



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Vilém Pecen

**Řídicí a vyhodnocovací část systému kontroly
celistvosti vlaku**

Diplomová práce

2024



K620..... Ústav dopravní telematiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Vilém Pecen

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Řídicí a vyhodnocovací část systému kontroly celistvosti vlaku**

Název tématu (anglicky): **Control and Output Elaboration Part of a Train Integrity Monitoring System**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Analyzujte problematiku použití technologie kontroly celistvosti vlaku
- Navrhněte architekturu systému kontroly celistvosti vlaku a definujte hlavní funkce
- Navrhněte a demonstруйте programové řešení řídicí a vyhodnocovací jednotky systému kontroly celistvosti vlaku.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Deliverable D4.1, Výstup projektu X2RAIL-2
System Requirements Specification pro systém ETCS
WABTEC CORPORATION. TrainLink™ NG5 ATX End of Train Device - příklad implementace systému kontroly celistvosti vlaku

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Leso, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **22. července 2022**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **15. května 2024**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Vilém Pecan
jméno a podpis studenta

V Praze dne 1.prosince 2023

Poděkování

Autor děkuje všem, kteří poskytli podklady pro vypracování této bakalářské práce. Zvláštní dík patří panu doc. Ing. Martinu Lesovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování práce. Autor dále děkuje své rodině a blízkým za morální a materiální podporu poskytovanou během celého studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 15. května 2024

.....
Vilém Pecen

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Řídicí a vyhodnocovací část systému kontroly celistvosti vlaku

Autor	Bc. Vilém Pecen
Studijní program	N1041A040007 – Inteligentní dopravní systémy
Druh práce	Diplomová práce
Termín odevzdání	15. května 2024
Vedoucí práce	doc. Ing. Martin Leso, Ph.D. Katedra dopravní telematiky K620 Fakulta dopravní, ČVUT v Praze

Abstrakt

Tato diplomová práce provádí analýzu aktuálně používaných způsobů zjišťování celistvosti vlaku. Během práce autor spolupracoval na výzkumném projektu „Výzkum provozních aspektů inteligentního konce vlaku“. Součástí práce je návrh SW pro zpracování a vizualizaci měřených dat-

Abstract

This diploma thesis analyses current state-of-art methods for monitoring integrity of trains. During the work in this thesis, the author also participated in the research project into „Operational aspects of intelligent end of train devices“. Part of this thesis also deals with development of a data analysis and visualisation software.

Klíčová slova

konec vlaku, Python, vývoj SW, vizualizace dat, specifikace požadavků

Keywords

end-of-train, Python, software development, requirements specification

Obsah

1. Úvod	11
2. Systémy kontroly celistvosti vlaku	13
2.1. Motivace	14
2.1.1. ETCS L2 s kontrolou integrity vlaku	16
2.1.1.1. Hybridní detekce vlaku	21
2.2. Způsoby zjišťování celistvosti vlaku	26
2.2.1. Systémy TIMS s vlakovou sběrnici	26
2.2.1.1. Digitální automatické spřáhlo	27
2.2.2. Systémy TIMS pracující se sensorickou sítí	29
2.2.3. Systémy TIMS využívající brzdové potrubí pro detekci celistvosti	29
2.2.3.1. Trainguard EOT	31
2.2.3.2. DPS 2020-He-LD ETD	32
2.2.3.3. TrainLink NG5ATX	32
3. Projekt INTELIGENT_END4TRAIN	32
3.1. Východiska projektu	33
3.2. Výzkumná cesta do USA	34
3.3. Řešení projektu	35
3.3.1. Rádiová komunikace	35
3.3.2. Pneumatický generátor	36
3.3.3. Technologie akumulátoru jednotky EoT	37
3.3.4. Energetická bilance jednotky EoT	38
3.3.5. Zástavba jednotky HoT na lokomotivě	39
3.3.6. Napájení jednotky HoT na hnacím vozidle	39
3.3.7. Problematika párování jednotek HoT a EoT na vlaku při jeho sestavování	40
3.3.8. Zkoušky elektromagnetické kompatibility a odolnosti vnějším vlivům	41
3.3.9. Architektura systému TIMS	41
3.3.10. Komunikační protokoly v systému TIMS	44
3.3.10.1. On-line protokol	44

3.3.10.2. Off-line protokol	45
3.3.10.3. Procesní data	45
3.3.11. Specifikace požadavků na systém	46
3.3.11.1. Modelování požadavků.....	47
3.3.11.2. Základní požadavky.....	51
3.3.11.3. Další důležité požadavky	53
3.4. Plán další práce na projektu END4TRAIN	55
4. Nástroj pro vizualizaci a vyhodnocení dat z měření.....	56
4.1. Použité technologie	57
4.1.1. Programovací jazyk	57
4.1.2. Tvorba grafického uživatelského rozhraní	57
4.1.3. Zpracování dat	59
4.1.4. Dekódování binárních dat	59
4.1.5. Vytváření grafů v prostředí PySide.....	60
4.2. Popis softwarového řešení	62
4.3. Ukázka vizualizace dat z měření v DAKO Třemošnice	65
4.4. Další možné rozšiřování vizualizačního SW	68
5. Závěr	69
6. Bibliografie	70
7. Seznam obrázků.....	76
8. Seznam tabulek	78
9. Seznam příloh.....	79

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

FD Fakulta dopravní ČVUT v Praze

1. Úvod

V posledních letech se v oblasti železniční dopravy stále častěji hovoří o systémech řízení a zabezpečení, které mají za cíl implementaci konceptu tzv. pohyblivého bloku, který je znám např. z prostředí městských kolejových dopravních systémů a podzemních drah, na železnici. Motivací k nasazování zabezpečení jízd vlaků v pohyblivém oddílu je zpravidla snaha o zvýšení kapacity dopravní infrastruktury a uspokojení přepravní poptávky. Rovněž sílí tlak na přesouvání přeprav zejména ze silnic na železnice podporovaný politickými cíli, jako je např. The European Green Deal.

Principem fungování zabezpečovacích systémů pracujících s pohyblivým oddílem je, že jednotlivé vlaky či vozidla pohybující se po infrastruktuře traťové části systému v dostatečně krátkých časových intervalech hlásí svoji aktuální pozici, a to nejen čela vlaku (včetně stanovené nejistoty, s jakou palubní jednotka tuto informaci stanovila), ale také jeho konce.

Z podstaty věci je nutné, aby palubní systém ve vlaku s požadovanou úrovní integrity bezpečnosti znal v každém okamžiku skutečnou délku soupravy a zároveň měl informaci, že všechna vozidla ve vlaku jsou stále bezpečně spojena s vozidly sousedními, tedy, že nedošlo k oddělení (odtržení) žádného z nich od zbytku soupravy. Tento stav se označuje jako integrita či celistvost vlaku.

Existují systémy, které jsou schopny bezpečného provozu vlaků, které jsou schopny bezpečně zjišťovat a reportovat informaci o své integritě, a vlaků, jejichž palubní systémy toto nedokážou, nicméně efektivita takovýchto systémů bude jistě klesat s rostoucím podílem vlaků bez kontrol celistvosti.

Tato diplomová práce se zabývá technickým řešením, které nabízí způsob implementace systému kontroly integrity pro segment vlaků, u nichž by aplikace obvyklého způsobu implementace systému kontroly celistvosti (dále také jen TIMS – angl. train integrity monitoring system) bylo potřeba vynaložit velmi vysokých nákladů – vlaky nákladní.

Zatímco osobní soupravy jsou dnes již zpravidla vybaveny určitým centrálním propojovacím vedením, které umožňuje určitou možnost technického řešení problému detekce celistvosti, klasické soupravy nákladních vlaků nic takového nemají.

Tato práce se proto zabývá zjištěním provozních aspektů a souvislostí, které by přineslo nasazení systému poměrně rozšířeného ve státech jako jsou USA, Kanada nebo Austrálie, založeného na bezdrátové komunikaci mezi řídicí jednotkou umístěnou na vedoucím hnacím vozidle vlaku a telemetrickým zařízením upevněným na posledním voze soupravy, které měří hodnotu tlaku v brzdovém potrubí vlaku (případně další veličiny) a přenáší je na vedoucí vozidlo, kde je na jejich základě možné vyhodnocovat, jestli nedošlo ke ztrátě integrity soupravy.

Ve svém úvodu tato diplomová práce analyzuje různé přístupy ke zjišťování integrity vlakových souprav, další část je věnována popisu poznatků v oblasti nasazení tzv. „inteligentního konce vlaku“, které byly získány při řešení výzkumného projektu s názvem

„Výzkum provozních aspektů inteligentního konce vlaku“, který probíhal v letech 2023 až 2024 na Fakultě dopravní Českého učení technického v Praze, jehož se zúčastnil i autor této práce.

Předposlední část této práce se věnuje specifikaci požadavků na zmíněný systém „Inteligentního konce vlaku“ a v závěru byl proveden návrh a vývoj SW nástroje pro vizualizaci a vyhodnocování měření prováděných v rámci uvedeného výzkumného projektu.

2. Systémy kontroly celistvosti vlaku

Primární funkcí systému kontroly celistvosti (integrity) vlaku je potvrzování, že během jízdy vlaku nedošlo k oddělení žádného z vozidel od zbytku soupravy. Jízdu vlaku se v tomto smyslu nerozumí pouze stav, kdy se vlak fyzicky pohybuje, ale jde o celé období, kdy je skupina vozidel tvořící soupravu daného vlaku za vlak požadována; z tohoto provozního hlediska je tedy potřeba jako jízdu vlaku chápat i případné stání soupravy v nácestné, výchozí nebo i koncové stanici v době, kdy nedochází k manipulaci s vozidly (svěšování, rozvěšování, posunové jízdy...).

Poskytování informace o integritě vlaku je jedním ze základních požadavků pro provozování železniční dopravy s využitím moderních způsobů řízení a zabezpečení jízdy vlaků. V evropském prostoru je v souladu s technickými specifikacemi pro interoperabilitu (TSI) v tomto směru sledovaným řešením systém ETCS (European Train Control System [evropský vlakový zabezpečovací systém]) nasazený v aplikační úrovni L2 s kontrolou integrity vlaku palubní částí¹.

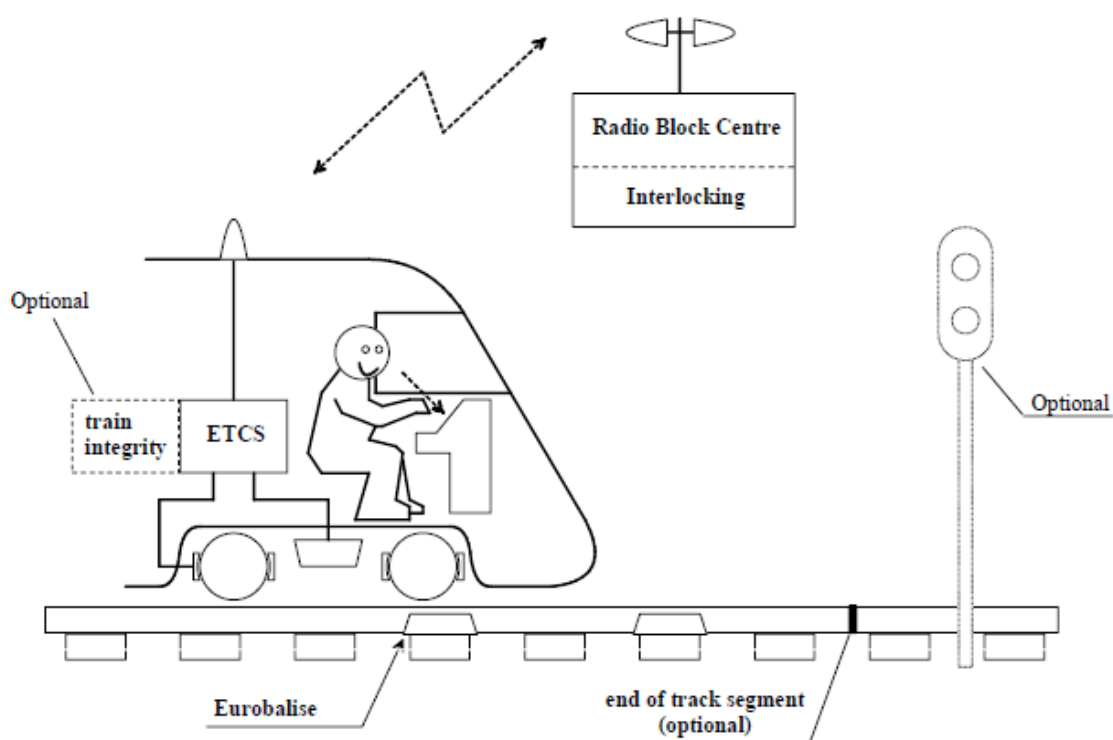


Figure 6: ERTMS/ETCS Application Level 2

Obrázek 1 Schéma prvků použitých v aplikační úrovni ETCS Level 2 (zdroj [1, s. 22])

¹ Tato aplikační úroveň systému ETCS byla v TSI CCS v minulosti označována jako ETCS Level 3. S vydáním souboru specifikací číslo 4 v roce 2023 bylo toto označení opuštěno a bývalá aplikační úroveň 3 je považována za variantu aplikační úrovně 2. Často používané označení původní aplikační úrovně 3 je nyní „ETCS Level 2 with train integrity“.

2.1. Motivace

Systémy řízení a zabezpečení jízdy vlaku pracující s informací o integritě používají tuto informaci při určování polohy vlaku na infrastruktuře. Konvenční zabezpečovací zařízení zpravidla vyhodnocují přítomnost vozidla pomocí pevných detekčních prostředků, které zjišťují volnost vymezené části koleje. Tento princip je označován jako tzv. pevný blok (angl. „fixed block“) a je logickým východiskem pro řízení železničního provozu v tzv. prostorové soustavě². V rámci hranic jednotlivých oddílů (bloků) je rovněž vlakům dovolována jízda, resp. udělováno tzv. oprávnění k jízdě (angl. „movement authority“ – MA).

Moderní systémy řízení a zabezpečení začínají pracovat s alternativním přístupem, tzv. pohyblivým blokem (angl. „moving block“), kdy místo diskrétního pohledu na infrastrukturu prostřednictvím dělení na jednotlivé bloky je možné určovat polohu vlaku v libovolném bodě na infrastruktuře a k libovolnému bodu lze též vydávat MA. Pro zjišťování volnosti jednotlivých částí infrastruktury tedy přestávají být využívány primárně pouze kolejové úseky. Tento přístup je v současnosti často aplikován na městských drahách a podobných uzavřených dopravních systémech. Jednotlivá technická řešení pracující s pohyblivým blokem bývají často označovány jako systémy řízení vlaku založené na komunikaci (angl. „communications-based train control“ – CBTC).³

Aplikace podobného způsobu řízení a zabezpečení pro provoz na konvenční (či případně i vysokorychlostní) železnici se nyní objevují v testovacích instalacích napříč Evropou. Příkladem systému, který využívá princip pohyblivého bloku je systém APS („advanced protection system“ – pokročilý zabezpečovací systém), který zavádí německé železnice v rámci programu DSD (Digitale Schiene Deutschland). APS pracuje s alternativním přístupem k zabezpečení jízdy vlaku, tzv. „train centric train control“. Tato filozofie opouští konvenční postup, kdy infrastrukturní zařízení pro jízdu vlaku tzv. připravují jízdní (tj. vlakovou, příp. posunovou) cestu. [2]

Jízdní cesta je definována jako „*Úsek koleje v dopravně s kolejovým rozvětvením určený pro danou jízdu vlaku*“ [3, s. 48]⁴. Proces její přípravy končí dovolením jízdy vlaku, přičemž během něho musí pro danou vlakovou cestu být z hlediska zabezpečovacího zařízení splněny minimálně tyto podmínky [4, s. 50]:

- Je zajištěna správná poloha všech relevantních výhybek a výkolejek

² Prostorová soustava pro řízení železničního provozu je způsob organizace jízd vlaků, který zajišťuje bezpečnost pohybu vozidel pomocí pravidla, že v každém definovaném úseku infrastruktury (koleje) se smí v jeden okamžik nacházet nejvýše jeden vlak. Při znalosti míst hranic těchto úseků je pak při vedení vlaku vždy zajištěno, že v rámci jednoho takového úseku (oddílu) nemůže dojít ke kolizi s jiným vozidlem.

³ Nasazení systému CBTC je plánováno např. i na připravované lince D pražského metra.[49]

⁴ Na širé trati se při jízdě kolem oddílových návěstidel termín jízdní cesty nepoužívá.

- Jsou vyloučeny současně zakázané jízdni cesty (kolizní)
- Je vyhodnocena volnost definovaných kolejových úseků
- Jsou splněny podmínky pro odjezd na širou trať
- Je znemožněno manipulovat s prvky v jízdni cestě provedením jejího závěru
- Je zajištěna vazba na přejezdová zabezpečovací zařízení v jízdni cestě
- Světelné návěstidlo na konci cesty není zhaslé

Uvedený systém APS musí tyto podmínky v principu zajistit též, rozdíl je však v tom, že místo použití definovaných seznamů⁵ určujících pro každou jízdni cestu např. předepsané polohy prvků jsou pro daný požadovaný pohyb vozidla po infrastruktuře tyto prvky a nutné podmínky identifikovány pomocí určitých algoritmů.

Detaily technického řešení systému APS jsou průběžně zkoumány a vyvíjeny také v rámci jeho pilotního nasazení na úseku mezi stanicemi Waiblingen a Schorndorf poblíže německého Stuttgartu. [2]

Jedním z hlavních přínosů těchto moderních systémů řízení a zabezpečení železniční dopravy je očekávané zvýšení kapacity a propustnosti železniční infrastruktury. Při nasazení systému pracujícího s pohyblivým oddílem odpadá při jízdě následných vlaků nutnost čekání zadního vlaku před hranicí oddílu do doby, než je celý tento oddíl uvolněn vlakem předním (obvyklá délka traťového oddílu je přibližně 1000 m). Alternativa k použití pohyblivého oddílu je zkrácení délky oddílů pevných, při němž je však potřeba počítat s vyššími náklady na vybavení infrastruktury detekčními prostředky a také na údržbu⁶.

Problematická může v tomto směru být také potřeba předvěstění návěsti návěstidla kryjícího obsazený (krátký) oddíl, které musí být při použití konvenčního návěstění provedeno minimálně na zábrzdnu vzdálenost. Tento problém odpadá při použití systému, který informace o návěsti následujícího návěstidla přenáší s dostatečným předstihem přímo na vedoucí hnací vozidlo vlaku (angl. tzv. „cab signalling“). Vzhledem k povinnosti implementace systému ERTMS/ETCS, který tento přenos informací zajišťuje, při investičních akcích rozvíjejících železniční infrastrukturu spolufinancovaných z evropských prostředků je však nepravděpodobné, že by byl realizován projekt, který by zkracoval délku oddílů na menší než zábrzdnu vzdálenost s cílem zvýšení kapacity trati a zároveň by neimplementoval ETCS. [5]

⁵ V českém prostředí jde o závěrové tabulky pro zabezpečovací zařízení.

⁶ Na síti Správy železnic se pro implementaci ETCS s přizpůsobením infrastruktury (tato varianta je též označována jako „ETCS s benefity“) uvažuje délka oddílů proměnná podle požadavků dopravní technologie, počítá se však s oddíly již od délky 200 m.[50, s. 30]

Největší potenciál z hlediska zvýšení kapacity infrastruktury lze očekávat zejména u silně vytížených tratí (např. příměstské trati).

Fixed Blocks

Train 2 must wait until train 1 has completely left the block before it is allowed to enter it.



Moving Block

Blocks do not exist anymore, trains are driving in optimal distance.



Moving Blocks increase capacities in the rail network because more trains can be used on the same tracks. Field elements such as axle counters are eliminated.

Obrázek 2 Vizualizace rozdílu mezi jízdou vlaků v pevných a v pohyblivém oddílu (zdroj [2])

2.1.1. ETCS L2 s kontrolou integrity vlaku

Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, z pohledu technických specifikací pro interoperabilitu v oblasti řízení a zabezpečení (TSI CCS) je v evropském prostředí do budoucna sledováno zavádění systému ETCS L2 s kontrolou integrity vlaku. Systém ERTMS/ETCS⁷ jako takový je vlakovým zabezpečovacím zařízením, a ačkoliv jsou jeho specifikacemi definovány prvky na palubě vlaku (mobilní část – angl. „on-board unit“ – OBU) i na straně železniční infrastruktury (traťová část – angl. „trackside“), neřeší potřebné závislosti pro zabezpečení pohybu vozidla z infrastrukturního pohledu (např. zajištění správné polohy výhybek apod.). ETCS však vytváří standardizované rozhraní mezi vozidlem a tratí podle níže popsané architektury.

⁷ Podle TSI CCS patří ETCS mezi součásti systému ERTMS (European Rail Traffic Management System – evropský systém řízení železniční dopravy). Dalšími prvky ERTMS jsou systémy RMR (Railway Mobile Radio) a ATO (Automatic Train Operation).

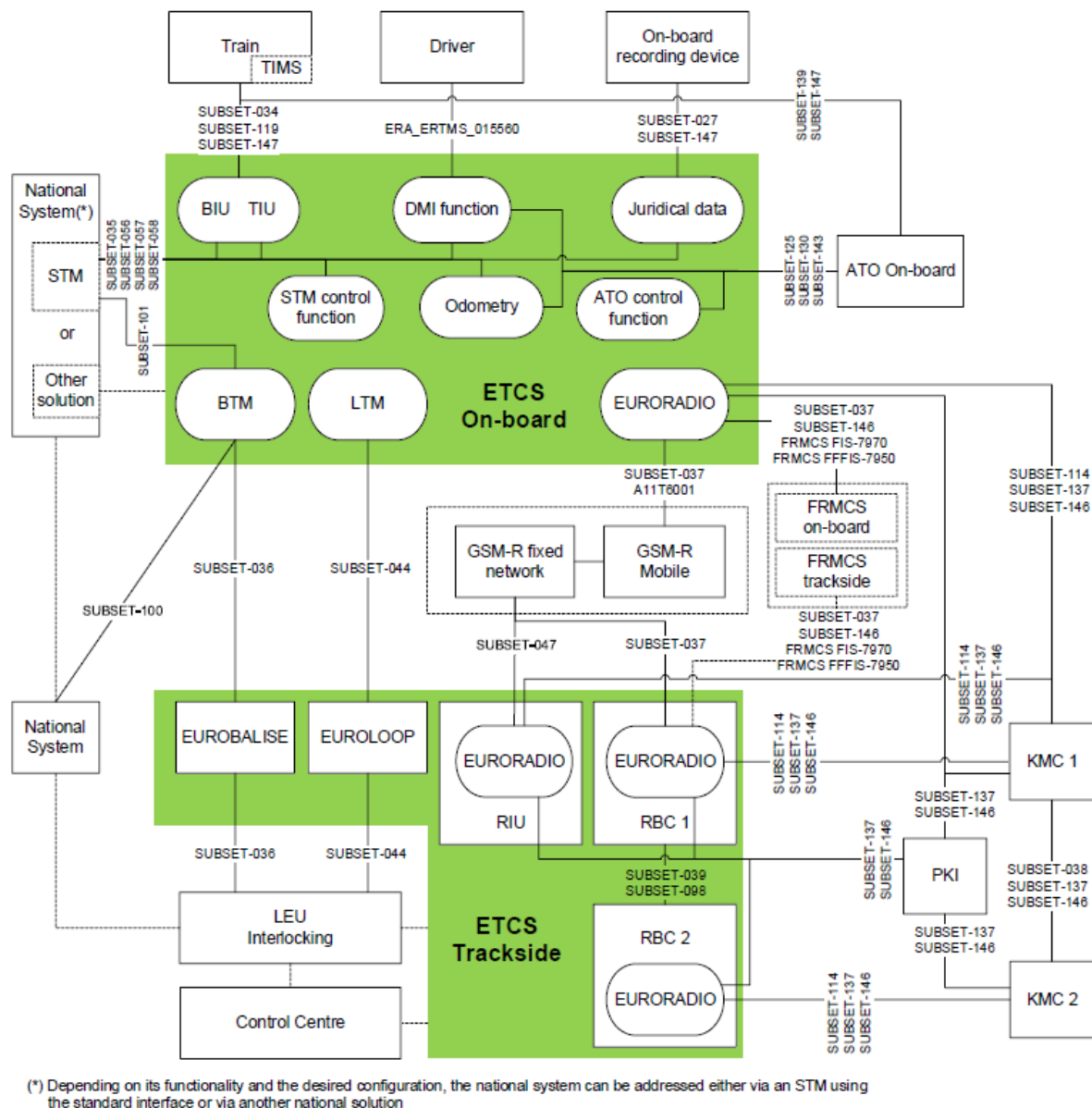


Figure 1: ERTMS/ETCS system and its interfaces

Obrázek 3 Architektura systému ERTMS/ETCS (zdroj [1, s. 11])

ETCS definuje dva kanály⁸ pro přenos informací mezi vozidlovou a traťovou částí:

1. **Rádiová komunikace** – vozidla jsou osazena mobilními terminály (označovány také EDOR – „ETCS Data only Radio“ [6, s. 9]) pro komunikaci s traťovou částí pomocí RMR (v současné době jde pouze o síť GSM-R, specifikace však již počítají s nasazením systému FRMCS („Future Railway Mobile Communication System“) využívajícím mobilní sítě páté generace). Tato komunikace je obousměrná.

