



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

Návrh systému přiřizování zadní nápravy experimentálního elektromobilu

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy
Autor práce: **Tomáš Rompotl**
Vedoucí práce: Ing. Pavel Jandura Ph.D.
Konzultant: Ing. Tomáš Zvolský





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

Design of rear wheel steering system for experimental electric car

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrical engineering and informatics
Study branch: 2612R011 – Electronic Information and Control Systems

Author: **Tomáš Ropotl**
Supervisor: Ing. Pavel Jandura Ph.D.
Consultant: Ing. Tomáš Zvolský



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Rompotl**
Osobní číslo: **M15000117**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Návrh systému přiřizování zadní nápravy experimentálního elektromobilu**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se aktuálním řešením systému řízení náprav experimentálního elektromobilu.
2. Proveďte rešerši principů a moderních systémů elektromechanického přiřizování zadní nápravy vozidel.
3. Navrhněte vhodný pohon řízení zadní nápravy včetně systému napájení experimentálního elektromobilu.
4. Navrhněte vhodnou řídicí jednotku a implementujte do ní základní algoritmy přiřizování zadní nápravy.
5. Nainstalujte systém do vozidla a experimentálně otestujte.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 30–40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] KREUTZ, Marlene, Martin HORN a Josef ZEHETNER, 2009. Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering systems. In: Vehicle System Dynamics. 47(12), s. 1551-1564. DOI: 10.1080/00423110802691507. ISSN 0042-3114. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423110802691507>
- [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] Göteborg : Chalmers tekniska högskola, 2017. Diploma work - Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, ISSN 1652-8557; 2017:08, 2017

Vedoucí bakalářské práce:

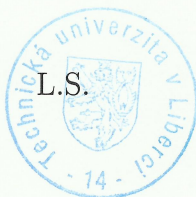
Ing. Pavel Jandura, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 14. května 2018

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan



Kolář
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 73. 5. 2018

Podpis: 

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlovi Jandurovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Tomáši Zvolskému za cenné rady a všem dalším kteří přispěli ke vzniku tohoto díla a podporovali mě.

Abstrakt

Cílem práce je rešerše stávajících systémů řízení zadní nápravy a návrh vlastního systému pro školní experimentální elektromobil. Práce začíná seznámením se školním elektromobilem, postupuje k návrhu vlastního algoritmu řízení zadní nápravy, jehož podoba byla inspirována funkcí stávajících systémů. Následně se zabývá návrhem fyzického systému pro experimentální elektromobil, který nebylo možné realizovat v plné míře kvůli pozdnímu dodání komponent.

Klíčová slova: směrové řízení vozidla, přiřizování zadní nápravy, experimentální elektromobil, řídicí systém, sběrnice CAN

Abstract

The goal of this thesis is research of existing rear wheel steering systems and desing of the system for school experimental electric vehicle. Thesis begins by introducing school electric vehicle, following by design of own algorithm for four wheel steering which was inspired by functionality of current systems. Next is design of physical system for electric vehicle, which could not be realized whole because the components arrived late.

Keywords: vehicle direction control, rear wheel steering, experimental electromobil, control system, CAN bus

Obsah

Seznam zkratk	12
Seznam použitých veličin a jednotek	13
Úvod	14
1 Experimentální elektromobil a jeho zadní náprava	15
1.1 Současná realizace náprav	15
1.2 Parametry zadní nápravy	16
1.2.1 Moment potřebný k otočení řídicího hřídele zadní nápravy	16
1.2.2 Potřebná rychlost otáčení řídicího hřídele zadní náprava	17
1.2.3 Stanovení výkonu potřebného k řízení zadní nápravy	17
2 Teorie řízení nápravy	19
2.1 Dostupné systémy	19
2.1.1 Mechanický předchůdce - Honda Prelude	19
2.1.2 Supec HICAS od Nissan	19
2.1.3 Současné systémy	20
2.1.4 Active Kinematics Control	20
2.2 Základní popis vozidla - Ackermanova geometrie	20
2.3 Geometrie řízení všech kol - 4WS	22
2.4 Algoritmus řízení	23
2.4.1 Výpočet natočení	23
3 Komponenty systému přiřizování zadní nápravy	25
3.1 Komunikace mezi komponenty - sběrnice CAN	25
3.2 Řídicí jednotka Arduino DUE + CAN shield	27
3.2.1 Komunikace po CAN s použitím shieldu	27
3.3 Snímač natočení volantu a zadní nápravy	28
3.3.1 Data ze snímače	28
3.3.2 Aplikace zjištěných vztahů v programu	31
3.3.3 Zapojení snímače	31
3.4 Servoměnič k motoru	32
3.4.1 Keya Electron - KYDBL4830-1E	32
3.4.2 DMM Technology Corp. - DYN2-TLC6S-00	32
3.4.3 DYN2 - Komunikace po CAN	34
3.5 Servomotor	36

3.6	Šneková převodovka	36
3.7	Měnič napájecího napětí	37
3.8	Záložní napájení a BMS	37
4	Kompletace systému a bezpečnost	38
4.1	Blokové schéma systému	38
4.2	Kompletace	39
4.3	Další práce	39
4.4	Bezpečnost s použitými komponenty	39
5	Závěr	40
	Přílohy	43

