

Testování autonomního řízení tramvaje na kolejové síti v Plzni



Doc. Ing. Tomáš Tichý, Ph.D.
ČVUT v Praze Fakulta dopravní,
Katedra dopravní telematiky



Ing. Tomáš Kohout, MBA
ČVUT v Praze Fakulta dopravní,
Ústav soudního znalectví v dopravě



Ing. Miroslav Vaniš, Ph.D.
ČVUT v Praze Fakulta dopravní,
Katedra dopravní telematiky

Článek se věnuje testování autonomního řízení tramvaje v Plzni a představuje zpracovanou metodiku využívající dynamické HD mapy a digitální dvojče městského prostředí. Popisuje technologická a datová řešení nutná pro vybavení kolejových vozidel a infrastruktury pro potřeby autonomní mobility, zejména v oblasti sensoriky, komunikace C-ITS a přesného mapování. Pro ověření funkčnosti byl vytvořen testovací úsek na reálné tramvajové síti doplněný o sensorické vybavení infrastruktury a vozidla. Testy probíhaly za přímého dohledu řidiče tramvaje se zajištěním maximální bezpečnosti. Článek přibližuje aktuální trendy v geoinformatice a zdůrazňuje význam HD map jako klíčového prvku pro lokalizaci a orientaci autonomních vozidel. Zaměřuje se na jejich roli při zajištění interoperability systémů, dynamické aktualizaci dat a propojení statických mapových podkladů s aktuálními dopravními informacemi prostřednictvím digitálního dvojčete.

Klíčová slova: autonomní mobilita, HD mapy, ITS, C-ITS, 5G, digitální dvojče

The article is dedicated to testing autonomous tram control in Pilsen and presents a developed methodology using dynamic HD maps and a digital twin of the urban environment. It describes the technological and data solutions necessary for equipping rolling stock and infrastructure for autonomous mobility, particularly in the areas of sensors, C-ITS communication and precise mapping. To verify the functionality, a test section was created on a real tram network with infrastructure and vehicles equipped by sensors. The tests were conducted under the direct supervision of the tram driver, ensuring maximum safety. The article presents current trends in geoinformatics and emphasizes the importance of HD maps as a key element for the localization and orientation of autonomous vehicles. It focuses on their role in ensuring system interoperability, dynamic data update and linking static map data with current traffic information via a digital twin.

Keywords: autonomous mobility, HD maps, ITS, C-ITS, 5G, digital twin

1 ÚVOD

S rostoucím zájmem o autonomní mobilitu nabývají na významu nové infrastrukturní prvky – od sensoriky vozidel přes přenos dat v sítích 5G až po sběr detailních informací o reliéfu. Tyto komponenty se stávají klíčovými pro efektivní a bezpečný provoz autonomních vozidel. V rámci projektu, který byl spolufinancován Technologickou agenturou ČR (TA ČR), vedeného v rámci programu Doprava 2020+ pod číslem CK03000179 – „Vytvoření dynamického digitálního modelu ulice pro potřeby autonomního řízení v Plzni“, byl vytvořen silný tým společností INTENS Corporation s.r.o., ŠKODA TRANSPORTATION a.s., ŠKODA DIGITAL s.r.o., CEDA Maps a.s. a dvou univerzit – Zápa- dočeská univerzita v Plzni a České vysoké učení technické v Praze, který navrhl, připravil a zajistil reálné pilotní testování autonomní tramvaje na vybrané části tratě v Plzni. Díky vstřícnému přístupu Plzeňského dopravního podniku byla pro testování využita tramvaj Škoda 40T, vůz č. 385 a řešitelskému týmu bylo umožněno testování na části nové tramvajové trati v oblasti Plzeň 3 – Jižní Předměstí, a to na dvou světelně řízených křižovatkách Kaplířova × Klatovská třída a Kaplířova × Dobřan- ská, na křížení tramvajové trati s ulicí Technickou při vyšších rychlostech vozu (obr. 1) a zejména na tramvajové smyčce zastávky Univerzitní (obr. 2). Testování v uvedených lokalitách proběhlo v červenci roku 2024. Na světelně řízených křižovatkách byla testována zejména komunikace s infrastrukturou z pohledu posílání příslušného signálu volno a směru pro tram- vaje včetně postavení výhybky. Na otevřené trati a v tramvajové smyčce bylo testováno různé umístění překážek a reakce na ně

v různých rychlostech tak, aby byla zajištěna bezpečnost provozu. Všechny reálné testy byly zabezpečeny nejen dohle- dem řidiče tramvaje pro případ selhání systémů, ale také pří- tomností proškolených a označených pracovníků, kteří dohlíželi na bezpečný pohyb osob na zastávkách, koordinaci pohybu dalších tramvají ve smyčce a kontrolu případného pro-



obr. 1 Testování autonomní tramvaje na trati při vyšších rychlostech
[mapy.cz, vlastní foto]

vozu na ulici Technická. Cílem bylo zajistit, aby během testování autonomního provozu tramvaje nebyla ohrožena bezpečnost žádného účastníka [1–3].

