediktivní údržby SMARTLIS.

Dosažený výsledek naplňuje cíle projektu v oblasti digitalizace železniční infrastruktury, implementace principů internetu věcí a vývoje prostředků pro prediktivní údržbu. Funkční vzorek V3 představuje klíčový spojovací článek mezi senzorickými systémy integrovanými do produktů SMARTLIS a nadřazenými systémy pro vyhodnocování technického stavu železniční infrastruktury a vytváří předpoklad pro budoucí praktické nasazení technologie v provozních podmínkách.