



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Návrh systému řízení zadních kol pro experimentální elektrické vozidlo

## Bakalářská práce

*Studijní program:* N2612 – Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy  
*Autor práce:* **Tomáš Hyška**  
*Vedoucí práce:* Ing. Lukáš Krčmář  
*Konzultant:* Ing. Pavel Jandura, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# System design of rear wheel steering for experimental electric car

## Bachelor thesis

*Study programme:* N2612 – Electrical engineering and informatics  
*Study branch:* 2612R011 – Electronic Information and Control systems

*Author:* **Tomáš Hyška**  
*Supervisor:* Ing. Lukáš Krčmář  
*Consultant:* Ing. Pavel Jandura, Ph.D.





## Zadání bakalářské práce

# Návrh systému řízení zadních kol pro experimentální elektrické vozidlo

*Jméno a příjmení:* **Tomáš Hyška**  
*Osobní číslo:* M16000077  
*Studijní program:* B2612 Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* Elektronické informační a řídicí systémy  
*Zadávací katedra:* Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Akademický rok:* 2019/2020

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s konceptem experimentálního elektromobilu.
2. Proveďte rešerši požadavků na moderní vícecestpá vozidla s ohledem na ovladatelnost v městských prostorech.
3. Na základě studie navrhňte konkrétní pohon a převodové ústrojí. Pro tyto proveďte simulace jízdy a případně proveďte korekce.
4. Pro daný pohon navrhňte řídicí systém a otestujte jej v laboratorních podmínkách, případně již na prototypu experimentálního elektromobilu.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby dokumentace  
30–40 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] KREUTZ, Marlene, Martin HORN a Josef ZEHETNER. Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering systems. *Vehicle System Dynamics*. 2009, 47(12), 1551-1564. DOI: 10.1080/00423110802691507. ISSN 0042-3114.
- [2] H. Bischof, B. Donhauser and K. Meder, „The ECU of a rear wheel steering system,“ 1991 Eighth International Conference on Automotive Electronics, London, 1991, pp. 208-213.
- [3] ROMPOTL, Tomáš. Návrh systému přiřizování zadní nápravy experimentálního elektromobilu. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci.
- [4] BANZI, Massimo. Getting started with Arduino. 2nd ed. Farnham: O'Reilly, 2011, 299 pages. ISBN 978-1-9309-879.

*Vedoucí práce:*

Ing. Lukáš Krčmář  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Konzultant práce:*

Ing. Pavel Jandura, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:*

10. října 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:*

18. května 2020

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu



## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

1. června 2020

Tomáš Hyška

## Abstrakt

Cílem bakalářské práce je seznámení s konceptem experimentálního elektromobilu, řešení požadavků na moderní vícestopá vozidla s ohledem na ovladatelnost v městských prostorech a návrh konkrétního pohonu a převodového ústrojí. Práce začíná seznámením s návrhem a funkcí elektromobilu, řešení požadavků na automobil a výhod přiřizování zadní nápravy a problémech, které toto řešení představuje. Následně se zabývá návrhem konkrétního systému a na závěr instalací a zhodnocením vytvořeného systému.

**Klíčová slova:** Řízení, elektrické, vozidlo, náprava, zadní, kolo, návrh, systém.

## Abstract

The goal of this bachelor thesis is research of experimental electric vehicle, requirement on modern vehicles about control in city areas and designing specific all wheel steering system and gearbox. Thesis begins with informations about design and functionality of electric vehicle, finding requirements for automobile, advantages of rear wheel steering and troubles using this system. This thesis continues with designing rear wheel steering for this car, instalation of said system in the vehicle and evaluation of it.

**Keywords:** Steering, electric, vehicle, axle, rear, wheel, design, system, 4WS, AWS.

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Lukášovi Krčmářovi za rady a pomoc při návrhu systému, jeho instalaci na vozidlo a zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval svojí rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

# Obsah

Seznam obrázků . . . . .	8
Seznam zkratek . . . . .	11
<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Koncepce experimentálního elektromobilu</b>	<b>13</b>
<b>2 Řízení všech kol</b>	<b>15</b>
2.1 Teorie řízení všech kol . . . . .	15
2.2 Historie . . . . .	16
2.3 HICAS . . . . .	16
2.4 SUPER HICAS . . . . .	17
2.5 Audi Dynamic all-wheel steering . . . . .	18
2.6 Požadavky na řízení všemi koly . . . . .	19
2.7 Výhody a nevýhody systému 4WS . . . . .	19
2.7.1 Výhody . . . . .	19
2.7.2 Nevýhody . . . . .	19
<b>3 Geometrie řízení</b>	<b>20</b>
3.1 Ackermannova geometrie . . . . .	21
3.2 Algoritmus řízení . . . . .	23
3.2.1 Rovnice natočení . . . . .	23
<b>4 Komponenty systému řízení všech kol</b>	<b>25</b>
4.1 Pohon řízení . . . . .	25
4.2 Řídící jednotka servomotoru . . . . .	26
4.3 Šneková převodovka . . . . .	28
4.4 Podvolantová jednotka . . . . .	28
4.5 Arduino due + CAN-Shield . . . . .	30
4.6 Měnič napětí . . . . .	30
4.7 CAN bus . . . . .	31
4.7.1 CAN bus v prostředí Arduino IDE . . . . .	32
<b>5 Testování systému a instalace na vozidlo</b>	<b>33</b>
5.1 První test . . . . .	33
5.2 Testování na vozidle . . . . .	34
5.3 Montáž na vozidlo . . . . .	35

5.4	Kompletace systému . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Software pro řízení zadní nápravy</b>	<b>37</b>
6.1	Program pro gateway arduino . . . . .	37
6.2	Hlavní program natáčení zadní nápravy . . . . .	38
6.3	Blokové schéma zapojení . . . . .	41
	<b>Závěr</b>	<b>42</b>
	<b>Použitá literatura</b>	<b>44</b>
	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>45</b>

## Seznam obrázků

1.1	Vozidlo eŠus . . . . .	13
1.2	Vozidlo zdvyžené v laboratoři [3] . . . . .	14
2.1	Natočení kol ve fázi a proti fázi [5] . . . . .	15
2.2	HICAS [6] . . . . .	16
2.3	Super HICAS [6] . . . . .	17
2.4	Audi Dynamic all-wheel steering [7] . . . . .	18
3.1	Příklady špatné geometrie vozidla a její vliv na pneumatiku [9] . . . . .	20
3.2	Poloha středu otáčení. [10] . . . . .	21
3.3	Křivka chyb a ideální přímka. [10] . . . . .	22
3.4	Vliv směrových úchylek na polohu středu otáčení. [10] . . . . .	22
3.5	Závislost natočení zadních kol na rychlosti. . . . .	24
3.6	Natočení zadních kol v závislosti na rychlosti a natočení předních kol. . . . .	24
4.1	Servomotor 640-DST-A6TK1 . . . . .	25
4.2	Specifikace servomotoru . . . . .	25
4.3	Řídící jednotka servomotoru . . . . .	26
4.4	Otestování pohybu motoru . . . . .	26
4.5	Nastavení servomotoru v SW výrobce . . . . .	27
4.6	Šneková převodovka . . . . .	28
4.7	Podvolantová jednotka. . . . .	28
4.8	Zadní strana podvolantové jednotky. . . . .	29
4.9	Arduino + CAN-Shield . . . . .	30
4.10	Rozdělení CAN zprávy [12] . . . . .	31
4.11	Inicializace CAN bus . . . . .	32
4.12	Příklad komunikace . . . . .	32
5.1	Prvotní zapojení a testování . . . . .	33
5.2	Testování na vozidle . . . . .	34
5.3	Průběh zapojení . . . . .	35
5.4	Kompletní zapojení systému na vozidle . . . . .	36
6.1	Hlavní smyčka programu . . . . .	37
6.2	Deklarace proměnných pro výpočet . . . . .	38
6.3	Nastavení servomotoru . . . . .	38

6.4	Načtení dat z CAN 0	39
6.5	Načtení dat z CAN 1	39
6.6	Změna maximálního natočení nápravy	40
6.7	Výpočet a odeslání polohy	40
6.8	Blokové schéma systému	41

## Seznam zkratek

<b>TUL</b>	Technická univerzita v Liberci
<b>FM</b>	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
<b>4WS</b>	Four Wheel Steering
<b>AWS</b>	All Wheel Steering
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>HICAS</b>	High Capacity Actively Controlled Steering
<b>SUPER HICAS</b>	Super High Capacity Actively Controlled Steering
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>CANH</b>	Controller Area Network High
<b>CANL</b>	Controller Area Network Low
<b>COM</b>	Communication port
<b>IP</b>	Ingress Protection
<b>ID</b>	Identifier
<b>GND</b>	Ground
<b>SOF</b>	Start of Frame
<b>RTR</b>	Remote Transmission Request
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>ACK</b>	Acknowledge
<b>EOF</b>	End of Frame
<b>ECU</b>	Electronic Control Unit



# Úvod

Cílem bakalářské práce je návrh a sestavení systému řízení zadních kol pro experimentální elektrické vozidlo. Tato práce vznikla za účelem vylepšení ovladatelnosti a hbitosti vozidla při jízdě po areálu školy a vyjíždění z laboratoří. Dále tento systém bude sloužit při propagaci na fakultních a univerzitních akcích, jako je den otevřených dveří. Teoretická část práce začíná seznámením se s koncepcí experimentálního elektromobilu a základní teorií řízení všech kol. Dále rozebírá historii těchto systémů, jejich konstrukci na již vyvinutých produkčních automobilech a výhody s nevýhodami těchto systémů. Teoretická část končí základním pohledem do geometrie řízení vozidel a návrhem rovnice natočení použitou v tomto konkrétním systému.

Práce pokračuje popsáním jednotlivých komponentů použitých pro sestavení systému, popisem sběrnice CAN bus a její komunikace. Praktická část vrcholí popisem postupu montáže systému na vozidlo a popisu jeho ovládacího programu. Nedílnou součástí práce je i blokové schéma celého zapojení.