⁸ Specifikace uvádějí ještě třetí způsob přenosu informací z traťové na mobilní část, jde o indukční smyčky, tzv „Euroloop“. Vybavení vozidlové části systému zařízením pro příjem informací z těchto smyček však není povinné. [5]

2. **Čtení eurobalíz umístěných v kolejišti** – Eurobalízy jsou pasivní rádiová zařízení krátkého dosahu umístěná v koleji, která při průjezdu vozidla s jednotkou pro čtení balíz (BTM – „balise transmission module“) předávají naprogramované informace. [7] Balízy se na infrastruktuře umísťují ve skupinách (angl. „balise group“ – BG), zpravidla po dvou. Samostatně umístěná balíza tvoří tzv. jednobalízovou skupinu. Přenos informací mezi balízou a BTM je jednosměrný.

Funkce jednotlivých prvků uvedené architektury ETCS, nepopsaných v předcházejícím odstavci, jsou zjednodušeně následující:

- **Radiobloková centrála (RBC)** – sbírá informace z infrastrukturního zabezpečovacího zařízení a na základě nich vydává jednotlivým vlakům ve své oblasti řízení oprávnění k jízdě (MA) a další pokyny včetně tzv. „popisu tratě“, obsahujícího informace o sklonových poměrech trati a o maximální povolené rychlosti v jednotlivých úsecích. Vlaky, resp. OBU, odesílají RBC data o své jízdě, zejména jde o hlášení o poloze (angl. „position report“ – PR).
- **Traťová elektronická jednotka (LEU)** – získává informace z infrastrukturního zabezpečovacího zařízení, zpravidla v oblasti s menším rozsahem než RBC, na základě nichž ovlivňuje telegram připojené Eurobalízy. Při aplikaci tzv. decentralizovaného řešení LEU používá tato jednotka pouze vstupy informující o stavu (návěstním znaku) jednoho návěstidla, poblíž kterého je umístěna.
- **Odometrie** – pomocí skupiny senzorů instalovaných na vozidle odměřuje dráhu, kterou vozidlo urazilo od přečtení poslední balízové skupiny. Touto změřenou vzdáleností a směrem vzhledem k orientaci dané BG je určována poloha vozidla na infrastruktuře.
- **DMI (driver – machine interface)** – tvoří rozhraní mezi obsluhou vozidla (strojvedoucím) a palubní částí ETCS. DMI zobrazuje aktuální informace o stavu vozidla a umožňuje zadávání údajů pomocí tlačítek či na dotykovém displeji.
- **TIU (train interface unit)** – tvoří rozhraní mezi palubní částí ETCS a ostatními systémy vozidla, zejména slouží k předávání povelů k provoznímu či nouzovému brzdění při zásahu systému do řízení vozidla.
- **JRU (juridical recorder unit)** – je záznamové zařízení ukládající data o průběhu jízdy a činnosti palubní části systému ETCS
- **Specifický transmisní modul (STM – specific transmission module)** – jde o zařízení plnící funkci standardního národního vlakového zabezpečovače. V případech, kdy vozidlo vybavené OBU ETCS jede v módu SN (národní systém), STM pouze předává ETCS informaci, že národní zabezpečovač je v činnosti.

- **Evropský bezpečný počítač (EVC – European Vital Computer)** – tvoří centrální prvek mobilní části ETCS a provádí bezpečné funkce dohledu nad jízdou vozidla na základě přijímaných informací.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro provoz systému ETCS s kontrolou integrity vlaku musí být informace o celistvosti soupravy vlaku předávána systémem kontroly celistvosti (angl. train integrity monitoring system – TIMS) prostřednictvím rozhraní TIU jednotce EVC. Z hlediska traťové části se vlak s aktivním TIMS projeví tak, že jeho hlášení o poloze budou obsahovat také informaci, že integrita vlaku byla potvrzena spolu s bezpečnou hodnotou udávající vzdálenost konce vlaku od jeho čela.

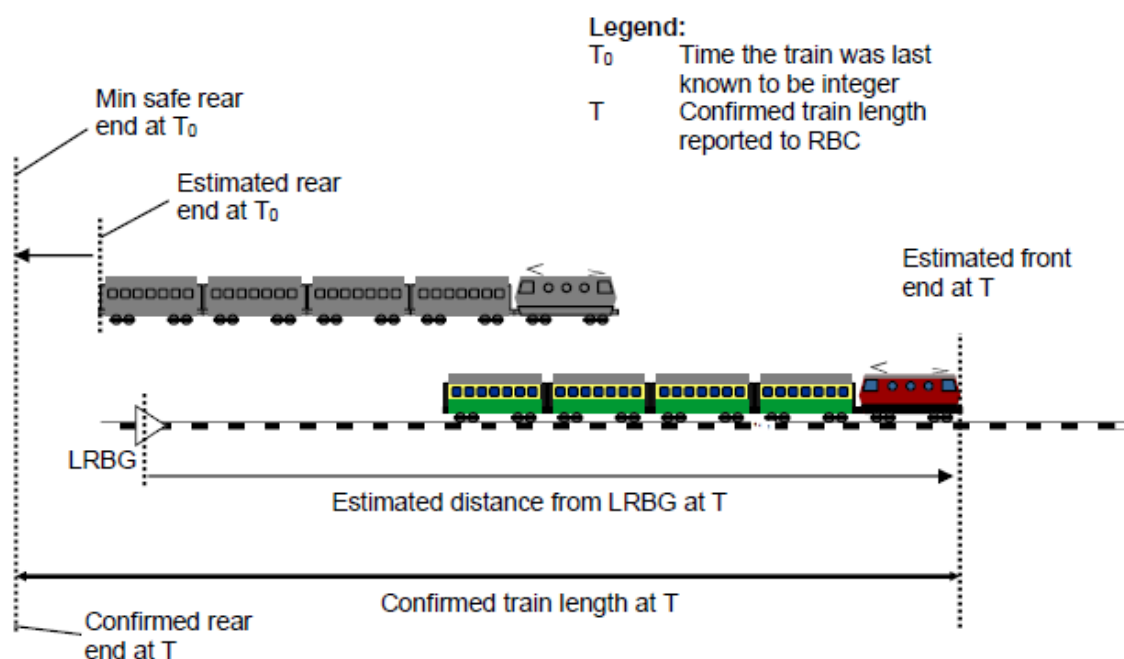


Figure 15: Calculation of Confirmed Train Length when train integrity is reported to the RBC

Obrázek 4 Znáznornění bezpečné délky vlaku (zdroj [8, s. 63])

Konkrétně je v datové struktuře zprávy nesoucí hlášení o poloze proměnná informující o bezpečné délce vlaku označena jako `L_TRAININT`. Tato proměnná je součástí paketů 0 (hlášení o poloze) a 1 (hlášení o poloze založené na informaci o dvou BG). Proměnná `L_TRAININT` se použije pouze, pokud integrita vlaku je potvrzena (strojvedoucím či externím zařízením) [9, s. 40, 41, 57]

Na rozhraní TIU je pro účely informace o integritě definován vstupní parametr, který může nabývat hodnot: [10, s. 17]

- Celistvost vlaku potvrzena⁹
- Ztráta celistvosti vlaku
- Stav celistvosti vlaku neznámý

Pro stanovení bezpečné délky vlaku je kromě informace o celistvosti soupravy potřeba znát také skutečnou fyzickou délku vlaku. Informace o délce soupravy je podle specifikace TIU součástí dat o vlaku a skládá se z těchto údajů [10, s. 18]:

- Zda je informace o celkové délce soupravy dostupná
- Minimální, nominální a maximální délka soupravy za čelem vedoucího hnacího vozidla včetně délky tohoto vozidla
- Minimální, nominální a maximální délka soupravy před čelem vedoucího hnacího vozidla (bez započítání délky tohoto vozidla)¹⁰

Před začátkem jízdy vlaku zadává strojvedoucí v rámci vlakových dat jednu hodnotu délky vlaku, pro využití v kontextu stanovení bezpečné polohy konce vlaku však není podle specifikací tato forma použitelná. [11, s. 35]

Celková integrita bezpečnosti funkce hlášení informace o poloze vlaku (tedy tzv. bezpečného čela a bezpečného konce) musí podle specifikace dosahovat úrovně SIL 4. Pro samotnou informaci o bezpečné celkové délce soupravy je definován požadavek na úroveň bezpečnosti SIL 2 a tato informace musí být mobilní části systému ETCS poskytnuta externím zařízením, nesmí jít o informaci zadávanou obsluhou vlaku (strojvedoucím). Konkrétní implementace ERTMS na každém úseku infrastruktury však může na základě vyhodnocení rizik požadovat, aby i tato funkce mobilní části dosahovala úrovně integrity bezpečnosti SIL 4¹¹. takový požadavek musí daný provozovatel infrastruktury zveřejnit v evropském registru železniční infrastruktury (RINF). Integrity bezpečnosti pro funkci poskytování informace o integritě soupravy je požadována na úrovni SIL 2. [12, s. 35]

⁹ Odkazovaný Subset-034 nespécifikuje, jakým má být algoritmus poskytování informace o integritě vlaku pro ucelené jednotky. Způsob jeho řešení bude tedy dán konkrétní implementací na konkrétním vozidle.

¹⁰ Podle souboru specifikací číslo 4 je možná jízda vozidel v módu SM (angl. „supervised manoeuvre“ – dohlížená posunová jízda). V tomto módu může být hnací vozidlo komunikující s RBC řazeno jako vložené, tedy část posunového dílu je v tu chvíli ve směru pohybu před tímto vozidlem (sunuta) a část za ním (tažena)

¹¹ Vyšší požadavek na úroveň integrity bezpečnosti je předpokládán např. při provádění posunu v módu SM. Daný správce infrastruktury může místo požadování bezpečnosti na úrovni SIL 4 použít jiná opatření k ošetření případných identifikovaných rizik, např. osazení (či ponechání v provozu) detekčních prostředků na straně infrastruktury.

V rámci výzkumu v oblasti moderních způsobů řízení a zabezpečení železniční dopravy na FD ČVUT byl navržen způsob, který umožňuje na straně traťové části systému ETCS ověřovat, zda délka vlaku zadaná strojvedoucím v rámci dat o vlaku odpovídá skutečné délce soupravy. Tento postup je založen na použití informace z počítačového bodu počítače náprav. Pro vlak projíždějící tímto počítačovým bodem je definováno tzv. poziční okno. Při příjmu hlášení o poloze (angl. position report – PR), podle kterého by měl vlak při uvažování délky uvedené v datech o tomto vlaku celým definovaným pozičním oknem sledovaný počítačový bod, se sleduje, zda dojde na daném bodě k započítání dalších náprav. Pokud ne, lze zadaný údaj o délce vlaku považovat za bezpečný. [13, s. 91]

2.1.1.1. Hybridní detekce vlaku

Výše popsáný způsob určování polohy vlaku na infrastruktuře zavedením pohyblivého oddílu kromě očekávaného zvýšení kapacity nabízí také potenciál ke snížení počtu infrastrukturních detekčních prvků (počítačů náprav či kolejových obvodů), což se může projevit snížením nákladů na instalaci nových technologií i jejich údržbu. V případě úplného odstranění těchto prvků a spoléhání se pouze na vyhodnocování volnosti úseků infrastruktury pomocí hlášení polohy z vozidel se objevují určitá rizika. Pro fungování musí takový systém v každém okamžiku znát polohu a informaci o integritě každého vozidla, které se fyzicky nachází v daném úseku infrastruktury. Splnění těchto podmínek v reálném prostředí je však značně komplikované. Příklady situací, kdy mohou nastat komplikace jsou:

- Případy, kdy je přerušena komunikace vozidla s traťovou částí. Sem patří např.:
 - Manipulace s vozidly (posun – mód SH)
 - Vypnutí palubní části (mód NP)
 - Ztráta rádiového spojení
- Výpadek či úmyslné vypnutí traťové části (např. kvůli údržbě)
- Nedovolená jízda vozidla
- Pohyb vozidla podle národních pravidel
- Ztráta integrity vlaku

Ve všech těchto uvedených situacích ztrácí traťová část informaci o volnosti či obsazenosti dotčených částí infrastruktury, což by mělo vést k bezpečné reakci a považování těchto úseků za obsazené. V takovém případě je pak pro obnovení standardního provozu nutné provést zjištění volnosti této části infrastruktury alternativním způsobem, což přináší další provozní komplikace a finanční náklady¹².

¹² Autor této práce může ze své vlastní zkušenosti při spolupráci na zjišťování příčin incidentů v provozu systému ETCS na síti Správy železnic potvrdit, že dopady stavů, kdy systém ETCS

Tyto problémy při absenci traťových detekčních prostředků řeší tzv. hybridní detekce vlaku. Tako metoda kombinuje detekci vlaku infrastrukturními prostředky se zpracováváním hlášení o poloze vlaků, které jsou schopny potvrzovat svou celistvost. V případě poruch či výpadků na straně hlášení polohy vozidly pak tento systém zachovává bezpečnost provozu pomocí konvenčních detekčních prostředků, byť s případně omezenými parametry (např. snížení kapacity z důvodu nutnosti jízdy v mezistaničních oddílech). Princip fungování hybridní detekce vlaku je zachycen na Obrázek 5.

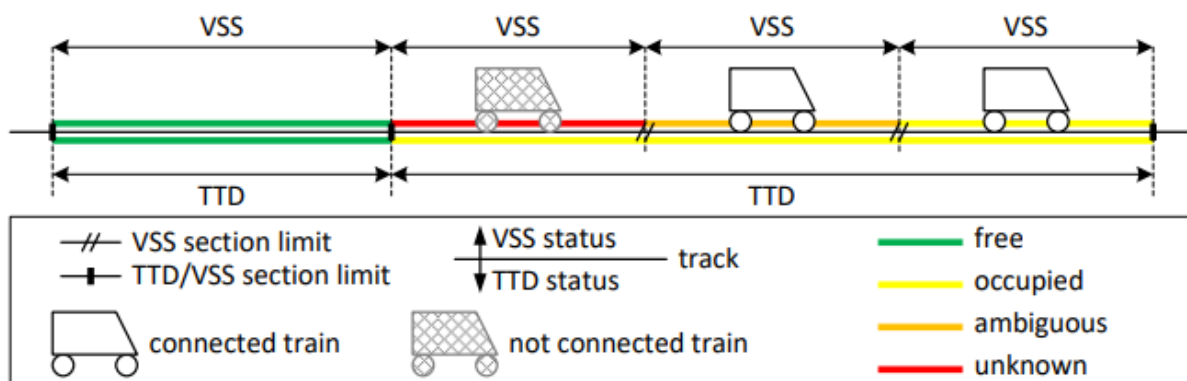


Figure 1: Section conventions

Obrázek 5 Základní pojmy hybridní detekce vlaku (zdroj [14, s. 10])

Význam jednotlivých pojmů je následující:

- **TTD (trackside train detection)** – úseky definované konvenčními způsoby detekce vlaku (kolejové obvody, počítače náprav). Tyto úseky jsou (z pohledu hybridní detekce vlaku) vždy v jednom ze stavů: obsazený, či volný¹³.
- **VSS (virtual sub-section)** – pevně definované pod-úseky v rámci jednoho úseku TTD, jejichž stav je vyhodnocován pomocí kombinace informací z TTD a informací přijatých od vlaků v rámci jejich hlášení o poloze (PTD – positive train detection). VSS může je vždy v jednom ze stavů: obsazený, nejednoznačný, neznámý, volný.

Význam jednotlivých stavů VSS je následující:

v určitém úseku ztratí informaci o volnosti, jsou významné. Na síti SŽ se nepoužívá hybridní detekce vlaku, nicméně zejména při porušení blokové podmínky v traťových oddílech mohou nastat situace, kdy v dotčené části trati systém nařizuje jízdu vlaku podle rozhledových poměrů. Strojvedoucí v takové situaci musejí významně snížit rychlost jízdy a vést vlak tak, aby byli schopni zastavit před případnou překážkou. Tento propad rychlosti se kromě vyvolání zpoždění projeví také zvýšeným odběrem trakční energie. Specifické pro konkrétní implementaci ETCS na síti SŽ jako nadstavby nad stávajícím konvenčním zabezpečovacím zařízením se světelnými návěstidly pak je také to, že návěsti světelných návěstidel v těchto situacích jízdu podle rozhledových poměrů zpravidla nenařizují. Z tohoto rozporu plyne sekundární riziko, že strojvedoucí bude považovat zabezpečovací systém na lokomotivě za vadný a bude mít snahu ho vypnout, čímž může docházet ke snižování bezpečnosti provozu.

¹³ Poruchové a nestandardní stavy těchto zařízení pro zjišťování volnosti se musí z hlediska bezpečnosti projevit vyhodnocením dotčeného úseku jako obsazeného. (V tomto smyslu nejsou uvažovány prostředky pro detekci přítomnosti vozidla, tedy např. sériové kolejové obvody apod.)

- **Volný (angl. free)** – v daném oddílu se nenachází žádné vozidlo, traťová část tuto skutečnost nepochybně zjistila
- **Obsazený (angl. occupied)** – v daném oddílu se podle PTD nachází vlak, který podle hlášené informace o integritě je celý, zároveň traťová část nepochybně ví, že se v oddíle za tímto vlakem nenachází žádné jiné (nekomunikující) vozidlo
- **Nejednoznačný (angl. ambiguous)** – v daném oddílu se podle PTD nachází vlak (jeho integrita nemusí být potvrzena), za vlakem se však může nacházet další vozidlo
- **Neznámý (angl. unknown)** – v daném oddíle není podle PTD hlášena poloha žádného vlaku, ale může se v něm nacházet vozidlo

Důležitou charakteristikou hybridní detekce vlaku je to, že pro spolupracující systémy (tedy zejm. stavědla, RBC) všechny VSS vystupují vždy pouze jako volné, či obsazené podle Tabulka 1.

Tabulka 1 Význam jednotlivých stavů

Vnitřní stav VSS	Indikace obsazení / volnosti pro spolupracující systémy
Volný	Volný
Obsazený	Obsazený
Nejednoznačný	Obsazený
Neznámý	Obsazený

Pro každý VSS platí, že pokud je volný úsek TTD, který je tímto VSS překryt, je jako volný označen i tento VSS. Tato vlastnost umožňuje na hranici úseků TTD (typicky např. ve zhlavích dopraven) uvolnění VSS dříve, než dojde k vyhodnocení jeho volnosti prostřednictvím PTD¹⁴. Příklad je uveden na Obrázek 6.

¹⁴ Doba vyhodnocení volnosti prostřednictvím PTD může být prodloužena např. při zpoždění v rádiové komunikaci mezi mobilní a traťovou částí systému.

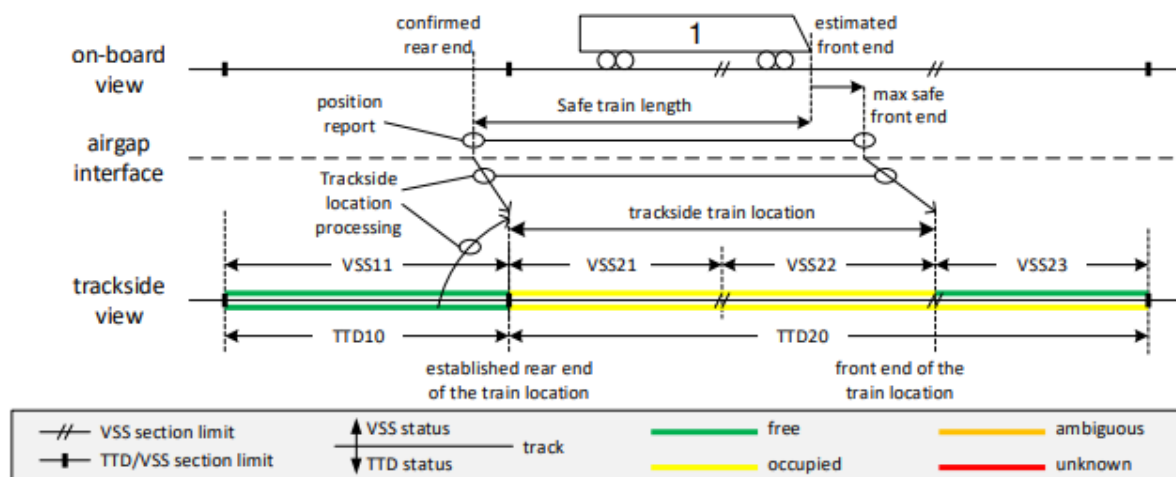
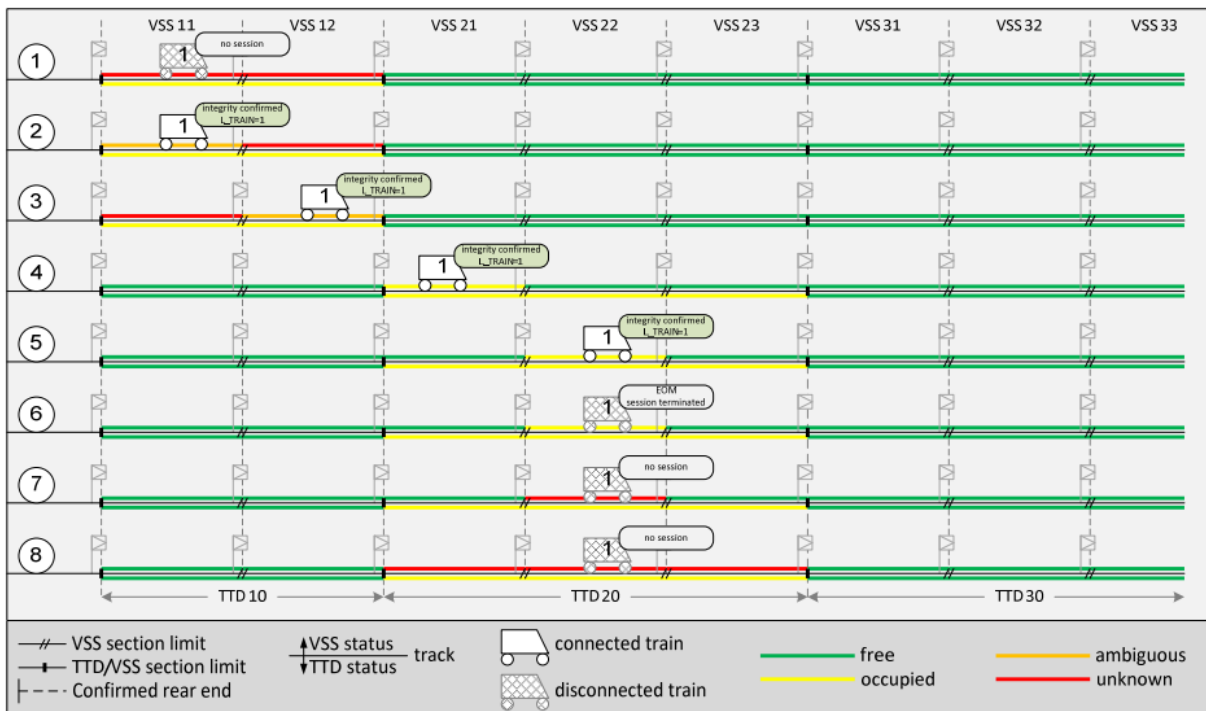


Figure 2: Train location for integer train

Obrázek 6 Vyhodnocení volnosti VSS11 na základě informace z TTD10 (zdroj [14, s. 14])

Celý algoritmus přechodů VSS mezi jednotlivými stavy je poměrně komplexní¹⁵, jeho součástí je kromě přímého zpracování vstupů z TTD a PTD také práce s časovými limity mezi jednotlivými změnami vstupů. Hodnoty těchto limitů musejí být stanoveny v rámci projektování instalace systému na základě charakteristiky daného úseku infrastruktury (jde např. o délku úseku, traťovou rychlost, sklonové poměry, uvažovaná latence v komunikačním řetězci mezi vozidlovou a traťovou částí apod.) Příkladem takového časového limitu je např. čas pro rozšíření stavu „neznámý“ na sousední VSS v rámci jednoho úseku TTD při ukončení spojení vlaku (např. při ukončení mise), jak je naznačeno na Obrázek 7 v bodu 8.

¹⁵ Vzhledem ke komplexnosti nově navrženého algoritmu proběhly na např. na technické univerzitě v Delftu projekty, které modelovaly navržené specifikace pomocí matematických formálních metod a měly za cíl ověřit některé vlastnosti (předpoklady) nutné pro bezpečné nasazení tohoto systému v provozu. [51]



Obrázek 7 Ukončení jízdy vlaku ve VSS a rozšíření stavu neznámý na sousední VSS (zdroj [14, s. 43])

Popsaný princip hybridní detekce vlaků nabízí díky abstrakci komplikovaných vnitřních závislostí při poskytování informace o volnosti a obsazení úseků infrastruktury spolupracujícím systémům potenciál nasazení se zachováním konvenčních principů zabezpečení železničního provozu. V tomto směru je též důležité zopakovat, že jde o systém pracující s pevnými prostorovými oddíly, jejichž délka je ale dána do značné míry pouze konfigurací VSS bez nutnosti zřizování dodatečných infrastrukturních detekčních prostředků při snaze o zkracování jednotlivých prostorových oddílů (zejména v oblastech železničních stanic). Díky tomu lze tyto VSS zkracovat podle potřeby a zvyšovat tak dostupnou kapacitu daných úseků infrastruktury. [14, s. 6] hovoří dokonce o parametrech srovnatelných s uvažovaným pohyblivým oddílem. Důležitým faktorem je také možnost provozu vlaků s i bez systému TIMS současně.

Z uvedeného vyplývá, že u výše popsaných flexibilnějších způsobu řízení a zabezpečení železniční dopravy existuje potenciál pro zvýšení kapacity infrastruktury¹⁶, který nemusí nutně vyžadovat velké investice do modernizace a rozsáhlé doplňování infrastrukturních detekčních prostředků.

Podmínkou jeho použití je však dostupnost informace o bezpečné délce vlaku poskytovaná vozidlovou částí systému ETCS s požadovanou úrovní integrity bezpečnosti.