Pilotní úsek v Plzni byl navržen tak, aby reflektoval požadavky výrobce vozidel městské hromadné dopravy (MHD) na přesná data, která jsou nezbytná pro vysoce automatizované a autonomní řízení. Inovativní přístup spočíval zejména v integraci dynamických dat z detekčních zařízení na infrastrukturu (například semaforey, elektrické obslužné jednotky a dopravní značení) a v samotných testovacích vozidlech. Tento přístup umožnil reálné zobrazení dopravních situací a polohy vozidla v přesné mapě – v HD mapě (High-Definition Maps nebo zkráceně HD Maps) a její potřebné aktualizaci v reálném čase, což je klíčová funkce pro bezpečný provoz autonomních vozidel. Pro přenos dat mezi jednotlivými prvky systému, jako jsou vozidla, infrastruktura (SSZ – světelné signalizační zařízení, EOV – elektricky ovládané výhybky, dopravní značení) a serverová část, byly použity nejnovější komunikační technologie, mezi které patří zejména technologie ITS-G5. Tento standard, vyvinutý pro inteligentní dopravní systémy, umožňuje komunikaci mezi vozidly (V2V – Vehicle to Vehicle) a mezi vozidly a infrastrukturou (V2I – Vehicle to Infrastructure), čímž se zajišťuje efektivní a bezpečný přenos dat. Tato technologie bude postupně implementována i v dalších městských prostředích v ČR, což přispěje k rozvoji infrastruktury připravené pro autonomní mobilitu [4–6].



obr. 2 Testování autonomní tramvaje ve smyčce při nižších rychlostech [mapy.cz, vlastní foto]

2 AUTONOMNÍ PROVOZ

Automatizace silničních vozidel se dělí do celkem šesti úrovní. Od vozidla, které je vybaveno varovnými systémy a řídí je pouze řidič, přes vozidlo vybavené asistenty pro parkování, až po udržování vozidla v určeném jízdním pruhu nebo pro udržení vzdálenosti mezi danými vozidly. U takto vybavených vozidel sice uvedené řídicí funkce probíhají automaticky, nicméně řidič musí být schopen kdykoliv převzít řízení. Posledním krokem postupného vývoje asistenčních systémů je stav, kdy řidiče není potřeba a cíl cesty zadává cestující. Současná osobní vozidla komerčně dostupná na trhu odpovídají v závislosti na typu vozidla a úrovni technické výbavy stupni automatizace úrovně 1–2 (zcela výjimečně i vyšší). V některých státech světa provozují výrobci vozidel a technologické firmy v testovacím provozu dopravní prostředky úrovně 4–5 [2, 3].

Pro určení úrovně automatizace kolejových vozidel slouží klasifikace GoA (Grade of Automation). Skládá se z 5 úrovní od GoA0 (žádná automatizace – vyžaduje plnou kontrolu jízdy strojvedoucím) až po GoA4 (plně automatická – všechny procesy a úkony jsou plně řízeny systémem vozidla). S rostoucí úrovní automatizace se zvyšují i požadavky na podklady (tab. 1 [2, 3]).

tab. 1 Úrovně automatizace podle GoA [2, 3]

Úroveň	GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Popis úrovně	Žádná automatizace. Řidič je plně odpovědný za všechny operace.	Řidič ovládá vlak s asistencí bezpečnostních systémů.	Automatizované startování a zastavování, řidič ovládá dveře a řeší nouzové situace.	Plně automatizovaný provoz s průvodčím na palubě.	Plně automatizovaný provoz bez personálu na palubě.
Provoz vlaku	Manuální	Manuální s asistencí	Semiautomatický	Bez řidiče	Bez dozoru
Klíčové vlastnosti	Ruční řízení, vizuální signály, ruční bezpečnostní kontroly.	Řidič ovládá startování, zastavování, dveře; bezpečnostní systémy pouze asistují.	Automatizované řízení mezi stanicemi, řidič ovládá dveře a řeší nouzové situace.	Automatizované řízení a ovládání dveří, přítomen průvodčí pro nouzové situace.	Plně automatizované řízení, žádný personál na palubě, dálková kontrola.
Příklady z praxe	Tradiční železnice	Konvenční metro systémy	Victoria Line v londýnském metru	Některé linky pařížského metra	Thomson-East Coast Line v Singapuru

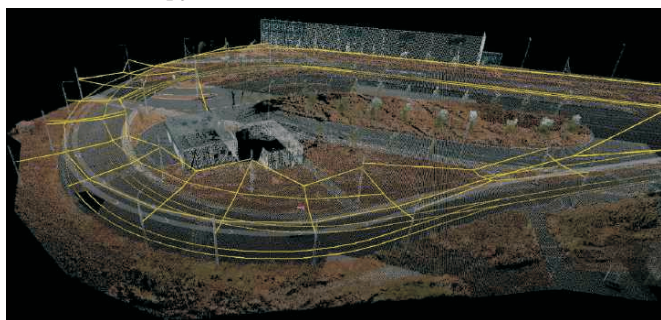
Pro autonomní vozidla je klíčové, aby pro ně bylo vytvořeno prostředí, ve kterém se mohou pohybovat bezpečně, efektivně a bylo pro ně dobře „čitelné/rozpoznatelné“ z hlediska průběhu dopravní cesty, výskytu potenciálních překážek a pohybu ostatních účastníků provozu. Nejde tedy pouze o kvalitu fyzického provedení dopravní cesty, ale i o její vybavení digitální infrastrukturou a inteligentními dopravními systémy, které umožní sledovat provozní situaci a autonomním vozidlům umožní rozhodovat o volbě jízdního režimu. Autonomní vozidla budou využívat síťové spojení pro sdílení dat a komunikaci s jinými vozidly (V2V), infrastrukturou (V2I) a centrálními servery (např. pro aktualizace map) pro sledování provozní situace, předvídání rizika, předcházení dopravním nehodám a pro zlepšení plynulosti dopravy [6].

