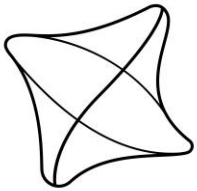
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



ŽILINSKÁ UNIVERZITA
V ŽILINE

AUTOREFERÁT
DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2025 **Ing. Arnold Jančár**

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov
Katedra cestnej a mestskej dopravy

Ing. Arnold Jančár

Autoreferát dizertačnej práce

ZVÝŠENIE PRESNOSTI A OPAKOVATEĽNOSTI REALIZÁCIE JAZDNÝCH SKÚŠOK

na získanie akademického titulu **d o k t o r**
(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
v študijnom odbore 3772 Doprava,
v študijnom programe Doprava.
Žilina 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Fakulte prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Arnold Jančár
Žilinská univerzita v Žiline Fakulta FPEDAS
Katedra cestnej a mestskej dopravy

Školiteľ: doc. Ing. Ján Ondruš, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline Fakulta FPEDAS
Katedra cestnej a mestskej dopravy

Oponenti: prof. Ing. Jozef Gašparík, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline Fakulta FPEDAS
Katedra železničnej dopravy

Ing. Tomáš Krakovský, PhD.
Kia Slovakia s.r.o.
Sv. Jána Nepomuckého 1282/1, 013 01 Teplička nad Váhom

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ..... o ..... h. v zasadačke dekanátu fakulty PEDAS pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore doprava, v študijnom programe doprava, vymenovanou dekanom Fakulty prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov Žilinskej univerzity v Žiline.

prof. Ing. Miloš Poliak, PhD.
predseda odborovej komisie
študijného odboru 3772 Doprava

ÚVOD

Jazdné skúšky predstavujú neoddeliteľnú súčasť vývoja, výskumu, homologizácie a bezpečnostného overovania cestných motorových vozidiel. Presnosť a opakovateľnosť výsledkov týchto skúšok sú kľúčové pre objektívne hodnotenie dynamických vlastností vozidiel, efektívne porovnávanie výsledkov medzi rôznymi testovacími sériami a pre dodržiavanie prísnych technických a legislatívnych požiadaviek. S rastúcimi požiadavkami na bezpečnosť, komfort a environmentálnu udržateľnosť sa v automobilovom priemysle neustále zvyšuje význam modernizácie testovacích metód, vrátane automatizácie vybraných procesov a implementácie robotických systémov.

Tradičné jazdné skúšky, ktoré sú závislé od ľudského faktora, sú často limitované subjektívnymi odchýlkami, variabilitou reakcií vodiča a možnými chybami merania. S cieľom minimalizovať tieto vplyvy a zvýšiť opakovateľnosť a presnosť meraní sa do popredia dostávajú automatizované meracie systémy, robotické ovládače pedálov a pokročilé elektronické technológie. Tieto systémy umožňujú presnejšie ovládanie brzdnej a akceleračnej sily, opakovateľné testovacie scenáre.

Dizertačná práca sa zameriava na komplexnú analýzu aktuálneho stavu v oblasti realizácie jazdných skúšok, identifikáciu hlavných problémov spojených s tradičnými metódami a následný návrh, vývoj a experimentálne overenie robotického systému na automatizované ovládanie pedálov. Súčasťou práce je porovnanie manuálneho, poloautomatizovaného a automatizovaného režimu na vyhodnotenie vplyvu automatizácie na kvalitu výsledkov a posúdenie prínosu navrhnutého riešenia pre výskum a vývoj v automobilovom sektore.

1 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY DOMA A V ZAHRANIČÍ

Jazdné skúšky predstavujú neoddeliteľnú súčasť vývoja, validácie a homologizácie cestných motorových vozidiel. Ich hlavným cieľom je overiť dynamické vlastnosti vozidla, ako sú brzdný účinok, stabilita, ovládateľnosť, akcelerácia či správanie pri núdzových manévroch. Rôzne organizácie, medzinárodné aj národné, definovali štandardizované metodiky testovania, ktoré umožňujú validáciu vozidiel v zmysle ich funkčnej bezpečnosti a dynamických parametrov. Medzi najvýznamnejšie dokumenty v tejto oblasti patria normy vydávané Medzinárodnou organizáciou pre normalizáciu (ISO), Spoločnosťou automobilových inžinierov (SAE) a právne záväzné predpisy vypracované v rámci Hospodárskej komisie OSN pre Európu (EHK/UNECE).

1.1 Medzinárodné predpisy pre schvaľovanie a testovanie vozidiel

V tejto kapitole je predstavený prehľad hlavných právnych predpisov a štandardov používaných v jednotlivých regiónoch sveta na schvaľovanie a testovanie cestných motorových vozidiel. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené predpisy podľa regiónov.

Tabuľka 1 Prehľad predpisov podľa regiónov

Región / Krajina	Používané predpisy	Poznámka
EÚ	UNECE predpisy (ECE) + legislatíva EÚ	Záväzné pre všetky členské štáty, typové schválenie podľa ECE preds., doplnené o nariadenia EÚ
Spojené kráľovstvo	GB Type Approval (UKCA)	Samostatný systém od Brexitu, založený na UNECE predpisoch
USA	FMVSS (NHTSA)	Federálny systém self-certification, kde výrobca potvrdzuje súlad s FMVSS
Kanada	CMVSS	Podobné FMVSS, ale s vlastnými odchýlkami a referenciami
Mexiko	NOM + (FMVSS / UNECE)	Oficiálne mexické normy (NOM), možnosť výberu medzi FMVSS alebo UNECE predpismi
Čína	GB / GB T + MIIT	Národné predpisy vydávané MIIT, nevyužívajú ECE ani FMVSS
Rusko (EAEU)	TR CU + GOST	Technické predpisy Colného zväzu (EAEU), harmonizované s UNECE a doplnené národnými GOST
Blízky východ	GSO (UNECE & FMVSS mix)	Väčšinou preberajú ECE predpisy, niektoré krajiny kombinujú aj FMVSS
Austrália	ADR (ECE-based)	Australian Design Rules vychádzajú z UNECE predpisov a vlastné schvaľovanie prebieha podľa ADR
Afrika	UNECE / JASIC / miestne normy	Väčšina krajín prijala UNECE alebo japonské JASIC schválenie, situácia je veľmi heterogénna

Zdroj: autor na základe [1]

1.2 Porovnanie ISO, SAE a EHK

Tabuľka uvádza prehľad základných rozdielov medzi normami ISO, SAE a predpismi EHK. Porovnanie zohľadňuje ich právnu záväznosť, geografické uplatnenie, oblasť použitia a typické príklady dokumentov.

Tabuľka 2 Porovnanie ISO, SAE a EHK

Vlastnosť	ISO	SAE	EHK (UNECE)
Typ dokumentu	Technická norma	Technická norma	Právny predpis
Právna záväznosť	Nie (odporúčanie)	Nie (odporúčanie)	Áno (v rámci schvaľovania vozidiel)
Geografický rozsah	Globálny	Najmä Severná Amerika, medzinárodný	Európa, Ázia, OSN krajiny
Oblasť použitia	Výskum, vývoj, testovanie	Vývoj, výskum, priemyselné aplikácie	Homologizácia, legislatíva
Príklady dokumentov	ISO 8855, ISO 3888, ISO 22140	SAE J670, SAE J3016	EHK 13, EHK 79, EHK 130

Zdroj: spracované autorom

1.3 Základy dynamiky vozidla

Modelovanie dynamiky vozidla tvorí nevyhnutný základ pre analýzu jeho správania pri rôznych jazdných manévroch a prevádzkových podmienkach. Pre správne uchopenie tejto problematiky je potrebné definovať súradnicové systémy, pohybové premenné, pôsobiace sily, princípy rotácie a základné zákony pohybu. Dynamika vozidla závisí od zvoleného súradnicového systému, ktorý určuje stupne voľnosti vozidla – teda jeho schopnosť translačného a rotačného pohybu. Štúdia [2] uvádza, že zotrvačné vlastnosti telesa, ako sú momenty a súčiny zotrvačnosti, zostávajú v takto definovanom súradnicovom systéme konštantné, avšak ich hodnoty sa menia, ak sú vzťahované na súradnicový systém fixovaný k zemi. Norma SAE J670 definuje dve akceptované orientácie osí vozidla: Z-Hore (v súlade s normou ISO 8855) a Z-Dole (pôvodná orientácia podľa SAE). Výber orientácie závisí od požiadaviek konkrétnej analýzy alebo skúšky. [3]

1.4 Metódy merania brzdného účinku vozidiel

V súčasnosti existuje viacero metód na zisťovanie účinnosti brzdových systémov vozidiel, ktoré sa líšia nielen použitou technikou, ale aj presnosťou, podmienkami merania a interpretáciou výsledkov. Z hľadiska technického prístupu a podmienok realizácie sa tieto skúšky delia na dve hlavné skupiny. Prvú skupinu tvoria jazdné skúšky, pri ktorých sa brzdné vlastnosti overujú počas reálneho pohybu vozidla. Druhú skupinu predstavujú laboratórne skúšky vykonávané na stacionárnych zariadeniach, ktoré umožňujú presné a opakovateľné merania v kontrolovanom prostredí.[4]

1.5 Jazdné skúšky

Jazdné skúšky predstavujú praktickú metódu overovania brzdného účinku vozidla za reálnych prevádzkových podmienok. Na zaznamenávanie priebehu brzdenia sa používajú meracie prístroje, ktoré snímajú relevantné fyzikálne veličiny, ako sú

rýchlosť, čas, dráha či spomalenie. Na základe týchto údajov je možné detailne popísať priebeh a účinnosť brzdenia.[4]

- Metóda odpaľovania značiek,
- Meranie pomocou vlečného kolesa,
- Decelometre,
- Optické meracie prístroje,
- Iniciálne MEMS senzory,
- GNSS/GPS akcelerometre.

1.6 Laboratórne skúšky na stacionárnom zariadení

Na rozdiel od dynamických jazdných skúšok sa laboratórne skúšky brzdových systémov realizujú na stacionárnych zariadeniach, pričom sa primárne nemeria brzdné spomalenie, ale veľkosť ovládacích síl.[4]
Stacionárne zariadenia sa delia do dvoch hlavných kategórií:

- Plošinové skúšobne,
- Valcové skúšobne bŕzd.

1.7 Skúšobné metódy

Táto podkapitola poskytuje prehľad hlavných experimentálnych metód využívaných pri hodnotení jazdnej dynamiky vozidiel.