# 1 Koncepce experimentálního elektromobilu

Experimentální elektrické vozidlo eŠus vzniklo ve spolupráci Ústavu MTI a Katedry vozidel a motorů Fakulty strojní v rámci projektu "elektromobilita na TUL". Studenti roku 2011 započali práce na vozidle eŠus v rámci úkolu navrhnout a postavit první elektromobil na TUL. Konstrukci elektromobilu navrhla fakulta strojní. Jedná se o pevný rám z extrudovaných hliníkových stavebnicových profilů. Díky tomu má elektromobil tuhou konstrukci při zachování nízké hmotnosti, která je do 550 kg. O pohon elektromobilu se stará motor Freeair HCS s výkonem 40 kW a kroutícím momentem 60 Nm, elektromobil dokáže překročit rychlost  $100 \text{ km h}^{-1}$ . Baterie elektromobilu jsou umístěny v podlaze. Akumulátor je tvořen články Winston batt. LiFePO4 17s / 200 Ah. Výhodou těchto článků je využitelné rozmezí teplot mezi  $-45 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tento rozsah dostatečně stačí na místní klimatické podmínky v kterých je naměřené Absolutní minimum minimální denní teploty  $-42,2 \text{ }^\circ\text{C}$  a Absolutní maximum maximální denní teploty  $+40,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Teoretický dojezd elektromobilu je 100 - 150 km. [1] [2]



Obrázek 1.1: Vozidlo eŠus

Elektromobil má řízenou a hnanou přední nápravu a nyní i přiřizovatelnou zadní nápravu. Technicky se jedná o přední nápravu ze Škody Fabia použitou na přední i zadní nápravě vozidla eŠus. Zadní náprava je namontována obráceně oproti přední. Zadní nápravou se otáčí pomocí hřídele, který je vyveden do kufru elektromobilu. Díky pracem, které již byly na vozidle provedeny víme, že výkon potřebný k otočení zadních kol je 188,6 W. Tento výkon je minimální nutný k otočení, je tedy nutné ho předdimenzovat z důvodu né vždy ideálních podmínek a použití šnekové převodovky k otáčení se zadní nápravou. Motor se šnekovou převodovkou funguje jako "volant" pro zadní nápravu. [1] [2]

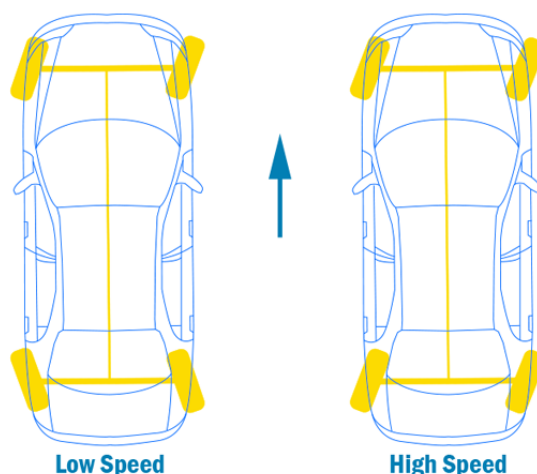


Obrázek 1.2: Vozidlo zdvyžené v laboratoři [3]

## 2 Řízení všech kol

### 2.1 Teorie řízení všech kol

Řízení všech kol, neboli přiřizování zadní nápravy umožňuje natáčet zadními koly během manévrování automobilu. Nemělo by dojít k omylu, že se jedná o pohon všech kol, kde jsou všechna kola hnaná. V tomto systému nedochází k pohánění zadních kol, pouze se s nimi zatáčí. Systém slouží k vylepšení ovládání vozidla a možnosti projetí ostřejších zatáček. U produkčních automobilů dochází k nedotáčivosti, případně přetáčivosti. Pokud by vozidlo dokázalo automaticky kompenzovat tyto jevy, řidič by cítil téměř neutrální jízdní projev skoro za každých podmínek. Přiřizování zadní nápravy je vážný pokus, jak neutrálního jízdního projevu docílit. Přední kola se starají o většinu řízení. Natočení zadních kol je většinou limitováno o polovinu, pokud se jedná o protichůdné natočení. Když se přední i zadní kola natáčejí stejným směrem, jsou ve fázi a dochází k bočnímu pohybu automobilu v nízké rychlosti. Pokud se zadní kola natáčejí opačně oproti předním kolům, takzvaně v proti fázi, dochází v nízkých rychlostech k ostřejšímu zatáčení. Tato práce je zaměřena na vyvinutí systému řízení všech kol, který by těchto vlastností využíval. Cílem systému je vylepšení stability vozidla při manévrování ve vysoké rychlosti natočením ve fázi a vylepšení manévrovatelnosti vozidla při nízké rychlosti natočením kol proti fázi. [4]



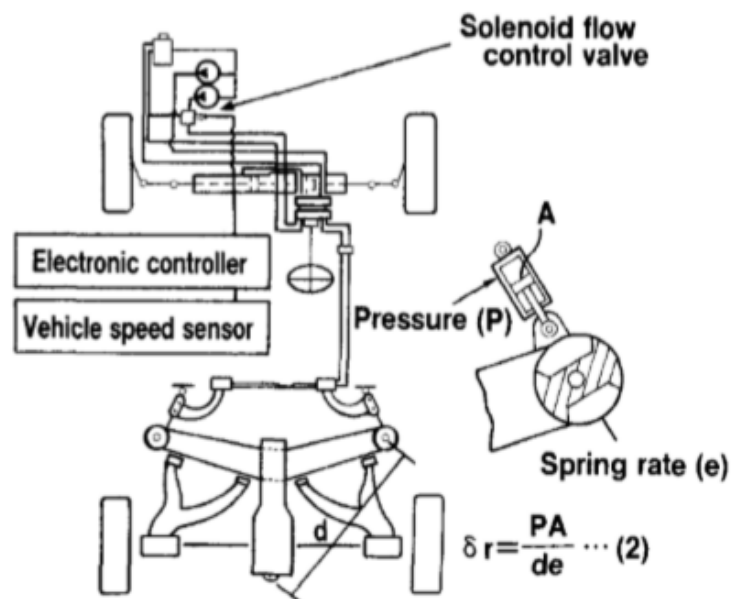
Obrázek 2.1: Natočení kol ve fázi a proti fázi [5]

## 2.2 Historie

Nápad na zmenšení poloměru otáčení zadními koly je tu již dlouho. V roce 1907 byl podán v Japonsku patent na systém řízení všech kol, ve kterém byla hřídelí spojena přední a zadní náprava. Systém protichůdného natočení kol při nízké rychlosti se již dlouho využívá u vojenských a stavebních vozidel. Praktické využití řízení všech kol v osobním automobilu uvedl na trh jako první NISSAN v roce 1985 systémem HICAS. V roce 1989 byl vylepšený na Super HICAS. [6]

## 2.3 HICAS

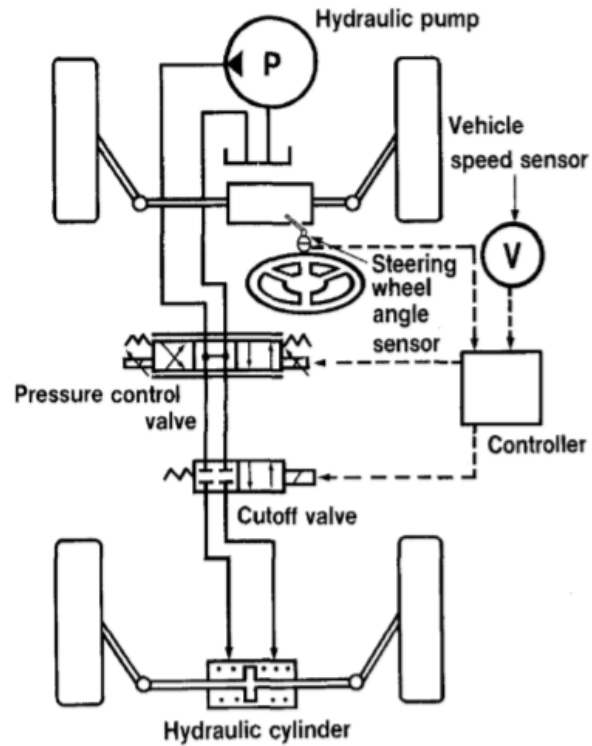
Systém HICAS využíval elektronicky řízený hydraulický systém pro aktivní natočení zadních kol. Funkčnost systému spočívá v reaktivní síle, která působí na přední kola během zatáčení. Tuto sílu detekuje hydraulický kontrolní ventil. Tento ventil slouží k vytvoření hydraulického tlaku úměrného k postraní akceleraci vozidla. Hydraulický tlak je indukován přímo do malého hydraulického válce, který způsobí, že se gumové izolátory zadního odpružení odkloní a tímto otočí zadními koly. Systém je zhotoven ze solenoidového ventilu pro řízení průtoku vody pomocí řídicí jednotky. Díky tomu je možné upravovat míru natočení v závislosti na rychlosti. [6]



Obrázek 2.2: HICAS [6]

## 2.4 SUPER HICAS

Super HICAS systém byl vyvinut z důvodu požadavku střídání souhlasného a nesouhlasného natočení kol. Byl kladen důraz na zjednodušení systému a zvýšení jeho spolehlivosti. Hydraulická soustava se skládá z hydraulické pumpy, která slouží jako zdroj hydraulického tlaku, nádrže a ventilu na regulaci tlaku. Díky tomu systém umožňuje dostačující rychlost odezvy systému. Využívá se senzoru natočení volantu a rychloměru. [6]

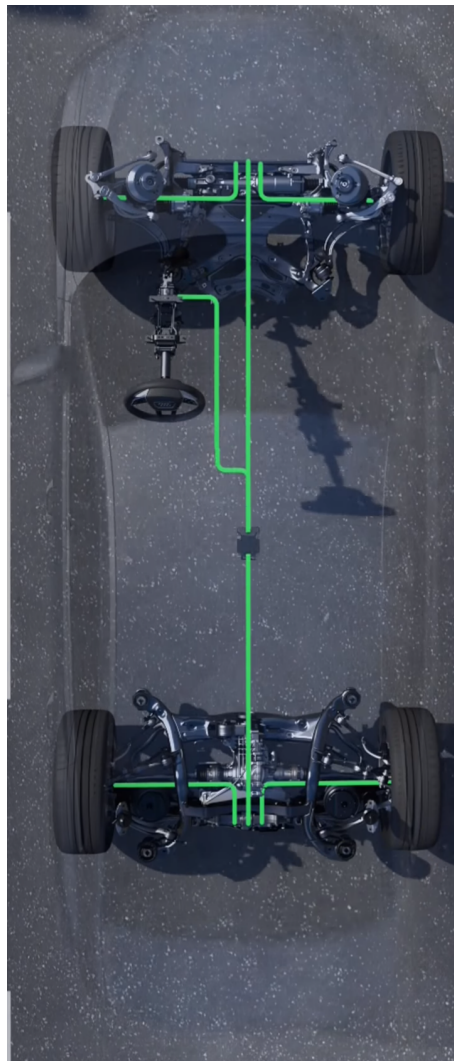


Obrázek 2.3: Super HICAS [6]



## 2.5 Audi Dynamic all-wheel steering

Jedním z novějších systémů řízení všech kol je Audi Dynamic AWS. Senzor pod volantem odesílá informace o natočení volantu do řídicí jednotky, ta vysílá signál do elektromechanického systému přední a zadní nápravy o úhlu natočení pro dané nápravy. Zadní náprava u tohoto systému připomíná přední nápravu díky namontování řídicí osy. To má pozitivní dopad na rozměry systému a jeho váhu, oproti nezávislému systému. Tento systém využívá pro změnu fázování směru natočení zadních kol rychlost  $60 \text{ km h}^{-1}$ . Maximální výchylka zadních kol je 5 stupňů při natočení proti fázi a 2 stupně při natočení ve fázi. Z důvodu omezeného místa pro montáž na zadní nápravě a přechodové odezvě systému (jak dlouho trvá akčnímu členu prodloužení), jsou aktuálně vyšší vychýlení zadních kol nepoužívána. Díky tomu tento systém dosahuje zmenšení poloměru otáčení až o 1 metr. [7]



Obrázek 2.4: Audi Dynamic all-wheel steering [7]

## 2.6 Požadavky na řízení všemi koly

- Bezpečné zatáčení a manévrování ve všech provozních podmínkách.
- Splnění požadavků na řízení dle § 32 vyhl. č. 102/1995 Sb.
- Splnění Ackermannovy podmínky pro zatáčení.