Seznam obrázků

1.1	Školní experimentální elektromobil	15
1.2	Zadní náprava elektromobilu, zatím přimontovaná napevno	16
2.1	Úhly natočení u Hondy Prelude	19
2.2	Ukázka lepší ovladatelnosti automobilu Nissan	19
2.3	Uspořádání motorů ZF AKC	20
2.4	Různé rádiusy kol	21
2.5	Skutečný směr jízdy	21
2.6	Zjednodušený model	22
2.7	Typy zatáčení zleva: bez zatáčení zadních kol, nesouhlasné zatáčení zadních kol, souhlasné zatáčení zadních kol	22
2.8	Závislost úhlu natočení zadních kol na rychlosti - graf maximálních natočení zadních kol	24
3.1	Diferenční napětí sběrnice CAN	26
3.2	Standardní CAN zpráva	26
3.3	Rozšířená CAN zpráva	26
3.4	Arduino DUE s CAN shieldem	27
3.5	Podvolantová jednotka používaná ve vozech Škoda	29
3.6	Piny na podvolantové jednotce	31
3.7	Kontrolér od Keya Electron	32
3.8	Kontrolér od DMM	32
3.9	Nastavení portu v systému Windows	33
3.10	Obslužný program servoměniče DYN2 - nastavení	34
3.11	Servomotor 640-DST-A6TK1[7]	36
3.12	Šneková převodovka	37
4.1	Blokové schéma kompletního systému	38

Seznam tabulek

1.1	Moment potřebný k zatočení s řídicím hřídelem zadní nápravy	17
1.2	Potřebná úhlová rychlost točení řídicím hřídelem zadní nápravy . . .	17
1.3	Naddimenzované parametry pohonu zatáčení zadní nápravy	18
3.1	Data ze snímače natočení	29
3.2	Převedená data snímače natočení	30
3.3	Elektronické specifikace servoměniče DYN2-TLC6S-00[6]	33
3.4	Specifikace motoru DMM 640-DST-A6TK1[8]	36
3.5	Parametry převodovky NMRV040-30	36

Seznam zkratek

4WS	4 Wheel Steering - řízení všech čtyř kol
AKC	Active Kinematics Control - 4WS od ZF
BMS	Battery Management System - systém na správu baterie
CAN	Sběrnice Controller Area Network
CANH	Vodič CAN HIGH
CANL	Vodič CAN LOW
COM port	Communication Port - sériový komunikační port
GND	Ground - společný vodič (země)
HICAS	High Capacity Actively Controlled Steering - 4WS od Nissan
LSB	Least Significant Bit - nejméně významný bit
MSB	Most Significant Bit - nejvýznamnější bit
bit SOF	Bit Start Of Frame značící začátek rámeč
USB	Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice
ZF	Německá společnost vyrábějící komponenty do automobilů

Seznam použitých veličin

symbol	jednotka	popis veličiny
Byte0	-	data ze snímače natočení - byte0
Byte1	-	data ze snímače natočení - byte1
l	m	rozvor náprav
M	N m	moment síly na řídicí hřídeli zadní nápravy
n	-	rozlišení snímače natočení
P	W	výkon
P_1	W	vstupní výkon
P_2	W	výstupní výkon
P_d	W	nadimenzovaný výkon
p_l	W	řádicí proměnná
R	m	rádus otáčení
S	(m, m)	střed otáčení
v	km h ⁻¹	rychlost vozidla
v_p	km h ⁻¹	přechodová rychlost
δ	°	úhel snímače natočení
Δ	°	krok snímače natočení
δ_f	°	úhel natočení předních kol
δ_r	°	úhel natočení zadních kol
δ_{fl}	°	úhel natočení předního levého kola
δ_{fr}	°	úhel natočení předního pravého kola
δ_{rmax}	°	maximální úhel natočení zadních kol
δ_{fmax}	°	maximální úhel natočení předních kol
η	-	účinnost převodovky
ω	rad s ⁻¹	úhlová rychlost

Úvod

Zatáčením zadních kol, jakožto způsobem pro zlepšení manévrovatelnosti vozidla se výrobci zabývají už od počátků. Zatáčení zadní nápravy se však nejvíce uplatňovalo u velkých strojů, se kterými by se jinak špatně manévrovalo. U osobních automobilů se z důvodu dostačující manévrovatelnosti začali výrobci zabývat touto myšlenkou až posledních pár desítek let. V posledních letech zažívá zatáčení zadních kol u osobních automobilů mírné rozšíření - na některých svých vozidlech ho už adaptovalo několik velkých automobilek.

Cílem této práce je provést rešerši systémů zatáčení zadních kol, dále navrhnout algoritmus pro jejich řízení, navrhnout samotný systém, který by se instaloval do školního experimentálního elektromobilu a případně ho tam i nainstalovat. Práce se tak podílí na jeho dokončení a na prozkoumání možností řízení osobních automobilů.

V práci bude postupně probrán experimentální elektromobil a jeho parametry potřebné pro budoucí výběr pohonu, dále rozebrány systémy které už existují a používají se, dále pak bude znázorněna geometrie řízení a dopad řízení zadní nápravy na jízdu vozidla a navržen jednoduchý řídicí algoritmus. Následují komponenty poskytnuté pro realizaci projektu a jejich problematika - komunikace v automobilu po sběrnici CAN, snímače pro získání informací o natočení volantu a zadní nápravy, motor s převodovkou pro řízení zadní nápravy a elektronika pro řízení, zpracování dat a nakonec systém napájení.

1 Experimentální elektromobil a jeho zadní náprava

1.1 Současná realizace náprav

Ve vozidle jsou vpředu i vzadu použity přední zatáčející nápravy z vozidla Škoda Roomster. Nápravy jsou konstruované pro elektrohydraulický posilovač řízení. Ten potřebuje k své posilovací činnosti olej a čerpadlo, které v elektromobilu nejsou instalovány. Vstupní hřídel přední nápravy je natvrdo spojena s volantem a řídicí tyč není vybavena posilovačem. Zatáčí se proto pouze silou řidiče.