- ISO 3888-1: Norma ISO 3888-1 definuje geometriu testovacej dráhy pre skúšku dvojitej zmeny jazdného pruhu, známej aj ako „losí test“. Počas testu sa zaznamenáva uhol natočenia volantu, bočné zrýchlenie a yaw rýchlosť (otáčanie okolo zvislej osi), čo umožňuje analyzovať hranice stability vozidla a identifikovať riziko šmyku alebo prevrátenia.[5,6,7]
- ISO 3888-2: Časť 2 normy ISO 3888 sa zameriava na simuláciu náhleho vyhýbacieho manévru pri vyšších rýchlostiach, typických pre jazdu na diaľnici (napr. 90 km/h). Testovacia dráha má prísnejšie geometrické parametre než ISO 3888-1, kratšiu dráhu a ostrejšie uhly nájazdu. Obrázok nižšie znázorňuje schému testovacej trate rozdelenej na päť úsekov. [5,8]
- ISO 4138: Test ustálenej jazdy po kruhovej dráhe, normalizovaný podľa medzinárodnej normy ISO 4138, predstavuje štandardizovaný postup na hodnotenie jazdných charakteristík vozidla v kontrolovaných podmienkach. Najčastejšie využívanou metodikou je test s konštantným polomerom smerového oblúka. [9]
- Fish-hook manéver: Tento test je špecificky navrhnutý na simuláciu situácií, v ktorých vodič musí vykonať rýchle a prudké vyhýbacie manévre ako reakciu na neočakávané prekážky.[10]

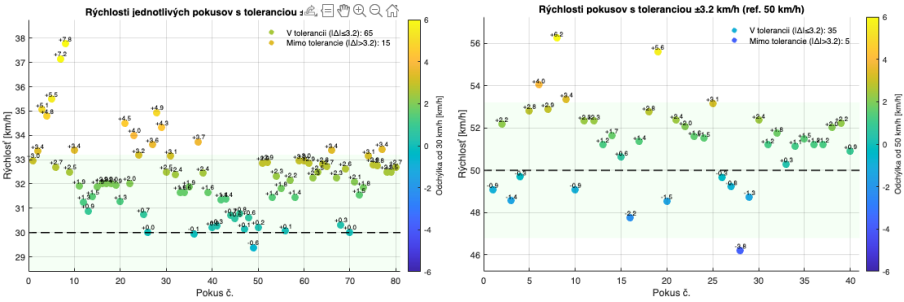
- ISO 7975: Táto norma poskytuje usmernenia pre testovanie a hodnotenie vplyvu brzdenia vozidla v oblúkoch na smerové vedenie a stabilitu vozidla. Test sa vykonáva na skúšobnom polygóne s konštantným polomerom oblúka, v tzv. „otvorenej slučke“. Norma platí pre osobné a ľahké nákladné vozidlá definované v ISO 3833.[11]
- ISO 21994: Norma stanovuje metodiku na meranie brzdnej dráhy vozidla pri brzdení v priamom smere so zapnutým systémom ABS (Anti-lock Braking System). Norma poskytuje referenčný testovací rámec, ktorý zohľadňuje vplyv rôznych podmienok počas testovania a vlastnosti samotného vozidla. [12]

1.8 Normalizácia a korekcia brzdných údajov

V reálnom svete je pre testovacích vodičov veľmi ťažké opakovane aktivovať brzdy presne pri stanovenej rýchlosti s odchýlkou iba 0,1 km/h.
Podľa normy SAE J2994 je korekcia nameranej rýchlosti presná pre odchýlky do ±3,2 km/h. V prípade, že sa nameraná rýchlosť od referenčnej hodnoty odchýli o viac ako uvedená hodnota, odporúča sa skúšku opakovať, aby sa minimalizovala systematická chyba merania. Ako súhrnný prehľad sa spracovali výsledky dvoch súborov brzdných skúšok z viacerých štúdií, ktoré boli vykonané pri rôznych počiatočných rýchlostiach:

- **Brzdné skúšky pri referencii 30 km/h**
  V celkovej sume 80 meraní (Obr.1 je každá nameraná rýchlosť znázornená bodmi s farebným kódovaním odchýlky od referenčnej hodnoty 30 km/h. Zelené body predstavujú merania vo vnútri tolerancie ($|\Delta v| \leq 3{,}2$ km/h), žlté až červené body označujú prípady, keď rýchlosť prekročila hornú hranicu tolerancie ($\Delta v > +3{,}2$ km/h), a modré body naopak merania pod dolnou hranicou ($\Delta v < -3{,}2$ km/h). Horizontálna čiara na úrovni 30 km/h zobrazuje ideálnu referenciu, pričom prerušované čiary nad a pod ňou vyznačujú medze povolenej odchýlky ±3,2 km/h.
- **Brzdné skúšky pri referencii 50 km/h**
  V druhom súbore bolo vykonaných 40 meraní (Obr.2), ktoré sú graficky zobrazené rovnakým spôsobom. Farebná škála ukazuje odchýlky od referenčných 50 km/h.

Z výsledkov je zrejmé, že pri požiadavke realizovať brzdnú skúšku z konkrétnej rýchlosti, napríklad 30 km/h, sa reálne namerané rýchlosti jednotlivých pokusov často významne odlišujú od referenčnej hodnoty. Tento jav má za následok, že skúšky sú v skutočnosti vykonávané z rôznych počiatočných rýchlostí, čo priamo ovplyvňuje hodnoty nameranej brzdnej dráhy aj ostatné kľúčové parametre.



Obr. 1 Začiatočné rýchlosti pri referencií 30 a 50 km/h
Zdroj: spracované autorom

1.9 Automatizácia jazdných skúšok a testovacie roboty

Automatizované robotické systémy na ovládanie pedálov vozidiel predstavujú dôležitý nástroj v oblasti výskumu, vývoja a testovania v automobilovom priemysle. Vďaka schopnosti zabezpečiť presné, opakovateľné a spoľahlivé ovládanie pedálu brzdy a akcelerátora, umožňujú eliminovať vplyv ľudského faktora a vytvárať štandardizované testovacie podmienky. Typickým príkladom aplikácie tejto technológie je porovnávací test elektromobilov Tesla Model 3 a Volkswagen ID.3, pri ktorom sa na zabezpečenie objektívnych podmienok počas testovania akcelerácie a rekuperácie využilo automatizované ovládanie pedálov.[13] Podobné systémy sú bežne nasadzované aj vo výskumných inštitúciách, ako napríklad na Technickej univerzite v Mníchove, kde sa pri hodnotení batériových systémov a efektivity elektrického pohonu zvolil štandardizovaný prístup práve pomocou robotických ovládačov pedálov. [14] Významný priestor pre ich využitie predstavujú aj špecializované testovacie centrá, ako napríklad Contidrom, kde sa tieto technológie uplatňujú pri vývoji pneumatík a skúšaní jazdných vlastností vozidiel na rôznych povrchoch a za rôznych klimatických podmienok. [15]

Pedálové a riadiace roboty od komerčných výrobcov:

- AB Dynamics,
- VEHI.CO,
- S-E-A ATD,
- 4activeDR,
- Maturo R,
- Elektromagnetický robot URAT.

2 CIEĽ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je zvýšiť presnosť a opakovateľnosť realizácie jazdných skúšok prostredníctvom vývoja vlastného robotického systému na ovládanie pedálov vozidla. Tento cieľ reaguje na identifikované nedostatky v oblasti experimentálneho testovania vozidiel, kde ľudský faktor často predstavuje zdroj variability a nepresností. Automatizácia ovládania pedálu akcelerátora a brzdy umožní vytvoriť štandardizované podmienky testovania, ktoré sú nevyhnutné pre objektívne porovnanie rôznych technických riešení a ich správania v rôznych jazdných situáciách. Na naplnenie hlavného cieľa boli definované nasledovné čiastkové ciele:

1. Analýza súčasného stavu v oblasti automatizovaného ovládania pedálov
2. Návrh a vývoj robotického systému
3. Implementácia a testovanie v reálnom prostredí
4. Experimentálne overenie prínosu systému

2.1 Výskumné otázky

Výskumné otázky boli stanovené s cieľom zamerať sa na kľúčové aspekty návrhu a overenia automatizovaného systému ovládania pedálov na zvýšenie presnosti a opakovateľnosti jazdných skúšok. Ich zodpovedanie umožní lepšie posúdiť možnosti a prínosy navrhovaného riešenia.

1. *Je možné realizovať opakovateľné a pevné uchytenie konštrukcie automatizovaného systému v priestore pre vodiča spôsobom, ktorý je nedeštruktívny voči interiéru vozidla?*
2. *Je možné navrhnúť automatizovaný systém na ovládanie pedálov tak, aby bol modulárny a univerzálne použiteľný v rôznych typoch vozidiel, vrátane možnosti rýchleho prispôsobenia a prekonfigurovania podľa rozmerov a usporiadania konkrétneho vozidla?*
3. *Dosahuje automatizovaný systém ovládania pedálov v automatizovanom režime vyššiu presnosť a opakovateľnosť výsledkov jazdných skúšok v porovnaní s manuálnym a poloautomatizovaným režimom?*

3 METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA

Na dosiahnutie hlavného cieľa dizertačnej práce, ako aj jeho čiastkových cieľov, bolo nevyhnutné vychádzať z teoretických poznatkov získaných štúdiom dostupných informačných zdrojov. Na základe spracovania týchto poznatkov boli pri riešení problematiky využité nasledovné metódy:

- **analytická metóda:** skúmanie existujúcich systémov a technológií v oblasti automatizovaného riadenia vozidiel a realizácie jazdných skúšok,
- **syntetická metóda:** návrh vlastného riešenia robotického mechanizmu na ovládanie pedálov vozidla,
- **metóda analógie**: využitie osvedčených princípov z iných oblastí robotiky a mechatroniky na účely automatizácie jazdných skúšok,
- **komparatívna metóda**: porovnanie presnosti a spoľahlivosti výsledkov pri realizácii skúšok s manuálnym, poloautomatizovaným a automatizovaným ovládaním,
- **experimentálna metóda**: testovanie navrhnutého systému v reálnych podmienkach a vyhodnocovanie získaných údajov,
- **metóda spracovania a analýzy údajov**: vyhodnocovanie nameraných hodnôt pomocou softvérových nástrojov na účely objektívneho posúdenia funkčnosti systému.

Schéma realizovaných experimentov:

- meranie presnosti a opakovateľnosti manuálne vykonaných jazdných skúšok,
- meranie presnosti a opakovateľnosti jazdných skúšok s využitím automatizovaného systému,
- porovnanie výsledkov a vyhodnotenie efektivity automatizovaného riešenia.

Tieto experimenty boli vykonané s cieľom kvantifikovať rozdiely medzi jednotlivými spôsobmi realizácie skúšok a posúdiť prínos automatizovaného systému z hľadiska stability výsledkov, minimalizácie odchýlok a celkovej efektivity testovania.

3.1 Metodika práce

Metodická časť dizertačnej práce je založená na systematickom a cyklickom prístupe k návrhu, vývoju, testovaniu a overovaniu automatizovaného systému pre zvýšenie presnosti a opakovateľnosti realizácie jazdných skúšok Kľúčovým prvkom metodiky je dôraz na kontrolu správnosti a funkčnosti každej časti systému (mechanickej, elektronickej aj softvérovej) a v prípade zistených problémov ich okamžitú korekciu.

Diagram obsahuje rozhodovacie uzly, ktoré zabezpečujú:

- kontrolu funkčnosti elektroniky (prípadne úpravu a opakovanie montáže),

- overenie správnosti softvérového kódu a debugging,
- testovanie správnej komunikácie medzi hardvérom a softvérom,
- doladenie softvérovej časti (najmä PID regulátorov),
- úspešnosť mechanickej montáže systému,
- správnosť kalibrácie,
- kontrolu a opakovanie zberu dát, ak je potrebné,
- a overenie, či sú výsledky v súlade s normami a očakávaniami.

3.2 Experimetnálny Dizajn (Design of Experiments - DOE)

Experimentálna časť práce bola rozdelená na dve hlavné kategórie testov: jazdné skúšky (zrýchlenie a brzdenie) a jazdné skúšky na stacionárnom zariadení (simulácia WLTP cyklu).

Jazdné skúšky (Zrýchlenie a Brzdenie)
Pre jazdné skúšky zrýchlenia a brzdenia bol použitý blokový (sekvenčný) experimentálny dizajn. Merania boli organizované do troch blokov, pričom každý blok zodpovedal jednému spôsobu ovládania vozidla:

- **Manuálny režim:** Vodič ovládal vozidlo štandardným spôsobom bez asistencie zariadení.
- **Poloautomatizovaný režim:** Vodič inicioval akciu (napr. stlačením tlačidla), pričom samotný pohyb pedálov zabezpečoval robotický systém.
- **Plne automatizovaný režim:** Celý jazdný cyklus bol riadený automatizovaným systémom bez priameho zásahu vodiča, ktorý plnil len monitorovaciu a bezpečnostnú funkciu.

V rámci každého bloku bolo uskutočnených 40 opakovaní kompletnej jazdnej skúšky. Každá skúška pozostávala zo zrýchlenia vozidla z pokoja na cieľovú rýchlosť 30 km/h, krátkej jazdy ustálenou rýchlosťou (približne 2 sekundy) a následného brzdenia až do úplného zastavenia.

Jazdná skúška na stacionárnom zariadení (Simulácia WLTP cyklu)
Pre testovanie na stacionárnom zariadení bola zvolená simulácia úvodnej fázy jazdného cyklu WLTP. Cieľom bolo overiť schopnosť systému plne automatizovane sledovať predpísaný rýchlostný profil. Celkovo bolo vykonaných päť opakovaných meraní tohto cyklu.

3.3 Zber údajov a príprava dát

Primárnym zariadením na zber dynamických údajov vozidla počas jazdných skúšok bol vysoko presný datalogger VBOX 3i Dual Antenna (v5) od spoločnosti Racelogic. Tento systém bol doplnený o:

- Inerciálnu jednotku IMU04 na meranie zrýchlenia a uhlových rýchlostí.
- Senzor sily na pedáli (Pedal Force Sensor) na meranie sily vyvíjanej na pedál brzdy.
- GNSS anténu pre príjem signálov z viacerých satelitných systémov (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou).