Moderní dopravní infrastruktura musí proto být vybavena vhodnými novými inteligentními dopravními systémy, které umožní získávat on-line informace zejména ze systému inteligentního

řízení křižovatek vybavených SSZ, informace o aktuálním stavu dopravního značení, o počasí a stavu infrastruktury či informace ze systémů řízení dopravy v reálném čase (dispečinky) apod. Tyto systémy poskytují vozidlům důležité informace, které jim pomohou rozhodovat se o rychlosti, změnách směru, povolení či omezení vjezdu a dalších manévrech a volbě jízdního režimu. Systémy doplňkových senzorů poskytnou informaci o aktuálních rizicích, sjízdnosti, nebezpečích, pohybu IZS (integrovaného záchranného systému) a ostatních účastnících dopravního provozu. Tato data jsou také přenášena do centrálního prvku a zaznamenána do digitálního dvojčete, kde se dotváří obraz zaznamenávané situace. Nejde však pouze o systémy detekce, ale i o komunikační technologie, které zaručí předávání požadovaných informací dostatečně rychle a bezpečně [7, 8].

2.1 HD Mapy

Automatizovaná vozidla vyžadují specifické mapy, které jsou výrazně jiné než mapy, které se používají v běžných navigačních aplikacích. Řidiči dnes využívají k orientaci především digitální mapy pro plánování cesty a navigaci k cílové destinaci. Jak se však úkol řízení postupně posouvá od řidiče po automatizované systémy ve vozidle, role a rozsah digitálních map se posouvá a mění. Uživatel mapy již není řidič, ale především vozidlo. Vzniká tak nová generace map, která je vytvořena účelově pro stroje. Jedná se o mapy ve formě vysoce přesné a realistické reprezentace komunikace a jejího okolí, obecně označované jako mapy s vysokým rozlišením (High-Definition Maps nebo zkráceně HD Maps). Jedná se o vysoce přesné mapy v řádu jednotek centimetrů, které jsou oproti běžným mapám obsahově mnohem obsáhlejší a jsou také častěji aktualizované (ukázka HD mapy na obr. 3) [2, 8].



obr. 3 Ukázka extrakce kolejí a trolejí z mračna bodů na konečné u Univerzity [1]

Tyto mapy jsou obvykle vytvářeny pomocí pokročilých technologií, jako jsou lidary, kamery a GNSS (Global Navigation Satellite System), aby poskytovaly podrobné informace o vozovkách, dopravních značkách, budovách a dalších objektech. HD mapy jsou klíčovou součástí systémů autonomního řízení vozidel, protože poskytují vozidlům potřebné prostorové informace pro navigaci, plánování trasy a detekci překážek. Díky vysokému rozlišení a detailnosti mohou HD mapy pomáhat autonomním vozidlům lépe chápat své okolí a reagovat na něj adekvátně, což přispívá k bezpečnější a efektivnější autonomní mobilitě [2].

Mapové podklady můžeme rozdělit do tří základních skupin [1, 2]:

- Navigační mapy, které poskytují základní geografické a silniční informace pro běžnou navigaci.

- ADAS mapy (mapy pro pokročilé asistenční systémy řidiče), které přidávají další vrstvu detailů, jako jsou informace o rychlostních limitech, pruzích a dalších prvcích kritických pro pokročilé asistenční systémy řidiče. Tyto prvky mohou být sbírány s nižší polohovou přesností než pro HD mapy.
- HD mapy jsou nejpokročilejší a nejdetailejší mapy, které zahrnují všechny potřebné informace pro autonomní řízení, včetně velmi přesných údajů o infrastruktuře, které jsou nezbytné pro bezpečnou a efektivní autonomní navigaci.

Navigační mapy hrají významnou roli v nižších úrovních automatizace, zatímco ADAS mapy jsou klíčové pro střední úroveň, kde podporují pokročilé asistenční systémy. HD mapy jsou nezbytné pro vyšší úroveň automatizace (úrovně SAE 3–5, GoA 2–4), kde zajišťují přesnou lokalizaci, navigaci a interpretaci prostředí, což je klíčové pro autonomní řízení bez lidského záahu [1–3].

2.2 Digitální dvojče

Digitální dvojče je virtuální replika fyzického objektu, systému nebo procesu, která v reálném čase zobrazuje a ukládá jeho stav a chování. Tato technologie se může dotýkat různých aspektů života, například v průmyslu umožňuje sledovat a optimalizovat výrobu, v dopravě pomáhá řídit a plánovat provoz, v městském plánování může simulovat vývoj infrastruktury a v medicíně slouží k modelování lidského těla pro lepší diagnózy a léčbu. Díky tomu se digitální dvojče stává klíčovým nástrojem pro zlepšování efektivity, bezpečnosti a inovace v mnoha oblastech.

Pro města to může znamenat vytvoření přesného digitálního modelu městské infrastruktury, jako jsou budovy, dopravní systémy nebo energetické sítě. Může také sloužit ke sledování dopravních situací a toků, kdy se v reálném čase zobrazují aktuální dopravní podmínky na základě dat z různých zdrojů, jako jsou senzory, kamery, GPS systémy či informace z jiných datových fondů (C-ITS, NDIC, FCD, atd.). Tento model pak pomáhá optimalizovat provoz, plánovat budoucí rozvoj, sledovat stav technologií a simulovat různé scénáře, například dopady nové výstavby nebo krizových situací. Díky tomu může město efektivněji spravovat své zdroje a zlepšovat dopravní systém.