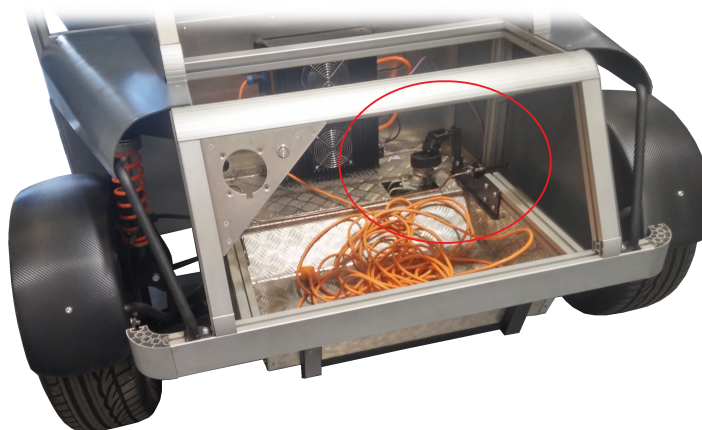


Obrázek 1.1: Školní experimentální elektromobil

Zadní náprava je nainstalována obráceně, tzn. otočena oproti přední o 180° okolo svislé osy - jestliže přední náprava má standardně kladný záklon (takový který při jízdě dopředu má tendenci rovnat kola), zadní náprava má negativní záklon (kola mají tendenci se spíš rozkmitat), ale díky tření v nápravě tento efekt není tak silný. Vstupní hřídel zadního řídicího ústrojí je napevno přimontována k rámu vozidla, zadní kola proto zatím nemohou zatáčet.

1.2 Parametry zadní nápravy

Se zadní nápravou se zatáčí hřídelem, který z ní vystupuje a je vyveden v zadním kufru elektromobilu.



Obrázek 1.2: Zadní náprava elektromobilu, zatím přimontovaná napevno

Následující podkapitoly se budou zabývat měřením parametrů na nápravě pro výběr elektromotoru, který zde bude. Je třeba zjistit potřebné otáčky a moment. Tím že natáčení zadní nápravy bude záviset na natáčení přední nápravy, jsou potřebné otáčky dané nejvyšší dosažitelnou rychlostí ručního otáčení volantu. Zadní náprava má oproti přední jen zlomkový rejď a tak i potřebné otáčky motoru budou potřeba menší než by byly u pření nápravy. Moment potřebný k otočení vstupní hřídele zadní nápravy se změří momentovým klíčem.

Aby bylo možné vybrat elektromotor, který bude se hřídelem otáčet, je potřeba určit potřebný výkon $P[\text{W}]$:

$$P = M \cdot \omega$$

kde $M[\text{Nm}]$ je moment potřebný k otočení nápravy. Úhlová rychlost $\omega[\text{rad s}^{-1}]$ vyjadřuje maximální rychlost otáčení nápravou.

1.2.1 Moment potřebný k otočení řídicího hřídele zadní nápravy

V měření momentu by mělo být zahrnuto vnitřní tření nápravy a tření mezi koly a povrchem. Dále by mělo být prováděno za klidu, protože za jízdy se odpor mezi koly a povrchem zmenšuje. Nejsnazší a zároveň dostatečný způsob jak to zjistit, je přimontovat na vystupující hřídel momentový klíč a zkoušet nastavovat moment, při jaké už se klíč neprotočí. Zde vyvstává problém, jak připojit momentový klíč na tisícíhran vystupující z hřídele. Vzhledem k náročnosti mechanické konstrukce a jen

orientačních nároků na přesnost byl použit výsledek dřívějšího orientačního měření, provedeného stejným způsobem, jaký je zde popsán. Výsledek měření byl poskytnut vedoucím práce, panem Jandurou, jehož dřívější kolega měření prováděl.

Měření se provádělo na budově L školy, kde jsou hladké podlahy a kde se školní uchovává. Bylo by vhodné, aby se kola vozidla dokázala otočit i na povrchu s vyšším třením a navíc jejich pohyb může být při provozu ztížen dalšími vlivy (kolo může stát na nerovném terénu). Moment potřebný pro reálný provoz tak bude vyšší a motor bude potřeba nadimenzovat.

Moment na řídicí hřídeli zadní nápravy M	15 N m
--	--------

Tabulka 1.1: Moment potřebný k zatočení s řídicím hřídelem zadní nápravy

1.2.2 Potřebná rychlost otáčení řídicího hřídele zadní náprava

Rychlost otáčení vstupní hřídelem nápravy se u předních kol odvíjí od toho, jak rychle dokáže řidič točit s volantem, protože hřídel je připojena přímo na volant. Zadní kola zatáčí současně s předními, ale při jejich standardním využití je úhel natočení zlomkový než u předních. Tím se otáčí pomaleji a na vstupní hřídeli je potřeba menší úhlová rychlost. Necht' je však uvažováno, že se na experimentálním elektromobilu budou dále provádět experimenty, které by mohly zkoumat například chování vozidla při různých úrovních natočení zadních kol oproti předním (např. jezdění do boku s nulovým rádiusem otáčení), pak by měla být rychlost otáčení minimálně stejná, jaké se dá dosáhnout u předních kol. Dále pak je třeba uvažovat, že do vozidla časem přibude posilovač řízení, který zde v průběhu psaní této práce chybí a maximální dosažitelná rychlost zatáčení předních kol se zvýší a tím se zvýší i rychlost potřebná u zadní nápravy.