## 2.7 Výhody a nevýhody systému 4WS

### 2.7.1 Výhody

- Vylepšená stabilita při zatáčení.
- Vylepšená odezva řízení a jeho přesnost.
- Vylepšené manévrování při rychlé změně jízdního pruhu.
- Menší poloměr otáčení vozidla.

### 2.7.2 Nevýhody

- Zvýšení ceny vozidla z důvodu přidání nových komponentů.
- Z důvodu přidání komponent je zde šance na poruchu části systému a tím nefunkčnosti systému řízení zadní nápravy.
- Díky komplikovanosti systému je potřeba zvýšit nároky na bezpečnost a kontrolu tohoto systému.

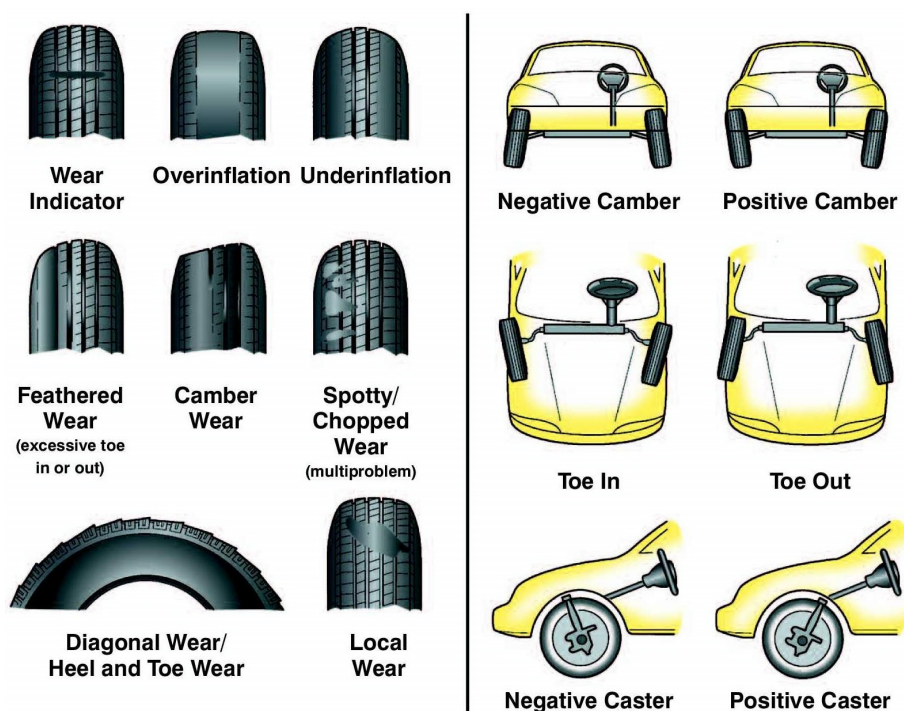


### 3 Geometrie řízení

Postavení a vzájemná poloha kol, náprav a karoserie nebo rámu se souhrnně nazývá geometrie podvozku.

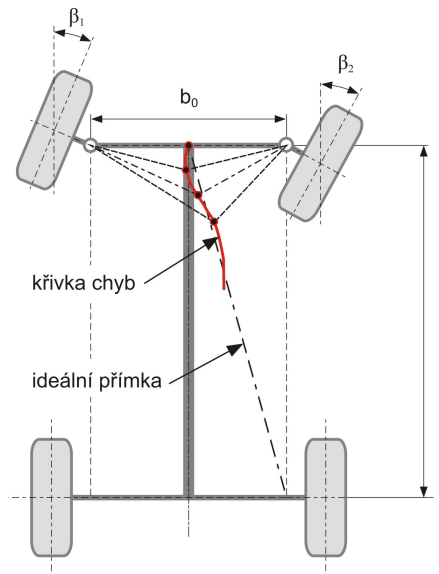
Konstrukce náprav a řízení musí dovolit valení všech kol bez jejich smýkání, a to při jízdě v celém rozsahu propérování. Musí se umožnit snadné natáčení do rejdu a samočinné vracení řídicích kol. Dále má potlačit tendenci kol k rozkmitání při přejetí jakékoliv nerovnosti. Pokud není zajištěna ideální geometrie řízení, dochází při odvalování kola i částečně k jeho smýkání. Následkem je rychlé, nadměrné a nerovnoměrné opotřebení pneumatik a také zhoršená stabilita vozidla během jízdy. Stejná je i situace zadní nápravy. Nápravy k sobě musí být rovnoběžné a obě musí být vzhledem k podélné ose automobilu kolmé a symetricky uloženy.

Při jízdě zatáčkou je pravé kolo oproti levému natočeno v mírně jiném úhlu. To je dáno Ackermanovou podmínkou, kterou řídicí mechanismus vozidla musí splňovat. Tato podmínka je základním předpokladem pro správné odvalování řízených kol. [8]



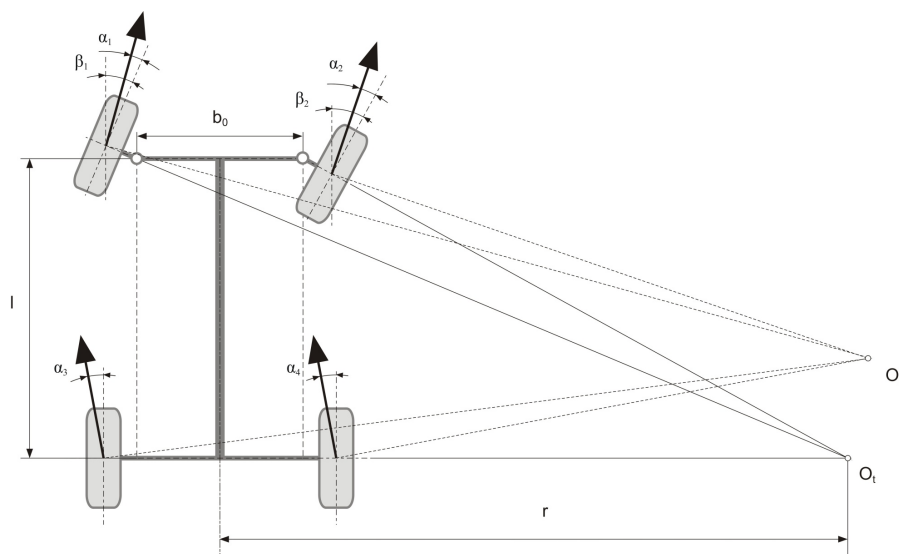
Obrázek 3.1: Příklady špatné geometrie vozidla a její vliv na pneumatiku [9]





Obrázek 3.3: Křivka chyb a ideální přímka. [10]

Při zatáčení v reálném prostředí vznikají na všech kolech směrové odchylky, vyvolávané vlivem poddajnosti pneumatik a odstředivé síly. Směrové výchylky vyjádřené úhlem  $\alpha_1$  posouvají reálný střed otáčení mimo teoretický střed otáčení. Ackermanova geometrie řízení tak platí pouze pro malé rychlosti a ideálně tuhá kola. Vliv výchylek je zobrazen na obrázku. [10]



Obrázek 3.4: Vliv směrových úchylek na polohu středu otáčení. [10]

## 3.2 Algoritmus řízení

Dostupných informací od výrobců automobilů k jejich systémům řízení všech kol příliš není. Většina prací zabývajících se tímto systémem končí v teoretické rovině, nebo neobsahují výpočetní algoritmus natočení a soustředí se pouze na mechanickou stránku systému. Zbytek prací systém většinou řeší pokročilým způsobem, například na základě rychlosti stáčení - yaw rate).

Tento algoritmus je postaven na již vykonané bakalářské práci pana Rompotla. Základem je rozdělení rozsahu jízdní rychlosti vozidla na dvě části. V první části, neboli v nízké rychlosti, se využije nesouhlasného natočení zadních kol pro zmenšení poloměru otáčení vozidla. Ve druhé části, při vyšší rychlosti, se spíše využije souhlasného natočení zadních kol, čímž se zlepší jízdní vlastnosti při rychlém průjezdu zatáčkou, nebo rychlé změně jízdního pruhu. Většinou se volí rychlost mezi 40 a 60 km h<sup>-1</sup>.

### 3.2.1 Rovnice natočení

Průběh natočení zadních kol lze popsat jako závislost na rychlosti vozidla. Tvar průběhu a natočení zadních kol určuje velikost tohoto průběhu. Vzorec pro tvar průběhu natočení zadních kol  $\delta_r(v)[^\circ]$  využitím funkce sinus:

$$\delta_r(v) = \sin((|v| - v_p) \cdot p_l) \cdot \delta_{rmax} \quad (3.1)$$

$$p_l = \left(2 - \frac{|v|}{3 \cdot v_p}\right) \quad (3.2)$$

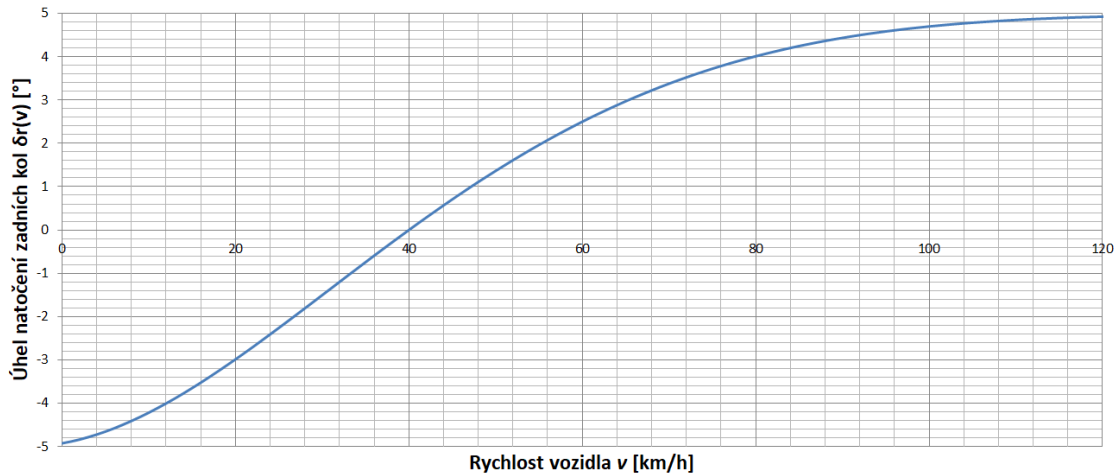
kde je aktuální rychlost vozidla označena jako  $v[\text{km h}^{-1}]$ , zvolená přechodová rychlost ve které se mění fáze natočení zadních kol  $v_p[\text{km h}^{-1}]$  a  $p_l$  je ladící proměnná, která slouží k úpravě strmosti průběhu. Tato ladící proměnná by měla vyhovět pro přechodové rychlosti mezi 35 až 50 km h<sup>-1</sup>.  $\delta_{rmax}[^\circ]$  označuje maximální úhel natočení zadních kol. Násobí se jím funkce sinus, která nabývá hodnot 0 až jedna. Touto rovnicí tedy vypočteme závislost velikosti natočení zadních kol pouze na rychlosti. Je důležité brát zřetel na nedokonalost tohoto vzorce. S původním násobením 4 v rovnici ladící proměnné docházelo při rychlosti nad 108 km h<sup>-1</sup> k postupnému snižování úhlu natočení zadních kol. Změnou této konstanty na 3 došlo k posunutí této meze na 140 km h<sup>-1</sup>. Tato rychlost je dostatečně vyšší nežli konstrukční rychlost vozidla.