Pre jazdné skúšky na stacionárnom zariadení bola použitá valcová skúšobňa Maha MSR 1050, pričom riadenie automatizovaného systému zabezpečoval mikrokontrolér ESP32. Všetky následné analýzy dát, štatistické vyhodnotenia a vizualizácie boli realizované v programovom prostredí MATLAB (verzia R2024b).

Pre dáta zo zrýchlenia a brzdenia bol aplikovaný nasledujúci postup:

- Sledované premenné:
    - Pri zrýchlení: čas na dosiahnutie cieľovej rýchlosti (t [s]), prejdená dráha (S [m]) a priemerné zrýchlenie (a [m/s²]).
    - Pri brzdení: čas brzdenia (t [s]), brzdná dráha (S [m]), strené plné brzdné spomalenie (MFDD [m/s²]) a brzdná sila (F [N]).
- Deskriptívna štatistika: Pre každú sledovanú premennú a každý režim boli vypočítané základné štatistické ukazovatele ako priemer, medián, minimum, maximum, smerodajná odchýlka (SD) a 95 % interval spoľahlivosti (CI95) pre priemer.
- Vizualizácia dát: Na grafické znázornenie rozloženia a porovnanie dát boli použité stĺpcové grafy s intervalmi spoľahlivosti a krabicové grafy (boxplots).
- Overenie predpokladov pre inferenčnú štatistiku:
    - Testovanie normality - Lillieforssovho testu pri $\alpha = 0,05$.
    - Testovanie homogenity variancií - Leveneho testu pri $\alpha = 0,05$.
- Porovnanie režimov:
    - Neparametrický Kruskal-Wallisov test.
    - Post-hoc analýza.
    - Výpočet veľkosti účinku (Effect Size).

Pre dáta zo simulácie WLTP cyklu na valcovej skúšobni bol aplikovaný nasledujúci postup:

- Sledovaná premenná: Rozdiel medzi referenčnou (cieľovou) rýchlosťou a skutočne dosiahnutou rýchlosťou vozidla počas simulovaného cyklu.
- Ladenie PI regulátorov: Počiatočné ladenie parametrov PI regulátorov pre aktuátory pedálov prebiehalo iteračne na základe jednoduchých testovacích cyklov definovaných v softvéri MAHA, s cieľom dosiahnuť stabilnú a presnú odozvu. Bola implementovaná aj bezpečnostná logika zamedzujúca súčasnej aktivácii akceleračného a brzdového aktuátora.
- Vizualizácia dát:

    - Grafické porovnanie referenčného rýchlostného profilu s profilmi dosiahnutými v jednotlivých piatich opakovaniach meraní.
    - Súhrnný graf zobrazujúci referenčný profil, aritmetický priemer z piatich meraní a pásmo minimálnych a maximálnych dosiahnutých hodnôt v každom časovom okamihu.
    - Histogram rozdielov medzi referenčnou a dosiahnutou rýchlosťou pre všetky merania kumulatívne.

Štatistické vyhodnotenie presnosti regulácie:

- Testovanie normality rozdielov - Lillieforssovho testu pri $\alpha = 0,05$.
- Kvantitatívne metriky presnosti:
    - Stredná kvadratická chyba (RMSE),
    - Priemerná absolútna chyba (MAE),
    - Zaujatá chyba / Smerná odchýlka (Bias),
    - Štandardná chyba priemernej chyby (StdErr),
    - Medián absolútnych odchýlok (MAD).
- Testovanie významnosti chyby - Wilcoxonov párový test.
- Korelačná analýza - Pearsonov korelačný koeficient R.

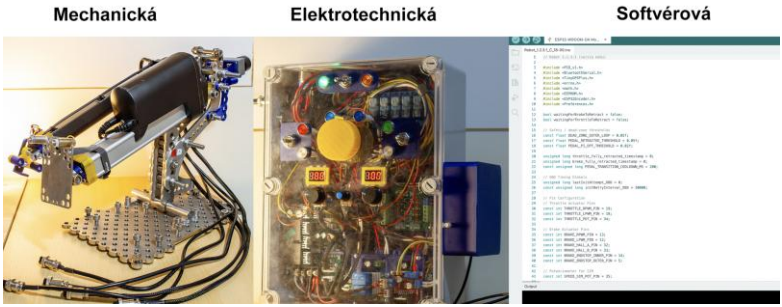
Tento metodický rámec zabezpečil jednotné a systematické spracovanie experimentálnych dát, umožňujúce objektívne porovnanie testovaných režimov a vyhodnotenie výkonnosti navrhnutého robotického systému.

4 VÝSLEDKY PRÁCE

Táto kapitola prezentuje výsledky práce v chronologickom poradí – od úvodného návrhu a koncepčného riešenia, cez výrobu a montáž mechanických častí, vývoj elektrotechnických a softvérových komponentov, až po testovanie a vyhodnotenie funkčnosti celého systému.

Navrhnuté zariadenie možno rozdeliť do troch hlavných oblastí:

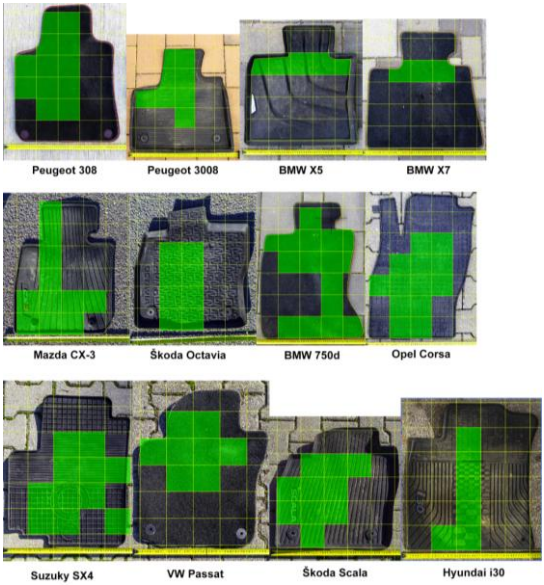
- Mechanická časť – konštrukcia rámu, pohyblivých prvkov a uchytenia aktuátorov.
- Elektrotechnická časť – návrh a zapojenie riadiacej elektroniky, senzorov a napájania.
- Softvérová časť – riadiaci algoritmus, komunikácia medzi komponentmi a používateľské rozhranie.



Obr. 2 Jednotlivé časti
Zdroj: autor

4.1 Analýza priestoru pre vodiča a ovládacích prvkov

V tejto časti sa zameriavame na vývoj a overenie magnetického upevnenia prístroja do priestoru vodiča. Hlavným cieľom je navrhnúť spoľahlivý a nenáročný mechanizmus pripevnenia, ktorý by umožnil jednoduchú manipuláciu so zariadením pri zachovaní dostatočnej fixácie počas jazdy. Vybral sa fishing magnet FM 510.
Za účelom vyhodnotenia vhodnosti aplikácie magnetického systému bola vykonaná analýza podlahy viacerých typov vozidiel. Cieľom bolo zistiť, na ktorých miestach v podlahe sa nachádza materiál schopný reagovať na magnetické pole.



Obr. 3 Testovanie reakcie na magnet vo vozidlách
Zdroj: autor

Na základe vykonanej analýzy bolo preukázané, že využitie permanentných magnetov ako prostriedku na uchytenie konštrukčných prvkov je technicky realizovateľné a zároveň výhodné z hľadiska montáže aj demontáže. V rámci návrhu zariadenia, ktoré ovláda vozidlo, bolo potrebné získať reálne rozmery pedálov, ktoré sa v praxi používajú. Tieto údaje sú nevyhnutné pre správny výber lineárnych piestov, ktoré budú v systéme zabezpečovať mechanický pohyb pedálov v definovanom rozsahu, ako aj pre určenie ich presného umiestnenia a vzdialeností.

Tabuľka 2 Analýza rozmerov brzdového a akceleračného pedálu vozidiel

Značka	Model	Prevodovka	Pedál akcelerátora				Pedál brzdy			Medzera [mm]	Rozchod [mm]
			Typ [mm]	Zdvih [mm]	Šírka [mm]	Kick-down	Typ	Zdvih [mm]	Šírka [mm]		
KIA	Ceed	Automat	Závesný	50	40	áno	Závesný	55	130	70	155
KIA	Ceed	Manuál	Závesný	50	45	nie	Závesný	55	50	65	113
KIA	Ceed	Manuál	Závesný	50	40	nie	Závesný	55	110	60	135
KIA	Sportage	Manuál	Podlahový	50	45	áno	Závesný	55	50	65	113
Opel	Corsa	Manuál	Závesný	45	45	nie	Závesný	55	50	60	108
BMW	X5 M	Automat	Podlahový	55	35	áno	Závesný	60	100	60	128
Suzuki	SX4	Manuál	Závesný	50	40	nie	Závesný	50	50	50	95
VW	Passat	Manuál	Podlahový	60	40	nie	Závesný	60	55	40	88
Škoda	Scala	Manuál	Závesný	40	40	áno	Závesný	60	55	65	113
Hyundai	i30	Manuál	Závesný	55	45	áno	Závesný	45	55	55	105
Hyundai	i30	Automat	Závesný	55	45	áno	Závesný	45	110	65	143
KIA	Rio	Automat	Závesný	60	45	nie	Závesný	60	110	70	148
			Min	**40**	**35**	-	-	**45**	**50**	**40**	**88**
			Max	**60**	**45**	-	-	**60**	**130**	**70**	**155**

Zdroj: autor

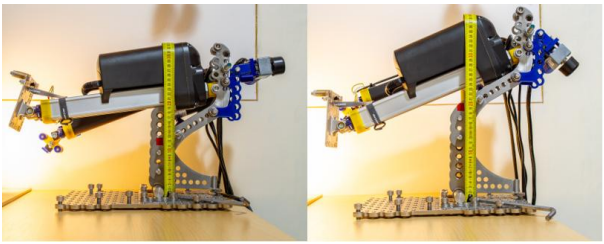
4.2 Návrh a realizácia mechanickej konštrukcie systému

Táto kapitola opisuje návrh, výrobu a montáž mechanickej konštrukcie systému, ktorá tvorí základ pohybového modulu. Konštrukcia bola navrhnutá s dôrazom na modularitu, jednoduchú manipuláciu, dostatočnú tuhosť a možnosť rýchlej demontáže. Hlavným cieľom bolo vytvoriť flexibilnú a modulárnu platformu vhodnú na použitie vo viacerých vozidlách.



Obr. 4 3D modely hlavných častí konštrukcie systému – základová doska, otočný hriadeľ a nosný
Zdroj: autor

Každý komponent bol navrhnutý v 3D CAD softvéri SolidEdge, s ohľadom na požiadavky presného osadenia, montážnych tolerancií a kompatibility jednotlivých dielov.



Obr. 5 Možnosti výškového nastavenia konštrukcie
Zdroj: autor

Tento rám je výškovo nastaviteľný, čo umožňuje zmenu pozície aktuátora v závislosti od konfigurácie testovanej aplikácie. Pri návrhu systému automatizovaného ovládania pedálu brzdy a akcelerátora boli použité dva typy elektromechanických lineárnych pohonov. Ich výber vychádzal z požiadaviek na výkon, presnosť a spoľahlivosť v prostredí osobného vozidla. Oba pohony pracujú na 12 V DC a boli vybrané s ohľadom na ich technické parametre, spätnú väzbu a krytie IP.



Obr. 6 Lineárne pohony
Zdroj: [16,17]

Na ovládanie brzdového pedálu bol použitý elektromechanický lineárny pohon LA36 od spoločnosti LINAK. Model LA36 využíva systém relatívnej spätnej väzby Dual Hall. Na ovládanie pedálu akcelerátora bol použitý elektromechanický lineárny pohon LA-T5P od spoločnosti GoMotorWorld. Pohon využíva potenciometrickú spätnú väzbu, ktorá prevádza aktuálnu polohu piestu na analógové napätie. V rámci rozšírenia riadiaceho systému vozidla bol do návrhu doplnený menší motorček, ktorý slúži na aktívne ovládanie volantu. Cieľom tejto časti je umožniť smerové riadenie vozidla automatizovaným spôsobom. Pre potreby upevnenia brzdového piestu na pedál vozidla bola navrhnutá a vyrobená špeciálna súčiastka. Pre účely upevnenia aktuátora k pedálu akcelerátora bola navrhnutá a skonštruovaná samostatná montážna súčiastka.