Necht' se na základě jednoduchého pokusu v uzavřeném prostoru s asfaltovým povrchem uvažuje, že řidič dokáže otočit volantem u vozidla s posilovačem (tj. běžný osobní automobil) nejrychleji asi dvě otáčky za sekundu. Úhlová rychlost je tedy:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 2 \text{ rad s}^{-1}$$

Úhlová rychlost řídicího hřídele zadní nápravy ω	12,57 rad s ⁻¹
---	---------------------------

Tabulka 1.2: Potřebná úhlová rychlost točení řídicím hřídelem zadní nápravy

1.2.3 Stanovení výkonu potřebného k řízení zadní nápravy

Výkon potřebný k otočení zadních kol na základě zjištěných hodnot momentu M a úhlové rychlosti ω :

$$P = M \cdot \omega = 15 \cdot 12,57 = 188,6 \text{ W}$$

Jak bylo předznamenáno dříve, motor bude potřeba nadimenzovat, protože vozidlo se nebude pohybovat jen v ideálních podmínkách. Dimenzování bylo úsudkem zvoleno na 130 % původního výkonu.

$$P_d = M \cdot \omega = 15 \cdot 12,57 \cdot 1,3 = 245,1 \text{ W}$$

Nadimenzovaný výkon P_d	245,1 W
---	---------

Tabulka 1.3: Naddimenzované parametry pohonu zatáčení zadní nápravy

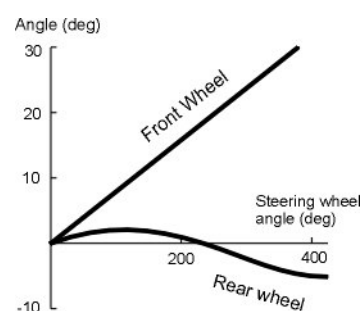
Kvůli použití převodovky bude muset potřebný výkon být ještě zvýšen viz. podkapitola 3.6.

2 Teorie řízení nápravy

2.1 Dostupné systémy

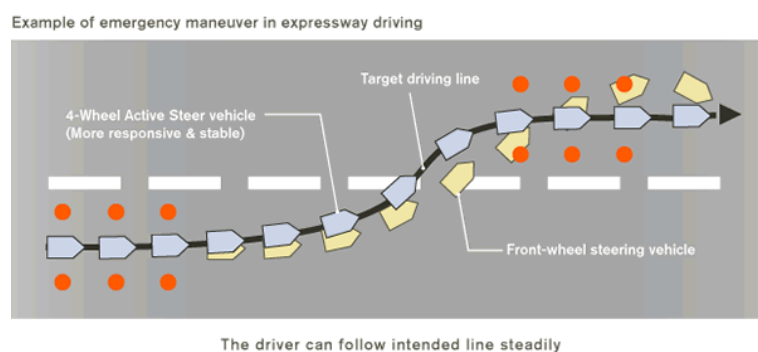
2.1.1 Mechanický předchůdce - Honda Prelude

Jako první osobní automobil se zatáčením zadních kol, kde se jejich úhel natočení mění mezi nesouhlasným a souhlasným natočením kol a nikoliv třeba jen nesouhlasně, jako to bylo u některých starých terénních automobilů nebo stavebních strojů, byl vůz Honda Prelude. Ten měl natočení zadních kol závislé pouze na natočení předních kol, kde při malém natočení se zadní kola natočila souhlasně s předními a to maximálně o $1,7^\circ$ (při vysokých rychlostech kdy se přejíždí z pruhu do pruhu a kdy se zatáčí jen málo se uplatní souhlasné natočení) a pokud se volantem točilo dále do vyššího rejdu, zadní kola se postupně srovnala a poté se natáčela nesouhlasně až do výchylky 5° což způsobí, že se Honda chová jako menší vozidlo (využití při parkování, projíždění ostřejších zatáček jako jsou křižovatky ve městech apod.). Systém ve vozidle byl čistě mechanický a zadní kola byly ovládána hřídelí vedenou ze předu vozidla od řídicího ústrojí[1].



Obrázek 2.1: Úhly natočení u Hondy Prelude

2.1.2 Superc HICAS od Nissan



Obrázek 2.2: Ukázka lepší ovladatelnosti automobilu Nissan

V roce 1989 Nissan vylepšil svůj systém HICAS (méně vyspělý systém neumožňující plné využití 4WS) a vytvořil Super HICAS - elektrohydraulický systém se souhlasným i nesouhlasným řízením. Zvláštností tohoto systému byla vlastnost, kdy při vjezdu do zatáčky systém nejdříve natočil kola nesouhlasně aby do ní vjel ostřeji a poté kola natočil souhlasně pro vyšší stabilitu při výjezdu[1].

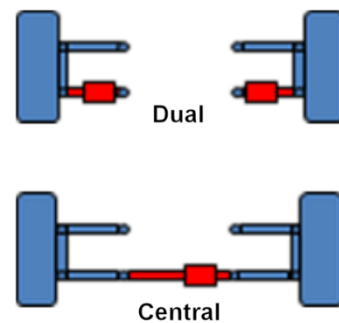
2.1.3 Současné systémy

V současnosti využívá systémy řízení zadních kol několik automobilek. Nápravy jsou ovládány principem steer-by-wire – mezi volantem a zadními koly není mechanická vazba, kola se ovládají elektronicky. Většímu rozšíření přiřizování zadních kol napomohl rozvoj technologií, kdy se místo hydraulických systémů, které byly těžší a musely být připojeny na hydraulické čerpadlo začaly používat systémy elektromechanické, kde je pro pohon použit elektromotor a systém je tak menší, lehčí a konstrukčně jednodušší. Nejčastěji se lze setkat s 4Control od Renault, který lze nalézt u modelů Talisman, Mégane a Espace, dále systém Integral Active Steering používaný u BMW v řadách 5, 6 a 7 a systém Super HICAS používaný asijskými automobilkami Nissan a Infinity. Dalším systémem je Active Kinematics Control (AKC) od firmy ZF. Ten se dá najít v některých vozech Porsche, Ferrari, Cadillac a BMW[2].