Aby jsme zjistili úplné natočení zadních kol  $\delta_r(v, \delta_f)[^\circ]$  se závislostí na rychlosti i natočení předních kol, využijeme vzorec:

$$\delta_r(v, \delta_f) = \delta_r(v) \cdot \frac{\delta_f}{\delta_{fmax}} \quad (3.3)$$

Vzorec se nám rozšířil o  $\delta_f[^\circ]$  značící natočení předních kol a  $\delta_{fmax}[^\circ]$  které označuje maximální natočení předních kol. Výsledný úhel natočení zadních kol je závislý na natočení předních kol a rychlosti vozidla. Rychlost vozidla také určuje fázi natočení zadních kol.

Vzhledem k povaze vozidla eŠus, které se pohybuje pouze po areálu technické univerzity a nedosahuje tedy vysoké rychlosti byla přechodová rychlost zvolena na  $40 \text{ km h}^{-1}$ . Ideální přechodová rychlost by byla  $50 \text{ km h}^{-1}$  u klasického produkčního automobilu, vzhledem k ovladatelnosti ve městě, kde je maximální povolená rychlost  $50 \text{ km h}^{-1}$ . Vzhledem k povaze vozidla a možnosti testování pouze v areálu školy však bude rychlost  $40 \text{ km h}^{-1}$  praktičtější. Maximální natočení zadních kol je zvoleno na  $\pm 5^\circ$ .



Obrázek 3.5: Závislost natočení zadních kol na rychlosti.

V grafu je znázorněna závislost natočení zadních kol pouze na rychlosti vozidla. Záporný úhel natočení do  $40 \text{ km h}^{-1}$  a kladný od této hranice souhlasí s našimi předpoklady, stejně jako maximální úhly natočení zadních kol  $\pm 5^\circ$ .

Pro ověření se provedl výpočet i několika úhlů natočení zadních kol v závislosti na rychlosti i natočení předních kol. Podle servisního manuálu je maximální natočení předních kol  $\delta_{fmax} = 39^\circ 14'$

<b>v [km/h]</b>	<b>δr(v, δf) [°]</b>	<b>δr(v, δf) [°]</b>	<b>δr(v, δf) [°]</b>	<b>δr(v, δf) [°]</b>	<b>δr(v, δf) [°]</b>
	Pro 0°	Pro 10°	Pro 20°	Pro 30°	Pro 39°
0	0	-1,26	-2,51	-3,77	-4,89
10	0	-1,07	-2,15	-3,22	-4,19
25	0	-0,58	-1,15	-1,73	-2,25
35	0	-0,19	-0,38	-0,57	-0,74
40	0	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0	0,76	1,51	2,27	2,95
80	0	1,02	2,04	3,07	3,99

Obrázek 3.6: Natočení zadních kol v závislosti na rychlosti a natočení předních kol.

## 4 Komponenty systému řízení všech kol

Tato část práce je vyhrazena k popsaní jednotlivých prvků systému přiřizování zadní nápravy, jejich funkčnosti a důvodu využití.

### 4.1 Pohon řízení



Obrázek 4.1: Servomotor 640-DST-A6TK1

Pro ovládání natočení zadních kol je využíván servomotor 640-DST-A6TK1 od Kanadské firmy Dynamic motor motion. Motor je z jejich nízko napěťové řady se vstupním napájením 60 V. Jmenovité otáčky servomotoru se pohybují na 3000 ot/min, ale dosáhne až 5000 ot/min. Výstupní výkon servomotoru je 400 W. Tato hodnota je dostatečná, jelikož je zjištěno, že potřebný výkon na otočení zadními koly s použitím šnekové převodovky je 345,1 W. Krytí IP65 by mělo být k tomuto využití dostatečné, jedná se o úplné krytí proti prachu a tryskající vodě ze všech úhlů. Motor je také vhodný díky přesné regulaci pohybu.

<b>Rated Voltage</b>	60 V
<b>Rated Output</b>	400 W
<b>Rated Torque</b>	1.27 Nm
<b>Rated Current</b>	8.4 A
<b>Rated Speed</b>	3000 r/min
<b>Enclosure</b>	IP65

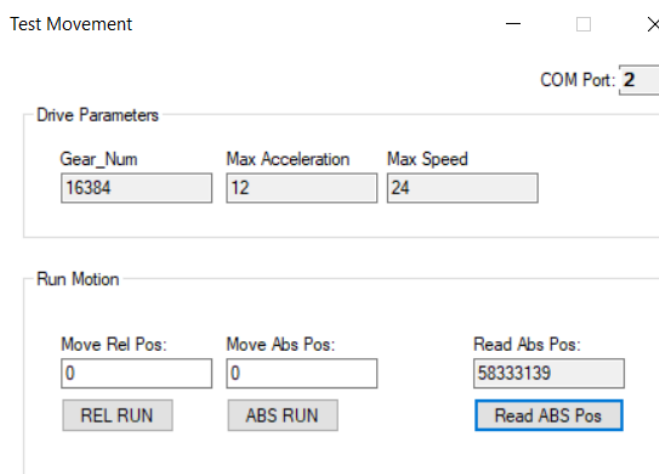
Obrázek 4.2: Specifikace servomotoru

## 4.2 Řídící jednotka servomotoru



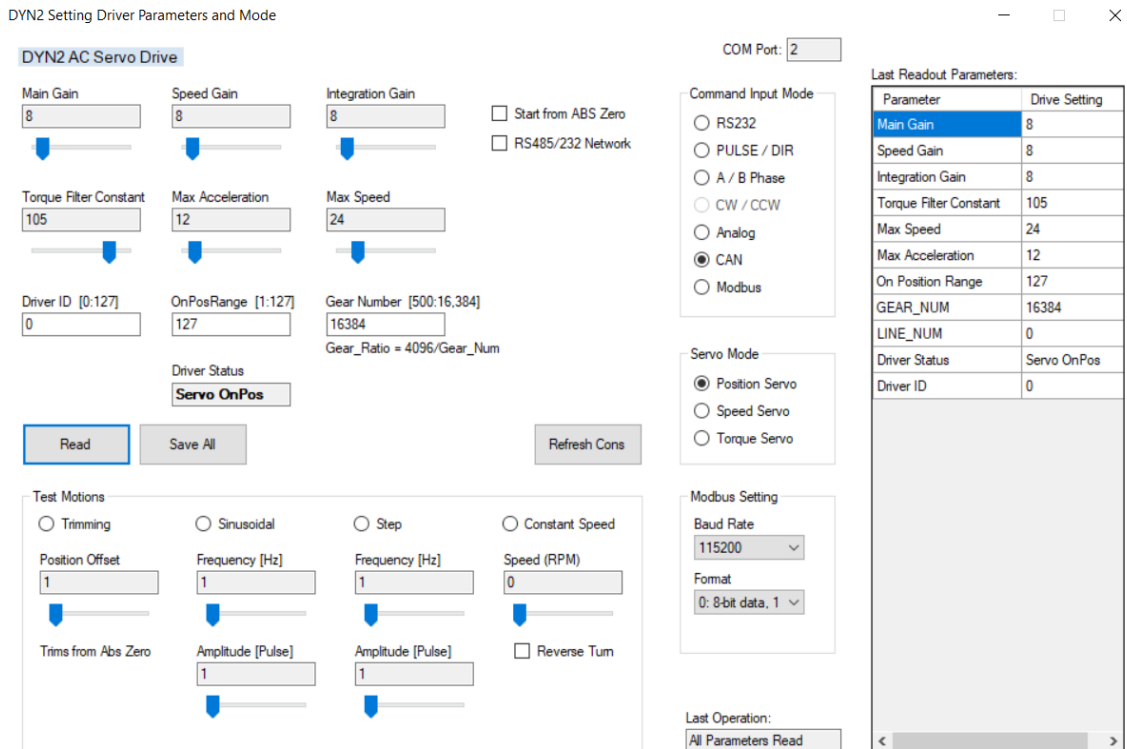
Obrázek 4.3: Řídící jednotka servomotoru

Kontrolér servomotoru je také od firmy Dynamic motor motion. Díky společnému výrobcovi je zajištěna dobrá komunikace a propojení zařízení. Servoměnič lze přesně regulovat natočení motoru. Servoměnič umožňuje komunikaci po sběrnici CAN. To je důležité, neboť veškerá komunikace mezi jednotlivými zařízeními systému řízení zadní nápravy bude probíhat po sběrnici CAN, která je standardem v automobilovém průmyslu. Výrobce dodává vlastní obslužný program, který komunikuje s kontrolerem přes USB. Ten je však vhodný maximálně pro otestování a odladění, protože po odpojení napájení jednotka všechna nastavení vymaže. [12]



Obrázek 4.4: Otestování pohybu motoru

V programu si lze jednoduše vyzkoušet otáčení motoru o relativní, nebo na absolutní pozici. Aktuální absolutní pozici si lze nechat vyčíst.



Obrázek 4.5: Nastavení servomotoru v SW výrobce

V programu lze detailně nastavit veškeré parametry, bohužel většina z nich pouze posuvníkem a nejde u nich měnit hodnoty napsáním číslovky. Servomenič si po vypnutí nepamatuje poslední polohu servomotoru. Je nutné tuto polohu snímat externím snímačem. K tomuto snímání využijeme druhou podvolantovou jednotku, která je namontována na výstupní tyči ze šnekové převodovky.

Při zapnutí programu je vždy nutné nastavit COM port, na kterém je kontrolér připojený. Program si toto nastavení nepamatuje, ani ho nedokáže automaticky vyhledat. Tento software nemá žádné další funkce.