Zjednodušeně si lze digitální dvojče představit jako mapovou aplikaci s databází, která v reálném čase zobrazuje a uchovává informace o polohách vozidel MHD (včetně údajů ze senzorů), změny a údaje z dopravní infrastruktury (např. semaforey, kamery) a současně poskytuje aktuální data o dopravní situaci, počasí a další informace z různých zdrojů. Tato data lze následně využít v nástrojích pro predikci a analýzu dopravních jevů [1, 2].

Hlavní rozdíl mezi HD mapou a digitálním dvojčetem spočívá v tom, že HD mapa poskytuje statická data s detailním a přesným modelem silniční infrastruktury a jejích prvků, které slouží jako základní vrstva pro polohovou orientaci objektů. Digitální dvojče naopak přidává dynamická data, zobrazující v reálném čase aktuální dopravní situace, pohyb vozidel a změny infrastruktury, čímž propojuje statická data z HD mapy s aktuálními informacemi [1, 2, 7].

2.3 C-ITS

C-ITS (kooperativní inteligentní dopravní systémy, Cooperative Intelligent Transport Systems) jsou pokročilé inteligentní dopravní technologie, které umožňují vozidlům, infrastruktuře a dalším účastníkům silničního provozu komunikovat a spolupracovat s cílem zvýšit bezpečnost a efektivitu dopravy. Jsou klíčovou komponentou pro rozvoj autonomních vozidel a zlepšení řízení dopravy. Jsou decentralizovaným systémem, umožňujícím dopravním prostředkům komunikovat mezi sebou, případně komunikovat s prvky umístěnými na dopravní infrastruktuře a přeposílat si důležité informace o dopravním proudu, či aktuální dopravní situaci [1, 2, 5, 6].

2.4 Antikolizní systém

Definování velmi přesného 3D průjezdného profilu je klíčovým aspektem antikolizního systému. Tento princip je obecný a lze jej aplikovat na různá vozidla, včetně kolejových. V případě kolejových vozidel, jejichž pohyb je striktně vymezen kolejištěm, je kladen zvýšený důraz na přesnost a spolehlivost systému. Tento systém vyhodnocuje přítomnost cizích objektů ve vymezeném koridoru a možnost vzájemné kolize na základě známé trajektorie pohybu. Na rozdíl od nekolejových vozidel, která mohou překážku snadno objet, je pohyb kolejových vozidel značně omezen, resp. vymezen. Tato skutečnost vyžaduje, aby byl tento systém mimořádně přesný a spolehlivý. Musí být schopen rozlišit objekty uvnitř a vně průjezdného profilu ideálně s přesností v jednotkách centimetrů, aby nedocházelo ke zbytečnému brzdění v případech, kdy jsou objekty těsně mimo jízdní profil [1, 2].

Pro funkční antikolizní systémy lze využít různá technická a technologická řešení. Níže jsou uvedena nejčastější čidla a zařízení, která se na trhu vyskytují a nacházejí uplatnění při autonomním provozu [1, 2].

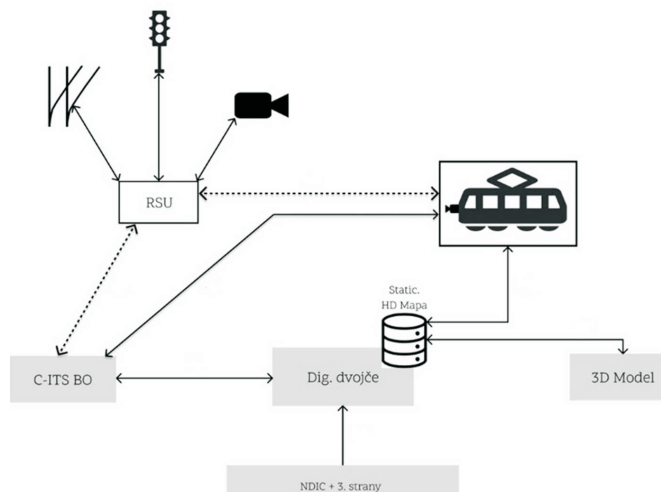
- GNSS modul,
- výpočetní jednotka,
- radar,
- lidar,
- kamera,
- IMU jednotka (inerciální měřicí jednotka),
- odometr,
- C-ITS technika.

Tato zařízení se různě kombinují a jejich konfigurace se liší podle výrobce. Každý výrobce se zaměřuje na jinou kombinaci výše uvedených senzorů. Zároveň je nutné uvést, že každé čidlo má jisté výhody a nevýhody či specifika. To je primární důvod pro používání kombinací výše uvedených technologií.

3 VLASTNÍ NÁVRH ŘEŠENÍ PRO AUTONOMNÍ MOBILITU

V rámci nasazení systémů pro podporu autonomního provozu je nutné využít různých typů komunikace mezi jednotlivými prvky systému. Na obr. 4 je uveden příklad architektury systému autonomní tramvaje pro testování s využitím C-ITS jako komunikační platformy s infrastrukturou na pozemní komunikaci. Bezpečnost a zejména důvěryhodnost veškerých C-ITS systémů je s ohledem na jejich heterogenní charakter a distribuovanou

architekturu vystavěna na principech infrastruktury veřejných klíčů (vycházející z angl. ekvivalentu Public Key Infrastructure, dále jen „PKI“), která je technologicky založena na asymetrické kryptografii (často také označované jako kryptografie s veřejným klíčem) a vytváří ekosystém vzájemné důvěry mezi jednotlivými aktéry systému díky důvěryhodným komponentám a ustanoveným procedurám [1, 2].



obr. 4 Architektura systému autonomní tramvaje pro testování [1, 2]