2.1.4 Active Kinematics Control

V únoru 2017 byl na webu německého výrobce ZF zabývajícího se vývojem komponent do automobilů publikován článek informující o sto tisících vyrobených jednotkách pro zatáčení zadních kol.

Uspořádání jednotek může být jako jeden elektromotor hýbající se spojovací řídicí tyčí, nebo dvojice menších motorů pohybující s řídicí pákou spojovací tyče každého kola zvlášť. Úhly natočení se odvíjí, stejně jako u všech ostatních výrobců od rychlosti a natočení volantu. Přechod z nesouhlasného na souhlasné řízení je při 60 km h^{-1} [3].

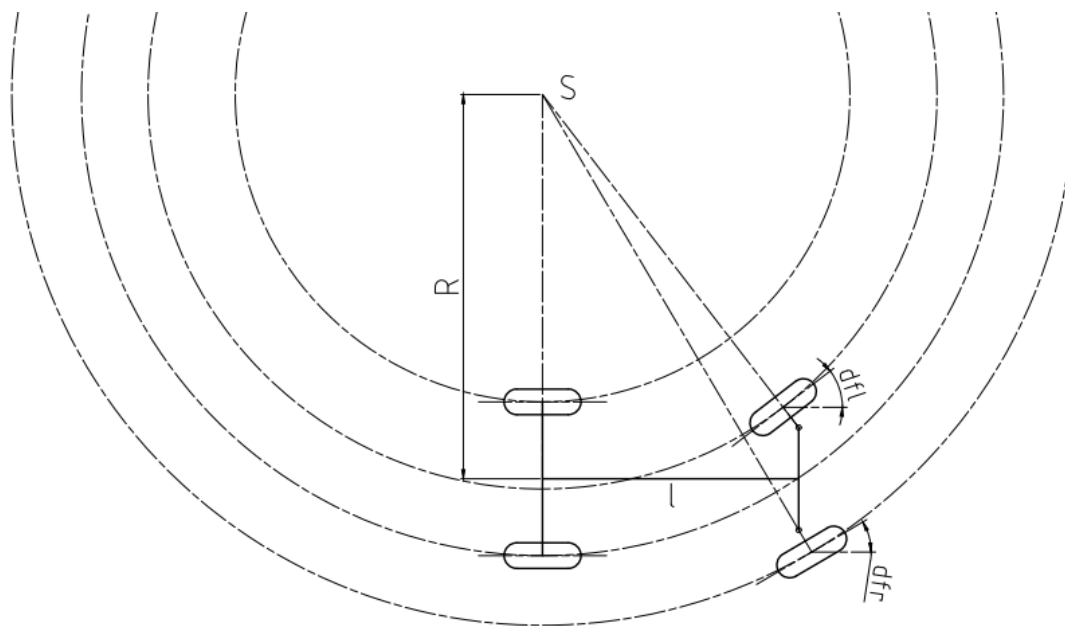


Obrázek 2.3: Uspořádání motorů ZF AKC

2.2 Základní popis vozidla - Ackermanova geometrie

Když automobil projíždí zatáčkou, opisuje (oskulační) kružnici. Tím, že má automobil nenulovou šířku, kola na jedné straně automobilu se pohybují po kružnici s jiným rádiusem než na druhé straně. Aby nedocházelo ke zbytečně vysokému opotřebením pneumatik, musí mechanismus řízení splňovat určité geometrické podmínky - kola musí mít jiný úhel natočení, takový aby opisovala kružnici s jim příslušícím rádiusem. Zatáčí-li vozidlo pouze v předu, je střed kružnice na prodloužené ose zadní nápravy. Zde bude zaveden teoretický ideální model vozidla, kde se neuvažuje boční

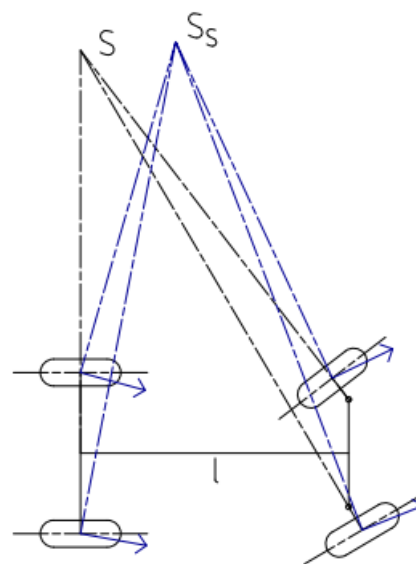
poddajnost pneumatik. Geometrie zatáčení vozidla je popsána Ackermanovou teoretickou geometrií řízení. Necht δ_{fl} a δ_{fr} jsou úhly natočení předního levého a pravého kola, l je rozvor náprav, R je rádius otáčení a S je střed otáčení.