¹⁶ Nejvýraznější možnost navýšení kapacity je potenciálně u regionálních tratí, kde je v současném stavu instalováno minimální infrastrukturní vybavení. [52, s. 37-38]

2.2. Způsoby zjišťování celistvosti vlaku

Pro zjišťování celistvosti vlaku je jedním z východisek fakt, jestli jsou vozidla v soupravě daného vlaku vybavena nějakým zařízením, či alespoň vedením, pro přenos elektrických signálů mezi vozidly. Pokud tato možnost spolehlivého přenosu mezi vozidly na začátku a na konci soupravy existuje, stává se implementace systému TIMS s požadovanými parametry (zejména z pohledu bezpečnosti) značně jednodušší. Hlavním přínosem je v tomto případě možnost vytvoření dvou či více nezávislých kanálů pro přenos a vyhodnocování dat, které umožní systému provádět svou funkci s vyšší úrovní integrity bezpečnosti. Některé systémy kontroly celistvosti vlaku jsou schopny k plnění své funkce využívat propojovací vedení elektropneumatické (EP) brzdy, kdy pomocí tohoto vedení může být realizována bezpečnostní smyčka, jejíž přerušení je indikací roztržení vlaku. U vlaků, kde pevné telekomunikační spojení mezi jednotlivými vozidly v soupravě neexistuje, je potřeba pro implementaci systému TIMS zvolit určitou formu bezdrátové komunikace, které však značně komplikuje dosažení požadované úrovně integrity bezpečnosti.

V letech 2017 až 2021 proběhl v rámci iniciativy Shift2Rail¹⁷ výzkumný projekt X2RAIL2. Jedním z výstupů tohoto projektu je i popis konceptu integrity vlaku a specifikace požadavků na funkce pro systémy TIMS. [15] V rámci tohoto výstupu bylo provedeno porovnání různých variant produktů a přístupů k problematice kontroly celistvosti soupravy palubními zařízeními (tzv. OTI – on-board train integrity). Porovnávané systémy lze rozdělit přibližně do kategorií popsaných v následujících odstavcích.

2.2.1. Systémy TIMS s vlakovou sběrnici

Většina osobních vlaků využívá určitý typ sběrnice pro komunikace mezi prvky různých systémů rozmístěných v různých vozidlech. K tomuto propojení je využívána palubní vlaková komunikační síť (TCN – train communication network). [16] V rámci jednoho vozidla jsou jednotlivá zařízení propojena pomocí sběrnice MVB (multifunction vehicle bus), tento způsob propojení se zpravidla používá i u vícevozových jednotek, jejichž soupravy se za provozu nemění. Pro propojování např. samostatných lokomotiv se soupravami vozů nebo vozů v soupravách mezi sebou slouží sběrnice WTB (wire train bus). [16] Moderní alternativou ke sběrnici WTB je síť ETB (Ethernet train backbone) založená na protokolu Ethernet, která podporuje standardní telekomunikační referenční model OSI. Jednou z možností, které tato technologie poskytuje, je tvorba virtuálních LAN (tzv. VLAN), pomocí kterých lze izolovat provoz mezi vybranými zařízeními do oddělených virtuálních podsítí. Tato funkcionality může být vhodná při implementaci TIMS např. pro oddělení bezpečnostně relevantní komunikace

¹⁷ Z právního hlediska byl Shift2Rail společný výzkumný podnik (Joint Undertaking) Evropské unie a soukromého sektoru.

jednotlivých kanálů a také k oddělení od ostatního provozu v síti, který mohou představovat např. data informačních systémů pro cestující. [15, s. 38]

Ucelené jednotky, zpravidla dodávané jediným výrobcem nebo jedním konsorciem společností, často implementují systém plnicí funkce TMS určitým proprietárním způsobem. Při implementaci ETCS v takové jednotce je pak na integrátorovi této zástavby, aby tento výstup patřičným způsobem navázal na rozhraní TIU.

Projekt X2RAIL2 v identifikoval proces probíhající v TCN při sestavování vozidel vlaku (angl. train inauguration) během kterého je jednotlivým uzlům (zde myšleno vozidlům) v síti přidělován unikátní identifikátor a obecně dochází k „mapování“ nově vzniklé vlakové sítě včetně její topologie. Tento proces probíhá jak v síti využívající směrnici WTB, tak s moderních sítích ETB, kde na základě sestavené topologie následně probíhá např. směrování síťového provozu (tzv. routing). Z pohledu využití je důležitý fakt, že jednotlivé uzly sítě evidují informaci o tom, jaké další uzly s nimi sousedí, případně jestli je některý z jejich konců volný a je tedy koncem vlaku. Případná změna v topologii je detekována se zpožděním 175 ms. [15, s. 42]

Zařízení v síti mohou využít protokol SDTv2 (safe data transmission) k přenosu bezpečnostně relevantních dat, který umožňuje dosažení úrovně integrity bezpečnosti SIL2. Další verze tohoto protokolu, které budou používat bezpečnostní kontrolní součty s delšími kontrolními poli, by měly být schopny dosáhnout až na úroveň SIL4. [15, s. 48]

2.2.1.1. Digitální automatické spřáhlo

V roce 2022 byl iniciativou Europe's Rail¹⁸ spuštěn tzv. „flagship project 5“ (FP5), který je zaměřen na modernizaci evropské železniční nákladní dopravy s cílem zejména zvýšení podílu železnice na celkové přepravní práci (tzv. modal split) v Evropě. Jednou z nejvýraznějších aktivit FP5 je snaha o vytvoření podmínek pro vznik tzv. FDFTO (full-digital freight train operation), což je koncept, který počítá s dosažením situace podobné aktuálnímu stavu vlakových komunikačních sítí u vozidel pro přepravu cestujících, tedy kdy jednotlivé nákladní vozy budou vybaveny různými systémy umožňující jednak efektivní sledování a monitorování přepravovaného zboží během cesty (např. dodržení požadovaných teplot u klimatizovaných vozů), ale také dovolí automatizaci celého procesu vlakotvorby. [17]

Základním prvkem, který má umožnit FDFTO je digitální automatické spřáhlo (DAC – digital automatic coupler). Projekt jeho nasazování na evropských železnicích pracoval s několika

¹⁸ Europe's Rail (zkráceně ERJU – Europe's Rail Joint Undertaking) je nástupnickou organizací iniciativy Shift2Rail. Jde o organizaci založenou orgány Evropské unie s cílem vedení výzkumných aktivit v oblasti železnice sdružující zástupce veřejného a soukromého sektoru (národní správci infrastruktury, výzkumné instituce, průmyslové podniky apod.)

variantami spřáhla, označovanými jako DAC typ 1 až 5. Stávající způsob spojování železničních vozů pomocí šroubovky a nárazníků je označován zkratkou SC (angl. screw coupler). [18]

- DAC typ 1 – tato varianta umožňuje automatické mechanické spojování vozidel při jejich najetí na druhé vozidlo, propojení hadic brzdového potrubí musí být provedeno manuálně, stejně tak je potřeba ručně vozidla rozpojovat
- DAC typ 2 – typ 2 oproti variantě 1 umožňuje automatické spojování brzdového potrubí, rozpojování je však stále manuální, typ 1 a 2 neumožňují propojování komunikačního ani napájecího vedení mezi vozy
- DAC typ 3 – typ 3 je vybaven zařízeními pro automatické spojení mechanické, pneumatické a elektrické (napájení), vozidla mohou spřáhlo rovněž poskytuje rozhraní pro propojení ovládání elektropneumatické brzdy, rozpojování je manuální
- DAC typ 4 – typ doplňuje typ 3 o propojení komunikačních kabelů mezi jednotlivými vozidly
- DAC typ 5 – poslední typ 5 je maximalistickou variantou, kromě možností DAC typu 4 rovněž podporuje proceduru automatického vzdáleného rozpojení soupravy v požadovaném místě

Zavádění DAC je aktuálně široce diskutovaným tématem. V rámci ERJU byl vytvořen zvláštní program EDDP (european DAC delivery programme), který má za cíl vytvořit podmínky pro rychlé a efektivní nasazení DAC napříč Evropou. [19] V průběhu roku 2025 je plánován začátek nasazování do provozu zařízení DAC typ 4 v tzv. „pre-deployment“ fázi. Celkově by mělo jít o 100 vlaků, které budou operovat na železnicích různých evropských států a mají prokázat spolehlivost technologie DAC, dokázat potenciál celoevropského plošného nasazení digitálního spřáhla a zajistit postupnou plynulou adaptaci celého železničního systému na změny spojené s jeho zaváděním. [20]

Jako hlavní výhody FDFTO jsou uváděny [20]:

- Zvýšení maximální možné délky a hmotnosti nákladních vlaků
- Snížení potřebného objemu manuální práce při manipulaci s vozy a zvýšení bezpečnosti pracovníků. Mezi tyto aspekty patří:
 - Automatické spojování a rozpojování vozů včetně brzdového a všech dalších propojení
 - Automatické sestavení rozboru vlaku a soupisu jednotlivých vozů
 - Automatická zkoušky brzdy a stanovení brzdových parametrů

- Zvýšení výkonosti a komfortu pro obsluhu při posunu (automatické zajišťovací brzdy, varování okolních pracovníků při pohybu vlaku, možnost monitorování prostoru za koncem vlaku při sunutí)
- Poskytování informace o integritě a bezpečné délce soupravy
- Automatické dálkové ovládání zařízení pro nakládku a vykládku (otevírání a zavírání klapek apod.)
- Rozvoj telematických aplikací sbírajících dat o provozu jednotlivých vozů (prediktivní údržba, monitorování a zabezpečení nákladu během přepravy)

2.2.2. Systémy TIMS pracující se senzorickou sítí

Některé přístupy ke zjišťování celistvosti vlaku zkoumané v rámci projektu X2RAIL 2 využívají pro plnění svého cíle senzory a vyhodnocovací zařízení rozmístěná na různých místech v soupravě, které mezi sebou komunikují bezdrátově¹⁹. Hlavním z nasazených typů senzorů byl ultrazvukový senzor vzdálenosti od okolních objektů. [15, s. 32]

Demonstrace nasazení těchto systémů proběhly na vlacích s vozidly, u nichž bylo možné jednotlivé senzory centrálně napájet elektrickou energií.

2.2.3. Systémy TIMS využívající brzdové potrubí pro detekci celistvosti

Zejména ve státech Severní Ameriky a zemích s podobným charakterem provozování železniční dopravy je (hlavně u nákladních vlaků) rozšířeno používání zařízení umístěných na posledním vozu soupravy, která určitým způsobem monitorují pohyb daného vozu a sledují aktuální hodnotu tlaku v brzdovém potrubí. Tato zařízení (angl. end of train device – EoT) nahradila zvláštní služební (či brzdařské) vozy řazené na koncích velmi dlouhých nákladních vlaků, jejichž posádky měly za úkol asistovat při posunu, za jízdy vlaku kontrolovat chod soupravy a v případě nebezpečí obsloužit záchrannou brzdu, která vypustila vzduch z průběžného potrubí.

¹⁹ Výstup projektu X2RAIL 2 v kontextu využití senzorických sítí pro realizaci systému TIMS popisuje projekt DEWI, který provedl demonstraci systému monitorujícího složení a integritu vlaku na historické železnici v Litvě, a na něj navazující projekt SCOOT, který se zabývá konceptem tzv. virtuálního spojování vlaků, kdy díky komunikaci mezi dvěma za sebou jedoucími vlaky tyto od sebe udržují pevně danou vzdálenost.



Obrázek 8 Služební vůz (angl. caboose) na železnici ve státě Illinois (zdroj [21])

Moderní zařízení EoT fungují jako telemetrické jednotky a na posledním vozu soupravy měří řadu parametrů, která následně odesílají pomocí rádia řídicí a zobrazovací jednotce na lokomotivě (angl. head of train device – HoT). Přenos dat z konce vlaku slouží strojvedoucímu k získávání lepšího přehledu o stavu celé soupravy. Obrázek 9 z manuálu k jednomu z takových zařízení ukazuje příklad provedení EoT. [22]

Jednou z veličin, kterou tyto systémy na konci vlaku měří, je tlak vzduchu v průběžném potrubí. Tato hodnota je důležitá pro ověření průchodnosti brzdového potrubí a včasné zjištění případného uzavření některého z brzdových kohoutů nebo zaškrvení brzdové hadice. Zařízení EoT jsou dále schopna na základě povelu z řídicí části HoT otevřením ventilu vypouštět vzduch z brzdového potrubí. [15, s. 49]

Zařízení typu EoT a HoT mohou být využita k implementaci systému TIMS pracujícím na principu vyhodnocování stavu průběžného brzdového potrubí. Tato varianta má výhodu absence nutnosti vybavování vozidel v soupravě dodatečnou technologií (s výjimkou posledního vozu a EoT). Nevýhodou takového řešení je dlouhá doba nutná k vyhodnocení ztráty integrity způsobená omezenou rychlostí šíření změny tlaku při přerušení brzdového potrubí soupravou. [15, s. 49]

Zařízení EoT zpravidla také informují, zda se konec vlaku pohybuje, jaká je aktuální poloha zařízení (GPS souřadnice), a dále o provozních parametrech jako je stav rádiového spojení, zbývající kapacita baterie EoT apod. [15, s. 52]



Figure 2-1 Unlatching the Crank Handle

Obrázek 9 Příklad zařízení EoT namontovaného na spřáhle vozu (zdroj [23])

Na základě dostupných materiálů byly porovnány 3 zařízení typu ETD různých výrobců.

2.2.3.1. Trainguard EOT

Zařízení Trainguard EoT je vybaveno LiFePO₄ baterií s kapacitou 4,5 Ah a nominálním napětím 12,8 V, deklarovaná doba provozu při výpadku napájení je minimálně 36 hodin. Pro informování obsluhy slouží dva displeje schopné zobrazit trojici číslic a jeden alfanumerický displej s osmi pozicemi. Hmotnost jednotky je 8,3 kg. Pro připojení, stahování záznamů, konfiguraci zařízení a aktualizaci firmware zařízení lze použít USB, WiFi, mobilní síť 4G, LTE či IoT nebo linku RS232. Měřená data jsou ukládána na SD kartu s výchozí velikostí 8 GB. Při instalaci zařízení na vlak a spuštění je definován přesný postup spárování jednotky s HoT, který umožní použití nouzové brzdy na posledním voze pomocí EoT na příkaz jednotky HoT. Tento párovací postup je popsán na příkladu v kapitole 3.3.7. Není-li zařízení v provozu (tj. není měřen žádný tlak na vstupu a zařízení není po dobu delší než 60 vteřin postavené vzpřímeně (tj. v poloze, ve které by bylo namontováno na konci vlaku), dojde k jeho přechodu do režimu spánku. Z tohoto režimu se zařízení probudí stisknutím ovládacího tlačítka na boční straně jednotky. Toto tlačítko je jediným fyzickým ovládacím

prvkem, veškerá obsluha a nastavování zařízení se provádí pomocí kombinací různě dlouhých stisků tlačítka podle návodu. Další možnost nastavování je pomocí uvedené sériové linky RS232 nebo WiFi rozhraní (po zapnutí dané volby zařízení začne pracovat jako WiFi přístupový bod, po připojení k němu lze v prostředí webové aplikace provádět konfiguraci nebo prohlížení záznamů). Připojení pomocí 4G modemu slouží ke vzdálenému monitorování pohybu zařízení. Za snížené viditelnosti je aktivováno intenzivní červené zábleskové světlo jednotky. [24]

2.2.3.2. DPS 2020-He-LD ETD

Toto zařízení je vybaveno externí prutovou anténou. Hmotností 8,16 kg je srovnatelné s jednotkou Trainguard. Výrobce deklaruje, že výměna baterie je u tohoto typu nutná jednou za 3 roky, což by mělo být třikrát méně často než u ostatních podobných produktů. Uváděná kapacita úložiště je 2 GB. Ostatní parametry jsou srovnatelné s předchozím uvedeným zařízením. V dostupném materiálu se výrobce nezmiňuje o možnosti připojování k zařízení přes webové rozhraní. [25]

2.2.3.3. TrainLink NG5ATX

ETD TrainLink NG5ATX je v porovnání s přechozími dvěma zařízeními nejlehčí, s hmotností 5,9 kg. Podle dostupných podkladů je v konstrukci zařízení kladen důraz na snadnou vyměnitelnost jednotlivých částí. [26]

Všechny analyzovaná zařízení podporují komunikaci na dvojici kmitočtů 457.9375 MHz (TX) and 452.9375 MHz (RX), na které probíhá komunikace mezi zařízeními EoT a HoT podle standardu AAR²⁰ S-9152.

3. Projekt INTELLIGENT_END4TRAIN

V roce 2023 byl na FD ČVUT v Praze zahájen projekt „Výzkum provozních aspektů inteligentního konce vlaku“, jehož cílem je vývoj a provozní ověření systému „inteligentního konce vlaku“, zejména přenosové, měřicí, řídicí a napájecí části. Kromě zástupců Fakulty dopravní a Fakulty elektrotechnické ČVUT jsou součástí projektového týmu také odborníci ze souvisejících železničních oborů z ČD Cargo, TRS Pardubice a Výzkumného ústavu železničního (VÚŽ). Součástí řešitelského týmu projektu je i autor této práce. [27]

Projekt END4TRAIN je podpořen grantem Technologické agentury České republiky s označením TAČR CK04000156. Pro dosažení definovaného cíle projektu, tedy prozkoumání provozních aspektů systému zařízení typu „inteligentního konce vlaku“, má být vytvořen funkční vzorek tohoto zařízení sestávajícího z jednotky EoT a HoT.

²⁰ AAR je zkratka americké standardizační organizace Association of American Railroads

3.1. Východiska projektu

Projekt INTELLIGENT_END4TRAIN zvolil ve svém počátku koncepci inteligentního konce vlaku podobnou výše popsanému způsobu telemetrických aplikací pro měření veličin na konci vlaku pomocí zařízení EoT s bezdrátovým přenosem dat a vyhodnocováním měření v zařízení HoT na vedoucím hnacím vozidle. Tato architektura systému byla zvolena s cílem v budoucnu umožnit co nejjednodušší a finančně zvládnutelnou aplikaci vyvinutého zařízení v podmínkách české, resp. evropské železnice. Primárně se očekává využití popisovaného systému u nákladních vlaků a je cílem umožnit jeho nasazení bez nutnosti úprav nákladních železničních vozů – nutný by byl pouze zásah na hnacích vozidlech, která se budou muset vybavit částí HoT.

Jednotka EoT je konstruována tak, aby byla schopna využití generátoru elektrické energie pracujícího na stlačený vzduch z průběžného brzdového potrubí vlaku pro dobíjení integrovaného akumulátoru.

Mezi zkoumané provozní aspekty navrhovaného systému patří např.:

- Dostupnost a funkčnost rádiového spojení mezi EoT a HoT v železničním prostředí
- Typická spotřeba energie jednotky EoT a s ní související maximální předpokládaná doba provozu zařízení po nabití akumulátoru.
- Možnost využití elektrického generátoru odebírajícího určité množství stlačeného vzduchu z průběžného potrubí pro dobíjení jednotky EoT při provozu
- Možnosti upevnění jednotky EoT na různé druhy železničních nákladních vozů
- Stanovení vhodných postupů pro instalaci a sejmutí jednotky EoT na poslední vůz vlaku během jeho sestavování
- Odhad očekávané hmotnosti a rozměrů jednotky EoT vzhledem k dostupným technologiím
- Možnost integrace jednotky HoT na hnacím vozidle, zejm. dostupnost možných rozhraní umožňujících měření tlaku v hlavním potrubí a snímání stavu lokomotivního brzdiče

Primárním zaměřením aktivit projektu je vývoj systému „inteligentního konce vlaku“ poskytujícího informaci o celistvosti vlakové soupravy na základě vyhodnocování hodnoty a průběhu tlaku v hlavním brzdovém potrubí na konci soupravy a porovnání s hodnotou měřenou na straně hnacího vozidla. Vstupem pro vyhodnocovací algoritmus má být též informace o stavu lokomotivního brzdiče (resp. poloze ovladače brzdiče na aktivním stanovišti strojvedoucího). [27]

Původní koncepce navrhovaného systému počítala se soustředěním vyhodnocovací logiky v části HoT, zařízení na konci vlaku mělo sloužit téměř výhradně k měření potřebných veličin

(kromě tlaku v brzdovém potrubí také např. zeměpisná poloha zařízení [GPS souřadnice] včetně informace o směru a rychlosti pohybu, informace o stavu nabití integrovaného akumulátoru a další). Důvodem tohoto rozhodnutí byla snaha omezit spotřebu energie jednotky EoT a umožnit jednodušší konstrukci celého zařízení, které musí vzhledem k umístění ve venkovním prostředí na pohybujícím se železničním voze splňovat náročné podmínky na odolnost.

Projekt END4TRAIN má podle plánu skončit a odevzdat požadované výstupy v prosinci roku 2024. V době vzniku této diplomové práce jsou dokončeny práce na HW jednotky EoT a HoT včetně jejich oživení a základního otestování. 22. 4. 2024 proběhly zkoušky na zkušebním brzdovém stavu společnosti DAKO Třemošnice, během kterých byl zkoumán vliv připojení jednotky EoT k brzdovému potrubí a chodu pneumatického generátoru na průběžnou brzdu simulovaného vlaku při různých stavech.

Zapojení autora této diplomové práce do projektu spočívalo ve spolupráci na sestavení seznamu požadavků na systém TIMS jako celek a ve vývoji vizualizačního nástroje pro zobrazování průběhů a výsledků měření při testech systému.

Podrobnější popis řešení projektu END4TRAIN je popsán v následujících kapitolách.

3.2. Výzkumná cesta do USA

V srpnu roku 2023 se členové projektového týmu zúčastnili výzkumné cesty do USA s cílem získání bližších informací o fungování systémů kontroly celistvosti vlaku na principu telemetrických zařízení typu EoT a HoT. Během cesty členové projektu navštívili areál společnosti BNSF v Denveru, kde proběhla prezentace ohledně provozních aspektů nasazení jednotek EoT na nákladních vlacích. Součástí této prezentace bylo také fyzické předvedení instalace jednotky EoT a ukázka procesu párování s řídicí částí HoT na lokomotivě.

Jak bylo zjištěno, u dané společnosti se zařízení typu EoT (označováno také jako ETD – end of train device) s pneumatickým generátorem nepoužívají tak dlouhou dobu, aby bylo možné komplexně vyhodnotit praktickou životnost integrovaných baterií a turbíny pro generování elektrického výkonu pro dobíjení akumulátoru v těchto jednotkách. Řešení, které bylo používáno před nasazením ETD s pneumatickými generátory, bylo založeno na vyměnitelných bateriích, které musely být zkontrolovány a případně vyměněny před každým nasazením na vlak.

Důležitým zjištěním bylo také to, že brzdová potrubí vlaků provozovaných v USA (resp. společností BNSF) se plní na tlak o hodnotě 8 bar. Na základě toho lze očekávat, že

potenciální zisk energie pomocí pneumatického generátoru bude vyšší, než s jakým lze počítat v podmínkách evropské železnice, kde nominální tlak v brzdovém potrubí je 5 bar.

Manuál popisující zásady provozování jednotek ETD, který byl členům delegace poskytnut ke studiu, popisuje rozdíly mezi prací se zařízením ETD dodávaným společností Wabtec a obdobným zařízením od společnosti DPS Electronics. Odlišnosti mezi těmito zařízeními jsou zejména ve způsobech indikací na displeji jednotky.

Praktický poznatek, který členové projektu během exkurze získali, je informace o důležitosti snadné manipulace s jednotkou EoT při vlakovorbě. Velký důraz by měl být kladen na hmotnost celého zařízení a na jeho kompaktnost.²¹

3.3. Řešení projektu

Na projektových schůzkách v počátku řešení byly vedoucím projektu END4TRAIN, panem doc. Ing. Martinem Lesem, Ph.D. představeny základní východiska a cíle. Byly vyjasněny organizační aspekty a došlo k rozdělení oblastí práce podle odborností jednotlivých řešitelů.

Jedním z prvních úkolů bylo sestavení prvotního návrhu požadavků na systém TIMS, od kterého se odvíjely další kroky. Seznam požadavků byl postupně upravován a doplňován, podle toho, jak postupovaly práce na projektu. Kromě výše uvedených východisek projektu byly při sestavování seznamu požadavků vzaty v úvahu také informace zjištěné členy řešitelského týmu ze společnosti ČD Cargo ohledně činnosti doprovodu vlaku při roztržení soupravy a ohledně četnosti takovýchto událostí²². Přibližně se objevují jednotky takovýchto událostí ročně. [27]

3.3.1. Rádiová komunikace

Důležitým aspektem celého řešení byla volba frekvenčního pásma a odpovídajícího HW pro bezdrátovou komunikaci mezi jednotkami HoT a EoT. Byly zvažovány varianty využívající licencovaná a nelicencovaná pásma, vzhledem k plánovanému nasazení na železnici byla z licencovaných pásem uvažována ta, která jsou podle platného Plánu využití kmitočtového spektra vydávaného Českým telekomunikačním úřadem vyhrazen pro železniční aplikace (aplikace PMR – private mobile radio – pro železnici). [28]

V uvažovaných nelicencovaných pásmech 430 – 430,45 MHz a 433,04 – 437,79 MHz je podle Všeobecného oprávnění k provozování uživatelských terminálů rádiových sítí

²¹ Dalším poznatkem, který však nesouvisí přímo s provozem jednotek EoT, byla zjevná poměrně častá potřeba výměny centrálních automatických spřáhel vozů používaných u společnosti BNSF, kvůli jejich opotřebení či poškození. Tento fakt může být zajímavý ve vztahu k projektu EDDP zmíněnému v kapitole 272.2.1.1, který usiluje o zavedení automatických spřáhel na evropské železnici.