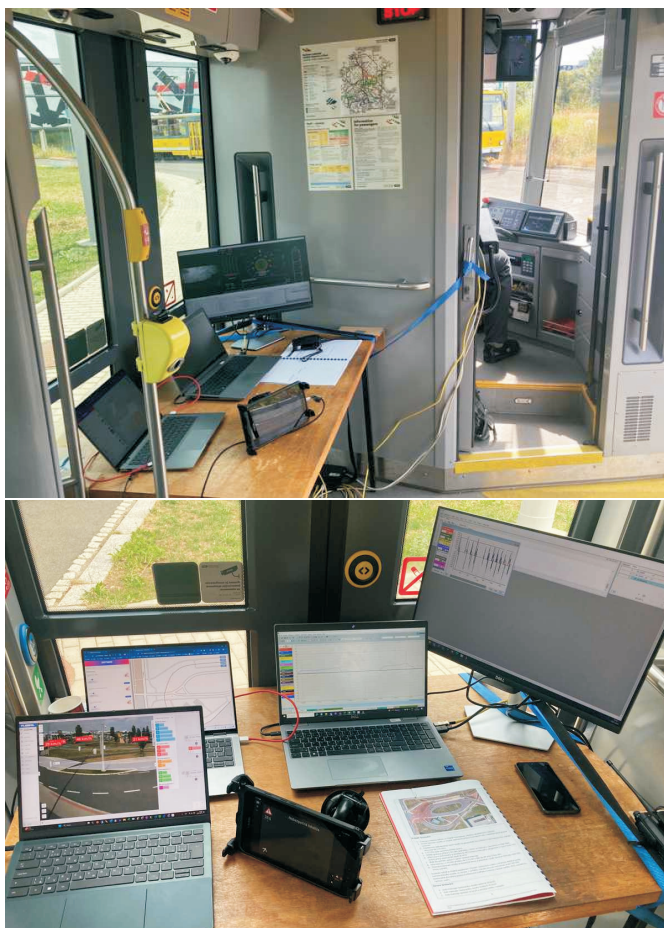
Jednotlivé prvky systému jsou v různých lokalitách a je nutné zabezpečit jejich spolehlivé a zabezpečené datové propojení. Popis většiny rozhraní vychází ze specifikací vytvořených v rámci projektu C-Roads CZ, který definoval požadavky na interoperabilitu a bezpečnost datové komunikace mezi jednotlivými komponentami systému. V rámci projektu byly navrženy nejen samotné komponenty, ale i potřebná rozhraní a komunikační toky mezi moduly, aby systém fungoval jako jeden celek [1, 2, 6].

4 TESTOVÁNÍ A SCÉNÁŘE

Pro vlastní ověření funkcí autonomního provozu tramvaje byly zpracovány testovací scénáře především pro ověření schopnosti systému reagovat na standardní a nestandardní dopravní situace (překážka v kolejišti, křížení s projíždějícím vozidlem apod.), interakci s ostatními účastníky provozu a spolehlivost v různých povětrnostních podmínkách.

Vzhledem k instalaci velkého množství technologií do tramvaje a dodržení všech drážních předpisů pro provedení zkušebního provozu, bylo nutné zajistit zejména pronájem tramvaje na 1 měsíc pro odzkoušení a instalaci potřebných detektorů jako ACS (antikolizní systém), úpravy SW vlastní tramvaje s přezkoušením funkce v uzavřeném areálu. Nutná byla také integrace systému V2X včetně instalace na infrastrukturu a OBU (OnBoard Unit) jednotek do vozidla IZS a dalšího testovacího osobního vozidla. Ukázka vybavenosti tramvajového vozu pro testování a ověřování všech funkcí je na obr. 5.

Před instalací tramvaje k testům probíhalo dílčí testování všech potřebných funkcionalit a systémů pro provedení testovacích scénářů v simulovaných podmínkách zázemí účastníků projektu.



obr. 5 Vybavení a příprava tramvajového vozu pro jednotlivé testy [vlastní foto]

V rámci pilotních testů bylo provedeno celkem 9 hlavních testovacích scénářů [1, 2]:

- 1) **Zúžení ve smyčce** – cílem testu bylo ověření schopnosti tramvaje autonomně detekovat překážku částečně zasahující do průjezdného profilu při pohybu ve smyčce, resp. jejím výjezdu, kde se sbíhají 2 souběžné koleje, a bezpečně před ní zastavit.
- 2) **Detekce ve slepém úhlu – C-ITS** – cílem testu bylo ověření schopnosti tramvaje detekovat pohybující se vozidlo blížící se do jeho dráhy ze slepého úhlu pomocí technologie C-ITS a bezpečně zastavit nebo upozornit řidiče.
- 3) **Detekce ve slepém úhlu – detektor** – cílem testu bylo ověření schopnosti inteligentní infrastruktury detekovat pohybující se překážku blížící se do dráhy jedoucí tramvaje ze slepého úhlu a předat informaci do tramvaje, která tak může bezpečně zastavit nebo upozornit řidiče.
- 4) **Přenos informací o parametrech trati z centrálních prvků do tramvaje** – cílem testu bylo ověřit přenos informací o parametrech a kvalitě trati z centrálních prvků směrem do tramvaje. Tyto informace zahrnují maximální doporučenou rychlost, omezení či nebezpečí na trati. Tyto informace mohou pocházet z externích zdrojů, např. z NDIC nebo dispečinku města. Informace může sloužit jako důležitý vstup pro provoz autonomní tramvaje, v případě testu sloužit jako varovná či doplňující informace pro řidiče.
- 5) **Přenos informací o stavu tratě z tramvaje do centrálních prvků** – cílem testu bylo ověřit přenos informací o stavu

tratě z tramvaje do centrálních prvků, kde mohou být dále zpracovávány. Takovými informacemi mohou být např. fyzický stav kolejí či detekce nepříznivých povětrnostních podmínek apod.