Obrázek 2.4: Různé rádiusy kol

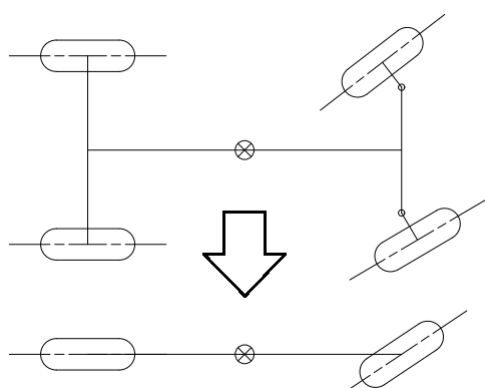
Ackermanova geometrie platí pouze za ideálních podmínek - dokonale tuhé pneumatiky, které se při zatáčení neodvalují do stran. U skutečného vozidla ale takové podmínky nikdy nenastanou. Pneumatiky mají danou tuhost, díky které se můžou odvalovat do boku - při zatáčení na vozidlo působí odstředivá síla. Tím, že se vozidlo pohybuje nejen po kružnici ale i do boku, vzniká nový střed otáčení S_S , který se přesouvá před střed původní. Ackermanovu geometrii tak nelze využít pro popis reálného vozidla.

Při zatáčení všemi čtyřmi koly se vlivem natočení zadních kol střed otáčení také posouvá, a to buď před a nebo za střed otáčení, jež by byl u Ackermanova modelu. Ackermanova geometrie tak nejde pro popsání této úlohy použít, avšak je to dobrý model, ze kterého se dá vycházet.



Obrázek 2.5: Skutečný směr jízdy

2.3 Geometrie řízení všech kol - 4WS

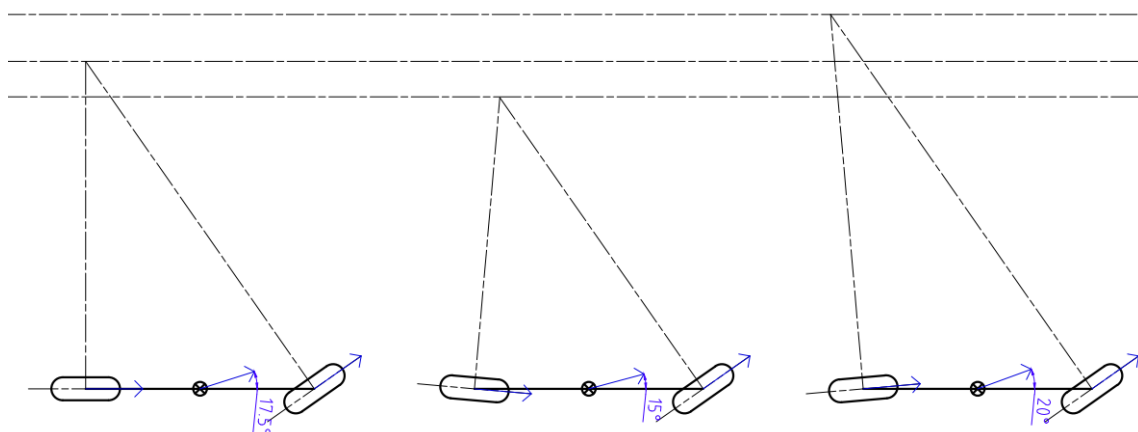


Obrázek 2.6: Zjednodušený model

Nechť je model dále považován za ideální bez boční poddajnosti pneumatik. Takovýto model může být nahrazen zjednodušeným jednostopým modelem, který má zde zkoumané vlastnosti stejné jako dvoustopý. Levá a pravá kola se sloučí a nahradí je jedno umístěné na spojnici přední a zadní nápravy. Zjednodušení je znázorněno na obrázku 2.6. Úhly natočení levých a pravých kol dvoustopého modelu jsou v jednostopém nahrazeny jedním úhlem. Náhradní úhel ve předu a vzadu se rovná průměru natočení předních, resp. zadních kol.

Na obrázku 2.7 jsou znázorněny tři druhy zatáčení - bez zatáčení zadních kol, souhlasné s předními a nesouhlasné. První varianta zle-

va je model klasického vozidla bez zatáčení zadních kol. Přední kola jsou natočena o $\delta_f = 35^\circ$ doleva od osy vozidla (osa je na spojnici náprav). Vektor rychlosti geometrického středu vozidla s osou svírá úhel, který je průměrem natočení přední a zadní nápravy. Standardní model vozidla má tedy vektor rychlosti natočený o $17,5^\circ$ doleva. Další dvě varianty ukazují nesouhlasné a souhlasné natočení, kde u obou příkladů jsou přední kola natočena také o $\delta_f = 35^\circ$ a zadní kola jsou vychýlena o $\delta_r = \mp 5^\circ$. Je vidět, že u nesouhlasného zatáčení se laterální složka pohybu zmenší a zároveň se snižuje i rádius otáčení R a u souhlasného zatáčení se složka bočního pohybu zvýší a stejně tak rádius R . Při nesouhlasném natočení tedy vozidlo opisuje menší poloměr, což se může hodit na parkovišti, nebo při průjezdu zatáčkou a při souhlasném natočení zadních kol se vozidlo pohybuje více do boku, což zvyšuje stabilitu při předjíždění ve vyšších rychlostech nebo změně pruhu na dálnici.



Obrázek 2.7: Typy zatáčení zleva: bez zatáčení zadních kol, nesouhlasné zatáčení zadních kol, souhlasné zatáčení zadních kol

2.4 Algoritmus řízení

Způsoby řízení nápravy jsou téma, které se zatím pouze dostává do popředí a dostupné vědecké práce se většinou zabírají pokročilejšími způsoby řízení (např. na základě rychlosti stáčení - yaw rate). Úkolem této práce však je návrh systému samotného a aplikování jednoduchého algoritmu pro ověření funkčnosti namísto návrhu pokročilého algoritmu. Byl tak navržen jednoduchý algoritmus vycházející z funkčnosti již používaných systémů.