Výrobce poskytuje čísla příkazů, kterými se dotazuje, či nastavuje servomotor. Mezi nejdůležitější patří 0x01 otočení o absolutní pozici. Nastavení rychlosti zisku motoru 0x11, 0x0e zjistí pozici motoru, jeho rychlost a točivý moment. Při nastavení je výhodné zjištění ID a baud rate měniče pomocí 0x06 a pomocí 0x08 lze číst aktuální nastavení servomotoru. [12]



## 4.3 Šneková převodovka



Obrázek 4.6: Šneková převodovka

Šneková převodovka patří mezi nejpoužívanější reduktory, protože jde o efektivní řešení úhlového převodu za přijatelnou cenu. Výhodou je dlouhá životnost, nízká hluchnost a celkem přijatelná účinnost 70 %. Konkrétní převodovka NMRV040 má dostačující převodový poměr 30:1 a je navržena pro použití se servomotorem. Hlavním důvodem pro použití tohoto typu převodovky je její samosvornost. Převodovka je zakoupena z aliexpressu, vypadá však kvalitně.

## 4.4 Podvolantová jednotka

O podvolantové jednotce Škoda nejsou dostupné žádné obecné informace. Důležitou informací je, že podvolantová jednotka v sobě obsahuje čidlo natočení, které absolutní polohu snímače odesílá po sběrnici CAN. Na vozidle jsou podvolantové jednotky nainstalovány dvě. První se nachází pod volantem, kde monitoruje natočení předních kol a druhá za šnekovou převodovkou, kde monitoruje natočení zadních kol. Jelikož mají jednotky stejný identifikátor, není možné je připojit na stejnou CAN síť. Proto byl zvolený CAN shield na arduino se dvěma CAN porty. [13]



Obrázek 4.7: Podvolantová jednotka.



Obrázek 4.8: Zadní strana podvolantové jednotky.

Na podvolantové jednotce využíváme piny v červeném rámečku. Zleva:

- 12V, signál 15 ze spínací skříňky
- Stálé napájení 12V
- Uzemnění GND
- CANH
- CANL

## 4.5 Arduino due + CAN-Shield

Řízení soustavy je postaveno na platformě Arduino Due. Jedná se o mikrokontrolérovou desku založenou na procesoru Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Programování desky probíhá pomocí programu Arduino IDE. Tento program je uživatelsky přívětivý a programování v něm je velice prosté. Propojení s CAN sítí vozidla je zajištěna díky Dual CAN Bus Interface For Arduino Due od firmy Copperhill technologies. Jedná se o CAN shield se dvěma CAN porty. Oba dostupné CAN porty využijeme z důvodu nutnosti rozdělení komunikace obou podvolantových jednotek. Použitý CAN shield slouží jako CAN budič, samotný CAN je implementován přímo na čipu desky Arduino due.



Obrázek 4.9: Arduino + CAN-Shield

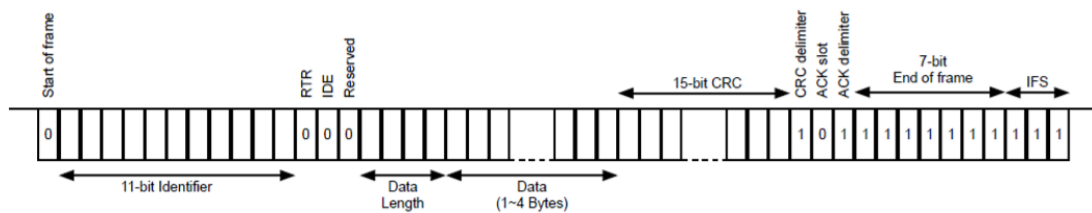
Výrobce Can-Shieldu přidává k zařízení i několik testovacích programů. Jeden z těchto programů byl využit pro základ přiřizování zadní nápravy. Tento základ zajišťuje kontrolu CAN portů, zakomponování knihoven a základní inicializaci.

## 4.6 Měnič napětí

Posledním komponentem systému je měnič napětí SD-1000H-48 od firmy Mean Well. Jedná se o měnič napětí ze 120V na 48V s maximálním výstupním proudem 21A. Tento měnič je použit pro napájení servomotoru.

## 4.7 CAN bus

CAN bus sběrnice je automobilová datová sběrnice vyvinutá Firmou Bosch, která je standartem v automobilovém i leteckém průmyslu. Je to sériová sběrnice pro připojení jednotlivých řídicích jednotek, zařízení a senzorů. Elektrické parametry fyzického přenosu jsou specifikované normou ISO 11898. Výměna a sdílení dat je možné mezi všemi řídicími jednotkami v automobilu. Využití CAN bus technologie výrazně snižuje nutný počet senzorů a drátů v automobilu. Maximální rychlost přenosu na sběrnici je 1 Mb/s. Can zpráva může mít standartní délku (11 bitů indetifikátoru), nebo může být prodloužená (identifikátor má délku 29 bitů). [14]



Obrázek 4.10: Rozdělení CAN zprávy [12]

Rozdělení CAN zprávy:

- **Start of Frame (SOF)** - Označuje počátek datového protokolu, jedná se o dominantní 0.
- **CAN-ID (Identifier)** - Obsahuje identifikaci a stanovuje prioritu.
- **Remote Transmission Request (RTR)** - indikuje jestli zpráva data odesílá, nebo se na data dotazuje.
- **Control** - Řídicí pole obsahuje jako kód počet informací, které jsou obsaženy v datovém poli.
- **Data** - Přenášené informace, které jsou důležité pro ostatní řídicí jednotky.
- **Cyclic Redundancy Check (CRC)** - Zjišťování chyb v přenosu. Založeno na cyklickém výpočtu kontrolního kódu před přenosem a po přenosu dat.
- **ACKnowledgement (ACK)** - Příjemce potvrzuje správné přijetí zprávy objektu, který ji vyslal.
- **End of Frame (EOF)** - Označuje konec zprávy.

## 4.7.1 CAN bus v prostředí Arduino IDE

Základní deklarace a inicializace CANu byla převzata ze vzorových programů od výrobce použitého CAN shieldu. Jako první se deklarují základní proměnné canTx na odesílání zpráv a canRx na příjem. V setupu se ověří funkčnost portů a nastaví se přenosová rychlost. V tomto případě je použita přenosová rychlost 500kbit/s, jelikož touto rychlostí spolu jednotlivé prvky komunikují.

```
// CAN Layer functions
extern byte canInit(byte cPort, long lBaudRate);
extern byte canTx(byte cPort, long lMsgID, bool bExtendedFormat, byte* cData, byte cDataLen);
extern byte canRx(byte cPort, long* lMsgID, bool* bExtendedFormat, byte* cData, byte* cDataLen);

void setup()
{
  // Set the serial interface baud rate
  Serial.begin(250000);

  // Initialize both CAN controllers
  if (canInit(0, CAN_BPS_500K) == CAN_OK)
    Serial.print("CAN0: Initialized Successfully.\n\r");
  else
    Serial.print("CAN0: Initialization Failed.\n\r");

  if (canInit(1, CAN_BPS_500K) == CAN_OK)
    Serial.print("CAN1: Initialized Successfully.\n\r");
  else
    Serial.print("CAN1: Initialization Failed.\n\r");

} // end setup
```

Obrázek 4.11: Inicializace CAN bus

Příklad komunikace po sběrnici CAN. Příkaz canTx odesílá po CAN portu 1, informaci s ID 0x11. Položka false značí, že se nejedná o prodlouženou CAN zprávu. canTx odesílá data uložená v proměnné motorInit s délkou dat 2 bajty. Příkaz canRx načte data z portu 0 a do jednotlivých proměnných uloží informace o ID, jestli se jedná o prodlouženou zprávu, data a délku dat.

```
byte motorInit[] = {0x5A, 0xA9};
canTx(1, 0x11, false, motorInit, 2);
canRx(0, &lMsgID, &bExtendedFormat, &cRxData[0], &cDataLen) == CAN_OK
```

Obrázek 4.12: Příklad komunikace

## 5 Testování systému a instalace na vozidlo

### 5.1 První test

Prvotní testování systému probíhalo v domácích podmínkách. Prvním bodem bylo porozumění funkčnosti komunikace sběrnice CAN bus, propojení podvolantové jednotky a servomotoru a ovládání servomotoru pomocí desky arduino. Podvolantová jednotka odesílá údaje o své absolutní poloze automaticky v prvních 2 bajtech zprávy. Při přivedení napětí na podvolantovou jednotku začne odesílání dat. Dokud se s podvolantovou jednotkou poprvé nepohne odesílá vždy stejnou hodnotu 80 80 hexa. Teprve po natočení začne odesílat svoji reálnou polohu. Servomotor na vyžádání odesílá údaje o své poloze. Dotaz na polohu se odesílá na ID 0x0e s daty 0x1b. Bylo zjištěno, že si servomotor nepamatuje svou absolutní pozici a vždy po připojení napájení uvede svou aktuální pozici jako nulovou. V tomto stádiu byla funkčnost servomotoru omezena z důvodu přivedení nízkého napětí ze zdroje. Při výraznějším zrychlení, nebo přechodu směru natočení se měnič z důvodu nedostatečného napětí vypnul.