- 6) **Aktuální stav prvků infrastruktury včetně preference na křižovatkách** – cílem testu bylo ověření zpracování informací ohledně aktuálního stavu SSZ a výhybek a zajištění preference tramvaje na křižovatkách prostřednictvím C-ITS.
- 7) **Zásah vozidla IZS na trati** – cílem testu bylo ověření schopnosti tramvaje detekovat zasahující vozidlo IZS (jedoucí či stojící) na trati nebo v její blízkosti pomocí C-ITS a přizpůsobit tomu další jízdu, zejména k ověření přenosu informací o zásahu IZS do centrálního prvku.
- 8) **Nehoda tramvaje ve smyčce** – cílem testu bylo ověření schopnosti tramvaje detekovat a dále komunikovat nehodovou událost okolních vozidel s vazbou na centrální prvek a dispečink.
- 9) **Jízda po širé trati s překážkami** – cílem testu bylo ověření schopnosti tramvaje autonomně detekovat překážku v průjezdném profilu při jízdě běžnou rychlostí po širé trati, bezpečně před ní zastavit a událost správně komunikovat na dispečink.

Jelikož testování bylo prováděno za běžného provozu, byla přijata opatření k minimalizaci vzájemného ovlivňování testů a běžného provozu – organizační vyčlenění koleje ve smyčce pouze pro potřeby testování, označení personálu provádějícího testy, vybavení personálu vysílačkami, zamezení vjezdů do prostoru testování v průběhu testů pro silniční vozidla, chodce apod.

Na základě provedených testů dle testovacích scénářů bylo následně přistoupeno k vyhodnocení získaných dat. Jednalo se o jízdní data z vozidla tramvaje (rychlost vozidla, počátek automatického brzdění) a současně o data ze senzorického vybavení vozidla (ACS, C-ITS OBU) (obr. 6a) zobrazující prvky na tramvajovém tělese pomocí lidarů. Rovněž byla vyhodnocena data zasílaná z/do C-ITS Back Office a digitálního dvojčete a detektorů (obr. 6b), detekce objektů z infrastruktury posílané do digitálního dvojčete a tramvaje [1, 2, 7].

Výsledky provedeného testování a jeho vyhodnocení ukazují, že systém dokázal zvládnout úkony, které mu předepisovaly tes-



obr. 6a Zobrazení dat z lidarů vozidla



obr. 6b Zobrazení detekce objektů na infrastruktuře [1, 2]

toovací scénáře vytvořené pro ověření schopnosti systému. Základní zjištění, znalosti, postupy a návrhy byly vloženy formou doporučení do schválené metodiky [2]. V rámci vyhodnocování jednotlivých scénářů byl kontrolován nejen požadovaný výsledný efekt samostatné reakce tramvaje, ale zejména celý řetězec přenosu dat, reakcí a ověření jednotlivých funkcí včetně celkového ověření při opakovaném testování pro prokázání možné chybovosti, jež bylo nastaveno na minimální hodnotu 3 kladných pokusů po sobě jdoucích s tím, že prakticky všechny testy se podařilo udělat v definovaných časech a počty opakování nepřesáhly počty plánovaných pokusů. Pro určení vyšší spolehlivosti a ověřování by samozřejmě bylo nutné zajistit statisticky významnější počty opakování, nicméně v daném rozsahu rozpočtu a možného času testování v reálném provozu 5 dnů bylo toto testování maximálně úspěšně zvládnutelné s výsledky, které jsou relevantní pro doporučení do schválené metodiky [1, 2].

5 DOPORUČENÍ PRO ZAVÁDĚNÍ AUTONOMNÍCH TECHNOLOGIÍ

5.1 Vozidlo

Současné technologie umožňují využití asistenčních systémů ve vozidlech, které za určitých podmínek dokážou minimalizovat dopady případných kolizí způsobených primárně nepozorností účastníků provozu, případně umožnit provádění rutinní (provozní) operace místo řidiče. Tyto systémy však musí postupně prokázat spolehlivost jednotlivých subsystémů i bezpečnost přenášovaných dat a informací za všech provozních podmínek. Toho lze dosáhnout pouze postupným nasazením a průběžným hodnocením jednotlivých provozních situací a následně je nutné ošetřit nevyhovující scénáře tak, aby bylo možné dosáhnout určitého stupně autonomie [1, 2].

V rámci testování autonomních vozidel je důležité důkladně ověřit a zhodnotit efektivitu antikolizních systémů v odlišných situacích a podmínkách provozu. Předpokládá se testování systémů v lokalitách s rozdílnými charakteristikami a simulace různých scénářů včetně prudkých manévřů, neočekávaných překážek či vstupu ostatních účastníků silničního provozu. Dalším krokem v rámci ověřování funkčnosti je ověření interoperability antikolizních systémů s ostatními bezpečnostními prvky a systémy autonomního vozidla, jako jsou systémy navigace, adaptivní řízení rychlosti a nouzové brzdění. To zahrnuje integrované testování a simulace v reálném čase, aby se zajisti-

lo, že všechny systémy pracují harmonicky a spolehlivě v různých situacích [1, 2]. V první fázi se doporučuje provádět testování v uzavřeném areálu, a teprve poté v reálných podmínkách za dodržení příslušných bezpečnostních opatření, obdobně jak je uvedeno v článku a metodice [2].