²² Dle předpisu SŽ D17 pro šetření mimořádných událostí se v případě přetržení vlaku nákladní dopravy nejedná o mimořádnou událost. [53]

elektronických komunikací vydaného ČTU povoleno pro aplikace SRD (short range device – zařízení krátkého dosahu) používat maximální vysílací výkon 100 mW, resp. 10 mW e.r.p.²³ Testy provedené zástupci FD ČVUT ve spolupráci s TRS Pardubice ještě před zahájením projektu END4TRAIN v roce 2021 ukázaly nutnost použití poměrně vysokého výkonu (minimálně 300 mW) pro spolehlivý přenos na vzdálenost přibližně 700 m, kterou lze očekávat u dlouhých nákladních vlaků. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o použití licencovaného pásma na frekvencích kolem 450 MHz, které jsou využívány traťovými rádiovými sítěmi typu SRD (sít' radiodispečerská) provozovanými na železniční infrastruktuře Správy železnic. Získání potřebného povolení k experimentálnímu provozu od ČTU a k testování komunikace na těchto kmitočtech od Správy železnic bude předmětem další práce na projektu. [29, s. 33]

Z důvodu nedostupnosti rádiového modemu schopného provozu v požadovaném pásmu 450 MHz zajistil spoluřešitel společnost TRS Pardubice dovezení vhodného zařízení vyráběného společností americkou RITRON²⁴ do ČR spolu s obstaráním potřebných povolení. [27]

3.3.2. Pneumatický generátor

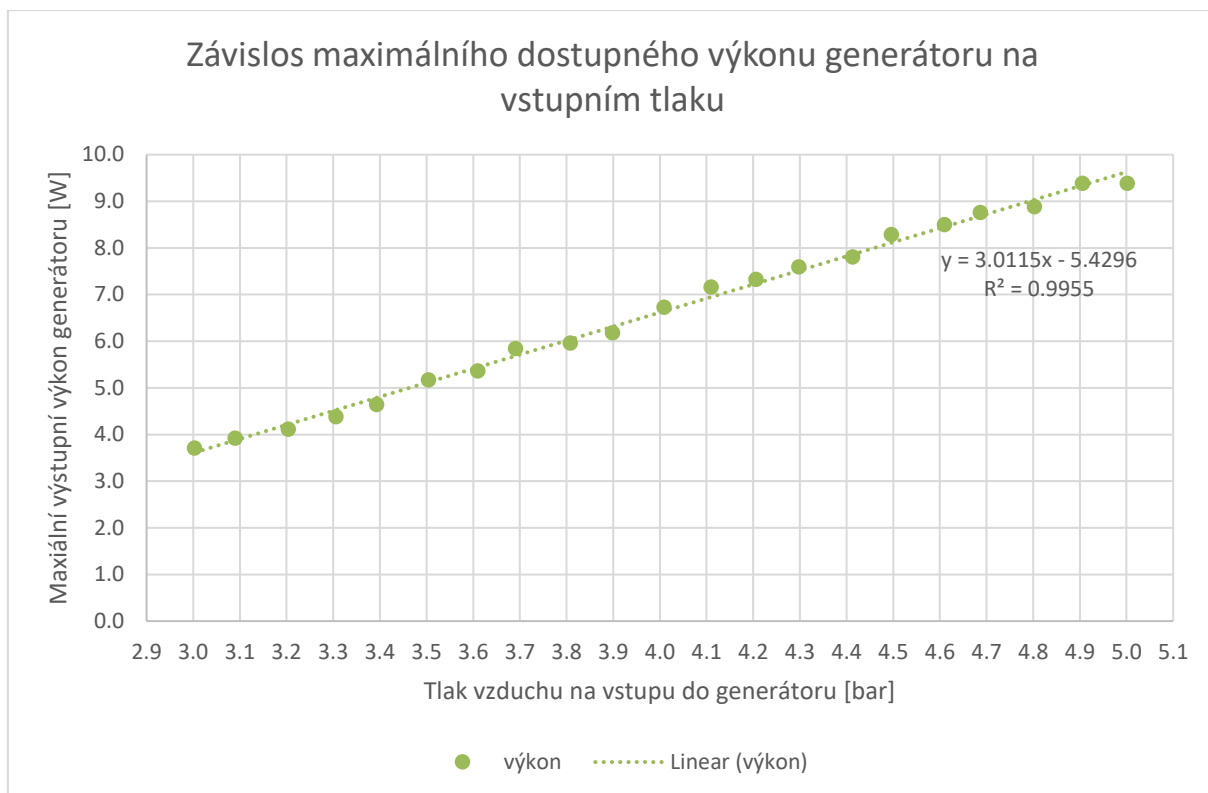
Pro získávání elektrické energie z potrubí průběžné brzdy pomocí pneumatického generátoru bylo použito zařízení Pneumo Power italského dodavatele Metal Work. Jde o systém se vzduchovou mikroturbínou pohánějí bezkartáčový elektromotor a podpůrnou elektronikou, která generuje stejnosměrné výstupní napětí o hodnotě 24 V. [30]

Během testování generátoru byla zjištěna problém s možností efektivní regulace zatěžování generátoru. Zařízení je osazeno indikační zelenou LED diodou, která po většinu času chodu generátoru bliká. Dokumentace k zařízení neobsahovala upřesnění významu této indikace. Během experimentování se zařízením řešitelský tým vyvodil, že při změně přerušovaného svícení uvedené LED na stálé se generátor nachází ve stavu, kdy je již přetížen a dochází k poměrně rychlému poklesu otáček turbíny až do jejího zastavení.

Bylo provedeno měření, s cílem zjištění maximálního výkonového zatížení generátoru při různých úrovních vstupního tlaku, podle kterého by bylo možné efektivně regulovat dobíjení akumulátoru jednotky EoT. Výsledek měření ukazuje Obrázek 10.

²³ V pásmu 433,05–434,79 MHz existuje ještě omezení maximálního klíčovacího poměru na 10%.

²⁴ Konkrétně jde o analogový transceiver DTX-446.



Obrázek 10 Výsledky pokusu se zatěžováním pneumatického generátoru

Měření bylo provedeno v rozsahu vstupního tlaku od 3 do 5 bar, který odpovídá hodnotám, jež lze očekávat v průběžném potrubí při jízdě vlaku. Jak naznačuje regresní přímka proložená naměřenými daty, ve zkoumaném intervalu roste dostupný výkon přibližně lineárně se vstupní tlakem. Na každé zvýšení tlaku o 1 bar připadá nárůst dostupného výkonu přibližně o 3 W.

Za účelem efektivního využití dostupného výkonu generátoru přistoupili řešitelé projektu k zásahu do jeho řídicí elektroniky. Bylo zjištěno, že generátor je navržen tak, aby pracoval s konstantními otáčkami turbíny. Pokud je na jeho výstupu odebírán menší výkon, než jaký je při těchto otáčkách generován, je přebytečná energie přeměňována na teplo v integrovaném výkonovém odporu. Řídicí obvod reguluje proud tímto odporem pomocí PWM signálu.

Přivedením zmíněného signálu na vstup řídicího procesoru jednotky EoT získává tento procesor informaci o tom, zda je v každém okamžiku generátor schopen poskytovat vyšší výkon, než jaký je aktuálně odebírán (zejména pro dobíjení akumulátoru jednotky EoT). Pokud se střída tohoto PWM signálu blíží nule, znamená to, že generátor se blíží přetížení. Na základě této informace může řídicí procesor jednotky EoT regulovat nabíjecí proud akumulátoru a efektivně využívat dostupný výkon na maximum.

3.3.3. Technologie akumulátoru jednotky EoT

Vzhledem k nutnosti provozování systému TIMS i v zimním období bylo stanoveno, že použitý elektrochemický akumulátor jednotky EoT musí umožňovat nabíjení i v záporných teplotách. Tím došlo ke značnému zúžení možných variant použitelných technologií akumulátorů. Nakonec byla zvolena technologie LTO (lithium-titanium-oxide), která umožňuje rychlé nabíjení i v záporných teplotách. Akumulátor v jednotce EoT bude tvořen několika LTO články, řídicí procesor bude proto muset zajišťovat jejich balancování při nabíjení. [31]

3.3.4. Energetická bilance jednotky EoT

Po zvolení typu rádiového modulu pro zajištění bezdrátového spojení mezi jednotkami EoT a HoT byl proveden orientační výpočet očekávané spotřeby elektrické energie jednotky EoT²⁵. Nejvýznamnější podíl na celkové spotřebě energie jednotky EoT bude mít rádiový modu, předpokládá se použití standardu MPT1327, modulační rychlost 2400 *baud* · *s*. Tabulka 2 ukazuje očekávanou energetickou náročnost přenosu podle objemu přenášených dat.

Tabulka 2 Předpokládaná energetická náročnost rádiového přenosu

Délka rámce [byte]	Doba přenosu [ms]	Energie [<i>W</i> · <i>s</i>]
4	84	0,9
20	138	1,7
64	284	3,9
128	498	7,1

Pro účely testování a s cílem získání konzervativního odhadu energetické náročnosti provozu jednotky EoT případného komerčně vyráběného zařízení se předpokládá odesílání rámce o délce 128 byte v každé komunikační periodě. Po zahrnutí příkonu dalších součástí jednotky EoT byla očekávaná spotřeba 6 W. [27]

Porovnáním s grafem na Obrázek 10 je zřejmé, že pro dosažení vyrovnané energetické bilance je nutné, aby na vstupu pneumatického generátoru byl tlak vzduchu na hodnotě přibližně 3,9 bar. Projektový tým na základě informací a zkušeností řešitelů za VÚŽ a ČD Cargo předpokládá, že během jízdy vlaku by měl tlak v hlavním potrubí být většinu času na hodnotě 5 bar, která odpovídá odbrzdění soupravy. Přesné změření energetické bilance bude provedeno během pokračujících prací na projektu, zejména v rámci zkušební jízdy na běžném nákladním vlaku o délce více jak 400m.

²⁵ Pro jednotku HoT je počítáno s napájením z palubní elektrické sítě na hnacím vozidle. Potřebný příkon jednotky HoT bude před integrací na hnacím vozidle zjištěn měřením. Nepředpokládá se, že by příkon dosáhl hodnot, které by měly negativně ovlivnit dotčenou elektrickou síť vozidla.

Pro minimalizaci ztrát energie a za účelem prodloužení životnosti baterie bylo rovněž rozhodnuto, že jednotka EoT bude umožňovat přechod do pohotovostního režimu, kdy veškerá komunikace a měření budou přerušeny. „Probuzení“ z pohotovostního režimu zpět do standardního provozu bude možné provést bezkontaktně (přiložením magnetu na vyznačené místo na krytu jednotky, čímž dojde k sepnutí jazýčkového kontaktu umístěného uvnitř.²⁶

3.3.5. Zástavba jednotky HoT na lokomotivě

Zástupci společnosti ČD Cargo z řešitelského týmu přislíbili zajištění možnosti provozního ověření výsledného systému „inteligentního konce vlaku“ na reálném vlaku jedoucím po železniční síti. Za tímto účelem byla provedena analýzy možností zástavby funkčního vzorku jednotky HoT na rekonstruované lokomotivě řady 363.5.

Během prohlídky lokomotivy přistavené v depu provozní jednotky České Budějovice byly členům projektového týmu zástupci ČD Cargo sděleny požadavky na zástavbu, zejména že všechny vedené kabely musí být umístěny v rozvodných kanálech pro elektroinstalaci umístěných na lokomotivě. Tyto kanály nejsou přístupné bez demontáže některých krytů a zařízení na lokomotivě, zástavba proto bude muset být provedena v dílnách a bude jí muset být věnována náležitá pozornost a předcházet jí důkladná příprava.

Během prohlídky lokomotivy bylo též zjištěno, že pro instalaci antén jednotky HoT na střechu lokomotivy (poblíž klimatizační jednotky nad stanovištěm strojvedoucího) bude muset být vyroben speciální držák.

Podle provedené analýzy legislativních dokumentů je též nutné pro jízdu lokomotivy s instalovanou jednotkou HoT zajistit povolení ke zkušebnímu provozu, které vydává Drážní úřad.

3.3.6. Napájení jednotky HoT na hnacím vozidle

Jednotka HoT je napájena z nízkonapěťové elektrické sítě na hnacím vozidle. Navržený vstupní obvod umožňuje připojení stejnosměrného napětí až do hodnoty +48 V. Při provedených prohlídkách lokomotivy, jejíž poskytnutí pro účely zkoušek bylo přislíbeno ze strany ČD Cargo, bylo zjištěno, že vozidlová síť napájená z lokomotivní baterie má napětí +24 VDC s maximální proudovou zatížitelností 6 A. Pro účely zachování funkce jednotky HoT při krátkodobém výpadku napájení (např. odpojení napájecího konektoru při manipulaci s jednotkou na stanoviště strojvedoucího při provádění zkoušek) byla jednotka vybavena

²⁶ Důvodem použití jazýčkového kontaktu místo běžného tlačítka je snaha o maximalizaci odolnosti jednotky EoT proti vniknutí vlhkosti.

záložní olověnou baterií. Tato baterie je při připojení externího napájení stále dobíjena. Provoz HoT po delší dobu při napájení touto záložní baterií se nepředpokládá.

3.3.7. Problematika párování jednotek HoT a EoT na vlaku při jeho sestavování

V počáteční fázi návrhu zařízení byla plánována implementace mechanismu párování jednotky EoT a HoT. Jednou z uvažovaných variant bylo přidělení unikátního identifikátoru každé jednotce s tím, že tento identifikátor bude při navazování komunikace mezi oběma jednotkami zadáván obsluhou. Cílem tohoto opatření je zabránit nesprávnému spárování zařízení při reálném provozu více vlaků vybavených navrhovaným systémem TIMS současně.

Takovéto procesy jsou zavedeny např. u telemetrických systémů používaných v USA, jak je popsáno v kapitole 2.2.3. U jednoho z analyzovaných zařízení probíhá proces párování při sestavování vlaku následovně: [24, s. 3-15]

1. V ovládacím rozhraní HoT se zadá číslo přidělené jednotky EoT.
2. Po zkontrolování, že číslo bylo zadáno správně, se na jednotce EoT stiskne tlačítko START/ARM. EoT indikuje odeslání zprávy zobrazením symbolu kosočtverce na displeji a kmitáním indikační LED. Viz Obrázek 11.
3. Po přijetí zprávy jednotkou HoT se na displeji obsluhy (strojvedoucího) zobrazí výzva „Arm now“. Do pěti sekund od jejího zobrazení musí být na jednotce HoT stisknuto tlačítko COMM TEST/ARM.
4. Pokud proces proběhl správně, EoT indikuje přijetí zprávy zobrazením symbolu přesýpacích hodin na displeji a kmitáním indikační LED, poté se na displeji zobrazí text ARMED. Jednotka HoT informuje obsluhu o úspěšném spárování s EoT zprávou „Emergency Enabled“. Viz Obrázek 11.

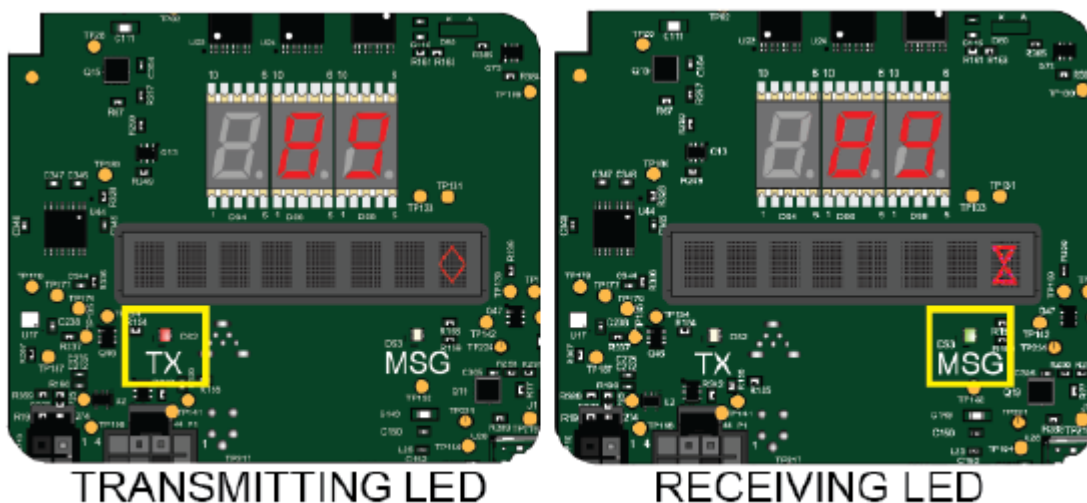


Figure 3-5 Transmit and Receive LEDs

Obrázek 11 Indikace odesílání a přijímání zprávy od HoT (zdroj [24, s. 3-10])

Po diskusi mezi členy projektového týmu bylo rozhodnuto, že v rámci vývoje funkčního vzorku nebude funkcionality párování implementována, protože vždy bude testována právě jedna jednotka EoT a jedna jednotka HoT. Navržený systém TIMS však bude připraven na její doplnění.

3.3.8. Zkoušky elektromagnetické kompatibility a odolnosti vnějším vlivům

V dohledné době (květen roku 2024) je plánováno provedení zkoušek elektromagnetické kompatibility zprovozněných zařízení HoT a EoT v laboratoři RICE (Research and Innovation Centre for Electrical Engineering) Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Rovněž jsou plánovány testy funkčnosti zařízení v náročných klimatických podmínkách (teplota, vlhkost).

3.3.9. Architektura systému TIMS

Ve spolupráci s ostatními členy projektového týmu sestavil autor této diplomové práce architekturu navrhovaného systému TIMS tak, jak byla nakonec po prodiskutování několika variant stabilizována. Obrázek 12 zobrazuje celkové propojení částí systému umístěných na konci vlaku a na vedoucím hnacím vozidle. Podrobnější popis jednotlivých částí poskytuje Obrázek 13 a Obrázek 14.

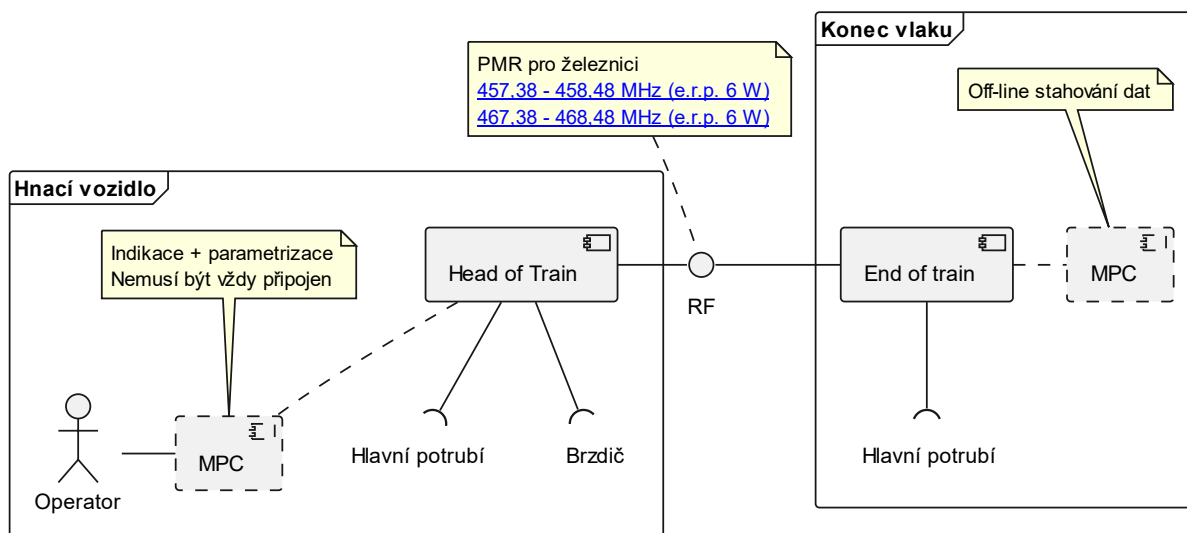
Význam zkratk na obrázcích je následující:

- **MPC (master PC)** – osobní počítač (laptop) sloužící k monitorování, konfiguraci a stahování dat z jednotek HoT a EoT
- **HC (HoT Controller)** – řídicí jednotka „subsystému“ HoT

- **HPRS (HoT pressure sensor)** – elektronické zařízení tvořící rozhraní pro měření tlaku v hlavním potrubí a v řídicím vzduchojemu lokomotivního brzdiče²⁷
- **BSE (brzdíč samočinný elektrický)** – lokomotivní brzdič, resp. skupina ventilů sloužících k ovládnání brzdiče
- **BSE-breakout** – obvod umožňující připojení k ovládacím elektropneumatickým ventilům lokomotivního brzdiče
- **ETH** – rozhraní Ethernet
- **RF** – rádiové komunikace
- **ANT** – anténa

Detailní popis jednotlivých prvků a jejich funkcí je uveden v kapitole 3.3.10.

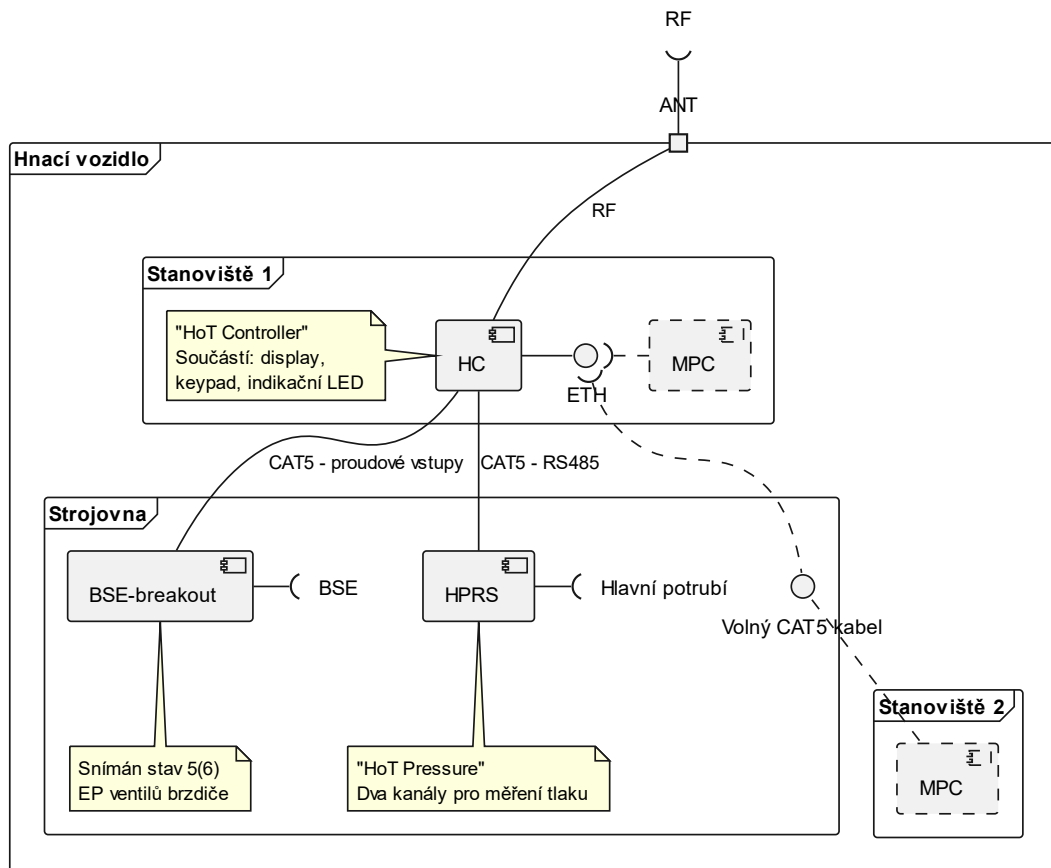
Celý systém - zjednodušený diagram komponent



Obrázek 12 Celkové schéma architektury navrhovaného systému TIMS (zdroj autor)

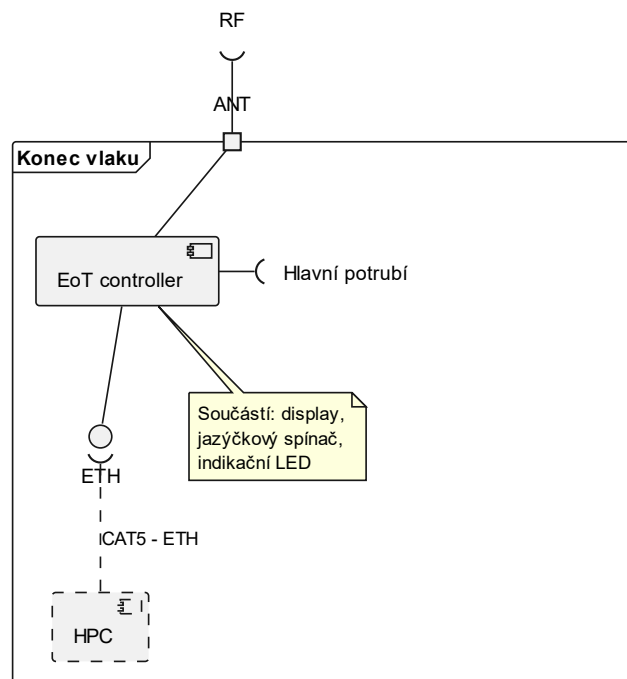
²⁷ Jednotka HPRS byla také vyvinuta v rámci řešení projektu END4TRAIN.

Hnací vozidlo - diagram komponent



Obrázek 13 Schéma architektury části systému na hnacím vozidle (HoT) (zdroj autor)

Konec vlaku - diagram komponent



Obrázek 14 Schéma architektury části systému na konci vlaku (EoT) (zdroj autor)

3.3.10. Komunikační protokoly v systému TIMS

Pro předávání dat mezi jednotlivými částmi systému TIMS definovanými v kapitole 3.3.9 byly definovány dva způsoby komunikace – on-line a off-line protokol. Tyto protokoly byly navrženy členy řešitelského týmu, kteří pracovali na návrhu HW a SW pro jednotky HoT a EoT.