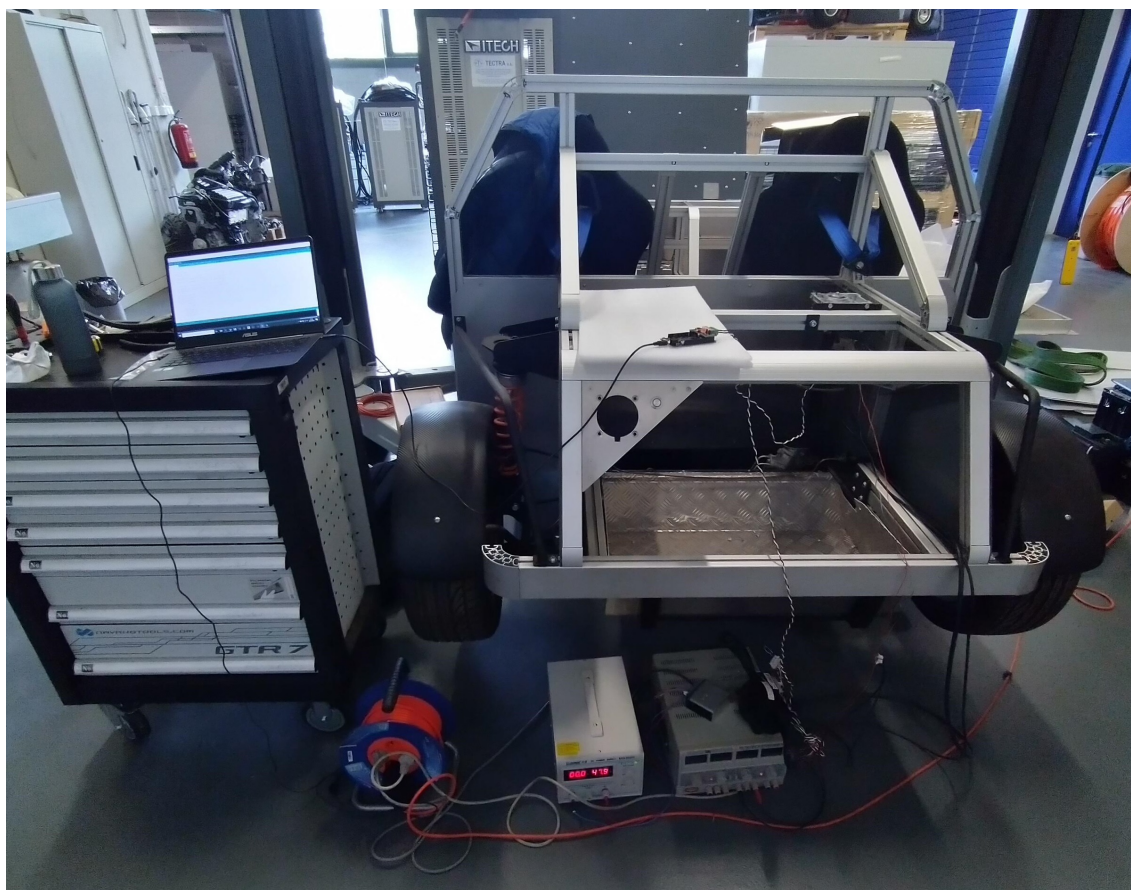


Obrázek 5.1: Prvotní zapojení a testování



## 5.2 Testování na vozidle

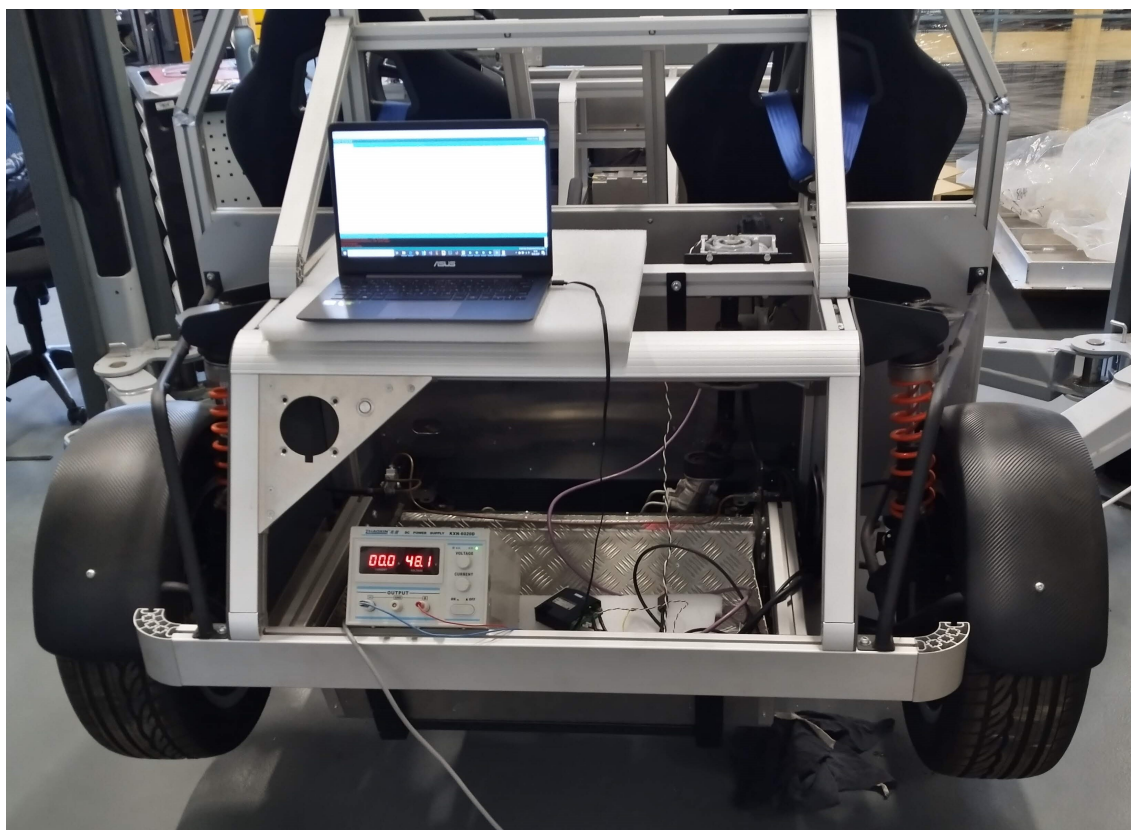
V další fázi přišla montáž komponent na vozidlo. Zadní část byla již finálně zkompletoována připojením servomotoru na šnekovou převodovku, která je uchycena na řídicí tyči společně s druhou podvolantovou jednotkou. Napájení bylo prozatím stále přivedeno z externích zdrojů. Nyní byl použit i druhý zdroj pro přivedení stabilního napětí 48V pro servomotor. Přední podvolantová jednotka prozatím osazena na své místo nebyla. Z důvodu testování byl napsán program pro otáčení kol 1:1. Testována byla plynulost pohybu a schopnost servomotoru otáčet se zadními koly i na zemi mimo hydraulický zvedák. Díky samosvornosti převodovky nedochází při jízdě k nežádoucí změně natočení kol od pohybu podvozku. Do této chvíle byl servomotor ovládán absolutně. Byl přidán podprogram pro srovnání zadních kol do roviny po zapnutí zapalování vozidla. Následovat mělo nastavení aktuální pozice servomotoru jako jeho absolutní nulu. Sice je tento příkaz uveden v manuálu pro daný servomotor, ale vynulování motoru nefungovalo. Bylo tedy rozhodnuto, že se bude servomotor řídit pomocí jeho relativní pozice.



Obrázek 5.2: Testování na vozidle

## 5.3 Montáž na vozidlo

Po odladění předchozích problémů se po vozidle rozvedlo napětí 12V pro podvolantové jednotky a arduino. Přední podvolantová jednotka byla namonována na své místo. Byly rozvedeny CAN linky. Na jedné je připojen měnič motoru vozidla s přední podvolantovou jednotkou. Na druhé se připojila zadní podvolantová jednotka se servomotorem. Rozhodnuto bylo o uložení arduina s měničem servomotoru do vytisknuté krabičky do zadní části vozu. Po připojení systému bylo zjištěno několik problémů. Měnič elektromobilu hlásil chybové hlášení a data z podvolantové jednotky se načítala chybně. Nesprávnost přijatých dat byla zaviněna vysokým rušením v motorovém prostoru, nejspíše od měniče napětí. Po uzemnění kabelu již data byla přijímána správně. Chybová hláška měniče motoru však byla zaviněna připojením podvolantové jednotky na stejný CAN. ID pod kterým odesílá podvolantová jednotka (0xC2) je stejné, jako ID po kterém měnič přijímá zprávy o chybě. Bylo nutné za měnič motoru vložit druhé arduino které funguje jako brána. Načítá zprávy od měniče, přečte hodnotu otáček motoru, kterou přepočte na rychlost vozidla a tu odesílá do druhého arduina. Arduino s funkcí brány je prozatím uloženo v motorovém prostoru. Do programu pro řízení bylo přidáno čtení rychlosti vozidla a přepočtení pro natáčení v určitém rozmezí v závislosti na rychlosti a natočení předních kol.

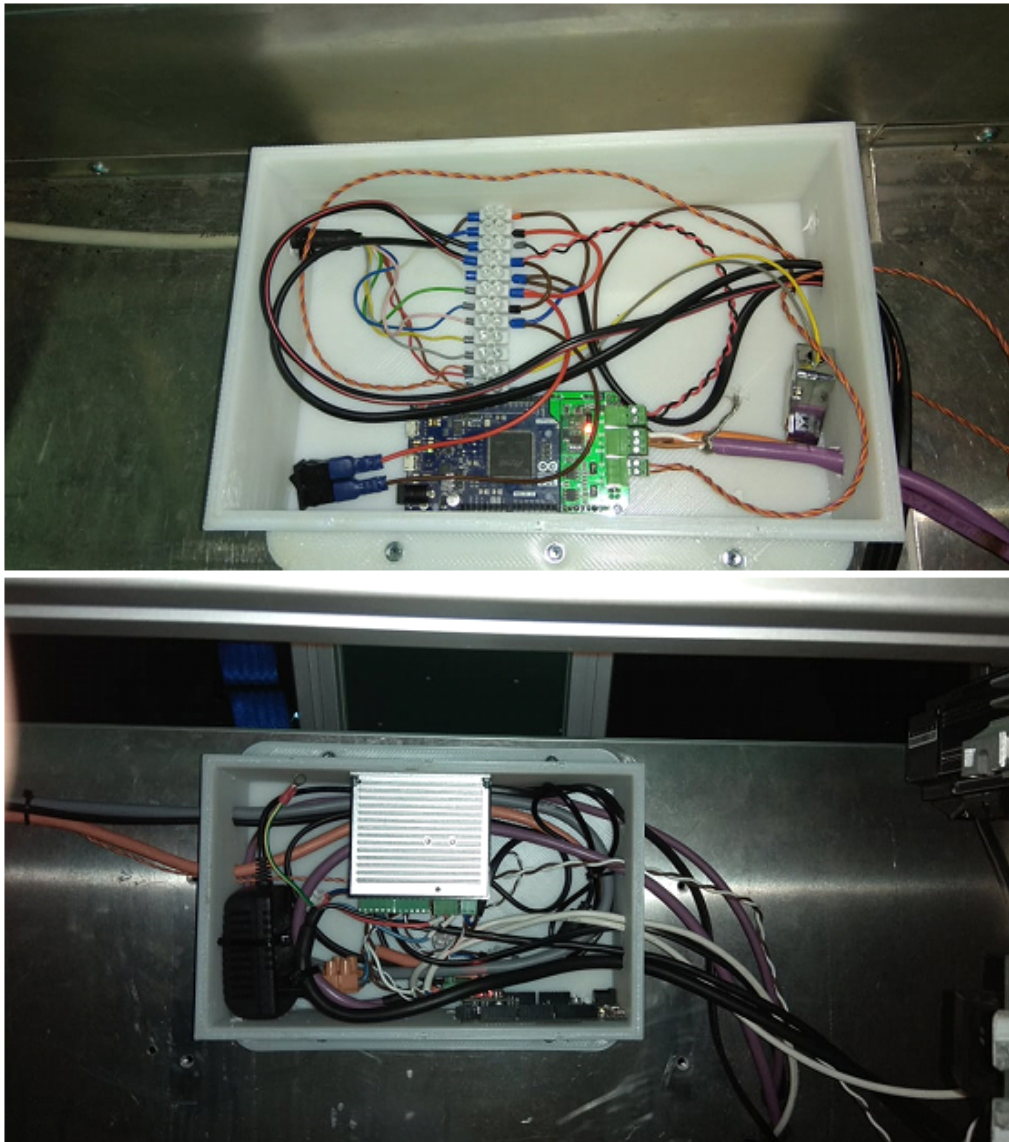


Obrázek 5.3: Průběh zapojení



## 5.4 Kompletace systému

V poslední fázi instalace systému se připojil měnič napětí pro servomotor. Díky tomu již není potřeba žádný externí zdroj napětí. Byla upravena délka vodičů a arduino s řídicí jednotkou servomotoru byly uloženy do krabičky vytisknuté na 3D tiskárně. Po softwarové stránce je řízení spolehlivé, pouze se upravovali maximální úhly natočení a přidání kontrolních smyček pro zajištění správné funkčnosti. Na žádost vedoucího práce byl nastaven maximální úhel natočení zadní nápravy pro nízké rychlosti mnohonásobně vyšší, nežli zamýšlených 5 stupňů. Jelikož je vozidlo demonstrativního charakteru, byla žádost o výrazné natáčení. Pro rychlosti vyšší než  $40 \text{ km h}^{-1}$  je úhel nastaven na původních 5 stupňů kvůli bezpečnosti.