4.3 Návrh a realizácia elektrotechnickej časti systému

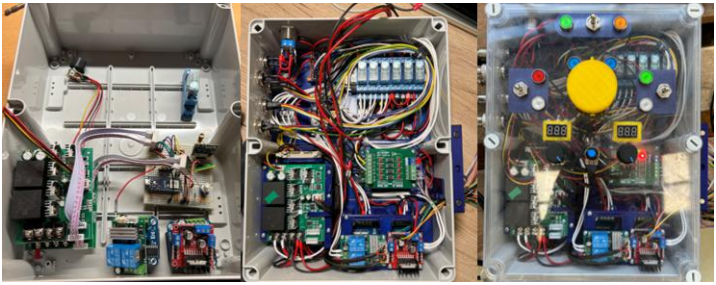
Elektrotechnická časť robota tvorí základnú infraštruktúru, ktorá zabezpečuje napájanie, ovládanie a komunikáciu medzi jednotlivými komponentmi systému. Z hľadiska

funkcie predstavuje nosný prvok celého riadiaceho systému, nakoľko bez nej by nebolo možné vykonávať žiadne akcie ani snímať okolie. Vzhľadom na charakter riadenia lineárnych pohonov bolo zvolené dvojité ovládanie, pozostávajúce z manuálneho a automatizovaného režimu. Každý spôsob ovládania si vyžaduje odlišný prístup k výberu komponentov. Zásadný rozdiel spočíva vo výstupných signáloch a spôsobe riadenia. Manuálne ovládanie umožňuje priame riadenie používateľom, zatiaľ čo automatizované riešenie prostredníctvom mikrokontroléra (napr. Arduino alebo ESP32) si vyžaduje signálové výstupy schopné generovať PWM alebo digitálne impulzy.

Ovládače použité pre riadenie motorčeka a lineárnych piestov:

- PWM regulátor 3A,
- L298N – Dual H-Bridge,
- PWM regulátor 40 A,
- H-Bridge BTS 7960.

Na zabezpečenie prepínania medzi manuálnym a automatizovaným riadením lineárnych pohonov bolo potrebné integrovať elektromagnetické relé. Nosnou časťou elektrotechnickej výbavy je plastová elektroinštalačná krabica s krytím IP65. Výber tohto konkrétneho typu bol ovplyvnený viacerými požiadavkami. V prvom rade bolo potrebné zabezpečiť dostatočný vnútorný priestor pre umiestnenie všetkých aktívnych a pasívnych komponentov. Na základe 3D návrhu boli všetky nosné prvky následne vyrobené pomocou technológie 3D tlače. Na obrázku nižšie je znázornený vývojový postup montáže elektroinštalačnej krabice, od prázdnej krabice, osadenia nosných držiakov, cez zapojenie riadiacich a výkonových modulov, až po finálnu verziu s ovládacími a signalizačnými prvkami.

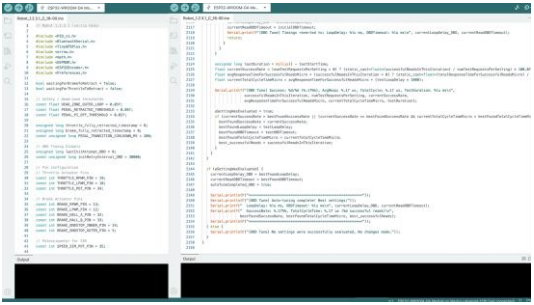


Obr. 7 Montáž a zapojenie elektroinštalačnej krabice
Zdroj: autor

Pri návrhu embedded systému je voľba vhodného mikrokontroléra kľúčovým rozhodnutím, ktoré ovplyvňuje výpočtový výkon, možnosti komunikácie, energetickú náročnosť aj celkovú flexibilitu riešenia. Na základe porovnania bola ako najvhodnejšia platforma zvolená doska ESP32 DevKitC s čipom ESP-WROOM-32E.

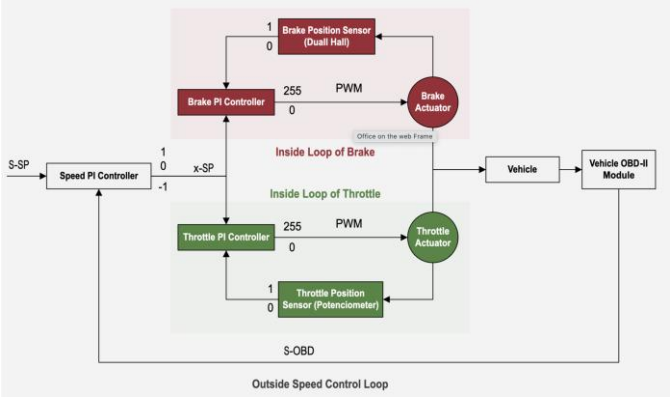
4.4 Návrh a realizácia softvérovej časti robota

Softvérová časť robota bola navrhnutá a implementovaná v jazyku C++ v prostredí Arduino IDE, pričom bola kladená dôraz na modulárnosť, flexibilitu a možnosť jednoduchého rozširovania riadiaceho systému. Celá architektúra softvéru je postavená na princípe viacúrovňového riadenia, ktoré zabezpečuje presné a spoľahlivé ovládanie aktuátorov s ohľadom na požadovanú dynamiku jazdy a bezpečnostné požiadavky.
Riadiaci systém robota je založený na hierarchickej regulačnej štruktúre, ktorá pozostáva z jednej vonkajšej regulačnej slučky a dvoch vnútorných regulačných slučiek. Vonkajšia slučka má za úlohu regulovať rýchlosť vozidla na základe spätnej väzby z vozidla a to buď pomocou OBD-II modulu alebo GPS senzora, zatiaľ čo vnútorné slučky sú zamerané na presnú reguláciu polohy jednotlivých piestov.



Obr. 8 Ukážka zdrojového kódu softvérovej časti
Zdroj: autor

Na nasledujúcom obrázku je znázornená logika ovládania jednotlivých piestov a tok regulačných signálov v celom systéme.



Obr. 9 Štruktúra riadiaceho systému
Zdroj: autor

4.5 Nastavenie PID parametrov a overenie presnosti polohovania aktuátorov

Samotné ladenie PID parametrov prebiehalo systematicky v niekoľkých krokoch, pričom základom bolo najskôr nastaviť a overiť tzv. vnútorné polohové slučky každého aktuátora samostatne. Až následne bolo možné prejsť na optimalizáciu nadriadenej regulačnej slučky rýchlosti vozidla. Na základe metódy kalibrácie a experimentálnych skúšok boli stanovené konkrétne hodnoty parametrov PI regulátorov pre jednotlivé regulačné slučky. Pre aktuátor akcelerátora sa dosiahla približne optimálna hodnota proporcionálnej zložky P = 0,12 a integračnej zložky I = 0,01. V prípade brzdového aktuátora sa v dôsledku odlišnej dynamiky musela hodnota P zvýšiť na 1 200, zatiaľ čo I bola znížená na 5. V oboch prípadoch zostala derivačná zložka D neaktívna, vzhľadom na nestabilitu vyvolanú šumom pri spätnej väzbe potenciometrom.

4.6 Nastavenie PID parametrov a overenie presnosti polohovania aktuátorov

Cieľom tohto merania bolo experimentálne vyhodnotiť presnosť a spoľahlivosť rôznych systémov na meranie rýchlosti vozidla, s ohľadom na ich vhodnosť pre použitie v automatizovanom elektromechanickom systéme ovládania vozidla. V navrhovanom riešení má riadiaca jednotka na základe informácie o aktuálnej rýchlosti rozhodnúť, či je potrebné aktivovať lineárny aktuátor pedálu akcelerátora, znížiť akceleráciu alebo spustiť brzdenie prostredníctvom brzdového aktuátora.

Do porovnania sú zahrnuté nasledovné zdroje údajov:

- Tachometer – základný údaj zobrazovaný vodičovi na prístrojovej doske.
- OBD-II (ESP32 + ELM327 Mini).
- GNSS (1): NEO-M8M – lacný GPS modul s aktualizáciou 1 Hz.
- GNSS (2): VBOX alebo iný presný GNSS systém.



Obr. 10 Meracie zariadenia A) ELM327, B) NEO-M8M, C) GNSS VBOX
Zdroj: [18,19,20]

Na rozdiel od štandardných jazdných testov s dynamickými zmenami rýchlosti bude v tomto výskume použitý metodicky presný, opakovateľný spôsob zberu údajov pri ustálenej rýchlosti. Tento prístup vychádza z metodiky použitej v štúdii [21], kde bo la každá úroveň rýchlosti analyzovaná samostatne.

Postup merania:

- Nastavenie rýchlosti: Pomocou adaptívneho tempomatu alebo rýchlostného obmedzovača sa vozidlo stabilizuje na cieľovej rýchlosti (napr. 5 km/h).

- Stabilizácia: Po ustálení sa počká 3–5 sekúnd, aby sa eliminovali prechodové javy.
- Záznam údajov: Zaznamenajú sa hodnoty zo všetkých štyroch systémov – tachometer, OBD-II, GNSS (1) a GNSS (2).
- Opakovanie: Postup sa opakuje pre rýchlosti od 0 do 130 km/h v krokoch po 5 km/h.

Navrhnutá metodika vychádza zo štúdie [21], kde autori porovnávajú údaje z tachometra, OBD-II, smartfónového GPS. Ich výskum preukázal systematické odchýlky medzi systémami, napríklad že údaje z OBD-II je možné previesť na hodnoty tachometra konštantným koeficientom 1,429 a že tachometre bežne vykazujú odchýlky rýchlosti o 5–10 % kvôli legislatívnym požiadavkám [21].

Experiment pozostával z meraní v 27 úrovniach rýchlosti, v rozsahu od 0 do 130 km/h, v krokoch po 5 km/h. Pri každej rýchlosti boli súčasne zaznamenané hodnoty zo všetkých štyroch systémov. Výsledné údaje sú spracované v tabuľke, ktorá zachytáva jednotlivé rýchlosti a merané hodnoty.

Tabuľka 3 Namerané hodnoty jednotlivých vstupov rýchlostí

Meranie	Tachometer [km/h]	OBDII [km/h]	NEO-M8M [km/h]	VBOX [km/h]
1	0	0	0	0
2	5	4	4,1	4
3	10	9	9,1	9,4
4	15	13	13,2	13,3
5	20	18	18,3	18,2
6	25	22	22,5	22,6
7	30	27	26,9	26,8
8	35	32	31,7	31,9
9	40	37	36,8	36,7
10	45	42	41,6	41,8
11	50	47	46,7	46,6
12	55	52	51,5	51,7
13	60	57	56,4	56,4
14	65	62	61,7	61,8
15	70	67	66,4	66,3
16	75	72	71,3	71,4
17	80	77	76,2	76,2
18	85	82	81,3	81,6
19	90	87	86,2	86,3
20	95	92	91,1	91,1
21	100	97	96,1	96,2
22	105	102	101,1	101,2
23	110	107	106,1	106,2
24	115	112	111,1	111,1
25	120	117	116,1	116,2
26	125	122	121	121,1
27	130	127	126,1	126,1
Priemer [km/h]	**65**	**62,33**	**61,87**	**61,93**
Rozdiel [km/]	-	**1,043**	**1,051**	**1,05**

Zdroj: autor

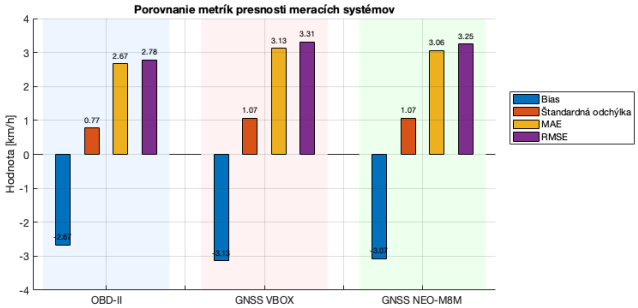
Pri porovnaní výstupov bolo zrejmé, že všetky alternatívne systémy (OBD-II, GNSS NEO, GNSS VBOX) systematicky podhodnocovali rýchlosť vozidla v porovnaní s tachometrom. Tabuľka sumarizuje všetky štatistické ukazovatele pre jednotlivé meracie systémy – priemernú hodnotu rýchlosti, odchýlku voči tachometru (bias), štandardnú odchýlku, strednú absolútnu chybu (MAE), strednú kvadratickú chybu (RMSE) a koeficient determinácie (R^2).