5.2 Infrastruktura

Při návrhu infrastruktury pro autonomní mobilitu je klíčové zohlednit několik hlavních oblastí, které zásadně ovlivňují úspěšné zavedení a fungování autonomních vozidel. Tyto oblasti zahrnují dopravní infrastrukturu a technologickou připravenost, které tvoří základní rámec pro efektivní a bezpečné nasazení autonomních systémů v městských a regionálních prostředích. Infrastruktura zahrnuje všechny fyzické komponenty a technologické systémy, které podporují autonomní vozidla včetně silnic, křižovatek, dopravních značek a signalizačních zařízení. Je nezbytné, aby byla navržena s ohledem na specifické požadavky autonomních vozidel, jako je schopnost efektivně komunikovat s vozidly a poskytovat aktuální a přesné informace o dopravní situaci [2].

Technologická připravenost se týká implementace a integrace potřebných technologií, které umožňují autonomním vozidlům správně fungovat. To zahrnuje jak technologie pro detekci a monitorování prostředí, tak systémy pro zpracování a přenos dat mezi vozidly a infrastrukturou. Příkladem je C-ITS, jehož zavádění má již nyní zásadní využití a umožňuje městům využít preferenci MHD/IZS na světelně řízených křižovatkách. K využití preference je nutné propojení mezi RSU (roadside unit) a řadičem SSZ dané křižovatky [1, 2, 8].

5.3 Centrální prvky

Vzhledem k neexistující standardizaci v oblasti požadavků na centrální prvky autonomní mobility je nutné vybírat řešení a partnery/dodavatele schopné dalšího rozvoje jejich produktů a zajištění jejich vzájemné interoperability. Ideálním stavem je, aby byl pouze jeden subjekt odpovědný za dodávku celého ekosystému. Např. u tramvajového provozu je to zpravidla výrobce tramvajových vozidel, který dodává svá vozidla např. společně s technologiemi autonomního depa nebo částí na doplnění dispečinku dopravního podniku. Tím je zajištěna jednoznačná odpovědnost za dodávku a funkčnost všech systémů. V rámci dodávek je vhodné realizovat zkušební provoz systému, který ověří, zda jsou dodané systémy funkční, stabilně plní požadované funkce a jsou provozuschopné ideálně v uzavřeném areálu. Centrální prvky systému je nutné vybudovat a provozovat v závislosti na předpokládaném rozsahu a využití systémů a s možností škálovatelnosti včetně doplnění a rozšíření dispečinku dopravního podniku nebo jiného vhodného objektu pro centralizované funkce řízení, správy nebo dohledu ve městě [1, 2].

5.4 HD mapy a datový fond měst

Pro úspěšné zavádění autonomních technologií ve městech je klíčovým krokem vytvoření kvalitního datového základu, přičemž stěžejní roli hrají HD mapy a městské datové fondy. Prvním krokem je pořízení vysoce přesných a spolehlivých HD map ve standardizovaných formátech, které autonomní vozidla využívají pro přesnou navigaci a orientaci v městském prostře-

dí. Tyto mapy musí obsahovat detailní informace o infrastruktuře, jako jsou silnice, křižovatky, dopravní značení, semaforey a parkovací plochy apod., aby přesné mapové podklady umožnily bezpečný a plynulý provoz a orientaci autonomních vozidel. Pokud není zřejmé, se kterými z těchto formátů umí dodavatelé autonomních vozidel pracovat, lze jako meziprodukt využít i data, která se využívají při tvorbě těchto HD map: mračna bodů ve 3. třídě geodetické přesnosti, panoramatické fotografie, extrahované prvky komunikací a model sítě pozemních komunikací ve 2D, 3D a GIS formátech, jako jsou např. modely budov a terénu ve formě 3D meshů apod. [2].

Paralelně je nutné provést detailní analýzu současných datových zdrojů města, které mohou být využity pro správu a provoz autonomních systémů a digitálního dvojčete. Mezi tyto zdroje mohou patřit při splnění podmínek na prostorovou přesnost data z BIM (Building Information Modelling), DTM (Digitální Technická Mapa) nebo 3D modelu města a dále údaje o dopravním provozu, veřejné dopravě, parkování, inženýrských sítích apod. Město by mělo rovněž zjistit, jaké nové datové sady je schopno pro účely autonomní mobility a digitálního dvojčete dlouhodobě sbírat a aktualizovat [2, 8].

6 ZÁVĚR

Předložený článek stručně sumarizuje řešený projekt podporovaný TA ČR a schválenou metodiku – „Využití dynamických HD map pro potřeby autonomní mobility“, jež představuje významný krok v oblasti digitalizace a automatizace dopravy, zejména v kontextu rozvoje ITS technologií, autonomních systémů a digitální dopravní infrastruktury. Integrací moderních komunikačních technologií, jako jsou ITS-G5, LTE a 5G, umožňují zásadní podporu pro efektivní řízení dopravy, syn-

chronizaci dat v reálném čase a zajištění interoperability mezi vozidly a dopravní infrastrukturou.