Obrázek 5.4: Kompletní zapojení systému na vozidle

## 6 Software pro řízení zadní nápravy

Programování systému řízení všech kol proběhlo v prostředí Arduino IDE, které je určeno pro desku Arduino Due použitou na řízení systému. V programu bylo využito volně dostupných knihoven pro komunikaci arduina a sběrnice CAN.

### 6.1 Program pro gateway arduino

```
if (canRx(0, &lMsgID, &bExtendedFormat, &cRxData[0], &cDataLen) == CAN_OK)
{
  if (lMsgID == 0x410) {

    velocity = cRxData[1]; //úprava přijatého rámce do jedné proměnné
    velocity <<= 8;
    velocity |= cRxData[0];

    velocity = (velocity / 5.857); // převodový stupeň je 5.857
    rychlost = 0.12 * PI * polomerkola * float(velocity); // přepočítání RPM na rychlost

    cTxData0[0] = rychlost;

    canTx(1, 0x410, false, cTxData0, cDataLen);
  }
} // end if
```

Obrázek 6.1: Hlavní smyčka programu

Údaje o otáčkách elektromotoru vozidla jsou řídicí jednotkou odesílány s ID 410. Po načtení zprávy se přijatá data upraví do jedné proměnné. Převodovka nainstalovaná na vozidle je standartní ze škody fabia s permanentně zařazeným třetím rychlostním stupněm. Tomu odpovídá převodový stupeň 5,857. Na vozidle jsou patnácti palcová kola. Pomocí těchto hodnot se již provede standartní přepočítání na rychlost. Výsledná rychlost se po CANu odešle do druhého arduina. Délka jednoho bajtu je pro velikost rychlosti dostatečná, neboť se u vozidla předpokládá maximální rychlost  $140 \text{ km h}^{-1}$ .

## 6.2 Hlavní program natáčení zadní nápravy

První část programu, starající se o inicializaci sběrnice CAN, již byla popsána v kapitole 5.1. Následuje deklarace obecných proměnných programu a proměnných pro CAN 0 a 1. Na závěr se deklarují proměnné pro výpočet úhlu natočení zadních kol.

```
//deklarace proměnných pro výpočet úhlu natočení zadních kol
float aktualniRychlost;           // údaje o rychlosti elektromobilu
float prechodovaRychlost = 40;   // přechodová rychlost fázování natočení (40 km/h)
float maxnatoceniZ = 50;         // maximální natočení zadních kol (5 stupňů)
float maxnatoceniP = 540;       // maximální natočení předních kol (otáčka a půl volantu)
float zadanenatoceniZ;          // výsledný žádaný údaj o natočení zadní nápravy
float pocatekZpodvol = -174;    // úhel natočení zadní podvolantové jednotky pro kola v rovině

float rozdil;                    // výpočet rozdílu
int dataMotor;                   // data na odeslání do měniče
```

Obrázek 6.2: Deklarace proměnných pro výpočet

Program je sestaven tak, aby případné změny bylo možné realizovat pouhou změnou jediné proměnné. Do proměnné *aktualniRychlost* se uloží údaj o aktuální rychlosti vozidla z druhého arduina. Proměnná *prechodovaRychlost* udává při jaké rychlosti se mění souhlasné a nesouhlasné natočení zadní nápravy. Údaj o maximálním natočení předních a zadních kol se ukládá do *maxnatoceniP* a *maxnatoceniZ*. Jedná se o úhly naměřené na podvolantové jednotce. U předních kol jde maximálně otočit o otáčku a půl volantu. U zadních kol se nastavuje libovolná hodnota o kterou se mají maximálně natáčet. Zadní podvolantová jednotka nebyla namontována s počátkem v nulovém natočení zadní nápravy. Kvůli tomu je důležitý údaj, *pocatekZpodvol* který udává, že při úhlu -174 stupňů je zadní náprava rovně.

```
//počáteční nastavení motoru
byte motorInit[] = {0x5A, 0xA9}; //nastavení hodnot Max Speed a Max Acceleration
canTx(1, 0x11, false, motorInit, 2); //odeslání parametrů Max Speed a Max Acceleration do měniče
```

Obrázek 6.3: Nastavení servomotoru

Po zapnutí arduina se odešle zpráva s nastavením maximální rychlosti a zrychlení pro servomotor. Zpráva se odešle pouze jednou. Tyto údaje jsou důležité pro plynulou a rychlou odezvu servomotoru.

V samotné smyčce programu se nejdříve načítají data ze sběrnice CAN 0, na které je připojena přední podvolantová jednotka a arduino odesílající rychlost vozidla. Načítání dat probíhá střídavě. Nový údaj o aktuální rychlosti se přijme jednou za 4 průběhy cyklu. Je to dáno nižší frekvencí odesílání zprávy, nežli odesílá podvolantová jednotka.

```

if (canRx(0, &lMsgID, &bExtendedFormat, &cRxData[0], &cDataLen) == CAN_OK) //načtení dat z volantu a rychlosti
{
  if (lMsgID == 0x410) {
    aktualniRychlost = cRxData[0];
  }
  if (lMsgID == 0xC2) {
    angleDataSWRx_0 = cRxData[1]; //úprava přijatého rámce z volantu do jedné proměnné
    angleDataSWRx_0 <<= 8;
    angleDataSWRx_0 |= cRxData[0]; //volant

    if (angleDataSWRx_0 < 32767)
    {
      angleDegreesSW_0 = float(angleDataSWRx_0) / 8228.0 * 360.0; //výpočet úhlu pro kladné hodnoty (směr CCW)
    }
    else
    {
      angleDegreesSW_0 = -(float(angleDataSWRx_0) - 32767.0) / 8228.0 * 360.0; //to samé pro CW
    }
  }
}
} // end if

```

Obrázek 6.4: Načtení dat z CAN 0

Přijaté rámce se uloží do vlastních proměnných. Jedná-li se o údaj z podvolantové jednotky provede se přepočítání na úhel. Jestliže je načtená hodnota v rozmezí 0 až 32767 jedná se o kladný úhel, naopak pro hodnoty větší než 32767 je úhel záporný.

```

if (canRx(1, &lMsgID_1, &bExtendedFormat_1, &cRxData_1[0], &cDataLen_1) == CAN_OK) { // získání rámce z nápravy
  if (lMsgID_1 == 0xC2) {
    angleDataSWRx_1 = cRxData_1[1]; //úprava přijatého rámce z nápravy do jedné proměnné
    angleDataSWRx_1 <<= 8;
    angleDataSWRx_1 |= cRxData_1[0]; //náprava

    if (angleDataSWRx_1 < 32767)
    {
      angleDegreesSW_1 = float(angleDataSWRx_1) / 8228.0 * 360.0; //výpočet úhlu pro kladné hodnoty (směr CCW)
    }
    else
    {
      angleDegreesSW_1 = -(float(angleDataSWRx_1) - 32767.0) / 8228.0 * 360.0; //to samé pro CW
    }
  }
}
} //end if

```

Obrázek 6.5: Načtení dat z CAN 1

Načtení dat z druhé sběrnice probíhá obdobně. Uloží se do jedné proměnné, zjistí se jestli se jedná o kladný, nebo záporný úhel a vypočte se jeho hodnota.

Na žádost vedoucího práce byla do programu přidána podmínka na zvětšení maximálního úhlu natočení v nízkých rychlostech. Jelikož je vozidlo předváděcího charakteru a natočení o 5 stupňů není vizuálně příliš výrazné, je nastaven úhel 4x větší. Pro rychlosti převyšující  $40 \text{ km h}^{-1}$  je z důvodu bezpečnosti a stability vozidla nastaven maximální úhel původních pět stupňů.

```

if (aktualniRychlost < 40) //Z důvodu demnostrace v nízkých rychlostech natočení větší nežli 5 stupňů
{
    float maxnatočeníZ = 200;
} else
{
    float maxnatočeníZ = 50; //Pro vyšší rychlosti z důvodu bezpečnosti max úhel do 5 stupňů
}