Tabuľka 4 Štatistické ukazovatele presnosti a stability systémov merania rýchlosti

Systém	Priemer [km/h]	Bias [km/h]	Štandardná odchýlka [km/h]	MAE [km/h]	RMSE [km/h]	R^2
OBD-II	62,33	–2,67	0,77	2,67	2,78	0,9998
GNSS NEO-M8M	61,87	–3,13	1,07	3,13	3,31	0,9996
GNSS VBOX	61,93	–3,07	1,07	3,06	3,25	0,9996

Zdroj: autor

Graf vizualizuje rozdiely medzi systémami naprieč všetkými metrikami. Zámerne podfarbené pozadie pomáha opticky oddeliť každú technológiu. OBD-II má stabilný výkon naprieč všetkými štatistikami, zatiaľ čo GNSS systémy sú o niečo presnejšie, no zároveň nestabilnejšie.



Obr. 11 Porovnanie metrík presnosti meracích systémov
Zdroj: autor

4.7 Metodika vykonania jazdných skúšok

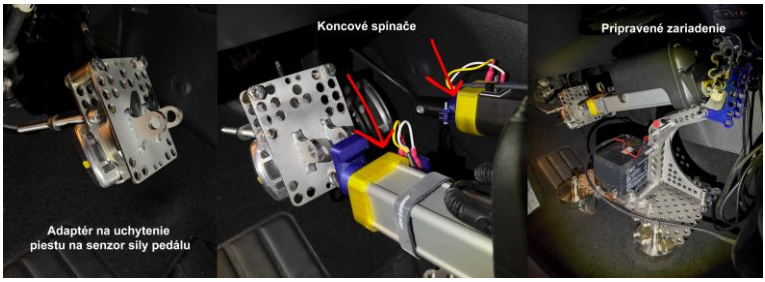
Táto kapitola popisuje metodický postup realizácie jazdných skúšok, ktoré boli vykonané s cieľom vyhodnotiť správanie testovaného systému v rôznych prevádzkových režimoch. Merania boli vykonané na vozidle Peugeot 308, rok výroby 2017, výbava GT Line. Vozidlo je vybavené naftovým motorom 1.5 BlueHDi s výkonom 96 kW (130 k). Vozidlo bolo počas meraní malo nové letné pneumatiky značky Michelin Pilot Sport s rozmerom 225/40 R18. Tlak v pneumatikách bol nastavený na 2,4 bar pre prednú nápravu a 2,3 bar pre zadnú nápravu, v súlade s odporúčaniami výrobcu. Merania boli realizované na úseku cesty s asfaltovým povrchom, ktorý sa nachádza v priemyselnom areály v rovinatom teréne. Dĺžka

meracieho úseku bola 150 metrov. V mieste merania neboli identifikované výrazné poruchy povrchu, ako sú trhliny, výtlky alebo nerovnosti. Pred realizáciou samotných meraní bolo potrebné zabezpečiť správne umiestnenie a nastavenie všetkých meracích zariadení, ktoré slúžili na zber a spracovanie dát.



Obr. 12 Meracie zariadenia
Zdroj: [22,23,24]

Po príprave meracích zariadení bolo možné pristúpiť k realizácii samotných meraní. V prípade, že boli skúšky vykonávané s vodičom, zariadenie pre automatizované ovládanie brzdového pedála nebolo vo vozidle inštalované. Pri realizácii skúšok s použitím tohto zariadenia bolo potrebné vykonať dodatočné kroky súvisiace s jeho inštaláciou a nastavením.



Obr. 13 Postup inštalácie a umiestnenie zariadenia pre automatizované ovládanie
Zdroj: autor

4.8 Priebeh merania

Po všetkých nastaveniach sa vykonala ešte kalibrácia Kalmanovho filtra IMU. Merania prebiehali na základe metodiky Design of Experiments (DOE), ktorá bola definovaná v kapitole Metodika. Tento prístup umožnil systematické plánovanie experimentov s cieľom minimalizovať počet potrebných meraní pri zachovaní dostatočnej spoľahlivosti a štatistickej významnosti výsledkov.
Skúšky boli rozdelené do troch režimov podľa spôsobu ovládania brzdného systému:

- Manuálny režim, brzdný manéver vykonával výhradne vodič,
- Poloautomatizovaný režim, vodič ovládal zariadenie na aktiváciu brzdného zásahu,
- Automatizovaný režim, brzdný manéver prebiehal autonómne na základe vopred nastavených parametrov bez zásahu vodiča.

V každom režime bolo vykonaných 40 meraní, čo zodpovedalo experimentálnemu plánu navrhnutému podľa zásad DOE a zabezpečilo dostatočný rozsah dát pre analýzu a porovnanie výsledkov. Priebeh jednotlivých meraní bol jednotne definovaný. Vodič najskôr zrýchlil vozidlo na požadovanú rýchlosť 30 km/h, následne ju udržiaval a po približne 2 sekundách vykonal brzdný manéver. V manuálnom režime vodič brzdil priamo, v poloautomatizovanom režime aktivoval zariadenie, ktoré realizovalo brzdný zásah, a v automatizovanom režime bol celý priebeh plne riadený systémom bez zásahu vodiča.

V rámci vykonávaných jazdných skúšok sú pre prehľadnosť jednotlivé skúšky číslované nasledovne:

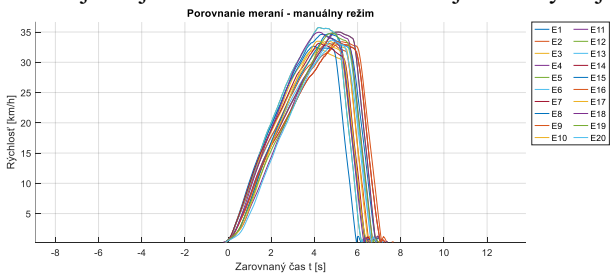
- Test 1 – Celkový priebeh jazdy.
- Test 2 – Zrýchlenie vozidla.
- Test 3 – Brzdné vlastnosti.

Takto definované a oddelené testy (Test 1–3) umožňujú systematické vyhodnotenie jednotlivých aspektov jazdných vlastností skúšaného vozidla.

4.9 Jazdná skúška – celkový priebeh (Test 1)

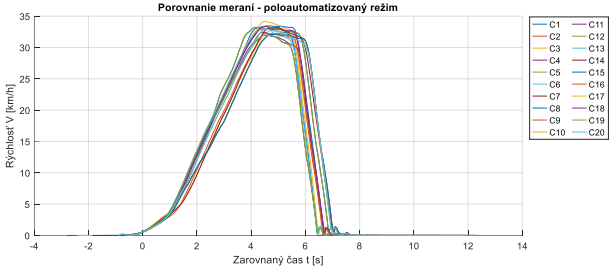
Pre každý režim bolo vykonaných 20 meraní. Analýza sa sústredí na kľúčové ukazovatele výkonnosti a presnosti riadenia.

Nasledujúci graf (Obr.15) zobrazuje 20 individuálnych meraní v manuálnom režime. Z vizuálneho posúdenia je zrejmá značná variabilita medzi jednotlivými jazdami.



Obr. 14 Celkový priebeh manuálny režim pri Test 1
Zdroj: autor

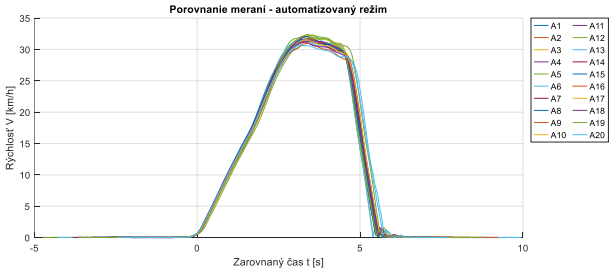
Graf (Obr.16) znázorňuje 20 meraní v poloautomatizovanom režime. V porovnaní s manuálnym režimom je možné pozorovať o niečo menšiu odchýlku medzi jednotlivými rýchlostnými profilmi.



Obr. 15 Celkový priebeh poloautomatizovaný režim pri Test 1

Zdroj: autor

Graf (Obr.17) pre 20 jázd v automatizovanom režime demonštruje najvyššiu mieru spoľahlivosti. Jednotlivé rýchlostné profily sú si veľmi podobné a tesne zoskupené. Variabilita v maximálnej rýchlosti a celkovom priebehu jazdy je minimálna, čo poukazuje na vysokú mieru opakovateľnosti a presnosti automatizovaného systému riadenia.



Obr. 16 Celkový priebeh poloautomatizovaný režim pri Test 1

Zdroj: autor

Súhrnné deskriptívne štatistiky pre jednotlivé režimy sú uvedené v Tabuľke 5.

Tabuľka 5 Deskriptívna štatistika pre celkový priebeh jazdných skúšok

Parameter	Jednotka	Auto	Poloauto	Manuál
Priemerná vnúroskupinová RMSE	-	5,16	4,518	5,645
Priemerná vnúroskupinová MAE	-	3,905	3,377	4,542
Priemerná maximálna rýchlosť	km/h	31,71	32,84	34,03
Priemerný čas nad 30 km/h	s	1,53	1,88	1,92
Priemerné prekročenie referenčnej rýchlosti	-	1,71	2,83	4,03
Počet jázd v tolerancii (\Δ\≤3.0 km/h)	(počet/celkom)	20 / 20	13 / 20	2 / 20
Percento jázd v tolerancii (\Δ\≤3.0 km/h)	%	100%	65%	10%

Zdroj: autor

4.10 Jazdná skúška – zrýchlenie vozidla (Test 2)

Pre každý z troch testovaných režimov jazdy – manuálny, poloautomatizovaný a automatizovaný – bolo vykonaných 40 pokusov zrýchlenia vozidla. Počas týchto pokusov boli zaznamenávané kľúčové premenné: čas potrebný na dosiahnutie cieľovej rýchlosti (t) v sekundách [s], prejdená dráha (S) v metroch [m] a priemerné zrýchlenie (a) v m/s². Cieľom bolo analyzovať a porovnať výkonnosť a charakteristiky vozidla v jednotlivých režimoch pri zrýchľovaní z 0 na 30 km/h. Na identifikáciu konkrétnych rozdielov medzi dvojicami režimov bola vykonaná post-hoc analýza.

Tabuľka 6 Post-hoc porovnanie režimov pre Test 2

Premenná	Porovnanie režimov	Odhad rozdielu	95 % CI (dolný – horný)	p-hodnota	Významnosť
t (čas)	Manuál vs. Poloauto	-25,188	[-43,7581; -6,6169]	0,0036	významný
	Manuál vs. Auto	46,110	[27,5419; 64,6831]	< 0,0001	významný
	Poloauto vs. Auto	71,330	[52,7294; 89,8706]	< 0,0001	významný
S (dráha)	Manuál vs. Poloauto	3,210	[-15,3955; 21,7845]	0,9671	nevýznamný
	Manuál vs. Auto	60,160	[41,5905; 78,7345]	< 0,0001	významný
	Poloauto vs. Auto	56,070	[38,378; 75,522]	< 0,0001	významný
a (zrýchlenie)	Manuál vs. Poloauto	-0,830	[-19,3954; 17,7454]	0,9994	nevýznamný
	Manuál vs. Auto	-58,200	[-77,5954; -40,4546]	< 0,0001	významný
	Poloauto vs. Auto	-58,200	[-76,7704; -39,6296]	< 0,0001	významný

Zdroj: autor

Výsledky párových porovnaní (zhrnuté v tabuľke) sú nasledovné:

- Premenná t (čas): Automatizovaný režim je štatisticky rýchlejší (kratší čas) než oba ostatné, a aj rozdiel medzi manuálnym a poloautomatizovaným je významný.
- Premenná S (dráha): Automatizovaný režim prejde štatisticky významne kratšiu dráhu než ostatné. Rozdiel medzi manuálnym a poloautomatizovaným nie je významný.
- Premenná a (zrýchlenie): Automatizovaný režim dosahuje výrazne vyššie zrýchlenie než ostatné režimy. Manuálny a poloautomatizovaný sa štatisticky nelíšia.