3.3.10.1. On-line protokol

On-line protokol slouží k přenosu aktuálně měřených a vyhodnocovaných dat mezi jednotkami HoT a EoT navzájem a případně také mezi každou z jednotek a diagnostickou aplikací spuštěnou na MPC připojenému k dané jednotce. Rovněž jsou s jeho pomocí posílány pokyny jednotlivým zařízením.

Na transportní vrstvě je pro on-line komunikaci použit nespolehlivý protokol UDP (user datagram protocol) s pevně nastaveným číslem portu 3635. V případě ztráty přenášených dat je možné pomocí off-line protokolu chybějící záznamy načíst zpětně. V Tabulka 5 jsou vyjmenovány definované zprávy. Druh zprávy je uveden na první pozici daného UDP paketu.

Tabulka 3 Zprávy on-line komunikačního protokolu (zdroj [27])

Typ zprávy	Význam	Délka zprávy [Byte]
I	žádost o identifikaci zařízení	2
J	Odpověď na žádost o identifikaci zařízení	2
P	Přenos procesních dat	Proměnlivá podle délky přenášených dat
R	Žádost o zaslání procesních dat	Proměnlivá podle počtu požadovaných veličin dat
S	Potvrzení žádosti o zaslání procesních dat	6
T	Žádost o zaslání aktuálního času	1
G	Odpověď na žádost o zaslání aktuálního času	7
C	Pokyn pro HoT k navázání rádiového spojení s EoT	1
D	Pokyn pro HoT k ukončení rádiového spojení s EoT	1
E	Nastavování intenzity svícení displeje EoT	2
FFFF	Pokyn ke smazání obsahu interní paměti pro ukládání záznamů	4

V případě zaslání žádosti o zasílání procesních dat je v odpovědi na tuto zprávu uvedeno, zda bylo možné všechna požadovaná data získat lokálně ze zařízení, kterému byl požadavek poslán, či jestli budou některé záznamy vyžádány a přeneseny pomocí rádiového spojení mezi jednotkami HoT a EoT. Tento druh odpovědi je implementován pouze pro žádost o zasílání dat z jednotky HoT, jednotka EoT nepodporuje vyžádání dat ze vzdáleného zařízení. [27]

3.3.10.2. Off-line protokol

Účelem definovaného off-line protokolu je umožnění čtení v paměti zaznamenaných dat jednotek EoT a HoT z vyhodnocovacího PC (MPC). Pro přenos byl zvolen protokol TCP (transmission control protocol), který je spolehlivý a zajistí přenesení ucelených bloků dat. Navržený protokol počítá s implementací mechanismu, který dovolí stažení dat za zvolené období definované pomocí počátečních a koncových časových značek. V současné podobě bylo použito zjednodušení, kdy po navázání TCP spojení ze strany MPC jsou odeslána všechna data uložená v paměti daného zařízení (jednotky EoT či HoT).

Přenos probíhá po ucelených blocích, které odpovídají sektorům použitého paměťového média (flash paměť). Každý sektor je opatřen hlavičkou, která obsahuje informace o času zápisu sektoru, kontrolním součtu, podle něhož je možné ověřit integritu dat v těle sektoru, sériovým číslem informujícím o návaznosti na sousední sektory (postupně zvyšující se číslo znamená, že sektory navazují), a informací o odsazení obsažených dat od začátku těla sektoru. Sériové číslo a informace o odsazení dat od začátku těla sektoru se použije ke spojení části zaznamenaných dat, která byla rozdělena hranicí sektoru. [27]

V těle sektoru jsou uloženy jednotlivé záznamy z měření a provozu jednotky (EoT či HoT). Každý záznam začíná identifikátorem, který určuje typ záznamu a jeho délku v bytech, následuje časová značka (v sekundách), ke které se záznam váže a poté samotná uložená data. Jsou definovány dva typy záznamů – záznam textového výpisu a záznam procesních dat. V případě textového záznamu následuje za časovou značkou upřesnění času jeho výpisu v milisekundách a poté vlastní řetězec znaků.²⁸ Pokud se jedná o záznam procesních dat, následují tato data ihned za časovou značkou. Uvedená časová značka identifikuje tzv. epochu, což je časový interval, v kterého jednotky EoT a HoT provedou měření vstupních veličin, komunikaci pomocí rádiového spojení, vyhodnocení dat a jejich zapsání do paměti. Délka epochy je stanovena na 1 sekundu.

3.3.10.3. Procesní data

²⁸ Řetězec je ukládán bez ukončujícího znaku (NULL) protože z identifikátoru záznamu je známá jeho délka.

Ve struktuře procesních dat jsou ukládány datové objekty reprezentující jednotlivé veličiny měřené jednotkami HoT a EoT. Každý objekt začíná kódem informujícím o tom, o jaký objekt se jedná. Podle tohoto kódu je poté dána struktura obsahující samotná data. V době vzniku této diplomové práce bylo definováno 12 různých objektů, jak ukazuje Tabulka 4:

Tabulka 4 Seznam definovaných objektů procesních dat (zdroj [27])

Číslo objektu	Délka objektu [bit]	Obsah objektu
0	8	Verze datového slovníku
1	24	Dvojice tlaků A a B jednotky EoT
2	24	Dvojice tlaků A a B jednotky HoT
3	100	Pole záznamů tlaku A jednotky EoT měřených v intervalu 100 ms v předcházející epoše
4	100	Pole záznamů tlaku A jednotky HoT měřených v intervalu 100 ms v předcházející epoše
5	94	Informace z GPS ²⁹ EoT
6	94	Informace z GPS HoT
7	32	Seznam (bitové pole) hlášených chyb EoT
8	32	Seznam (bitové pole) hlášených chyb HoT
9	64	Informace o stavu napájení a teplotě EoT
10	8	Teplota HoT
11	40	Pole záznamů stavu lokomotivního brzdíče měřených jednotkou HoT v intervalu 100 ms v předcházející epoše

3.3.11. Specifikace požadavků na systém

Jedním z úkolů autora této diplomové práce v projektu END4TRAIN bylo vytvoření specifikace požadavků na celý systém TIMS.

V počáteční fázi projektu byla pro tvorbu seznamu požadavků na systém zvolena forma dokumentu aplikace MS Word. Požadavky byly rozděleny na obecné celkové požadavky na systém, kterým byly přiděleny identifikátory G.XX, kde XX udávalo pořadové číslo požadavku. Šlo o požadavky např. G.04 – Napájení, G.05 – Provozní podmínky nebo G.08 – Bezpečnost. Ke každému požadavku bylo doplněno upřesnění, zpravidla poměrně podrobné (přibližně čtyři řádky textu). Obecných požadavků bylo sestaveno celkem 18.

²⁹ Data získávaná z GPS modulu jsou kromě aktuálních zeměpisných souřadnic také, nadmořská výška a rychlost a směr (azimut) pohybu. Pokud je zařízení v klidu, směr pohybu má zvláštní neplatnou hodnotu.

Pro jednotlivé obecné požadavky byly následně definovány dílčí požadavky, které popisovaly způsob, jakým mají být dané obecné požadavky implementovány. Označení dílčích požadavků bylo provedeno podle následujícího vzoru:

H/E.SW/HW.YY[-G.XX1:G.XX2: ...]

Význam jednotlivých částí označení je následující:

- H/E – požadavek na subsystém HoT, nebo EoT
- SW/HW – požadavek na software, či hardware
- YY – identifikační číslo dílčího požadavku
- G.XX1, G.XX2, ... – volitelně: odkazy na obecné požadavky s identifikačními čísly XX1, XX2 atd., jež jsou daným dílčím požadavkem YY implementovány

Požadavky implementující např. obecný požadavek G.04 – Napájení byly:

- H.HW.5-G.4 – Napájení HoT
- H.SW.27-G.4 – Napájení HoT
- E.HW.6-G.4 – Napájení EoT
- E.HW.28-G.4 – Napájení EoT
- E.HW.29-G.4 – Připojení EoT k HP
- E.SW.30-G.4 – Firmware generátoru EoT
- E.SW.7-G.4 – Napájení EoT

Tyto uvedené dílčí požadavky také vyžadovaly poměrně rozsáhlé upřesňování. Nevýhodou bylo obtížné hledání vazeb mezi dílčími a obecnými požadavky, které nebylo možné provádět jinak než prostým vyhledáváním v textu. Matoucí byly také opakovaně používané názvy pro různé požadavky. Komplikované bylo rovněž upravování požadavků a přidávání nových.

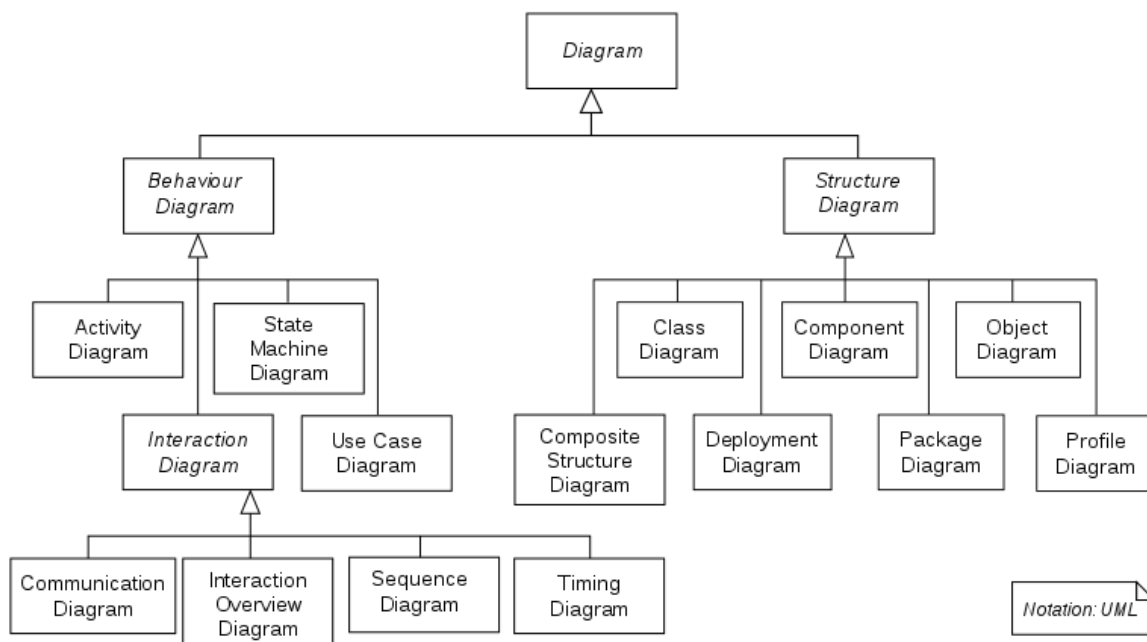
Z výše uvedených důvodů bylo rozhodnuto o využití SW nástroje pro správu požadavků a převedení existujícího dokumentu do nové podoby.

3.3.11.1. Modelování požadavků

Při výběru nástroje k modelování požadavků na systém TIMS bylo cílem autora zvolit pokud možno standardizované řešení tak, aby práce na specifikaci obsahovala minimální potřebu nastavování a konfigurace daného SW.

Při výběru modelovacího grafického jazyka byl nejprve zvažován jazyk UML2, tento ve své základní specifikaci však neobsahuje prostředky pro modelování požadavků, jak ukazuje. Je možné pro požadavek definovat vlastní třídu s potřebnými atributy a jednotlivé požadavky

poté označovat odpovídajícím stereotypem. Diagram požadavků by poté byl formálně diagramem tříd. [32; 33]



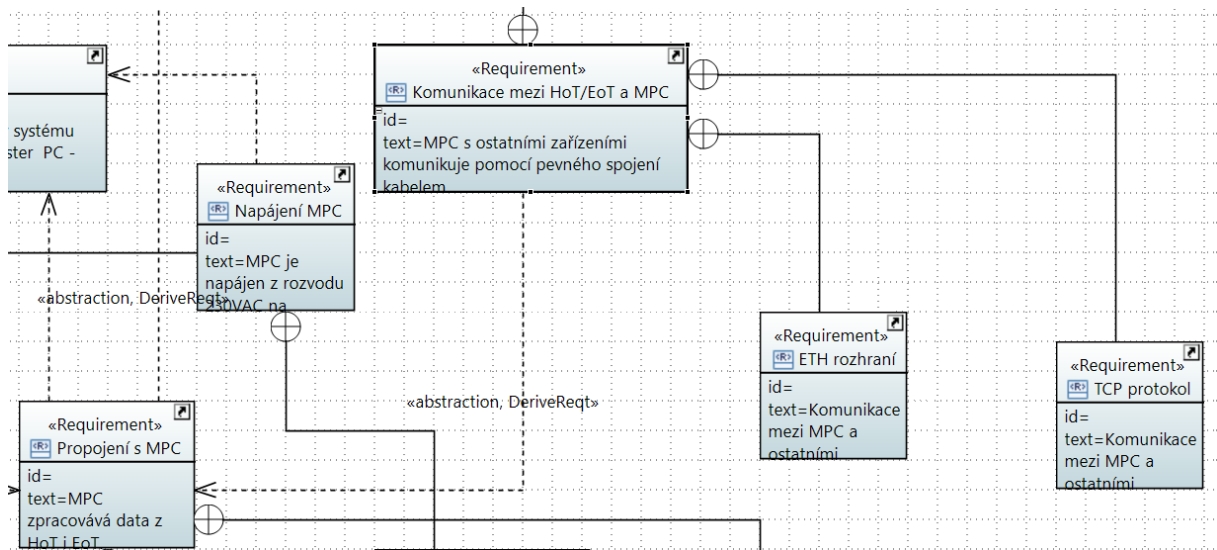
Obrázek 15 Hierarchie diagramů v jazyce UML 2.2 (zdroj [33])

Modelovacím jazykem, který podporuje modelování požadavků a tvorbu jejich diagramů, je jazyk SysML (Systems Modeling Language). Každý požadavek je označen identifikátorem a názvem, ke kterým se doplní samotný text požadavku. SysML specifikuje řadu vazeb, které je mezi jednotlivými požadavky modelovat, v rámci vytvořeného seznamu požadavků byly použity tyto vazby [34, s. 181, 182]:

- **Odvození (angl. derive dependency)** – tato vazba zpravidla vyjadřuje vztah mezi zdrojovým a odvozeným požadavkem, kdy odvozený požadavek rozvíjí či implementuje zdrojový požadavek na vyšší úrovni podrobnosti popisu systému
- **Upřesnění (angl. refine dependency)** – vztah upřesnění mezi dvěma požadavky nastává v situaci, kdy jeden požadavek popisuje obdobnou vlastnost či funkci modelovaného systému, ale používá k tomu jiný způsob vyjádření, příkladem je vztah mezi popisem jednoho funkčního požadavku nejprve textovou formou a poté např. diagramem aktivity³⁰
- **A obsahuje B (angl. namespace containment relationship)** – tento vztah se objevuje mezi složeným požadavkem a jeho jednotlivými dílčími požadavky, tímto způsobem je definována také hierarchie požadavků

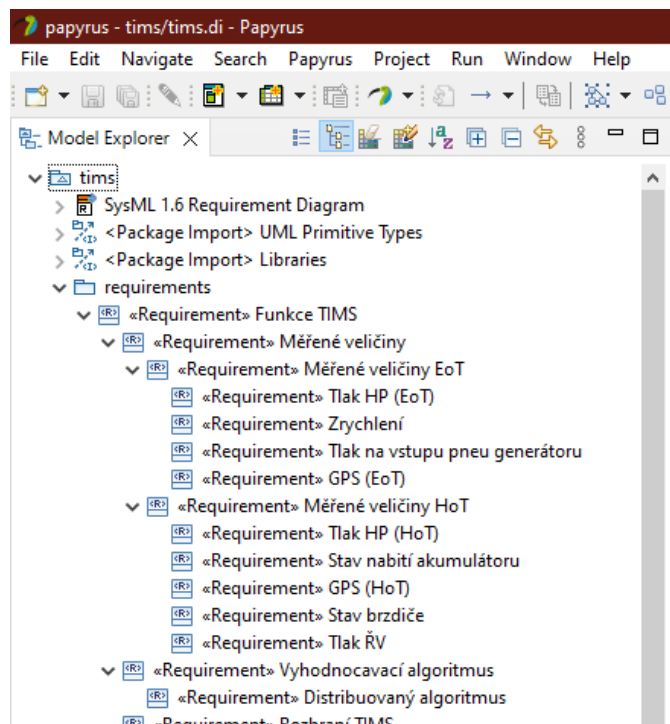
³⁰ Vztahy nemusí být modelovány pouze mezi požadavky (objekty stejného druhu), mohou spojoval různé konstrukty jazyka SysML.

Obrázek 16 ukazuje znázornění jednotlivých vazeb mezi požadavky v modelovacím SW.

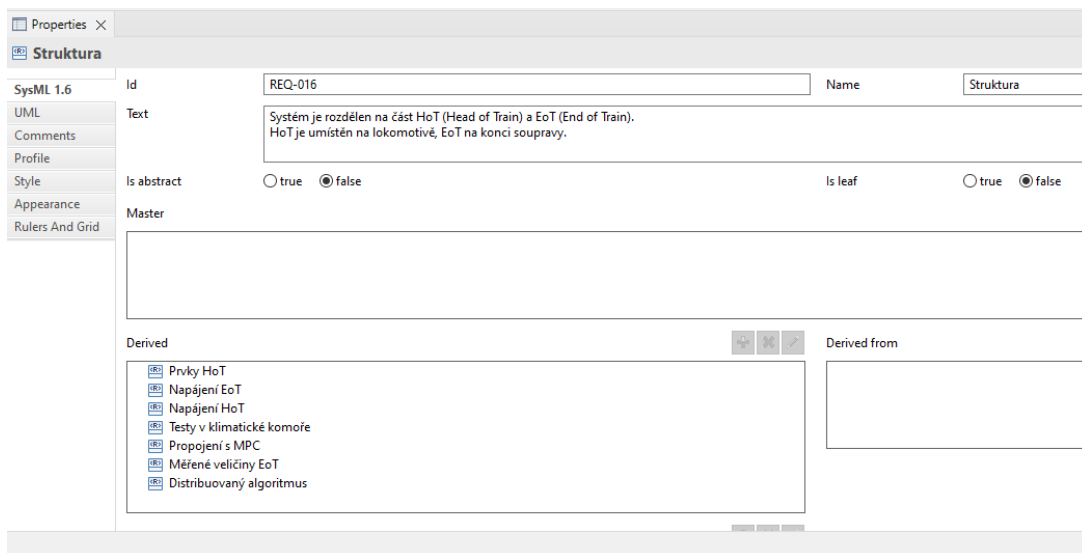


Obrázek 16 Ukázka zobrazení jednotlivých požadavků a vazeb mezi nimi v SW Eclipse Papyrus (zdroj autor)

Kromě grafického zobrazení je důležité, že jednotlivé požadavky propojené vazbami je možné zobrazit v přehledovém okně, čímž lze rychle získat přehled o závislostech mezi nimi. Obrázek 17 zobrazuje hierarchicky propojené požadavky, Obrázek 18 pak ukazuje seznam odvozených požadavků.

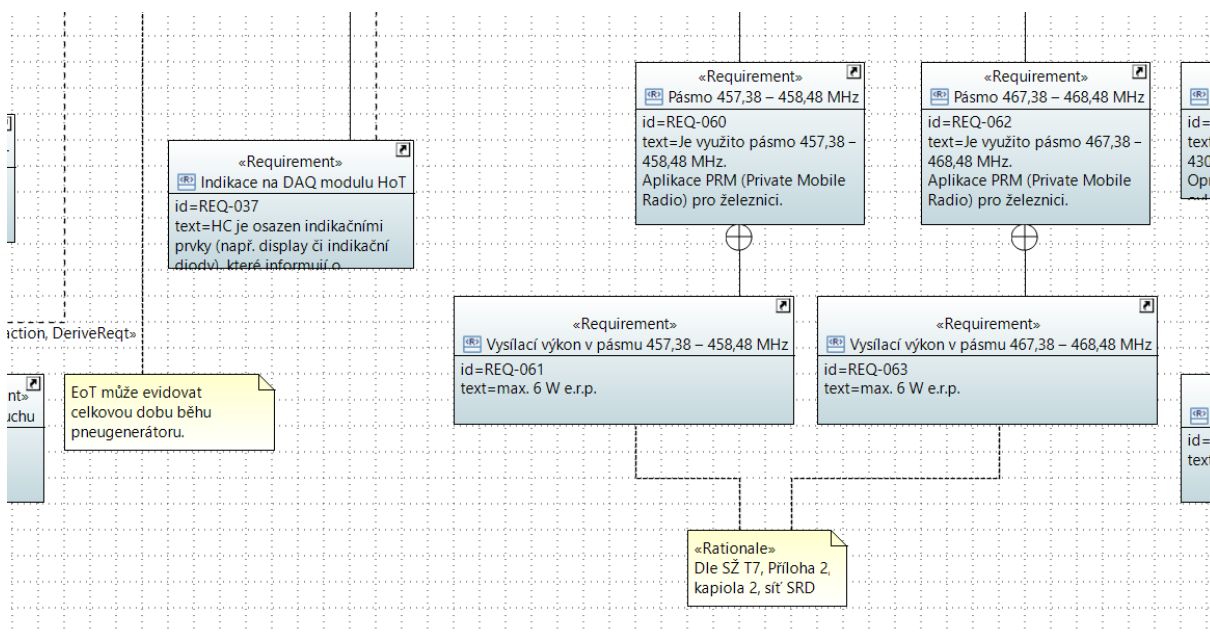


Obrázek 17 Hierarchie požadavků zobrazených v okně Model Explorer SW Eclipse Papyrus (zdroj autor)



Obrázek 18 Zobrazení požadavků odvozených od požadavku REQ-016 v okně Properties SW Eclipse Papyrus (zdroj autor)

Podrobnosti, komentáře a odůvodnění požadavků, které tvoří samostatný požadavek, je možné doplnit pomocí objektů typu „komentář“ a „odůvodnění“ (angl. rationale), jak ukazuje Obrázek 19.



Obrázek 19 Ukázka připojení komentáře a odůvodnění k požadavkům v prostředí SW Papyrus (zdroj autor)

SW prostředí pro tvorbu specifikace požadavků muselo být volně dostupné, aby byly výstupy použitelné i zpětně po skončení projektu bez nutnosti pořizování komerčních licencí. Z toho důvodu došlo k volbě mezi nástroji Eclipse Papyrus a Eclipse Capella.

Eclipse Papyrus je integrované prostředí pro modelování v rámci tzv. EMF (Eclipse Modelling Framework). V základní verzi tento SW obsahuje knihovny pro tvorbu UML modelů, jeho důležitým rysem je však důraz na možnost úpravy nástroje tak, aby umožňoval

modelování pomocí libovolných prvků a struktur vytvořených uživateli. Součástí SW jsou také nástroje pro generování spustitelného kódu na základě definovaných modelů. [35]

Eclipse Capella patří do podobné skupiny nástrojů jako Papyrus, významným rozdílem je však přímá podpora a integrace pracovních postupů navržených podle MBSE metody Arcadia. Capella po spuštění nabízí uživateli pomocí průvodce postupně nástroje k tvorbě modelů používaných v jednotlivých krocích metody Arcadia³¹.

Vzhledem k uvažovanému rozsahu projektu END4TRAIN a faktu, že nástroj pro modelování systémových požadavků byl vybírán až dodatečně v průběhu řešení, bylo rozhodnuto o použití SW Papyrus. Nástroje dostupné v SW Capella byly vyhodnoceny jako příliš komplexní pro definovaný účel.

Oproti způsobu popisu v původním dokumentu se autor rozhodl formulovat texty požadavků modelované pomocí SW vždy co možná nejstručněji a jejich podrobnosti a souvislosti modelovat pomocí vazeb s dalšími požadavky. Příkladem aplikace tohoto přístupu je převedení původního požadavku definujícího, které veličiny mají jednotky EoT a HoT měřit, na skupiny požadavků na měření vždy jedné veličiny svázané pomocí hierarchické vazby pod jeden nadřazený požadavek na provádění měření obecně. Celkově bylo v novém modelu identifikováno 97 požadavků. Oproti prvotnímu návrhu bylo jednotlivým požadavkům přidělováno pouze sekvenční označení bez rozlišování podle vzoru uvedeného v kapitole 463.3.11.

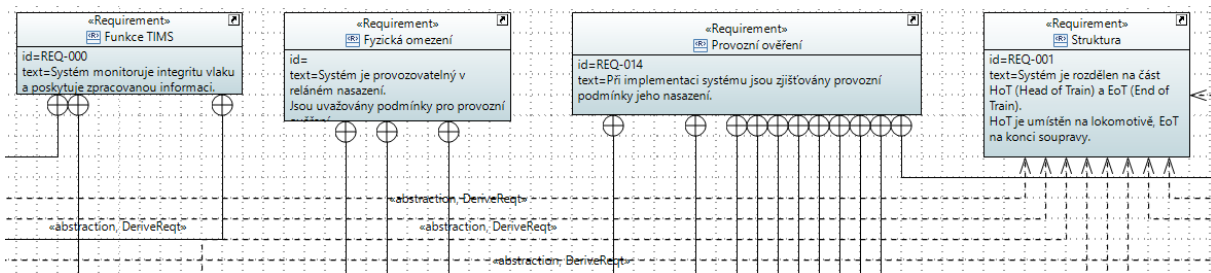
3.3.11.2. Základní požadavky

V SW Papyrus byly jako základy celé hierarchie definovány 4 požadavky:

- Funkce TIMS
- Fyzická omezení
- Provozní ověření
- Struktura

Vznikly tedy 4 základní větve, které byly dále rozvíjeny, upřesňovány a vzájemně propojovány jednotlivými dílčími požadavky, jak naznačuje Obrázek 20. Níže jsou popsány uvedené základní požadavky.