Vytvořením HD virtuálního obrazu testovacího polygonu a implementací senzorických systémů lze zajišťovat přesnou detekci stavu dopravní infrastruktury včetně překážek a profilových omezení pro optimalizaci jízdní trasy. Pilotní testy v Plzni potvrdily efektivitu různých technologií umístěných ve vozidle i na infrastruktuře. Získaná data byla integrována do HD map a digitálního dvojčete dané lokality a mohou být využita pro autonomní řízení s napojením na centrální dispečink, který zajišťuje dohled a umožňuje potřebné či operativní zásahy v městském provozu. Tento přístup nejen zvyšuje bezpečnost, ale také umožňuje širší využití digitálních modelů v plánování a správě dopravní infrastruktury. Současně je nutné reflektovat zásadní požadavky na kybernetickou bezpečnost a vycházet z doporučení evropských platform, jako je C-Roads, které podporují harmonizaci komunikačních standardů C-ITS [6, 8]. Výsledkem je ucelený přístup k digitalizaci dopravy, jež propojuje autonomní vozidla, chytrou dopravní infrastrukturu a pokročilé datové technologie města. Provedené testy, jež se promítly do schválené metodiky, tak poskytují cenný podklad pro budoucí rozvoj propojených a automatizovaných dopravních systémů. Hlavní důraz je přitom kladen na přesnost, bezpečnost a efektivní řízení dopravy v městském i meziměstském prostředí zejména veřejné městské dopravy – tramvajového provozu [2].

Článek byl zpracovaný za podpory Technologické agentury České republiky v programu DOPRAVA 2020+, pod č. projektu CK03000179 vedeného pod názvem „Vytvoření dynamického digitálního modelu ulice pro potřeby autonomního řízení v Plzni“.

ZDROJE

- [1] Volný, M. a kolektiv: Vytvoření dynamického digitálního modelu ulice pro potřeby autonomního řízení v Plzni, Průběžné zprávy projektu TA ČR CK03000179, Praha 2023 a 2024.
- [2] Tichý, T., Lokaj, Z., Kohout, T., Vaniš, M., Prokeš, R., Kvapilík, M., Swientek, L.: Využití dynamických HD map pro potřeby autonomní mobility. Schválená metodika MD ČR, Praha 2025. <https://www.mdcrcz/Dokumenty/Veda-a-vyzkum/Certifikovane-metodiky>.
- [3] ČSN EN 62290-1 (333530) N Drážní zařízení – Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodicí dráhou. Část 1, Systémové principy a základní pojmy = Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems. Part 1, System principles and fundamental concepts. Praha: Český normalizační institut, 2007. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [4] Tichý, T. et al., Information Modelling and Smart Approaches at the Interface of Road and Rail Transport, 2023 Smart City Symposium Prague (SCSP), Prague, Czech Republic, 2023, pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1109/SCSP58044.2023.10146231>
- [5] Vaniš, M., Horák, M., Tichý, T., Lokaj, Z., Malý, M., Brož, J.: Autonomous Trams and Urban Infrastructure: A Methodological Approach to Testing and Integration, In: 2024 Smart City Symposium Prague (SCSP). IEEE, 2024. pp. 1–7. 979–8–3503–6095–0/24/\$31.00 ©2024 IEEE <https://doi.org/10.1109/SCSP61506.2024.10552728>
- [6] Lokaj, Z., Srotyr, M., Vanis, M. and Broz, J.: „Technical part of evaluation solution for cooperative vehicles within C-ROADS CZ project,“ in 2020 Smart City Symposium Prague (SCSP), 2020, pp. 1–5. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9133885>.
- [7] Hájek, P.; Kepka, M.; Fiala, R.; Janečka, K.; Jedlička, K. et al. On the combination of Dynamic Features into 3D City Models. In: MARINOVA, Silvia, BANDROVA, Temenoujka a KONEČNÝ, Milan (ed.). 9th International Conference on Cartography and GIS Proceedings. Sofia: Bulgarian Cartographic Association, 2024, s. 356–364. ISSN 1314–0604. Dostupné z: [https://iccgis2024.cartography-gis.com/papers/9ICCGIS-ProceedingsPaper%20\(38\).pdf](https://iccgis2024.cartography-gis.com/papers/9ICCGIS-ProceedingsPaper%20(38).pdf)
- [8] Kuda, F. a kolektiv autorů: Městské inženýrství nejen pro městské inženýry, 1. vydání, IC ČKAIT, Praha 2022, ISBN 978–80–88265–39–9

Lektorský komentář

Tento článok sa zameriava na testovanie autonómneho riadenia električky v Plzni a predstavuje inovatívnu metodiku, ktorá spája technologické a dátové riešenia nevyhnutné pre rozvoj autonómnej mobility. Kľúčovým prvkom metodiky je využitie dynamických HD máp a digitálneho dvojčata mestského prostredia, ktoré umožňuje presnú lokalizáciu a orientáciu autonómnych vozidiel. Dôraz je kladený na interoperabilitu systémov, ktorá je zásadná pre zabezpečenie plynulosti a bezpečnosti autonómneho riadenia. Testovanie na reálnej električkovej sieti, doplnené o senzorické vybavenie ako vozidla, tak infraštruktúry, prebiehalo pod priamym dohľadom vodiča, čo zabezpečilo

maximálnu bezpečnosť a efektívnosť overovacích procesov. Metodika predstavená v článku prináša praktický postup integrácie nových technológií do mestskej dopravy, pričom sa zameriava na optimálne technické riešenia pre nasadenie senzorov, komunikácie C-ITS a mapovania. Vytváranie a pravidelná aktualizácia HD máp sú kľúčové pre presnú a aktuálnu lokalizáciu autonómnych vozidiel, a to nielen v rámci statických informácií, ale aj s prepojením na dynamické údaje získavané v reálnom čase. Tento prístup poskytuje cenný návod pre zavádzanie autonómnej dopravy do mestských mobilitných schém, a to ako z hľadiska technologického, tak aj dátového zabezpečenia pre správne fungovanie a bezpečnosť systému.

Doc. Ing. Rastislav Pirník, PhD., Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Žilinská univerzita v Žiline