4.11 Jazdná skúška – brzdennie vozidla (Test 3)

Podobne ako pri zrýchlení, aj tu boli porovnávané tri režimy: manuálny, poloautomatizovaný a automatizovaný. Zaznamenávali sa štyri hlavné premenné: čas brzdenia (t) v sekundách [s], brzdná dráha (S) v metroch [m], maximálne efektívne spomalenie (MFDD) v m/s² a brzdná sila (F) v Newtonoch [N]. Pre každý režim bolo pravdepodobne vykonaných 40 pokusov, analogicky k testom zrýchlenia. Na

identifikáciu konkrétnych rozdielov medzi dvojicami režimov bola vykonaná post-hoc analýza.

Tabuľka 7 Post-hoc porovnávanie režimov pre Test 3

Premenná	Porovnanie režimov	Odhad rozdielu	95 % CI (dolný – horný)	p-hodnota	Významnosť
t (čas)	Manuál vs. Poloauto	-6,1375	[-24,6979; 12,4229]	0,8146	nevýznamný
	Manuál vs. Auto	-28,8500	[-47,4104; -10,2896]	0,0006	významný
	Poloauto vs. Auto	-22,7125	[-41,2729; -4,1521]	0,0104	významný
S (dráha)	Manuál vs. Poloauto	-17,8250	[-36,3965; 0,7465]	0,0643	nevýznamný
	Manuál vs. Auto	-38,3125	[-56,884; -19,741]	< 0,0001	významný
	Poloauto vs. Auto	-17,3900	[-35,9616; 1,1816]	0,0251	významný
MFDD	Manuál vs. Poloauto	-11,5875	[-30,1578; 6,9828]	0,3556	nevýznamný
	Manuál vs. Auto	-36,0000	[-54,5703; -17,4297]	< 0,0001	významný
	Poloauto vs. Auto	-27,2715	[-45,842; -8,701]	0,0051	významný
F (sila)	Manuál vs. Poloauto	8,6580	[-9,6778; 26,8222]	0,8033	nevýznamný
	Manuál vs. Auto	47,7750	[29,2028; 66,3472]	0,0003	významný
	Poloauto vs. Auto	-20,4750	[-39,0472; -1,9028]	0,0252	významný

Zdroj: autor

Výsledky (zhrnuté v tabuľke) sú interpretované nasledovne:

- Čas brzdenia (t):
  - Manuál vs. Poloauto: Rozdiel nie je štatisticky významný.
  - Manuál vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim má výrazne dlhší čas brzdenia.
  - Poloauto vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim má výrazne dlhší čas brzdenia.
- Brzdná dráha (S):
  - Manuál vs. Poloauto: Rozdiel na nie je štatisticky významný, hodnota je blízko prahu významnosti.
  - Manuál vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim má dlhšiu brzdnú dráhu.
  - Poloauto vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim má dlhšiu brzdnú dráhu než poloautomatizovaný režim.
- MFDD:
  - Manuál vs. Poloauto: Rozdiel na nie je štatisticky významný.
  - Manuál vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim dosahuje výrazne vyššie spomalenie.
  - Poloauto vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim má je výrazne vyššie spomalenie.
- Premenná F (brzdná sila):

- Manuál vs. Poloauto: Rozdiel nie je štatisticky významný.
- Manuál vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim vyvíja vyššiu brzdnú silu.
- Poloauto vs. Auto: Významný rozdiel, automatizovaný režim pôsobí vyššou silou než poloautomat.

4.12 Zhrnutie výsledkov

Cieľom tejto časti bolo vykonať porovnanie troch režimov ovládania vozidla – manuálneho (M), poloautomatizovaného (PA) a automatizovaného (A). Hodnotenie sa zameriavalo na ich výkonnosť v rôznych fázach jazdy, najmä počas celkového priebehu jazdy, zrýchľovania a brzdenia.

Tabuľka 8 Výsledky celkového priebehu jazdných skúšok

Celkový priebeh					
Metrika	Manuálny	Poloautomatizovaný	Automatizovaný	Zmena PA vs M (%)	Zmena A vs M (%)
Prekročenie ref.rýchlosti [km/h]	5,645	4,518	5,16	-20,0%	-8,6%
Max. rýchlosť [km/h]	31,71	32,84	31,71	3,6%	0,0%
Čas [s]	1,92	1,88	1,53	-2,1%	-20,3%

Zdroj: autor

Tabuľka 9 Výsledky zrýchlenia vozila

Zrýchlenie					
Metrika	Manuálny	Poloautomatizovaný	Automatizovaný	Zmena PA vs M (%)	Zmena A vs M (%)
Čas [s]	3,81	4,3	2,87	+12,9 %	−24,7 %
Dráha [m]	16,23	15,83	11,84	−2,5 %	−27,1 %
Zrýchlenie [m/s²]	2,18	2,18	2,94	0,0 %	+34,9 %

Zdroj: autor

Tabuľka 10 Výsledky brzdenia vozidla

Brzdenie					
Metrika	Manuálny	Poloautomatizovaný	Automatizovaný	Zmena PA vs M (%)	Zmena A vs M (%)
Čas [s]	1,05	1,06	1,17	+0,9 %	+11,4 %
Dráha [m]	4,54	4,96	5,74	+9,3 %	+26,4 %
MFDD [m/s²]	8,67	8,91	9,35	+2,8 %	+7,9 %
Sila [N]	164,12	91,3	108,74	−44,4 %	−33,8 %

Zdroj: autor

4.13 Jazdná skúška na stacionárnom zariadení

V rámci dizertačnej práce bola realizovaná séria jazdných skúšok na stacionárnom zariadení s cieľom overiť funkčnosť, presnosť a stabilitu navrhovaného riadiaceho systému pri simulácii reálnych jazdných podmienok. Testovanie prebiehalo v laboratóriu Katedry cestnej a mestskej dopravy, kde je k dispozícii valcová skúšobňa typu MAHA MSR 1050. Skúšobným vozidlom bol model KIA Ceed. Vzhľadom na

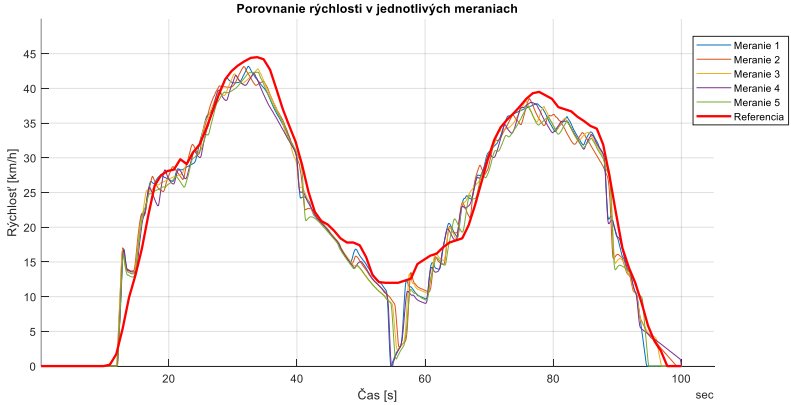
konštrukčné usporiadanie testovaného vozidla bolo nevyhnutné výškovo upraviť zariadenie určené na mechanické ovládanie pedálov.



Obr. 17 Zariadenie umiestnené v KIA Ceed
Zdroj: autor

Na dôkladnú validáciu systému bola zvolená simulácia úvodnej fázy jazdného cyklu WLTP. Cieľom bolo otestovať schopnosť zariadenia plne automatizovane vykonať predpísaný cyklus bez zásahu obsluhy. Ovládacie a referenčné hodnoty boli prednahrané do mikrokontroléra ESP32, ktorý riadil celý priebeh simulácie v reálnom čase.

Celkovo bolo vykonaných päť opakovaných meraní. V každom z nich bola zaznamenaná vysoká zhoda medzi referenčnou a dosiahnutou rýchlosťou, pričom najväčšie odchýlky sa objavovali počas dynamických prechodov a to najmä pri zrýchľovaní alebo spomaľovaní. Špecificky medzi 45. a 55. sekundou dochádzalo ku krátkodobému úplnému zastaveniu vozidla, čo bolo identifikované ako dôsledok akumulovanej chyby v integračnej (I) zložke PI regulátora. Po návrate piestu do základnej polohy došlo k resetovaniu I-zložky, čím bola chyba odstránená a systém pokračoval v režime podľa zadanej trajektórie.



Obr. 18 Porovnanie rýchlosti v jednotlivých meraniach
Zdroj: autor

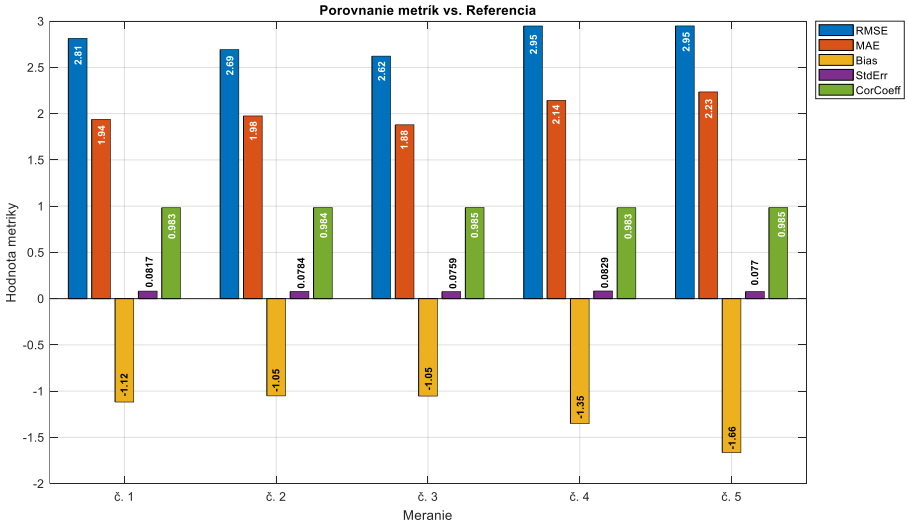
Pre komplexné vyhodnotenie presnosti a správania sa regulačného systému boli pre každé meranie vypočítané základné kvantitatívne metriky.

Tabuľka 11 Kvantitatívne ukazovatele regulačnej presnosti

Meranie	RMSE [km/h]	MAE [km/h]	Bias [km/h]	StdErr	MAD [km/h]	Wilcoxon p	Pearson R
Meranie 1	2,815	1,939	-1,118	0,082	1,031	< 0,001	0,983
Meranie 2	2,693	1,975	-1,052	0,078	1,149	< 0,001	0,984
Meranie 3	2,622	1,879	-1,054	0,076	1,165	< 0,001	0,985
Meranie 4	2,948	2,144	-1,351	0,083	1,292	< 0,001	0,983
Meranie 5	2,949	2,235	-1,665	0,077	1,224	< 0,001	0,985

Zdroj: autor

Graf (Obr.20) ilustruje správanie všetkých vybraných metrík v jednotlivých meraniach, čo umožňuje rýchle vizuálne posúdenie ich trendov a vzájomných vzťahov.



Obr. 19 Porovnanie metrík

Zdroj: autor

4.14 Ekonomické zhodnotenie

Ekonomické posúdenie navrhnutého robotického systému na ovládanie pedálov vozidla predstavuje dôležitý aspekt, predovšetkým z hľadiska jeho potenciálneho využitia vo výskumných a akademických inštitúciách, kde býva rozpočet na technické vybavenie často obmedzený. Cieľom tejto dizertačnej práce preto nebolo len vyvinúť funkčné technické riešenie, ale aj zabezpečiť jeho ekonomickú dostupnosť. Dôraz bol kladený na minimalizáciu výrobných nákladov bez zníženia funkčnosti a presnosti systému.