```

Obrázek 6.6: Změna maximálního natočení nápravy

V poslední části se vypočte žádaný úhel natočení zadních kol podle vzorce z kapitoly 3.2.1. Je zde implementována podmínka pro kontrolu vypočtených dat. Jestliže je žádaný úhel větší, nežli maximální povolený úhel zadní nápravy dojde k přerušení programu. Dále se vypočte rozdíl mezi žádaným natočením a aktuálním natočením nápravy. Tento rozdíl se přepočte a upraví na data pro měnič. Výsledná data se odešlou do servomotoru. Pro lepší čitelnost programu je výpočet žádaného natočení v obrázku 7.7 rozdělen do dvou řádků. V originálním zobrazení by tento řádek byl jednotný.

```

if ((lMsgID == 0xC2) & (lMsgID_1 == 0xC2 )) //výpočet natočení zadní nápravy závislé na rychlosti a natočení předního volantu
{
    zadanenanatoceniZ = -(sin((abs(aktualniRychlost) - prechodovaRychlost) / 180 * PI * (2 - (abs(aktualniRychlost) / (3 * prechodovaRychlost)))) * maxnatočeníZ);
    zadanenanatoceniZ = zadanenanatoceniZ * (angleDegreesSW_0 / maxnatočeníP);

    if (abs(zadanenanatoceniZ) > maxnatočeníZ) //pokud vypočtené natočení zadní nápravy je větší než
    { //maximální povolené natočení nápravy, program začne od začátku
        break;
    }

    rozdíl = zadanenanatoceniZ - angleDegreesSW_1 + pocatekZpodvol; // vypočítání rozdílu aktuální pozice zadní nápravy od žádané pozice zadní nápravy

    float prepočet = (rozdíl * 8228 / 360) * 39; // přepočet na data pro měnič motoru
    dataMotor = prepočet;

    cTxData0[3] = dataMotor; //vytvoreni dat pro odeslání do menice
    dataMotor >= 8;
    cTxData0[2] = dataMotor;
    dataMotor >= 8;
    cTxData0[1] = dataMotor;
    dataMotor >= 8;
    cTxData0[0] = dataMotor;

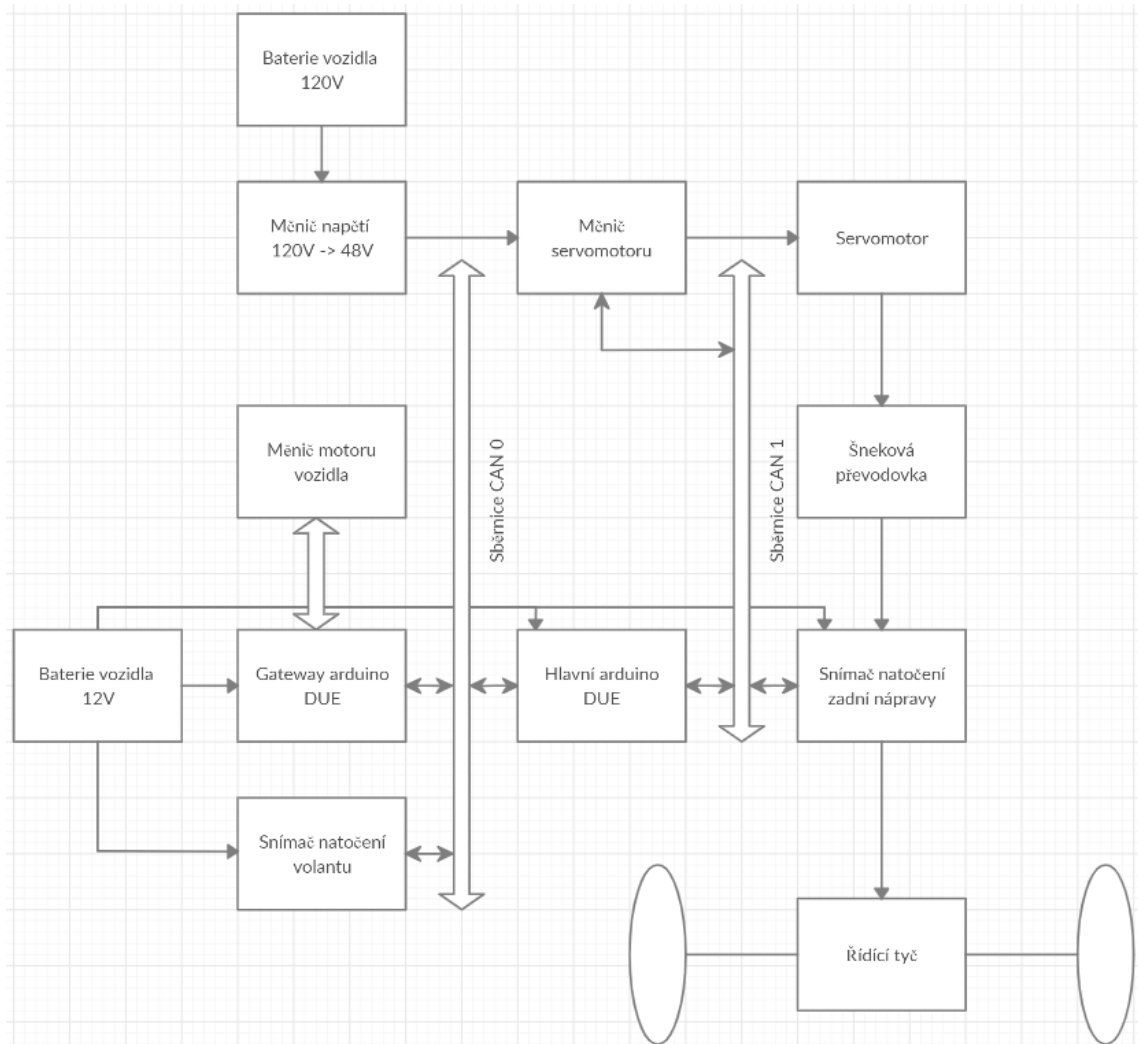
    canTx(1, 0x03, false, cTxData0, 4); //odeslání dat do měniče
}

```

Obrázek 6.7: Výpočet a odeslání polohy

## 6.3 Blokové schéma zapojení

Arduino přijímá po sběrnici CAN 0 polohu od snímače natočení volantu a druhého arduina, které vysílá údaje o aktuální rychlosti vozidla. Na sběrnici CAN 1 přijímá polohu od snímače natočení zadní nápravy. Údaj o výsledné poloze odesílá po CAN 1 do měniče který odešle instrukci servomotoru. Servomotor pomocí šnekové převodovky otáčí hřídeli řídicí tyče zadní nápravy. Servomotor je napájen z baterií elektromobilu pomocí měniče napětí, který sníží napětí baterie ze 120V na 48V. Podvolantové jednotky a arduina jsou napájené z 12V baterie elektromobilu.



Obrázek 6.8: Blokové schéma systému



## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zprovoznit systém řízení zadních kol pro experimentální elektrické vozidlo. Tento systém byl navrhnout jako experimentální a vzhledem k použití vývojového kitu arduino, nebo šnekové převodovky čínské produkce nesplňuje všechny náležitosti pro využití u produkčního automobilu.

Tento systém natáčí zadní kola v závislosti na natočení volantu a rychlosti vozidla. Při rychlosti do  $40 \text{ km h}^{-1}$  se zadní kola natáčí nesouhlasně oproti předním kolům pro zmenšení poloměru otáčení. U rychlostí vyšších než  $40 \text{ km h}^{-1}$  se natáčí souhlasně, což poskytuje lepší stabilitu vozidla. Systém řízení zadních kol je ovládán pomocí arduino, které komunikuje s ostatními komponenty pomocí sběrnice CAN.

Během kompletace systému došlo ke komplikacím s řízením servomotoru a komunikaci podvolantové jednotky s měničem motoru vozidla po stejné sběrnici CAN. Řízení servomotoru muselo být realizováno pomocí relativní polohy, z důvodu resetování absolutní pozice při odpojení napětí a nefunkčnímu nulování polohy programově pomocí příkazu. Mezi měnič motoru a desku arduino bylo nutné instalovat druhé arduino ve funkci gateway brány. Toto arduino načítá data o otáčkách motoru a po přepočtu na rychlost je odesílá do druhého arduino, kde probíhá hlavní smyčka programu. Toto opatření bylo nutné kvůli stejnému identifikátoru zprávy, kterým podvolantová jednotka odesílá informace o své poloze. Měníči motoru vozidla pomocí tohoto identifikátoru přijímá zprávy o chybovém hlášení a tím znemožňuje správnou funkci měniče.

Řízení zadní nápravy má velice dobrou rychlost odezvy na pohyb volantu i změnu rychlosti vozidla. Regulace natočení probíhá téměř okamžitě a plynule, bez známek zaškubávání pohonu řízení, nebo vypočítání špatného úhlu natočení. Díky samosvornosti převodovky nedochází k nežádoucímu natočení kol například při průjezdu výmolem. Během testování při jízdě po areálu univerzity bylo zjištěno, že úhel natočení zadních kol vyhovuje spočítaným hodnotám a v rámci požadovaných hodnot funguje v pořádku. Nedošlo ke zahřívání pohonu, ani chybě řízení i přes dlouhé testování, při rozmanitých rychlostech. Manévrovatelnost vozidla byla výrazně vylepšena, především v případě poloměru otáčení.

## Použitá literatura

- [1] *Máme vlastní školní elektromobil, říká se mu eŠus*. [online]. Liberec: Kočárková, 2013 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://tuni.tul.cz/rubriky/veda-a-vyzkum/id:52549/mame-vlastni-skolni-elektromobil-rika-se-mu-esus->.
- [2] *Elektromobil eŠus* [online]. Liberec: FM, b. r. [Cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.fm.tul.cz/ustavy/ustav-mechatroniky-a-technicke-informatiky/laboratore/esus>.
- [3] JANDURA, Pavel. *Současné trendy optimálního řízení pohonů a energetických úložišť v elektromobilech a městské trakci*. Liberec, 2015. Disertace. Technická univerzita v Liberci, Fakulta Mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.
- [4] SINGH, Arun; RAJIV, Chaudhary; CHAUDHARY, Rajiv; SINGH, R. C. *International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014): Study of 4 Wheel Steering Systems to Reduce Turning Radius and Increase Stability*. [online]. 1. vyd. Dillí: ICARI, 2014 [cit. 2020-04-12]. ISBN 978-93-5156-328-0. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/281450446\\_Study\\_of\\_4\\_Wheel\\_Steering\\_Systems\\_to\\_Reduce\\_Turning\\_Radius\\_and\\_Increase\\_Stability](https://www.researchgate.net/publication/281450446_Study_of_4_Wheel_Steering_Systems_to_Reduce_Turning_Radius_and_Increase_Stability).
- [5] *4-Wheel Steering Systems (Pros/Cons and Cars That Have It)* [online]. Oards, b. r. [Cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://oards.com/four-wheel-steering-system-info/>.
- [6] IRIE, Namio; KUROKI, Junsuke. 4WS Technology and the Prospects for Improvement of Vehicle Dynamics. *Convergence International Congress & Exposition On Transportation Electronics*. 1990, s. 429–437. ISSN 0148-7191. Dostupné z DOI: 901167.
- [7] *Audi Technology Portal: Audi A6 Sedan – Dynamic All-Wheel Steering* [online]. AUDI, 2018 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.audi-technology-portal.de/en/chassis/wheel-suspension-steering/audi-a6-sedan-dynamic-all-wheel-steering>.
- [8] *Geometrie řízení* [online]. Slaný: ISS Slaný [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://zak.iss-slany.cz/?id=619%5C&action=detail%5C&presenter=Material>.



- [9] *Tire Wear and Wheel Alignment* [online]. Mishiwaka (Indiana): Quality Automotive, 2017 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://qamotive.com/frame-and-front-end-services/frame-tire-align/>.
- [10] *Ackermannova podmínka* [online]. Autolexicon [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/ackermannova-podminka/>.
- [11] NĚMEČEK, Pavel. *Kolové dopravní a manipulační stroje I: 6 – Řízení*. Liberec, 2009. Dostupné také z: <http://old.kvm.tul.cz/studenti/texty/Kdms1/6-Rizeni.pdf>.
- [12] *DYN AC Servo Drive CAN Specification*. 1.1A. Canada, 2017. Dostupné také z: [www.dmm-tech.com/Dyn2\\_v2.html](http://www.dmm-tech.com/Dyn2_v2.html).
- [13] ROMPOTL, Tomáš. *Návrh systému přiřizování zadní nápravy experimentálního elektromobilu*. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta Mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.
- [14] *CAN BUS EXPLAINED* [online]. Dánsko: CSS Electronics, 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.csselectronics.com/screen/page/simple-intro-to-can-bus/language/en>.

## Obsah přiloženého CD

- text bakalářské práce
  - `bakalarska_prace_2020_Hyska_Tomas.pdf`
- zdrojový kód programu
  - Program pro Gateway arduino
  - Program pro hlavní arduino