³¹ Arcadia (Architecture Analysis and Design Integrated Approach) je MBSE metoda postupuje v krocích: analýzy uživatelských potřeb, analýza požadavků na systém, tvorba funkční a logické architektury, tvorba fyzické architektury, návrh vývojových a výrobních procesů.[54]



Obrázek 20 Základní identifikované požadavky (zdroj autor)

3.3.11.2.1. Funkce TIMS

Požadavek „Funkce TIMS“ (REQ-000) definuje nutnost, aby celý systém plnil svou základní funkci, kterou je monitorování integrity vlakové soupravy a poskytování výsledné informace spolupracujícím systémům. Dílčí požadavky, definované jako součásti tohoto základního požadavku, stanovují, že systém musí informaci o celistvosti soupravy zjišťovat na základě měření definovaných veličin a provádění vyhodnocovacího algoritmu. Jednotlivé měřené veličiny jsou potom definovány jako dílčí požadavky požadavku na měření, jak bylo popsáno v příkladu uvedeném v kapitole 3.3.11.1.

Oproti původnímu záměru na centralizaci vyhodnocovací funkce systému v jednotce HoT došel během řešení problematiky projektový tým k závěru, že vhodnější z hlediska požadavku na minimalizaci spotřeby energie jednotkou EoT je použití určité formy distribuovaného vyhodnocovacího algoritmu, který bude vyžadovat menší objem dat přenášených mezi jednotkami EoT a HoT. Konkrétní podoba tohoto algoritmu je předmětem další práce na projektu.

Jako požadavky odvozené od zmíněného požadavku na použití distribuovaného vyhodnocovacího algoritmu byly identifikovány požadavky na obousměrnou komunikaci mezi jednotkami HoT a EoT a s nimi související požadavky na kvalitu rádiového spojení umožňujícího komunikaci mezi nimi.

Poslední součástí požadavku na provádění funkce TIMS je požadavek na definici rozhraní, pomocí kterého je výstup této funkce poskytován spolupracujícím systémům. V rámci vývoje funkčního vzorku systému během práce na projektu END4TRAIN bylo jako řešení zvoleno osazení jednotky HoT kontaktní sadou, která umožňuje spínání připojených vstupních obvodů případných spolupracujících systémů

3.3.11.2.2. Fyzická omezení

Požadavek „Fyzická omezení“ (REQ-039) říká, že systém TIMS musí být stabilně provozovatelný v železničním prostředí. Hlavními body, které jsou tímto a odvozenými požadavky definovány je odolnost vnějším vlivům při umístění jednotek HoT i EoT na

jedoucím vlaku a zajištění napájení elektrickou energií. Problematika napájení, zejména pokud jde o jednotku EoT je podrobně popsána v kapitole 3.3.4.

3.3.11.2.3. Provozní ověření

Jako součásti požadavku „Provozní ověření“ (REQ-023) jsou uvedeny všechny identifikované aspekty vztahující se k provozu navrhovaného systému TIMS v prostředí železničního provozu. U některých požadavků se nejedná přímo o funkce nebo vlastnosti, které by měl systém mít, ale jde o uvedení zkoušek či dalších úkolů, které musí být provedeny, aby byl splněn cíl projektu END4TRAIN spočívající v ověření provozních aspektů možného nasazení systému TIMS na české (resp. evropské) železnici.

3.3.11.2.4. Struktura

Pod požadavkem s názvem „Struktura“ (REQ-016) byla spojena všechna identifikovaná rozdělení systému TIMS na dílčí části tak, jak je popsáno v kapitole 3.3.9 hovořící o architektuře systému. Od tohoto základního požadavku byly rovněž odvozeny požadavky na komunikace mezi jednotlivými částmi a takové požadavky, které specifikovaly zajištění určité funkce či vlastnosti pro obě jednotky zvlášť (např. napájení).

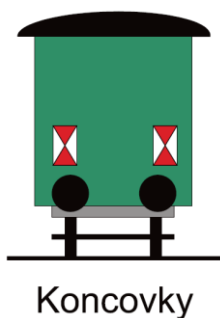
3.3.11.3. Další důležité požadavky

Celý model se specifikací požadavků je přílohou číslo 1 této diplomové práce. V odstavcích níže jsou zvlášť zmíněny další vybrané požadavky, které určitým způsobem ovlivnily návrh systému TIMS.

3.3.11.3.1. Návěst Konec vlaku

Vzhledem k plánovanému uchycení jednotky EoT na železničním voze v místech, kde jsou standardně zavěšovány odrazky (tzv. „koncovky“) tvořící návěst Konec vlaku³², kterou musí být poslední vozidlo každého vlaku podle předpisu SŽ D1 označeno, bude kryt jednotky EoT proveden tak, aby bylo touto jednotkou možné nahradit jednu z koncovek.[3, s. 230]

³² Je plánováno přímo zavěšení jednotky EoT za hák sloužící k umístění koncovek.



Obrázek 21 Znárodnění umístění dvojice červenobílých desek dávajících návěst Konec vlaku na posledním voze soupravy, desky nejsou zobrazeny v odpovídajícím měřítku (zdroj [3, s. 229])

Podle analýzy existujících řešení jednotek EoT používaných v USA jsou tato komerční zařízení zpravidla vybavena červeným zábleskovým světlem, které za snížené viditelnosti konce vlaku označuje. V prostředí evropské železnice však takové řešení není možné, protože provozní předpisy vyžadují použití dvojice stálých světel.³³ [3, s. 230; 24]

Úpravu navrhované jednotky EoT tak, aby nahrazovala obě koncovky světly, považuje projektový tým za nevhodnou, protože by tím byl negativně ovlivněn proces montáže zařízení na vozidlo, stejně jako spotřeba elektrické energie z akumulátoru či pneumatického generátoru.

3.3.11.3.2. Záznam dat

Pro účely zpětné analýzy dat změřených jednotkami HoT a EoT během prováděných experimentů a zkoušek byly definovány požadavky na uchovávání zaznamenaných dat v nevolatilní paměti obou zařízení. Ve fázi vývoje funkčního vzorku byla minimální doba uchování záznamů definována jako 3 hodiny provozu zařízení. Podle předběžných výsledků testovacích měření a výpočtů je kapacita úložných medií u obou jednotek dostatečná i pro ukládání dat po dobu celých dní nepřetržitého provozu. Adekvátnost takového řešení a vhodnost případné optimalizace bude předmětem další práce na projektu.

3.3.11.3.3. Datový slovník

Za účelem umožnění dynamické konfigurace jednotek EoT a HoT a procesu zpracování dat ve vyhodnocovací počítači (MPC) byla stanovena datová struktura označená jako „slovník procesních dat“, která popisuje způsob reprezentace jednotlivých měřených a vyhodnocovaných veličin v datové komunikaci mezi jednotlivými zařízeními. Tento slovník je možné před načítáním dat z paměti či jejich on-line zobrazování při měření použít k automatickému rozkódování datových zpráv.

³³ Kombinování jedné koncovky a jednoho světla není povoleno. [3, s. 230]

Alternativou k použití tohoto slovníku by bylo použití formátu umožňujícího přenos dat ve strukturované podobě (případně spolu s dalšími metadaty), jako je např. formát JSON. Protože však při rádiové komunikaci mezi jednotkami EoT a HoT je zapotřebí zachovat pokud možno nízký objem přenášených dat, a zároveň bylo během návrhu dalších rozhraní rozhodnuto o použití stejné reprezentace dat při veškeré komunikaci za účelem omezení potřeby opakovaného převádění mezi jednotlivými formáty, byla zvolena uvedená varianta s datovým slovníkem.

3.4. Plán další práce na projektu END4TRAIN

Jak bylo naznačeno v přechozích kapitolách, práce na vývoji navrhovaného systému TIMS v rámci projektu INTELLIGENT_END4TRAIN dospěly v době odevzdávání této diplomové práce do stavu, kdy jsou obě jednotky HoT i EoT vyrobeny, otestovány a připraveny k provedení experimentů směřujících k finálnímu zjištění provozních aspektů této systému „inteligentního konce vlaku“.

Jako následující hlavní cíl bylo stanoveno připravení algoritmu pro vyhodnocování celistvosti vlaku na základě měřených veličin. V Tabulka 5 jsou popsána základní pravidla pro toho vyhodnocení tak, jak byly definovány spoluřešiteli za VÚŽ. Spolu s úspěšným ověřením činnosti jednotky EoT při testech na zkušebním stavu společnosti DAKO Třemošnice byla provedena měření s cílem stanovit potřebné parametry uvedené v tabulce

Z hlediska vypracované specifikace požadavků na systém bude pokračovat práce zejména na validaci systému. Pro jednotlivé požadavky budou stanoveny podmínky splnění a budou definovány testovací scénáře. Validace požadavků bude též modelována pomocí SW Papyrus definováním objektů testovacích scénářů a jejich svázáním s danými požadavky pomocí vazeb typu „splňuje“ (angl. satisfy) a „ověřuje“ (angl. verify).

Tabulka 5 Definovaná pravidla pro rozhodnutí o roztržení vlaku na základě měřených veličin (zdroj [27])

brzděč na lokomotivě		tlakoměr na konci vlaku indikuje HP_{end}			poznámka
poloha	tlak v řídicím vzduchojemu	HP = konst.	HP roste	HP klesá	
O, P, Š	HP roste	plnění brzdy = OK trvá-li příliš dlouho = chyba zařízení	OK	roztržení vlaku	1
J	HP konstantní	OK	chyba zařízení	if $\Delta HP < 0,2 \text{ bar/s}$ → OK if $\Delta HP > 0,2 \text{ bar/s}$ → roztržení vlaku or if $\Delta HP < 3 \text{ bar}$ → roztržení vlaku	2
B	HP klesá $HP_{min} \geq 3 \text{ bar}$	chyba zařízení	chyba zařízení	if $3 \text{ bar} < HP < 5 \text{ bar}$ → OK if $\Delta HP < 3 \text{ bar}$ → roztržení vlaku	
R	HP hlesá $1 \text{ bar} < HP < 3 \text{ bar}$	chyba zařízení	chyba zařízení	if $1 \text{ bar} < HP < 3 \text{ bar}$ → OK if $\Delta HP < 1 \text{ bar}$ → roztržení vlaku	
	HP hlesá $HP < 1 \text{ bar}$	chyba zařízení	chyba zařízení	if $\Delta HP_{end} > \Delta HP_{front}$ → OK if $\Delta HP_{end} < \Delta HP_{front}$ → roztržení vlaku	

Polohy brzděče: O = odbrzdovací, P = přebití, Š = švih, J = jízda, B = provozní brzdění, R = rychločinné brzdění

Poznámky:

- 1 Pro identifikaci chyby je potřeba zkouškou stanovit časové zpoždění nárůstu tlaku vzduchu na koci vlaku v důsledku plnění vlaku po úplném provozním zabrzdění resp. po rychlobrzdě.
- 2 Hodnoty poklesů tlaku vzduchu a jejich trvání na konci vlaku nutno stanovit zkouškou. Dvě podmínky nutné, protože neznáme délku vlaku a místo, kde se vlak roztrhl.

4. Nástroj pro vizualizaci a vyhodnocení dat z měření

Podle zadání této diplomové práce byl vytvořen SW pro vyhodnocování a vizualizaci dat měřených jednotkami HoT a EoT. Z pohledu navržené architektury systému kontroly celistvosti vlaku bude tento SW spouštěn na vyhodnocovacím a řídicím počítači (MPC). Vzhledem ke komplexnosti algoritmu detekce ztráty integrity soupravy vlaku bylo během řešení projektu rozhodnuto, že tato vyhodnocovací logika nebude zatím v SW MPC implementována. Jak bylo uvedeno v kapitole 3.3.11.2.1, je plánováno navržení vyhodnocovacího algoritmu v určité distribuované podobě, jeho implementace bude tedy prováděna na HW vybavení jednotek HoT a EoT. Z toho důvodu nebylo projektovým týmem vyhodnoceno jako účelné vytvářet prototyp tohoto algoritmu v prostředí MPC, protože by pravděpodobně musel být pro konečné nasazení značně přepracován.

4.1. Použité technologie

Následující kapitoly popisují použité technologie a nástroje, které ovlivnily tvorbu vizualizační aplikace.

4.1.1. Programovací jazyk

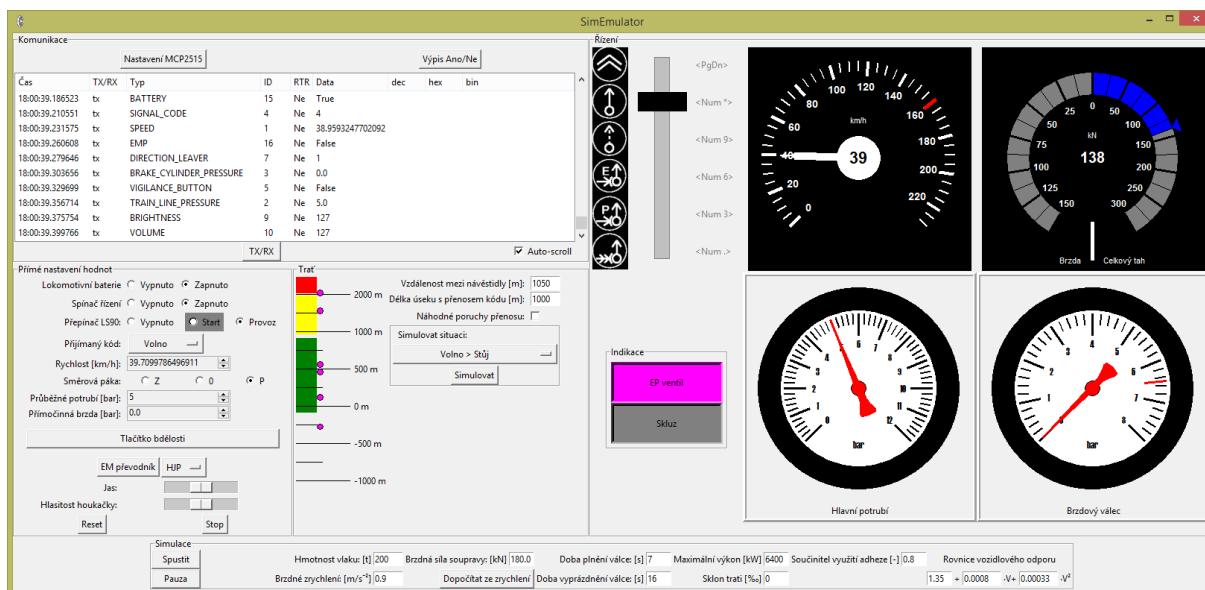
Autor se rozhodl pro implementaci vizualizačního SW s využitím skriptovacího jazyka Python³⁴. Hlavním důvodem této volby byly autorovi dosavadní zkušenosti s prací v tomto jazyce, dále také jednoduchost a obvyklá vyšší rychlost vývoje SW než u jazyků, jakými jsou např. C, či C++. Oproti uvedeným jazykům je Python méně výkonný (z důvodu použití interpretu), zpracovávání dat při vyhodnocování měření by však nemělo být natolik výpočetně náročné, aby se tento fakt negativně projevil na použitelnosti výsledného SW. [36; 37]

4.1.2. Tvorba grafického uživatelského rozhraní

Vizualizační SW bude vytvořen jako aplikace s grafickým uživatelským rozhraním (GUI – graphical user interface). Pro tvorbu těchto rozhraní existuje v jazyce Python řada knihoven, např.:

- **tkinter** – tkinter (Tk interface) je balíček, který je součástí standardní knihovny distribuované s interpretem jazyka Python. Jak název napovídá, jde o jakési rozhraní (angl. termín je „wrapper“ – obálka), které umožňuje programům psaným v jazyce Python používat knihovnu Tk skriptovacího jazyka Tcl sloužící ke tvorbě grafických uživatelských rozhraní. tkinter je poměrně snadný na používání, výsledná vytvářená rozhraní ale v základním nastavení působí poměrně zastarale a nejsou příliš intuitivní pro uživatele. Obrázek 22 ukazuje příklad grafického uživatelského rozhraní vytvořeného pomocí knihovny tkinter. [38; 39]

³⁴ Python je vysokoúrovňový interpretovaný programovací jazyk. Interpret jazyka Python spouští tzv. bytecode, který vzniká kompilací původního zdrojového kódu. Python se vyznačuje tím, že součástí jeho syntaxe jsou odsazení jednotlivých bloků kódu. Nepoužívají se tedy obvyklé prvky jako závorky nebo klíčová slova. Python podporuje různá programovací paradigmaty, tj. je v něm možné strukturované, objektově orientované, ale např. i funkcionální programování. Python je dynamický jazyk a je navržen s důrazem na přehlednost a pochopitelnost kódu. [37]



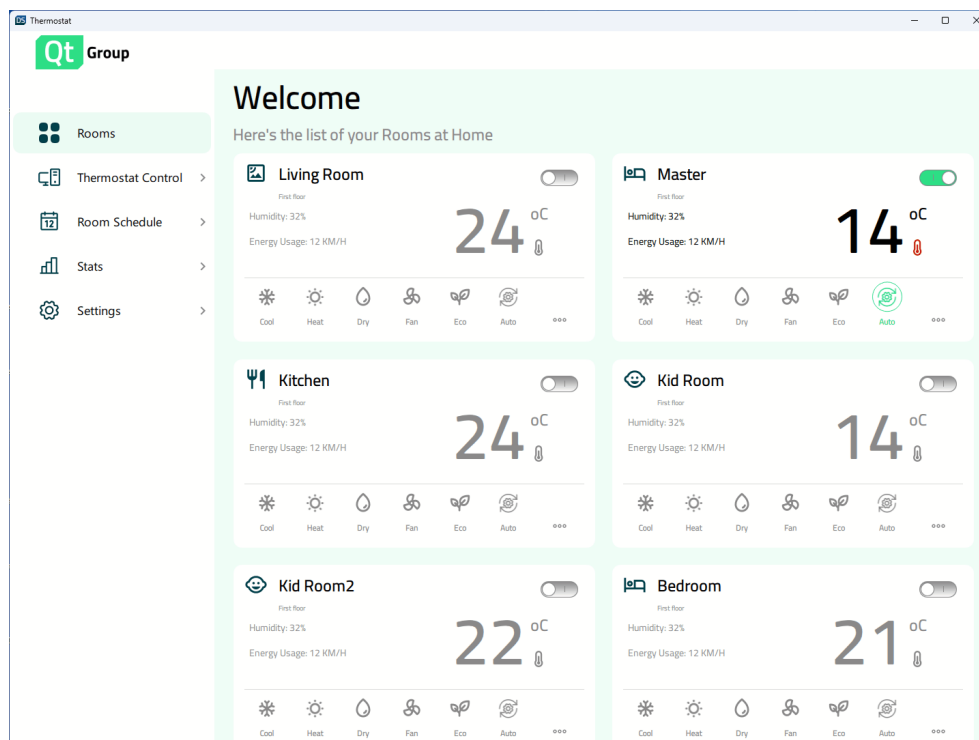
Obrázek 22 Ukázka grafického uživatelského rozhraní vytvořeného pomocí balíčku tkinter (zdroj [40, s. 46])

- **PySide** – Balíček PySide³⁵ poskytuje nástroje pro tvorbu grafických uživatelských rozhraní s využitím nástrojů frameworku Qt, který je původně vyvinut pro použití v C++. Tato knihovna nabízí širokou paletu předpřipravených prvků, které lze pro tvorbu GUI použít. Oproti tkinter je její použití o něco složitější a vyžaduje delší studium dokumentace. Příklad okna aplikace vytvoření pomocí Qt zobrazuje Obrázek 23. Balíček PySide je publikován pod dvojí licencí, LGPLv3/GPLv3³⁶ a Qt komerční licencí. PySide umožňuje definování struktury oken a dalších prvků aplikací pomocí grafického editoru QtDesigner, čímž je umožněno oddělení programování aplikační logiky od popisu rozmístění např. tlačítek v okně. [41; 42]
- **Kivy** – Knihovna Kivy je zaměřena na vývoj tzv. cross-platform aplikací. Tyto aplikace podporují např. ovládání pomocí gest na dotykové obrazovce a další funkce.

Z uvedených možností byla pro vývoj vizualizační aplikace zvolena knihovna PySide, zejména díky možnosti definice rozložení oken v grafickém editoru.

³⁵ V době psaní této diplomové práce je poslední vydanou verzí PySide6.

³⁶ Licence GPL je tzv. copy-leftová. Při distribuci díla, jehož součástí je kryta touto licencí, musí být zveřejněn zdrojový kód odvozeného díla. [55]



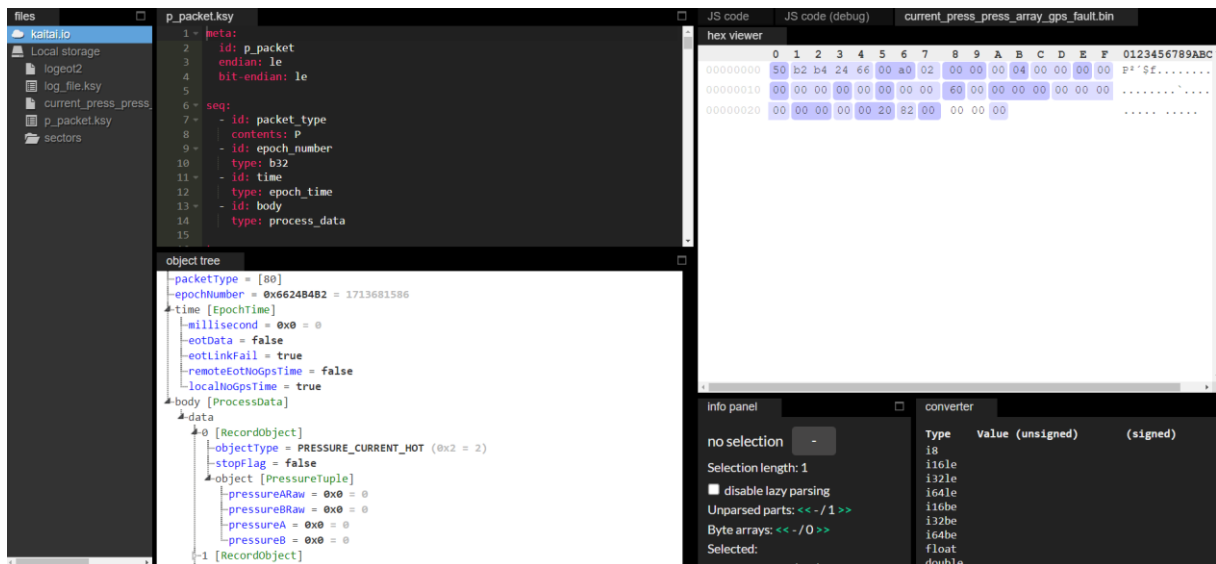
Obrázek 23 Ukázka aplikace vytvořené pomocí frameworku Qt (zdroj [43])

4.1.3. Zpracování dat

Pro práci s daty přijímanými z jednotek HoT a EoT se autor rozhodl použít balíček pandas, který nabízí užitečné funkce pro načítání, upravování, filtrování a další operace s daty. Základní strukturou používanou v tomto balíčku je tzv „dataframe“, který reprezentuje data jako tabulku. Výhodou je, že jednotlivé sloupce těchto tabulek jsou ukládány v paměti jako standardní pole (používaná např. jazykem C) a operace nad nimi jsou efektivnější než obvyklé cykly v jazyce Python. Funkce pracující se sloupci (reprezentovány jako objekty třídy Series) jsou definovány jako vektorové, stačí jim tedy předat objekt reprezentující daný sloupec namísto jednotlivých prvků. [44]

4.1.4. Dekódování binárních dat

Komunikace mezi jednotkami HoT a EoT a vizualizační aplikací spuštěnou na MPC je definována na úrovni paketů a binární reprezentace. Pro převod těchto dat na snaději zpracovatelné struktury (objekty) bude použita knihovna Kaitai Struct. Tento nástroj umožňuje pomocí speciální syntaxe deklarativní způsobem definovat strukturu objektů na úrovni bytů či bitů a pomocí kompilátoru poté na jejím základu vygenerovat kód ve zvoleném programovacím jazyce, který je schopen provádět převod mezi binární a objektovou reprezentací. Mezi podporovanými cílovými jazyky pro překlad specifikace formátu je o Python. Na webové stránce tohoto nástroje je možné použít vývojové prostředí pro definici specifikací, díky kterému je ihned možné sledovat, jak bude daný vstupní binární soubor dekodován. Náhled tohoto prostředí nabízí Obrázek 24.