Tabuľka 12 Zoznam komponentov a investičné náklady na navrhnutý automatizovaný systém

Komponent	Množstvo	Cena za jednotku (bez DPH) [€]	Celková cena (bez DPH) [€]
Lineárny piest LINAK	1 ks	559	559
Lineárny piest LA-T5	1 ks	148,4	148,4
Motorček	1 ks	56,1	56,1
Výroba konštrukcie	-	870	870
Fishing magnet FM 510	4 ks	49	196
PWM Regulátor 40A (manuálne ovládanie)	2 ks	9,12	18,24
H-Bridge BTS7960 (automatizované ovládanie)	2 ks	6,34	12,68
Elektromagnetické relé PS 40.52.9.012 (s päticou)	6 ks	8,9	53,4
Panelové konektory GX20 (súčet za 6ks)	6 ks	4,45	26,7
Páčkový prepínač ON-OFF-ON	2 ks	2,58	5,16
Núdzové tlačidlo (kovový spínač)	1 ks	5,64	5,64
LED kontrolka (kovová, 6mm)	8 ks	1,39	11,12
Olovená batéria GETI 12V/12Ah	1 ks	17,08	17,08
Modul optočlenového prevodníka (4-kanálový)	2 ks	2,39	4,78
Elektroinštalačná krabica LUCASYSTEM00878	1 ks	37,9	37,9
Mikrokontrolér ESP32 WROOM 32E DevKitC	1 ks	16,8	16,8
GPS Modul NEO-M8N	1 ks	17,42	17,42
Kabeláž	-	40,2	40,2
Ostatný materiál/komponenty	-	120	120
Spolu bez DPH [€]		**1 972,71**	**2 216,62**

Zdroj: autor

Na účely porovnania je následne uvedená Tabuľka 13, ktorá obsahuje orientačné porovnanie investičných nákladov vlastného riešenia s komerčne dostupnými systémami. Je potrebné poznamenať, že komerčné produkty štandardne zahŕňajú aj vývojové, výrobné a podporné náklady, čo sa výrazne premieta do ich finálnej ceny.

Tabuľka 13 Porovnanie orientačných investičných nákladov

Výrobca / Systém	Orientačná cena
AB Dynamics	130 000 €
VEHI.CO	145 000 €
S-E-A ATD	255 000 €
4activeDR (v spolupráci so Stähle)	140 000 €
Maturo R – ABC Robot System	30 000 €
URAT (výskumný projekt)	Neuvedená (výskum)
Automatizovaný systém	**2216,16 €**

Zdroj: autor

4.15 Spracovanie výskumných otázok

V tejto časti práce sú spracované výskumné otázky, ktoré boli definované v úvodných častiach dizertačnej práce. Ich zodpovedanie vychádza z výsledkov experimentálnych meraní, analytických hodnotení a praktických overení prezentovaných v predchádzajúcich kapitolách.

Výskumná otázka č.1	*Je možné realizovať opakovateľné a pevné uchytenie konštrukcie automatizovaného systému v priestore pre vodiča spôsobom, ktorý je nedeštruktívny voči interiéru vozidla?*
Odpoveď	V práci bola v kapitole 4.1 riešená otázka opakovateľného a pevného uchytenia robotického systému v priestore pre vodiča. Z viacerých alternatív bolo ako najvhodnejšie vybrané riešenie uchytenia prostredníctvom silných neodýmových magnetov. Toto riešenie bolo experimentálne overené (viď kap. 4.5) a ukázalo sa ako plne funkčné a nedeštruktívne voči interiéru vozidla. Magnetické uchytenie umožňuje rýchlu inštaláciu a demontáž bez poškodenia interiérových prvkov. Počas celého testovania nedošlo k žiadnym posunom konštrukcie ani pri opakovanej montáži, čo potvrdzuje jeho opakovateľnosť a spoľahlivosť. Takže odpoveď na výskumnú otázku je áno, je možné realizovať opakovateľné a pevné uchytenie konštrukcie.
Výskumná otázka č.2	*Je možné navrhnúť automatizovaný systém na ovládanie pedálov tak, aby bol modulárny a univerzálne použiteľný v rôznych typoch vozidiel, vrátane možnosti rýchleho prispôsobenia a prekonfigurovania podľa rozmerov a usporiadania konkrétneho automobilu?*
Odpoveď	Možnosti modularity a univerzálneho použitia systému boli podrobne analyzované v kapitolách 4.1, 4.4 a 4.6. Systém bol navrhnutý tak, aby bolo možné jednoducho prispôsobiť jeho rozmery a uchytenie rôznym typom vozidiel. Praktické skúšky preukázali, že zmena polohy uchytenia či výmena niektorých komponentov (napríklad typ pohonu) je možná v priebehu niekoľkých minút (viď tabuľka 4.2). Zároveň bola architektúra systému navrhnutá s možnosťou ďalšieho rozširovania, napríklad pridaním ďalších pohonov pre spojku alebo riadenie, čo potvrdzuje univerzálnosť a modularitu systému. Áno, automatizované zariadenie je modulárne a prispôsobiteľné aj pre iné vozidlá.
Výskumná otázka č.3	*Dosahuje automatizovaný systém ovládania pedálov v automatizovanom režime vyššiu presnosť a opakovateľnosť výsledkov jazdných skúšok v porovnaní s manuálnym a poloautomatizovaným režimom?*
Odpoveď	Výsledky experimentov prezentované v kapitolách 4.7 – 4.9 jednoznačne potvrdzujú, že automatizovaný systém ovládania pedálov dosahuje vyššiu presnosť a opakovateľnosť v porovnaní s manuálnym a poloautomatizovaným režimom. Smerodajná odchýlka počtu impulzov v plne automatizovanom režime bola iba 8,7, pričom v manuálnom režime to bolo až 14,7. Priemerná odchýlka od cieľovej polohy bola v automatizovanom režime len 1,8 %. Áno, automatizované zariadenie dosahuje vyššiu presnosť a opakovateľnosť.

5 DISKUSIA

Vývoj a testovanie univerzálneho skúšobného zariadenia určeného na automatizované jazdné skúšky vozidiel ukázali, že realizácia podobného systému je v praxi omnoho zložitejšia, ako sa pôvodne predpokladalo. Významným poznatkom je, že technické aj organizačné výzvy je nutné riešiť komplexne a v niektorých prípadoch prehodnotiť pôvodné koncepcie. Jednou z najväčších technických výziev bol návrh a výroba nosnej konštrukcie lineárnych pohonov. Počas výroby sa ukázalo, že aj menšie odchýlky od predpísaných strojárskych tolerancií môžu viesť k vzniku nadmerných vôlí v spojoch medzi nosným rámom a základovou časťou. V súčasnosti využívané magnety by bolo možné nahradiť výkonnejšími variantmi, alebo ich kombinovať s ďalšími konštrukčnými prvkami opierajúcimi sa o sedadlo vodiča, čím by sa zvýšila celková stabilita. Alternatívne, inšpirácia riešeniami zo zahraničia, teda uchytenie konštrukcie priamo na vodičovu sedačku s použitím popruhov k ISOFIX úchytom.

Počas úvah o rozšírení použiteľnosti systému na testovanie ťažších a výkonnejších vozidiel sa ukázalo, že pre zabezpečenie dostatočného výkonu pohonov (najmä lineárnych aktuátorov) by bolo žiaduce overiť aj možnosti prevádzky pri 24 V napájaní. V praxi sa ako najvýhodnejšie javí použitie GPS prijímača, avšak počas testov sa opakovane ukázalo, že GPS signál môže byť v niektorých lokalitách nedostatočný, nestabilný alebo dokonca úplne nedostupný. Riešením je implementácia fúzie senzorov – kombinácie údajov z GPS a IMU jednotky (akcelerometer, gyroskop), prípadne integrácia ďalších zariadení, ako je smartfón alebo alternatívne GPS prijímače.

V rámci softvérovej vrstvy sa ukázalo, že manuálne ladeniu PID parametrov priamo v Arduino IDE je pri vyšších nárokoch na presnosť, opakovateľnosť a spoľahlivosť testov značne neefektívne a náchylné na chyby. Aj malá zmena v nastavení môže spôsobiť výrazné zmeny v správaní systému – napríklad rozkmitanie alebo naopak neúmerné spomalenie odozvy. Pre overenie spoľahlivosti a univerzálnosti systému je potrebné rozšíriť testovanie na ďalšie typy vozidiel (napr. SUV, úžitkové vozidlá) a rôzne povrchy (mokrá vozovka, štrk a pod.), čím by sa overila adaptabilita regulačných algoritmov na meniace sa podmienky.

Získané poznatky a skúsenosti z vývoja zariadenia jednoznačne ukazujú, že najväčší potenciál pre ďalšie zlepšenia spočíva v rozšírení systému o nové funkcie a zvýšení univerzálnosti.

6 TEORETICKÉ A PRAKTICKÉ PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Kapitola sumarizuje hlavné teoretické a praktické prínosy dizertačnej práce, ktoré boli dosiahnuté v oblasti vývoja, implementácie a hodnotenia automatizovaného systému pre realizáciu jazdných skúšok.

Teoretické prínosy:

- Zlepšenie vedeckého poznania v oblasti jazdných skúšok.
- Rozvoj teórie automatizácie pri experimentálnych meraniach.
- Identifikácia faktorov ovplyvňujúcich presnosť a opakovateľnosť.
- Návrh metodiky hodnotenia vhodnosti magnetického uchytenia experimentálnych zariadení k podlahe vozidla.
- Návrh hodnôt pre PID reguláciu aktuátorov.

Praktické prínosy:

- Vývoj a overenie originálneho, funkčného a ekonomicky dostupného automatizovaného systému.
- Zhotovenie mechanickej časti konštrukcie.
- Zhotovenie elektrotechnickej časti.
- Vývoj softvérovej časti.
- Zvýšenie objektivity a zníženie vplyvu ľudského faktora pri realizácii jazdných skúšok.
- Zlepšenie efektivity, presnosti a opakovateľnosti výskumných a testovacích procesov.
- Široká aplikovateľnosť, modularita a potenciál pre ďalší rozvoj navrhnutého riešenia.
- Návrhy na optimalizáciu a ďalší rozvoj pre prax.
- Realizácia „proof of concept“ predprípravy pre smerové ovládanie vozidla.

ZÁVER

Predkladaná dizertačná práca sa komplexne zaoberala problematikou zvýšenia presnosti a opakovateľnosti realizácie jazdných skúšok s dôrazom na automatizáciu ovládania pedálov vozidla. Hlavným cieľom bolo analyzovať súčasné metódy merania jazdných vlastností, identifikovať ich obmedzenia, a navrhnúť, skonštruovať a experimentálne overiť vlastný robotický systém, ktorý by tieto nedostatky minimalizoval.

V úvodných kapitolách bola detailne rozpracovaná právna a normatívna báza v oblasti skúšania vozidiel, popísané základné pojmy z dynamiky vozidla a analyzované aktuálne trendy vo využívaní automatizovaných testovacích systémov. Nosnú časť práce tvoril návrh, konštrukcia a implementácia originálneho robotického systému na automatizované ovládanie brzdových a akceleračných pedálov. Pri návrhu bola zvolená modulárna architektúra s dôrazom na ekonomickú dostupnosť, bezpečnosť a univerzálnosť použitia v rôznych vozidlách. Experimentálna časť práce, zahŕňajúca porovnanie manuálneho, poloautomatizovaného a plne automatizovaného režimu jazdných skúšok (zrýchlenie, brzdenie, celkový priebeh jazdy), jednoznačne potvrdila prínos navrhovaného riešenia. Výsledky experimentov preukázali, že plne automatizovaný systém umožnil dosiahnuť štatisticky významne vyššiu presnosť a najnižšie rozptyly nameraných údajov v porovnaní s ostatnými režimami.

Teoretický prínos práce spočíva v prehĺbení poznatkov v oblasti automatizácie jazdných skúšok, návrhu metodiky testovania robotických systémov v tejto oblasti, identifikácii faktorov ovplyvňujúcich presnosť a v návrhu hodnôt pre PID reguláciu použitých aktuátorov. Praktický prínos predstavuje samotný vyvinutý, funkčný a ekonomicky dostupný automatizovaný systém (investičné náklady cca 2 217 €). K ďalším praktickým prínosom patrí realizácia nedeštruktívneho magnetického uchytenia, zhotovenie modulárnej mechanickej a elektrotechnickej časti, a vývoj flexibilnej softvérovej časti s hierarchickou PID reguláciou.

Z diskusie a zhodnotenia výsledkov vyplýva niekoľko odporúčaní a možných smerov pre ďalší výskum. Perspektívne je najmä rozšírenie systému o smerové ovládanie (volant) a plne automatizované riadenie všetkých ovládacích prvkov vozidla, vrátane spojky a radenia prevodových stupňov.

Navrhnutý a overený robotický systém predstavuje ekonomicky dostupnú, flexibilnú a opakovateľnú platformu pre ďalšie experimenty, validáciu meraní a vývoj nových metód v oblasti automatizovaných jazdných skúšok. Výsledky práce potvrdzujú, že využitie takýchto systémov významne prispieva k zvýšeniu kvality, objektivity a opakovateľnosti realizovaných testov, čo má pozitívny dopad na homologizáciu, vývoj a v konečnom dôsledku aj na bezpečnosť vozidiel.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

[1] TR CU 018/2011 On safety of wheeled vehicles | Schmidt & Schmidt. In [online]. [cit. 2025-04-13]. Dostupné na internete: <https://schmidt-export.com/eac-certification/tr-cu-0182011-safety-wheeled-vehicles>.

[2] MILLIKEN, W. - MILLIKEN, D.L. Race Car Vehicle Dynamics. In [online]. 1994. [cit. 2025-04-14]. Dostupné na internete: <https://www.semanticscholar.org/paper/Race-Car-Vehicle-Dynamics-Milliken-Milliken/9d5d2cfab23a60fb29ea6ac001641538df06f311>.

[3] J670_202206: Vehicle Dynamics Terminology - SAE International. In [online]. [cit. 2025-05-30]. Dostupné na internete: <https://www.sae.org/standards/content/j670_202206/>.

[4] ONDRUŠ, J. Základy súdneho inžinierstva v odbore Doprava cestná. . 1. vyd. Bratislava: DOLIS, 2025. 181 s. ISBN 978-80-8181-052-7.

[5] ISO 3888-2:2011. In ISO [online]. [cit. 2024-01-23]. Dostupné na internete: <https://www.iso.org/standard/57253.html>.

[6] BÎNDAC, I.-M. et al. Theoretical and experimental research on the double lane change maneuver. In MATEC Web of Conferences . 2022. Vol. 373, s. 00054. .

[7] KUTLUAY, E. - WINNER, H. Assessment methodology for validation of vehicle dynamics simulations using double lane change maneuver. . 2012. 1 s. ISBN 978-1-4673-4779-2.

[8] SEHOVIC, J. - PIKULA, B. CONTRIBUTION TO THE DETERMINATION OF VEHICLES BRAKING SYSTEM EFFICIENCY USING MEMS ACCELEROMETERS. . 2022. .

[9] ISO 4138:2021. In ISO [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné na internete: <https://www.iso.org/standard/81710.html>.

[10] Consumer Information Regulations; Federal Motor Vehicle Safety Standards; Rollover Resistance. In Federal Register [online]. 2002. [cit. 2025-05-04]. Dostupné na internete: <https://www.federalregister.gov/documents/2002/10/07/02-25115/consumer-information-regulations-federal-motor-vehicle-safety-standards-rollover-resistance>.

[11] ISO 7975:2019. In ISO [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné na internete: <https://www.iso.org/standard/67974.html>.

[12] ISO 21994:2022. In ISO [online]. [cit. 2025-05-30]. Dostupné na internete: <https://www.iso.org/standard/84163.html>.

[13] Sohu.com In [online]. [cit. 2025-03-31]. Dostupné na internete: <https://www.sohu.com/a/www.sohu.com/a/527121151_134157>.

[14] DRALLE, J. Akkus im Labor-Test: VW ID.3 gegen Tesla Model 3: Tesla top, VW dicht dran. In auto motor und sport [online]. 2021. [cit. 2025-03-31]. Dostupné na internete: <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/akku-test-tu-muenchen-vw-id3-tesla-model-3/>.

[15] AMZS Doživetje: Tempelj oprijema in vodljivosti. In AMZS [online]. [cit. 2025-03-31]. Dostupné na internete: <https://www.amzs.si/motorevija/mobilnost/na-poti/2022-12-21-dozivetje-tempelj-oprijema-in-vodljivosti>.

[16] LA36: Odolný elektrický lineární pohon pro náročné prostředí. In [online]. [cit. 2025-05-30]. Dostupné na internete: <https://www.linak.cz/produkty/line%C3%A1rn%C3%AD-pohony/la36/#/datasheet>.
[17] LA-T5,max 3500N 170mm/s speed. In [online]. [cit. 2025-05-31]. Dostupné na internete: <https://www.gomotorworld.com/pd?product_id=63>.
[18] INA VBOX Automotive - Speed & Position Anywhere. - VBOX AUTOMOTIVE. In [online]. [cit. 2025-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.vboxautomotive.co.uk/index.php/en/>.
[19] Techfun [Online]. 2023. [cit. 2025-05-20]. Dostupné na internete: <https://techfun.sk/produkt/elm327-bluetooth-diagnostika-pre-auta/>.
[20] Techfun [Online]. 2020. [cit. 2025-04-28]. Dostupné na internete: <https://techfun.sk/produkt/gps-modul-neo-m8n/>.
[21] AZIZ, T.S.T., Poh Ping Em, Nor Azlina Binti Ab Vehicle Localization Based On IMU, OBD2, and GNSS Sensor Fusion Using Extended Kalman Filter. In IJTech - International Journal of Technology [online]. [cit. 2025-05-30]. Dostupné na internete: <https://ijtech.eng.ui.ac.id/article/view/6649>.
[22] Pedal Force Sensor. In RACELOGIC Support Centre [online]. 2019. [cit. 2025-05-19]. Dostupné na internete: <https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Product_Info/Sensors/Pedal_Force_Sensor>.
[23]] Technical Specifications - IMU04. In RACELOGIC Support Centre [online]. 2023. [cit. 2025-05-19]. Dostupné na internete: <https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Product_Info/Modules_and_Accessories/Inertial_Measurement_Units/IMU04/IMU04_-_User_Guide/06_Technical_Properties_-_IMU04/Technical_Specifications_-_IMU04>.
[24] Technical Specifications - VBOX 3i Dual Antenna (v5). In RACELOGIC Support Centre [online]. 2023. [cit. 2025-05-19]. Dostupné na internete: <https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Product_Info/VBOX_Data_Loggers/VBOX_3i_Product_Range/VBOX_3i_Dual_Antenna/VBOX_3i_Dual_Antenna_(v5)/VBOX_3i_Dual_Antenna_(v5)_with_Firmware_Version_3.0/User_Guide_-_VBOX_3i_Dual_Antenna_(v5)_with_Firmware_Version_3.0/06_Technical_Properties/Technical_Specifications_-_VBOX_3i_Dual_Antenna_(v5)>.

ZOZNAM NAJDÔLEŽITEJŠÍCH PUBLIKOVANÝCH PRÁC

Jančár, Arnold. Rozloženie záťaže na nápravy jazdnej súpravy [elektronický dokument]: prípadová štúdia: a case study In: Svet dopravy: vedecký-recenzovaný online časopis. Bratislava: Asociácia Poskytovateľov Monitorovacích Satelitných Technológií a Inteligentných Dopravných systémov ASATECH, 2023, č. 2, s. 24-32 [online]. ISSN (online) 1338-9629.

Jančár, Arnold. Presnosť smartfónu pri meraní brzdného spomalenia konkrétneho vozidla [elektronický dokument] In: Svet dopravy: vedecký-recenzovaný online časopis. Bratislava: Asociácia Poskytovateľov Monitorovacích Satelitných Technológií a Inteligentných Dopravných systémov ASATECH, 2024, č. 1, s. 25-34 [online]. ISSN (online) 1338-9629.

Jančár, Arnold. Correct distribution of the selected type of goods on the loading area of the semi-trailer In: PHD Progress: vedecký časopis študentov doktorandského štúdia Fakulty prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov Žilinskej univerzity v Žiline. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline. Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, 2022, Roč. 10, č. 2, s. 1-7 [tlačená forma]. ISSN 1339-1712.

Ondruš, Ján, Jančár, Arnold, Gogola, Marián, Varga, Peter, Šarić, Željko, Caban, Jacek. Smartphone sensors in motion [elektronický dokument]: advancing traffic safety with mobile technology. DOI 10.3390/app14135404 In: Applied sciences. Bazilej: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024, Roč. 14, č. 13, art. no. 5404, s. [1-23] [online]. ISSN (online) 2076-3417. https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5404. https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13.

Jančár, Arnold, Ondruš, Ján, Gogola, Marián, Šarić, Željko. Comparison of breath alcohol measuring devices. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.312 In: TRANSCOM 2023: 15th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport. Amsterdam: Elsevier, 2023, s. 1500-1507 [online].

Jančár, Arnold, Ondruš, Ján. Assessment of the correct distribution of the selected type of goods on the loading area of the semi-trailer [elektronický dokument]: case study. DOI 10.1007/978-3-031-52652-7_40 In: Transbaltica 14: Transportation Science and Technology: Proceedings of the 14th International Conference. Cham: Springer Nature, 2024, s. 411-420 [tlačená forma] [online]. ISBN 978-3-031-52651-0. ISBN (elektronické) 978-3-031-52652-7.

SÚHRN

Dizertačná práca sa zaoberá problematikou zvyšovania presnosti a opakovateľnosti realizácie jazdných skúšok cestných motorových vozidiel. S rastúcimi nárokmi na bezpečnosť, komfort a environmentálnu efektivitu vozidiel narastá význam objektívneho a spoľahlivého testovania ich dynamických vlastností. Tradičné skúšky, závislé od vodiča, sú náchylné na odchýlky spôsobené ľudským faktorom. Cieľom práce preto bolo vyvinúť a experimentálne overiť vlastný automatizovaný robotický systém na ovládanie pedálov vozidla, ktorý by eliminoval tieto vplyvy.

Práca zahŕňa návrh, vývoj a testovanie komplexného systému pozostávajúceho z mechanickej, elektrotechnickej a softvérovej časti. Systém bol konštruovaný ako univerzálny, s dôrazom na modulárnosť, jednoduchú inštaláciu a vysokú opakovateľnosť činností. Boli realizované experimenty porovnávajúce manuálny, poloautomatizovaný a plne automatizovaný režim v podmienkach reálnej prevádzky aj v laboratóriu.

Výsledky ukázali, že automatizovaný režim dosahuje najvyššiu presnosť a najnižšiu variabilitu v rýchlostných profiloch, čase reakcie aj v brzdných parametroch. Napríklad podiel jázd v tolerancii ±3 km/h bol v automatizovanom režime 100 %, zatiaľ čo v manuálnom len 10 %. Pri zrýchlení a brzdení bol zaznamenaný významný pokles rozptylu aj zlepšenie kľúčových dynamických veličín v prospech automatizácie.

Záverom možno konštatovať, že navrhnutý systém významne zlepšuje kvalitu a objektivitu jazdných skúšok a predstavuje efektívne riešenie pre výskum a vývoj v oblasti automobilovej dopravy.

SUMMARY

The dissertation deals with the issue of increasing the accuracy and repeatability of the implementation of driving tests of road vehicles. With increasing demands on safety, comfort and environmental efficiency of vehicles, the importance of objective and reliable testing of their dynamic properties is growing. Traditional driver-dependent tests are susceptible to human error. Therefore, the aim of this work was to develop and experimentally validate a custom automated robotic system for vehicle pedal control that would eliminate these influences.

The work includes the design, development and testing of a complex system consisting of mechanical, electrical and software parts. The system has been designed as a general-purpose system, with emphasis on modularity, ease of installation and high repeatability of operations. Experiments were carried out comparing manual, semi-automated and fully automated modes under real operation conditions and in the laboratory.

The results showed that the automated mode achieves the highest accuracy and the lowest variability in speed profiles, reaction times and braking parameters. For example, the proportion of trips within ±3 km/h was 100% in the automated mode, while only 10% in the manual mode. For acceleration and braking, there was both a significant decrease in variance and an improvement in key dynamic variables in favour of automation.

In conclusion, the proposed system significantly improves the quality and objectivity of driving tests and represents an effective solution for research and development in the field of automotive transport.