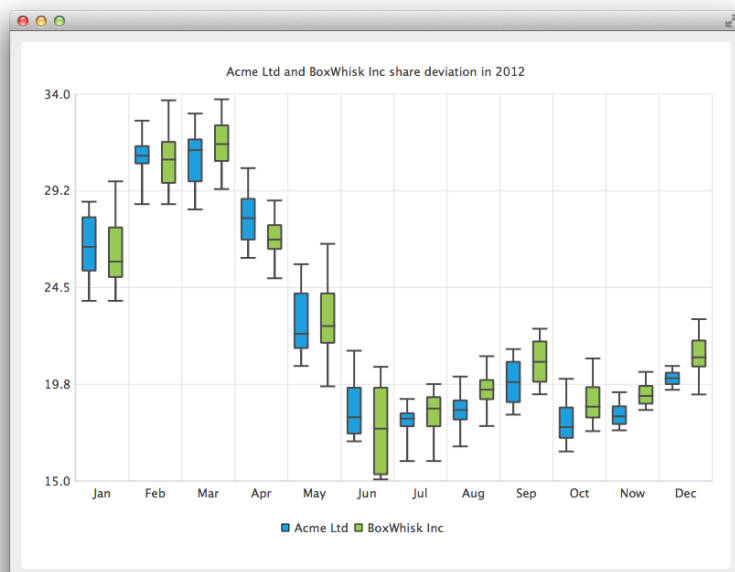


Obrázek 24 Webové vývojové prostředí Kaitai Struct (zdroj autor)

4.1.5. Vytváření grafů v prostředí PySide

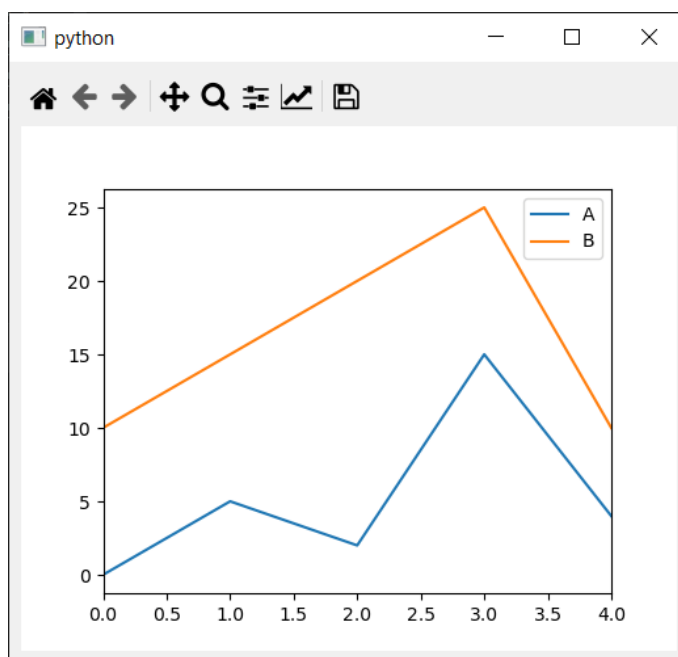
Jednou z hlavních úloh vyvíjené aplikace je vizualizace průběhů veličin měřených a vyhodnocovaných jednotkami HoT a EoT. Pro tuto funkcionalitu bylo třeba vybrat vhodný nástroj. Byly analyzovány 3 možné přístupy:

- **QtCharts** – součástí balíčku PySide je i modul QtCharts, který umožňuje tvorbu grafů a dalších vizualizací v rámci aplikací vytvářených tímto balíčkem. Modul používá podobný styl definice struktury a chování grafů jako zbytek balíčku PySide. Poskytované třídy pro vykreslování grafů neposkytují příliš rozsáhlou funkcionalitu a při potřebě implementace netriviálních funkcí (např. dynamické překreslování grafů při postupné přidávání dalších dat, jako tomu bude v případě této vyvíjené vizualizační aplikace) si musí tyto funkce programátor vytvořit sám. [45]



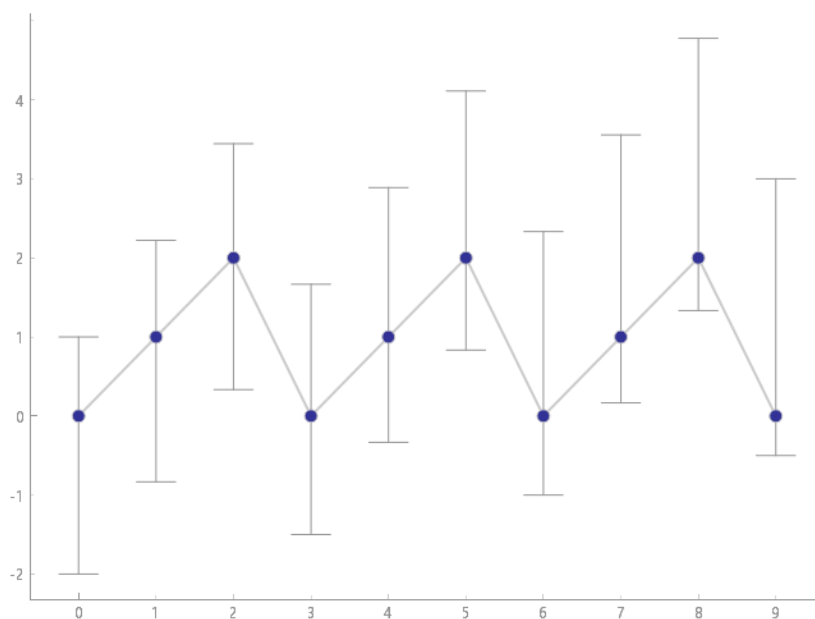
Obrázek 25 Příklad grafu vytvořeného pomocí modulu QtCharts (zdroj [46])

- Matplotlib – populární knihovna Matplotlib používaná pro vizualizaci dat v aplikacích vyvíjených v jazyce Python umožňuje umístění vykreslovaných objektů do oken aplikací vytvářených pomocí knihovny PySide. Primární zaměření této knihovny je však na tvorbu výstupů v publikační kvalitě a dynamická aktualizace dat v grafech u ní vyžaduje větší úpravy a tvorbu vlastních funkcí. Vykreslování grafů navíc není příliš dobře optimalizováno a při častém opakovaném překreslování by mohlo způsobovat zhoršení odezvy aplikace. [47]



Obrázek 26 Graf vytvořený pomocí balíčku Matplotlib vložený v okně PySde aplikace (zdroj [47])

- **PyQtGraph** – PyQtGraph je knihovna pro tvorbu grafických výstupů a celých grafických uživatelských rozhraní zaměřená na funkcionality, které jsou často využívány v inženýrských a vědeckých aplikacích. Jedním z cílů je umožnění tvorby výstupů v reálném čase tak, jak jsou přijímána vstupní data, bez nutnosti výrazných úprav. Vytvářené grafy mohou být uživateli výsledné aplikace také interaktivně exportovány do souborů různých formátů, a to včetně zdrojových dat použitých pro vizualizaci.



Obrázek 27 Příklad grafu vykresleného pomocí balíčku PyQtGraph (zdroj autor)

Na základě výše uvedených charakteristik byl k vytváření grafů ve vizualizačním SW zvolen balíček PyQtGraph.

4.2. Popis softwarového řešení

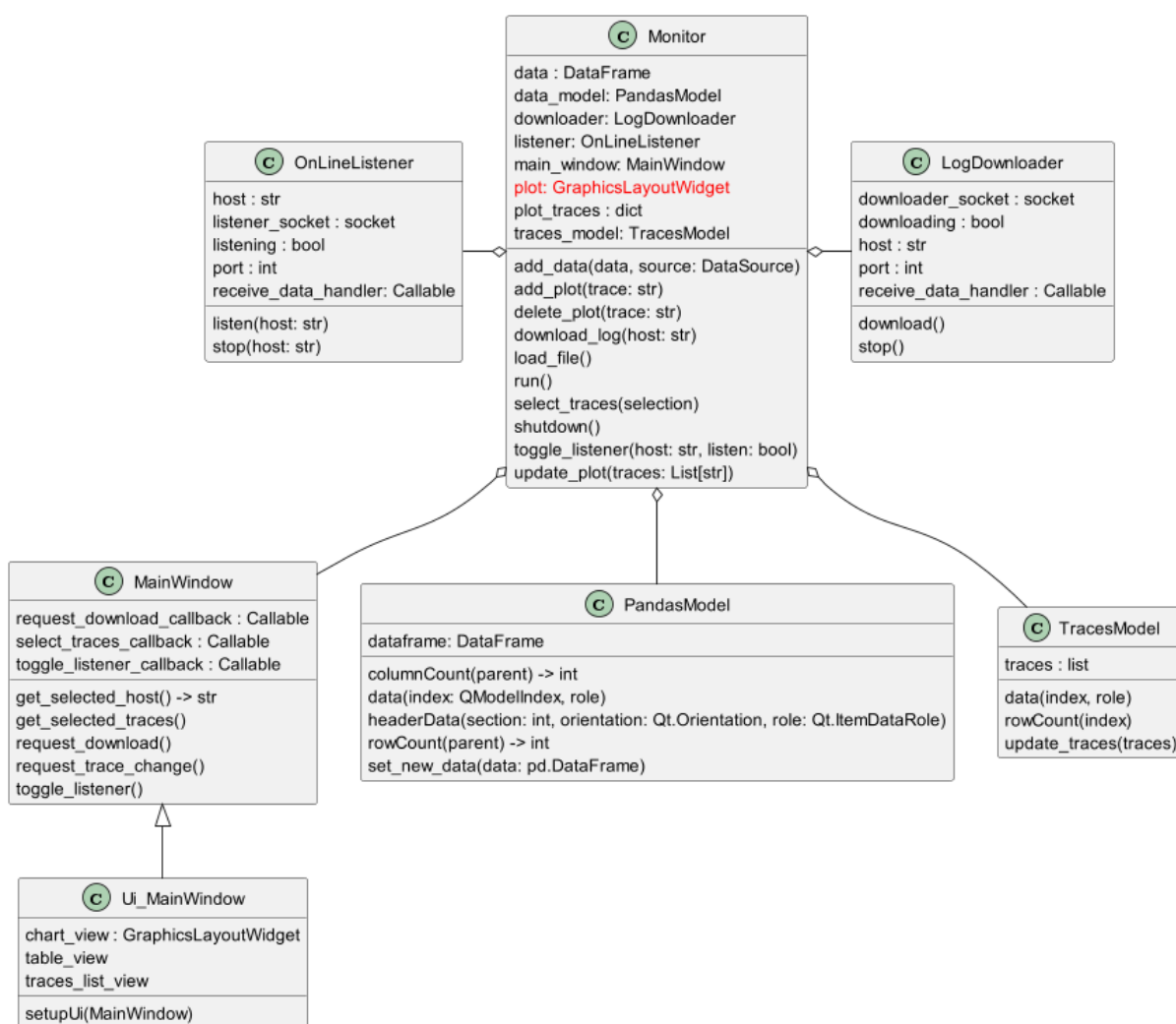
Obrázek 28 popisuje základní třídy implementované ve vizualizačním SW a jejich vzájemné vztahy. Červeně vyznačený atribut „plot“ třídy `Monitor` je pouze odkazem na atribut „chart_view“ třídy `MainWindow`, resp. `Ui_MainWindow`.

Logika vizualizační aplikace byla navržena v rámci jedné hlavní třídy nazvané `Monitor`. Tato třída plní následující funkce:

- Inicializace aplikace a spuštění hlavní smyčky
- uchovávání a aktualizace dat přijímaných z připojených zařízení
- zpracovávání povelů uživatele
- zahajování a ukončování stahování a přijímání dat z jednotky HoT nebo EoT
- výběr dat pro zobrazení v tabulce záznamů
- zobrazování, aktualizace a mazání grafů

Kromě vykreslování uživatelem požadovaných grafů v příslušném okně aplikace hlavní třída **Monitor** neinteraguje přímo s žádnými prvky grafického rozhraní. Toto řešení využívá architekturu podporovanou balíčkem PySide pro vytváření vazeb mezi datovými strukturami, s nimiž aplikace pracuje (tzv. business logic), a jejich reprezentací v grafickém rozhraní. Jde o architekturu typu MVVM (model-view-viewmodel). Vykreslování grafů je řízeno přímo třídou **Monitor**, protože knihovna PyQtGraph, z níž pochází třída použitá

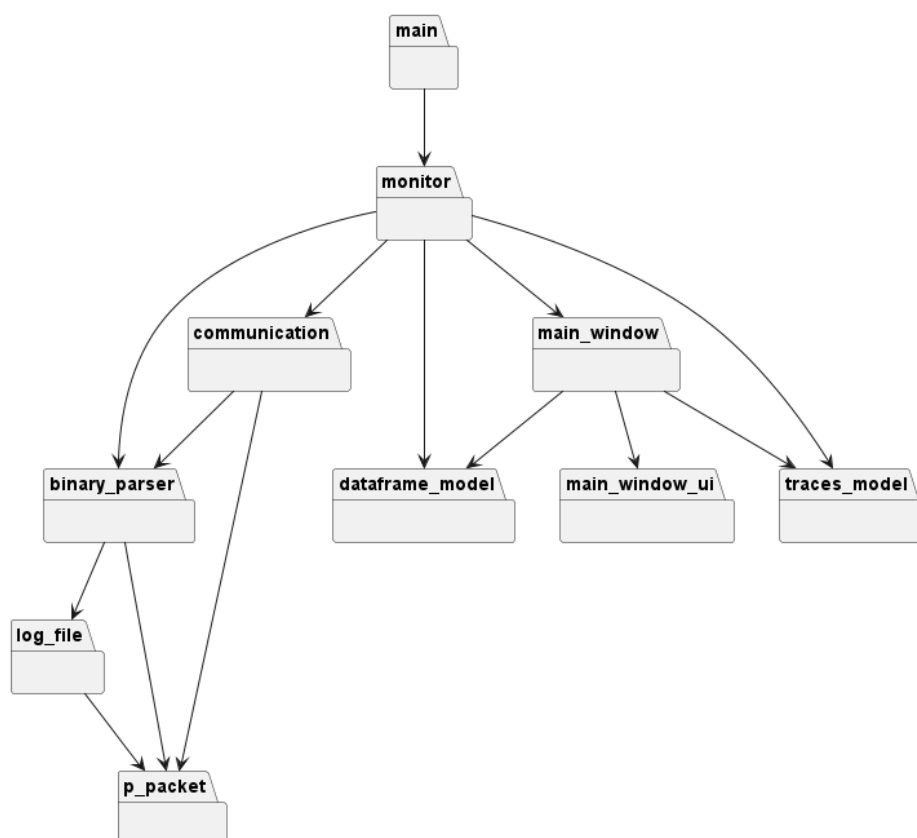
Propojení mezi zobrazením a daty zajišťují třídy **TracesModel** a **PandasModel**, které dědí od abstraktních tříd **QAbstractListModel** a **QAbstractTableModel** a implementují potřebné metody. Implementace třídy **PandasModel** byla převzata z oficiální dokumentace balíčku PySide6. [48]



Obrázek 28 Diagram tříd vizualizační aplikace (zdroj autor)

Třídou, která zajišťuje zachytávání událostí prováděných uživatelem a zobrazování dat v okně aplikace, je třída **MainWindow**. Tato třída neimplementuje žádné operace s daty, při výskytu definované události pouze zajistí volání odpovídající metody (tzv. „callback“ – zpětné volání), která jí byla předána v konstruktoru volaném třídou **Monitor**. Obsloužení dané

události pak zajistí tato předaná metoda (např. zahájení stahování logu) Třída `MainWindow` dědí od třídy `Ui_MainWindow`, která popisuje pouze strukturu a rozložení okna aplikace bez definice jejího chování. Tato třída je vygenerována utilitou `uic.exe` ze souboru `main_window.ui` vytvořeného pomocí aplikace `QtDesigner`. Obrázek 30 zobrazuje ukázkou tvoření specifikace rozložení prvků okna v této aplikaci. Aby bylo možné do okna umístit oblast pro vykreslování grafů knihovnou `PyQtGraph`, byl na její místo vložen zástupný objekt obecné třídy `QWidget`, který byl volbou „Promote to...“ změněn na potřebný objekt třídy `pyqtgraph.GraphicsLayoutWidget`.

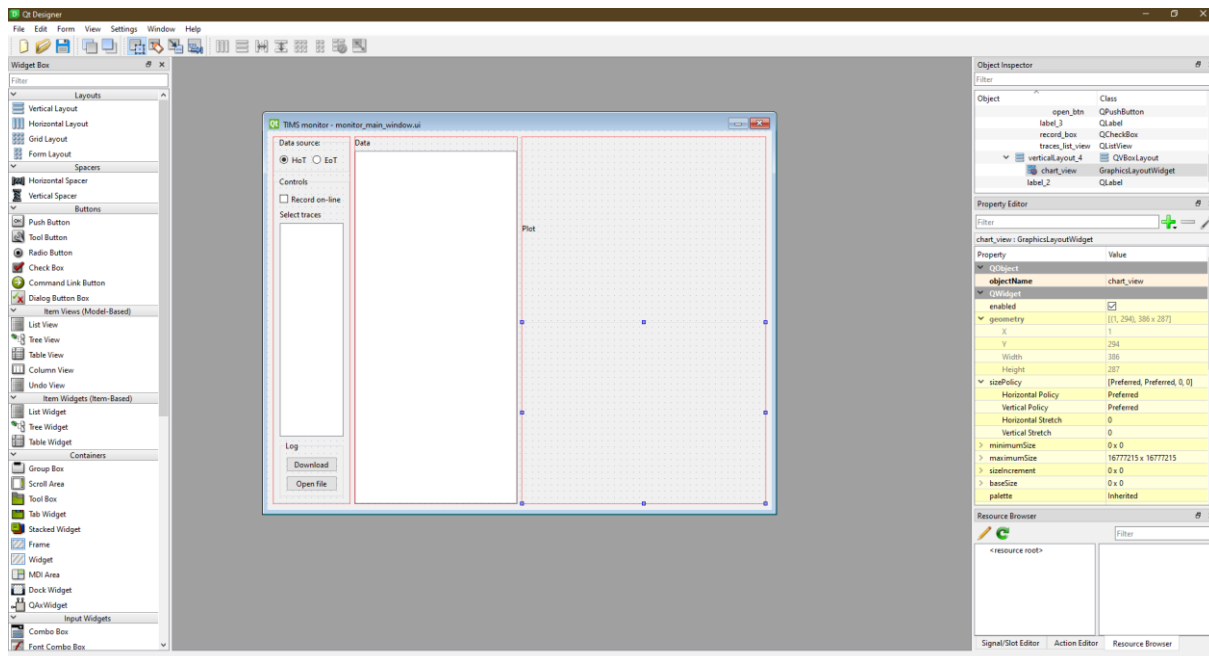


Obrázek 29 Diagram modulů vizualizační aplikace (zdroj autor)

Třídy `OnLineListener` a `LogDownloader` implementují komunikaci s jednotkami EoT a HoT a stahování či příjem dat. Po zavolání metody `listen()` resp. `download()` tyto třídy vytvoří spojení se zařízením EoT či HoT pomocí objektu `socket.socket` (součást standardní knihovny jazyka Python), v novém vlákně spustí smyčku příjmu dat a pomocí zpětného volání metody `add_data` třídy `Monitor` předávají přijatá binární zakódovaná data k dalšímu zpracování.

Dekódování binárních dat je implementováno pomocí funkcí soustředěných v modulu `binary_parser.py`. Přehled všech modulů, do nichž je rozdělen kód celého vizualizačního SW popisuje Obrázek 29. Modul `binary_parser.py` importuje některé třídy z modulů `p_packet.py` a `log_file.py`. Tyto dva moduly byly vygenerovány pomocí kompilátoru

nástroje Kaitai Struct ze specifikace binárního formátu v souborech `p_packet.ksy`, resp. `log_file.ksy`. Kompilátor Kaitai Struct nesprávně vkládal v části pro dekódování sekvence objektů procesních dat příkaz k zarovnání na celé byty za každým zpracovaným objektem. Tento příkaz na řádce 155 v souboru `p_packet.py` byl proto ručně zakomentován.



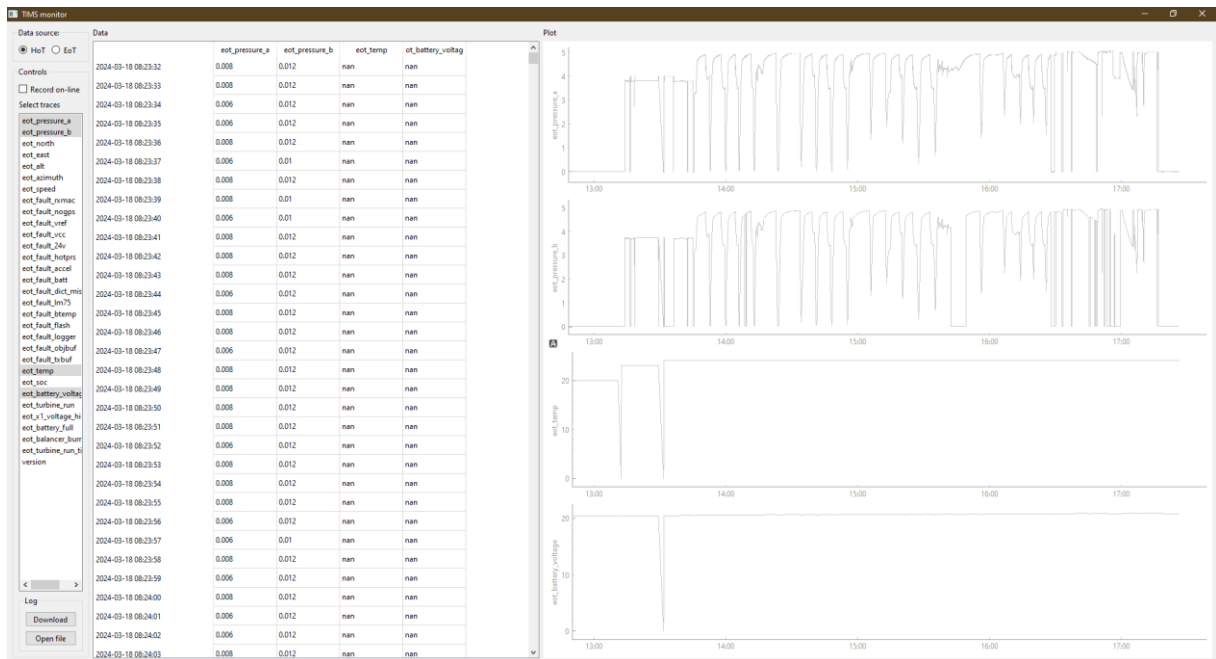
Obrázek 30 Tvorba rozložení prvků okna vizualizační aplikace (zdroj autor)

4.3. Ukázka vizualizace dat z měření v DAKO Třemošnice

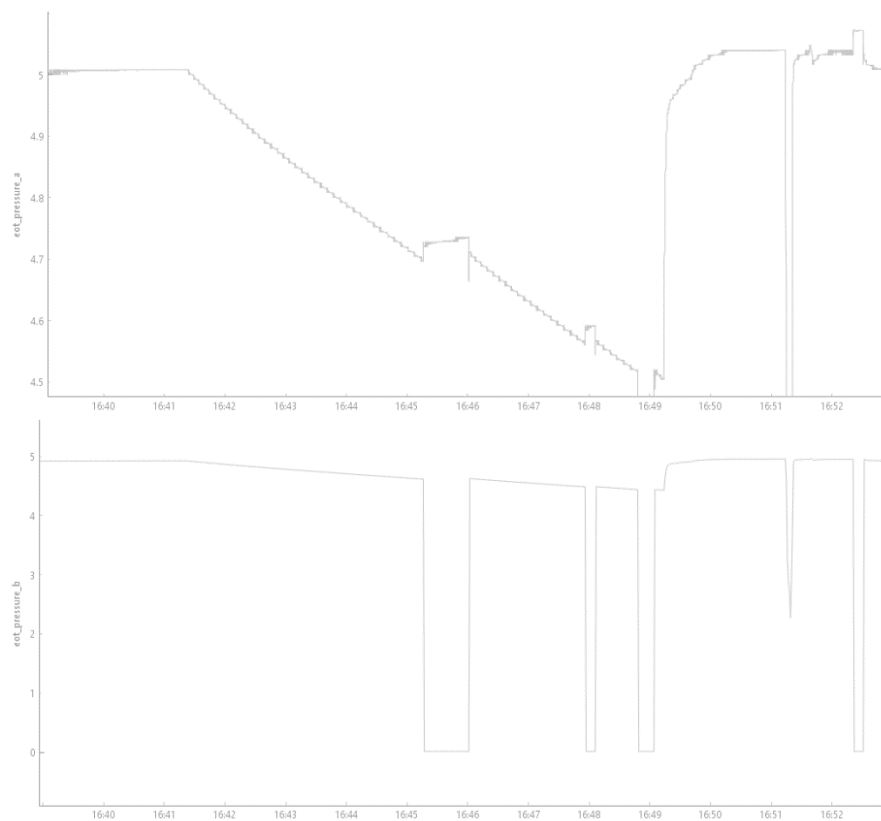
Ve vytvořeném vizualizačním programu byla za účelem ověření funkčnosti zobrazena data naměřená při experimentech prováděných dne 22. 4. 2024 s jednotkou EoT na zkušebním brzdovém stavu společnosti DAKO Třemošnice. Data z měření byla z jednotky stažena do binárního souboru, který byl poté načtený vizualizační aplikací pomocí zvláštní funkce vytvořené k tomuto účelu. Data uložená v souboru mají stejnou strukturu, jakou by měla data stažená z jednotky prostřednictvím protokolu pro off-line čtení, bylo tedy možné použít stejný postup dekódování. Data zobrazená po načtení souboru a výběru čtyř datových řad (tlak A, tlak B, teplota a napětí akumulátoru EoT) ukazuje Obrázek 31. Jak je vidět na vizualizaci, měřený tlak se v průběhu experimentů měnil podle toho, jak byly prováděny jednotlivé zkoušky a docházelo k naplňování a vyprazdňování brzdového potrubí simulovaného vlaku.

Autor této práce se nemohl zkušek v DAKO Třemošnice účastnit osobně, vycházel proto při ověření správnosti dekódování a zobrazení dat z dostupné informace o tom, kdy byly provedeny dvě zkoušky, při nichž byl simulován závěr na lokomotivním brzděči a byl sledován pokles tlaku v průběžném potrubí při chodu pneumatického generátoru jednotky EoT. Uvedené časy těchto zkušek byly přibližně 16:42 a 17:00. První z těchto zkušek byla prováděna se simulovaným vlakem s pěti vozy, druhá pak pouze s jedním vozem. Podle

vizualizace jsou v datech viditelné tyto dvě oblasti postupného poklesu tlaků A i B v časech odpovídajících uvedeným zkouškám. Ve druhém případě je pokles strmější než v prvním, i toto odpovídá očekávanému průběhu, poprvé s pěti vozy, podruhé pouze s jedním.

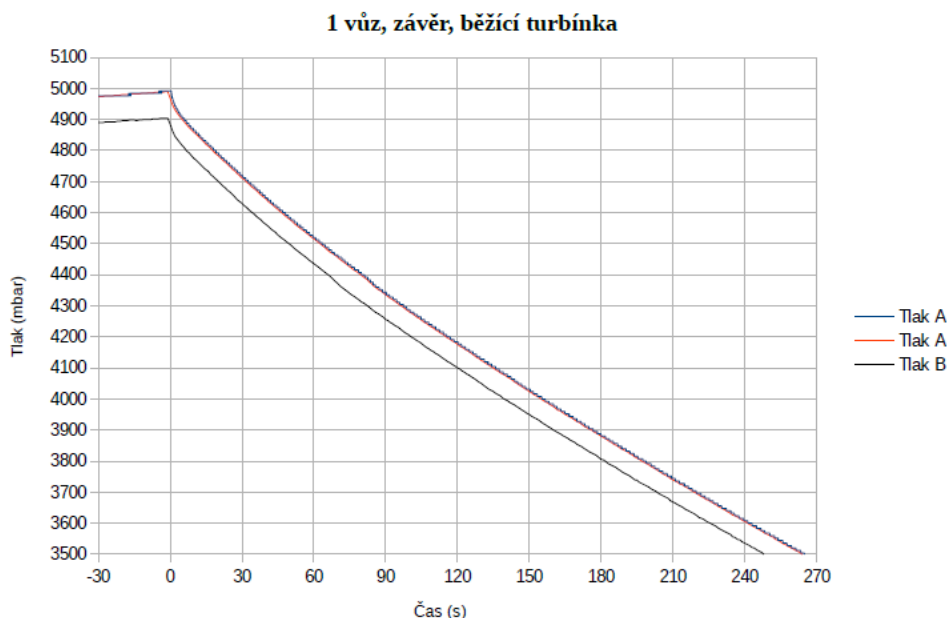


Obrázek 31 Celé okno vizualizační aplikace při zaměření na načtené záznamy z měření v DAKO Třešňovské (zdroj autor)

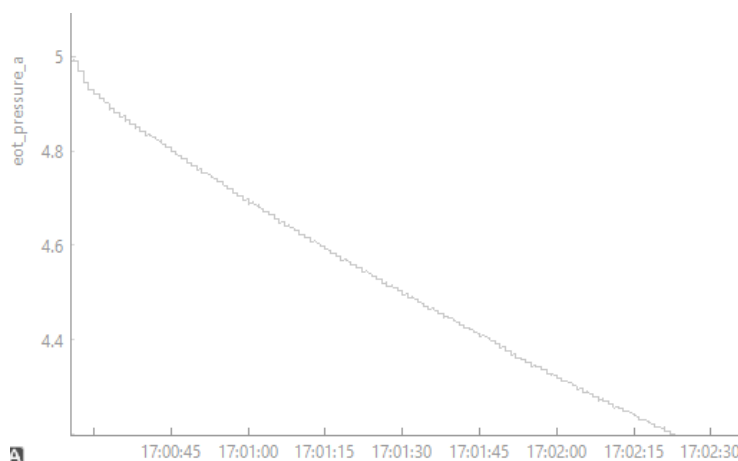


Obrázek 32 Vykreslené grafy průběhu tlaku A a B při provedeném závěru brzdě a chodu pneumatického generátoru (zdroj autor)

Obrázek 32 ukazuje detail první zkoušky se zavedením závěru. Přibližně v polovině doby poklesu tlaku byl na jistý okamžik vypnut pneumatický generátor. Na průběhu tlaku A měřeného před vypínacím ventilem je vidět skokový nárůst měřeného tlaku v této době. Tlak B, který je měřen za vypínacím ventilem před vstupem do generátoru, po tuto dobu klesá na nulu.



Obrázek 33 Pokles tlaku při zkoušce s jedním vozem vyhodnocený jedním ze spoluřešitelů projektu (zdroj [27])



Obrázek 34 Stejný průběh jako zobrazuje Obrázek 33, zobrazen pouze tlak A (zdroj autor)

Další ověření správnosti návrhu vizualizačního SW bylo provedeno porovnáním průběhů tlaku při zkoušce závěru brzdiče s jedním simulovaným vozem, které zobrazuje Obrázek 33, který byl nezávisle na autorovi této diplomové práce vytvořen jedním ze spoluřešitelů projektu, a Obrázek 34, který byl pořízen ve vizualizační aplikaci. Podle Obrázek 33 klesl tlak A z výchozí hodnoty na hodnotu 4,2 bar za přibližně 2 minuty, podle Obrázek 34 začal pokles z hodnoty 5 bar přibližně v 17:00:25 a hodnoty 4,2 bar (v obrázku na úrovni

vodorovné osy) dosáhl přibližně v 17:02:22. Výstupy vytvořené oběma metodami se tedy shodují.

4.4. Další možné rozšiřování vizualizačního SW

Po ověření funkčnosti navrženého vizualizačního SW byly identifikovány další možné směry vývoje a funkcionality, které by bylo možné v SW implementovat, aby práce s ním při provádění dalších testů byla komfortnější:

- Možnost uživatelského nastavení barev jednotlivých grafů
- Zobrazení proměnných výčtového typu (např. poloha ovladače brzdíče) formou barevných pruhů s legendou indikujícími aktuální hodnotu v čase
- Doplnění datového kurzoru, který bude indikovat hodnotu na ose x a y v místě umístění kurzoru na grafu
- Automatické zvýraznění hodnoty vybrané v tabulce zároveň v grafu a obráceně
- Doplnění mapy zachycující pohyb jednotek v prostoru (na základě GPS souřadnic)

5. Závěr

V rámci této diplomové práce byla provedena analýza současných existujících systémů zjišťování celistvosti vlaku vlakových souprav. Tato analýza byla použita při aktivitě autora práce ve výzkumném projektu „Výzkum provozních aspektů inteligentního konce vlaku“, který proběhl na Fakultě dopravní ČVUT v Praze v letech 2023 až 2024. Během tohoto projektu se autor podílel na specifikaci požadavků na systém „inteligentního konce vlaku“, která byla vytvořena pomocí modelovacího SW Eclipse Papyrus.

Poslední část práce se pak věnovala vývoji softwarového nástroje pro analýzu a vyhodnocování dat měřených v rámci experimentů prováděných při práci na uvedeném projektu. Návrh tohoto SW byl proveden v jazyce Python a byly využity knihovny umožňující efektivní zpracování binárních dat získávaných z jednotek EoT a HoT, které byly vyvinuty členy řešitelského týmu.

Oproti původnímu předpokladu nebyl součástí návrhu SW algoritmus vyhodnocování integrity vlaku na základě měřených veličin a to z toho důvodu, že tento algoritmus se po získaných zkušenostech a poznatcích bude implementovat jako distribuovaný a jeho vývoj pro platformu PC by nebyl přínosný pro pozdější přepracování pro spouštění na HW vestavěných systémů

Během práce měl autor možnost spolupracovat s odborníky z oblastí, ve kterých nemá příliš veliký rozhled (zejm. návrh nízkourovňových algoritmů a HW) a byl nucen se naučit v takovém prostředí efektivně pracovat.

Vytvořené výstupy – specifikace požadavků na systém a vizualizační software – budou i nadále používány při dokončování úkolů projektového týmu. V tomto směru by chtěl autor vyjádřit uspokojení nad tím, že výsledek této práce nebude ihned po jejím obhájení „odložen do šuplíku“.

6. Bibliografie

- [1 ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. *System Requirements Specification: Chapter 2 Basic System Description*. Online. Verze 4.0.0. 2023. Dostupné z: <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1>. [cit. 2022-07-15].
- [2 *Advanced Protection System*. Online. DEUTSCHE BAHN AG. Digitale Schiene Deutschland. 2024. Dostupné z: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/Advanced-Protection-System>. [cit. 2024-05-10].
- [3 SPRÁVA ŽELEZNIC. *SŽ D1 ČÁST PRVNÍ: Dopravní a návěštní předpis pro tratě nevybavené evropským vlakovým zabezpečovačem*. Online. Oprava č. 1. 2022. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/Portal/Show.aspx?oid=1951327>. [cit. 2024-04-10].
- [4 SPRÁVA ŽELEZNIC. *SŽ TNŽ 34 2620, Železniční zabezpečovací zařízení*. Změna č. 1. 2002.
- [5 EVROPSKÁ KOMISE. *PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2023/1695*. Online. 2023. Dostupné z: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1695/oj. [cit. 2024-05-10].
- [6 ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. *GSM-R Bearer Service Requirements*. Online. 4.0.0. 2022. Dostupné z: https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/index37_reserved_document_informative_specifications_0.pdf. [cit. 2024-04-10].
- [7 SPRÁVA ŽELEZNIC. *SŽ Z8 díl IV (prozatímní): Evropský vlakový zabezpečovač ETCS*. Online. Oprava č. 2. 2022. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/Portal/Show.aspx?oid=1951907>. [cit. 2024-04-10].
- [8 ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. *System Requirements Specification: Chapter 3 Principles*. Online. Verze 4.0.0. 2023. Dostupné z: <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1>. [cit. 2022-07-15].
- [9 ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. *System Requirements Specification: Chapter 7 ERTMS/ETCS language*. Online. Verze 4.0.0. 2023. Dostupné z: <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1>. [cit. 2023-07-15].
- [1 UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP, UNIFE. *Train Interface FIS*. Online. 4.0.0. 2023. Dostupné z: <https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index007 - SUBSET->

- 0] [034_v400.pdf](#). [cit. 2024-04-10].
- [1 UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP, UNIFE. *Safety Requirements for the Technical 1] Interoperability of ETCS in Levels 1 & 2*. Online. 4.0.0. 2023. Dostupné z: [https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index027 - SUBSET-091_v400.pdf](https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index027_-_SUBSET-091_v400.pdf). [cit. 2024-04-10].
- [1 UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP, UNIFE. *Performance Requirements for 2] Interoperability*. Online. 4.0.0. 2023. Dostupné z: [https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index014 - SUBSET-041_v400.pdf](https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index014_-_SUBSET-041_v400.pdf). [cit. 2024-04-10].
- [1 KOUTECKÝ, Petr. *SYSTÉM DYNAMICKÉHO ŘÍZENÍ A ZABEZPEČENÍ ŽELEZNIČNÍ 3] DOPRAVY*. Disertační práce. Chýně: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, 2020.
- [1 EEIG ERTMS USERS GROUP. *ERTMS/ETCS Hybrid Train Detection: Principles*. Online. 4] Revision 1F. Brussels, 2022. Dostupné z: https://ertms.be/wp-content/uploads/2023/06/16E0421F_HTD.pdf. [cit. 2024-02-10].
- [1 INDRA a SBB. *Deliverable D4.1: Train Integrity Concept and Functional Requirements 5] Specifications*. Online. Verze 5.0. 2020. Dostupné z: [https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=83cff4cc- bf4a-4fe5-97e6-a6c617f20981](https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=83cff4cc-bf4a-4fe5-97e6-a6c617f20981). [cit. 2022-07-15]. Výstup projektu X2RAIL-2.
- [1 KIRRMANN, Hubert a ZUBER, Pierre A. *THE IEC/IEEE TRAIN COMMUNICATION 6] NETWORK*. Online. IEEE, 2001. Dostupné z: https://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA_STR/trabalhos/rt-diversos/The%20IEC-IEEE%20train%20communication%20network.pdf. [cit. 2024-05-11].
- [1 *FP5-TRANS4M-R*. Online. 2023. Dostupné z: [https://projects.rail-research.europa.eu/eurail-fp5/](https://projects.rail-7] research.europa.eu/eurail-fp5/). [cit. 2024-05-07].
- [1 HUSTER, Alina. *Part I: What is Digital Automatic Coupling and what are its levels?* Online. 8] Rail Cargo Group Blog. 2021. Dostupné z: <https://blog.railcargo.com/en/artikel/dak-faq1>. [cit. 2024-05-10].
- [1 *Open European DAC Delivery Programme enabled by Europe's Rail*. Online. Europe's 9] Rail. 2024. Dostupné z: <https://rail-research.europa.eu/european-dac-delivery-programme/>. [cit. 2024-05-04].

- [2 VAN GILS, Karel; HENON, Frédéric a GRÄBER, Johannes. *DAC programme and 0] Interaction with ERTMS*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.era.europa.eu/system/files/2024-04/20240423%20ERTMS%20conference%202024_DAC.pptx. [cit. 2024-04-30].
- [2 LAMB, Sean. *BN caboose, Eola Yard, 1993*. Online. In: Wikipedie: Otevřená 1] encyklopedie. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2006. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BN_caboose,_Eola_Yard,_1993.jpg. [cit. 2024-02-11].
- [2 MCGONIGAL, Robert S. *End-of-train devices replaced cabooses*. Online. Trains. 2023. 2] Dostupné z: <https://www.trains.com/trn/train-basics/abcs-of-railroading/end-of-train-devices/>. [cit. 2024-04-13].
- [2 SIEMENS MOBILITY, INC. *TRAINGUARD EOT, A90385*. Online. VERSION A. 2020. 3] Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f90685a5-3bec-49fc-8bfe-16d403032bed/trainguard-eot-instruction-and-installation-manual-obe-00-17-06a.pdf>. [cit. 2024-04-12].
- [2 SIEMENS MOBILITY, INC. *TRAINGUARD EOT, A90385*. Online. VERSION A. Siemens, 4] 2020. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f90685a5-3bec-49fc-8bfe-16d403032bed/trainguard-eot-instruction-and-installation-manual-obe-00-17-06a.pdf>. [cit. 2024-05-08].
- [2 *DPS 2020-He-LD ETD*. Online. [2020]. Dostupné z: https://991dac5f-6ad7-4782-9802-5ffc1bec7ed98.usrfiles.com/ugd/991dac_b32a3d66cfcd477d854969b5d7e8b888.pdf. [cit. 2024-05-15].
- [2 WABTEC CORPORATION. *TrainLink™ NG5 ATX End of Train Device*. Online. Pittsburg, 6] © 2022. Dostupné z: <https://www.wabteccorp.com/digital-electronics/core-electronics-and-analytics/trainlink-ng5-atx-end-of-train-device..> [cit. 2022-07-15].
- [2 FD ČVUT, FEL ČVUT, ČD CARGO, TRS PARDUBICE, VÚŽ. *Interní materiály řešení 7] projektu INTELLIGENT_END4TRAIN*. 2024.
- [2 *Detail kmitočtového pásma: Pásmo 456 – 459 MHz*. Online. VYUŽITÍ RÁDIOVÉHO 8] SPEKTRA. 2024. Dostupné z: <https://spektrum.ctu.gov.cz/kmitocty/456-459-mhz?filter%5BfrequencyFrom%5D=150&filter%5BfrequencyFromUnit%5D=MHz&filter%5BfrequencyTo%5D=600&filter%5BfrequencyToUnit%5D=MHz>. [cit. 2024-05-02].
- [2 SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY. *SŽDC T7: Rádiový provoz*. Online. 2016.

- 9] Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/Portal/Show.aspx?oid=1326268>. [cit. 2024-04-10].
- [3 *Pneumo Power*. Online. [Metal Work] General Catalogue. [2024]. Dostupné z: 0] <https://media.metalwork.it/browse/catalogue-eng#page/1656>. [cit. 2024-05-12].
- [3 *Lithium-titanate battery*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): 1] Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-titanate_battery. [cit. 2024-05-09].
- [3 *What is UML Stereotype? How to Define it?* Online. Visual Paradigm. 2024. Dostupné z: 2] <https://www.visual-paradigm.com/tutorials/how-to-create-stereotyped-model-element.jsp>. [cit. 2024-05-09].
- [3 DERFEL73 a PMERSON. *Hierarchy of diagrams in UML 2.2*. Online. In: 3] Wikimedia Commons. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UML_diagrams_overview.svg. [cit. 2024-05-01].
- [3 OBJECT MANAGEMENT GROUP. *OMG Systems Modeling Language*. Online. Version 4] 1.6. Object Management Group, 2019. Dostupné z: <https://sysml.org/.res/docs/specs/OMGSysML-v1.6-19-11-01.pdf>. [cit. 2024-05-10].
- [3 *Eclipse Papyrus™ Documentation*. Online. Eclipse Papyrus™. [2024]. Dostupné z: 5] <https://eclipse.dev/papyrus/documentation.html>. [cit. 2024-05-13].
- [3 *The Python Tutorial*. Online. 2024. Dostupné z: 6] <https://docs.python.org/3/tutorial/index.html>. [cit. 2024-05-15].
- [3 *Python (programming language)*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San 7] Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language)). [cit. 2024-05-10].
- [3 *Tkinter — Python interface to Tcl/Tk*. Online. Python 3.12.3 documentation. 2024. 8] Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html#module-tkinter>. [cit. 2024-05-10].
- [3 9] *Tcl Developer Site*. Online. [2023]. Dostupné z: <https://www.tcl.tk/>. [cit. 2024-05-15].
- [4 PECEN, Vilém. *Simulátor vlakového zabezpečovače*. Bakalářská práce. Praha: České 0] vysoké učení v Praze, Fakulta dopravní, 2021.
- [4 *Qt for Python*. Online. © 2024. Dostupné z: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/>. [cit. 2024-05-

- 1] 10].
- [4 *PyQt*. Online. The Python Wiki. 2018. Dostupné z: <https://wiki.python.org/moin/PyQt>. [cit. 2] 2024-05-04].
- [4 *Thermostat*. Online. THE QT COMPANY. Qt Documentation. © 2024. Dostupné z: 3] <https://doc.qt.io/qt-6/qtdoc-demos-thermostat-example.html>. [cit. 2024-05-15].
- [4 *Pandas documentation*. Online. 2024. Dostupné z: 4] <https://pandas.pydata.org/docs/index.html>. [cit. 2024-05-11].
- [4 *PySide6.QtCharts*. Online. THE QT COMPANY. Qt for Python. Copyright © 2024. 5] Dostupné z: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/PySide6/QtCharts/index.html>. [cit. 2024-05-15].
- [4 *Class QBoxPlotSeries*. Online. THE QT COMPANY. Qt for Python. Copyright © 2024. 6] Dostupné z: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/PySide6/QtCharts/QBoxPlotSeries.html>. [cit. 2024-05-10].
- [4 *Plotting with Matplotlib*. Online. FITZPATRICK, Martin. Python GUIs. 2024. Dostupné z: 7] <https://www.pythonguis.com/tutorials/plotting-matplotlib/>. [cit. 2024-05-11].
- [4 *Pandas Simple Example*. Online. THE QT COMPANY. Qt for Python. Copyright © 2024. 8] Dostupné z: https://doc.qt.io/qtforpython-6/examples/example_external_pandas.html. [cit. 2024-05-13].
- [4 *Metro D*. Online. DOPRAVNÍ PODNIK HL. M. PRAHY. 2024. Dostupné z: 9] <https://www.dpp.cz/metro-d/uvod#dopravni-system>. [cit. 2024-04-10].
- [5 SPRÁVA ŽELEZNIC. SŽ TSI CCS/MP1: Zásady pro projektování traťové části ERTMS 0] *pro tratě s výhradním provozem evropského vlakového zabezpečovače*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/142705238/S%C5%BD+TSI+CCS+MP1.pdf/1cf94a98-657c-4579-a466-4adc85136804>. [cit. 2024-04-10].
- [5 BARHTOLOMEUS, Maarten. *Hybrid Level 3 & Formal Methods*. Online. ProRail. 1] Dostupné z: https://its-mobility.de/wp-content/uploads/Bartholomeus_EEIG_Test4Rail_2021.pdf. [cit. 2024-04-20].
- [5 VERKEHRSWISSENSCHAFTLICHES INSTITUT – LEHRSTUHL FÜR 2] SCHIENENBAHNWESEN UND VERKEHRSWIRTSCHAFT DER RHEINISCH-WESTFÄLISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE AACHEN. *Influence of ETCS on line capacity: Generic study*. Online. International Union of Railways, 2008. ISBN 2-7461-

1455-0. Dostupné z: https://uic.org/cdrom/2011/05_ERTMS_training2011/docs/Capacity-generic-study.pdf. [cit. 2024-05-13].

[5 SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY. *SŽ D17: Předpis pro hlášení a šetření 3] mimořádných událostí*. Změna č. 2. [2017]. [cit. 2024-03-20].

[5 *Capella MBSE Tool - Arcadia*. Online. Capella. [2024]. Dostupné z: [https://mbse-4\] capella.org/arcadia.html](https://mbse-4] capella.org/arcadia.html). [cit. 2024-05-13].

[5 *GNU General Public License version 3*. Online. Open source initiative. Dostupné z: 5] <https://opensource.org/license/gpl-3-0>. [cit. 2024-05-12].

7. Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma prvků použitých v aplikační úrovni ETCS Level 2 (zdroj [1, s. 22])	13
Obrázek 2 Vizualizace rozdílu mezi jízdou vlaků v pevných a v pohyblivém oddílu (zdroj [2])	16
Obrázek 3 Architektura systému ERTMS/ETCS (zdroj [1, s. 11]).....	17
Obrázek 4 Znázornění bezpečné délky vlaku (zdroj [8, s. 63])	19
Obrázek 5 Základní pojmy hybridní detekce vlaku (zdroj [14, s. 10]).....	22
Obrázek 6 Vyhodnocení volnosti VSS11 na základě informace z TTD10 (zdroj [14, s. 14]) .	24
Obrázek 7 Ukončení jízdy vlaku ve VSS a rozšíření stavu neznámý na sousední VSS (zdroj [14, s. 43]).....	25
Obrázek 8 Služební vůz (angl. caboose) na železnici ve státě Illinois (zdroj [21])	30
Obrázek 9 Příklad zařízení EoT namontovaného na spřáhle vozu (zdroj [23])	31
Obrázek 10 Výsledky pokusu se zatěžováním pneumatického generátoru	37
Obrázek 11 Indikace odesílání a přijímání zprávy od HoT (zdroj [24, s. 3-10]).....	41
Obrázek 12 Celkové schéma architektury navrhovaného systému TIMS (zdroj autor)	42
Obrázek 13 Schéma architektury části systému na hnacím vozidle (HoT) (zdroj autor)	43
Obrázek 14 Schéma architektury části systému na konci vlaku (EoT) (zdroj autor)	43
Obrázek 15 Hierarchie diagramů v jazyce UML 2.2 (zdroj [33])	48
Obrázek 16 Ukázka zobrazení jednotlivých požadavků a vazeb mezi nimi v SW Eclipse Papyrus (zdroj autor)	49
Obrázek 17 Hierarchie požadavků zobrazených v okně Model Explorer SW Eclipse Papyrus (zdroj autor)	49
Obrázek 18 Zobrazení požadavků odvozených od požadavku REQ-016 v okně Properties SW Eclipse Papyrus (zdroj autor)	50
Obrázek 19 Ukázka připojení komentáře a odůvodnění k požadavkům v prostředí SW Papyrus (zdroj autor)	50
Obrázek 20 Základní identifikované požadavky (zdroj autor)	52
Obrázek 21 Znázornění umístění dvojice červenobílých desek dávajících návěst Konec vlaku na posledním voze soupravy, desky nejsou zobrazeny v odpovídajícím měřítku (zdroj [3, s. 229])	54
Obrázek 22 Ukázka grafického uživatelského rozhraní vytvořeného pomocí balíčku tkinter (zdroj [40, s. 46]).....	58
Obrázek 23 Ukázka aplikace vytvořené pomocí frameworku Qt (zdroj [43]).....	59
Obrázek 24 Webové vývojové prostředí Kaitai Struct (zdroj autor).....	60
Obrázek 25 Příklad grafu vytvořeného pomocí modulu QtCharts (zdroj [46]).....	61
Obrázek 26 Graf vytvořený pomocí balíčku Matplotlib vložený v okně PySde aplikace (zdoj [47])	61

Obrázek 27 Příklad grafu vykresleného pomocí balíčku PyQtGraph (zdroj autor)	62
Obrázek 28 Diagram tříd vizualizační aplikace (zdroj autor).....	63
Obrázek 29 Diagram modulů vizualizační aplikace (zdroj autor)	64
Obrázek 30 Tvorba rozložení prvků okna vizualizační aplikace (zdroj autor)	65
Obrázek 31 Celé okno vizualizační aplikace při zaměření na načtené záznamy z měření v DAKO Třemošnice (zdroj autor).....	66
Obrázek 32 Vykreslené grafy průběhu tlaku A a B při provedeném závěru brzdíče a chodu pneumatického generátoru	66
Obrázek 33 Pokles tlaku při zkoušce s jedním vozem vyhodnocený jedním ze spoluřešitelů projektu (zdroj [27]).....	67
Obrázek 34 Stejný průběh jako zobrazuje Obrázek 33, zobrazen pouze tlak A (zdroj autor)	67

8. Seznam tabulek

Tabulka 1 Význam jednotlivých stavů	23
Tabulka 2 Předpokládaná energetická náročnost rádiového přenosu	38
Tabulka 3 Zprávy on-line komunikačního protokolu (zdroj [27])	44
Tabulka 4 Seznam definovaných objektů procesních dat (zdroj [27]).....	46
Tabulka 5 Definovaná pravidla pro rozhodnutí o roztržení vlaku na základě měřených veličin (zdroj [27])	56

9. Seznam příloh

Příloha č. 1 – Specifikace požadavků na systém TIMS v prostředí SW Eclipse Papyrus.

Příloha č. 2 – Zdrojový kód nástroje pro vyhodnocování dat měřených systémem TIMS