Základní úvaha pro úhel natočení zadních kol vychází z myšlenky rozdělit rozsah jízdní rychlosti vozidla na dvě části, kde při jedné se zatačí souhlasně s předními koly a v druhé nesouhlasně podle toho, kdy se ještě hodí zmenšovat rádius zatačení a kdy už se spíše využije jízda do boku. Rychlost kde se rozsahy dělí, se volí na cca 50 km h^{-1} . Do této rychlosti se spíše uplatní snížení rádiusu otáčení a to ať už ve velké míře při parkování nebo v menší míře při průjezdu ostrou zatáčkou, jakou může být například křižovatka ve městě, kde bývá rychlost omezena na 50 km h^{-1} . Jak bylo naznačeno, natočení se mění spojitě s rychlostí - při nejmenších rychlostech je úhel natočení zadních kol největší a postupně se zmenšuje až k nule při oněch 50 km h^{-1} . Nad touto rychlostí se natočení začne zase zvyšovat opačným směrem, kola se natočí souhlasně s předními. Natočení se zvyšuje a nejvyššího úhlu dosáhne asi kolem 100 km h^{-1} . Při rychlostech nad 50 km h^{-1} se už nehodí přibližovat střed otáčení vozidlu. Zde se cílí na zvýšení stability při změně pruhu ve vysoké rychlosti. Souhlasným natočením kol se vozidlo pohybuje i do boku (tzv. krabí pohyb). Natočení vzadu se tedy mění podle rychlosti a v závislosti na natočení kol ve předu.

2.4.1 Výpočet natočení

Průběh by se dal popsat tak, že závislost na rychlosti je tvar průběhu a natočení předních kol určuje jeho velikost. Pro získání ideálního tvaru průběhu natočení zadních kol $\delta_r(v)[^\circ]$ byla použita funkce sinus:

$$\delta_r(v) = \sin((|v| - v_p) \cdot p_l) \cdot \delta_{rmax}$$
$$p_l = \left(2 - \frac{|v|}{4 \cdot v_p}\right)$$

kde $v[\text{km h}^{-1}]$ je rychlost vozidla, $v_p[\text{km h}^{-1}]$ je přechodová rychlost, kde se nesouhlasné natočení mění v souhlasné a $p_l[1]$ je ladicí proměnná, která pomáhá vyrovnat rozdílné maximální úhly při souhlasném a nesouhlasném natočení a upravuje strmost průběhu. Pro budoucí ladění by měla ladicí proměnná vyhovět pro přechodové rychlosti cca 35 až 50 km h^{-1} , což by mělo stačit. Pokud by kvůli nějakým experimentům měla být přechodová rychlost jiná, bude třeba si pohrát s konstantami. Sinus nabývá hodnot 0 až 1 , proto se násobí $\delta_{rmax}[^\circ]$ jež vyjadřuje maximální úhel natočení zadních kol.

Závislost natočení zadních kol na rychlosti je zjednodušený graf průběhu a ukazuje pouze maximální natočení zadních kol při různých rychlostech. Úplná je závislost

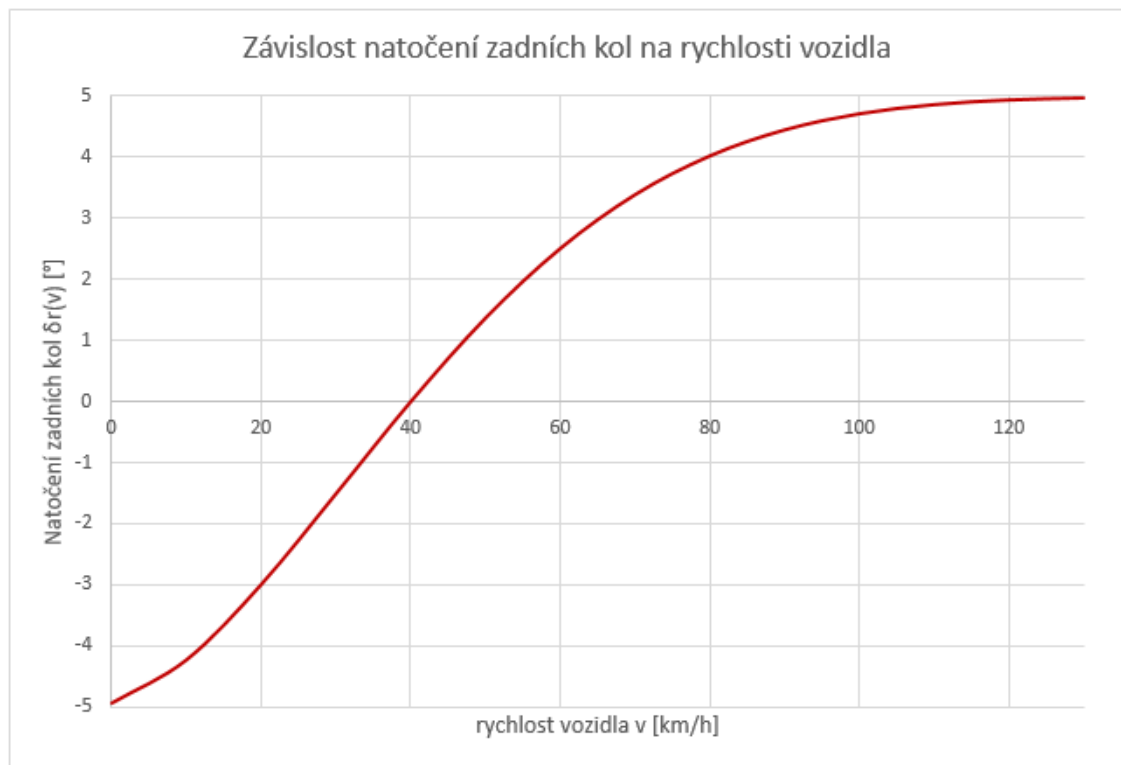
natočení zadních kol $\delta_r(v, \delta_f)[^\circ]$ na rychlosti a natočení předních kol:

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

kde $\delta_f[^\circ]$ je natočení předních kol a $\delta_{fmax}[^\circ]$ vyjadřuje maximální natočení předních kol. Úhel natočení zadních kol je tak úměrný rychlosti a mění znaménko podle rychlosti vozidla.

S experimentální elektromobile se většinou jezdí jen v areálu školy a nedosahuje se s ním velkých rychlostí a tak byla rychlost přechodu z nesouhlasného na souhlasné řízení nastavena na 40 km h^{-1} . Maximální natočení v závislosti na rychlosti při zvolených hodnotách:

Přechodová rychlost v_p	40 km h^{-1}
Maximální natočení zadních kol δ_{rmax}	5°



Obrázek 2.8: Závislost úhlu natočení zadních kol na rychlosti - graf maximálních natočení zadních kol

3 Komponenty systému přiřizování zadní nápravy

Nyní k samotnému návrhu systému. V první řadě je třeba zmínit, že komunikace komponent v elektromobilu probíhá po sběrnici CAN (protokol Controller Area Network je navržen pro automobily a je v této oblasti hojně využíván. Členy soustavy tedy budou vybírány s ohledem na podporu této sběrnice a nový systém bude napojen na stávající sběrnici CAN. Protokol bude popsán níže.

Z fyzických komponent bude třeba vybrat snímače pro zjištění absolutního natočení volantu a stejně tak pro zjištění absolutního natočení vstupní hřídele zadní nápravy. Pro tyto účely byly použity dva stejné snímače natočení volantu z podvolantových jednotek vozidel Škoda. Ve výběru rozhodoval průměr hřídelí, kam se budou snímače montovat. Co se týče CANu, vozy Škoda ho využívají a tudíž snímače ho podporují už z výroby. Zbývající informaci o rychlosti vozidla, doplňuje měnič hlavního pohonu školního elektromobilu. Pro otáčení se hřídelí byl navržen synchronní elektromotor. Pro zvýšení momentu na hřídeli elektromotoru byl osazen šnekovou převodovkou. Jako řídicí jednotka pro ovládání motoru byla vybrána platforma Arduino. Té byla podpora CAN zajištěna použitím CAN shieldu. Arduino však samo o sobě není zaměřeno na podávání velkých elektrických výkonů a proto bude řídicí jednotka řídit motor skrze servoměnič. Měnič bude dostávat povely taktéž po CAN. Silová část by měla být napájena z baterie elektromobilu a jištěná proti výpadku záložní baterií.

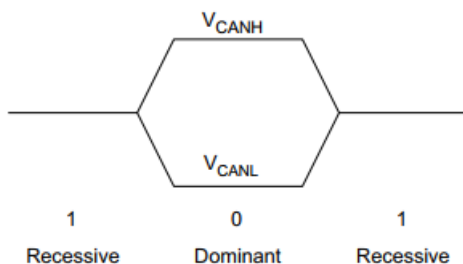
3.1 Komunikace mezi komponenty - sběrnice CAN

Sériový protokol, vyvinutý firmou BOSCH, je ideální pro mnoho průmyslových aplikací. Při příznivé ceně, výkonu, zabezpečení proti rušení a rozšiřitelnosti nabízí vysokou flexibilitu při návrhu systému. Využívá se tak v průmyslu i automobilech.

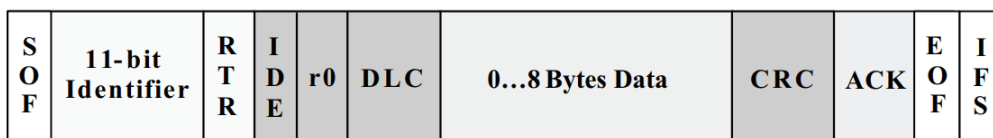
Namísto klasického master-slave systému přenosu dat, jako bývá například u Ethernetu nebo USB z bodu A do bodu B, funguje jako multi-master - každé zařízení je typu master a odesílá zprávy do sítě, kde je možno číst ostatní uzly. Síť je tvořena dvojicí kroucených vodičů *CAN LOW* a *CAN HIGH* s terminačními rezistory (typicky 120 Ω) na koncích vedení a každý uzel je připojen na sběrnici přímo.

Uzly mohou započít odesílání dat po uplynutí předem daného času po ukončení předchozí zprávy. Protože všechny uzly jsou na jedné sběrnici a tím navzájem

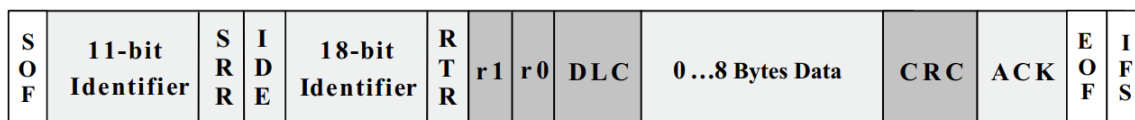
propojené, může nastat problém ve chvíli, kdy chce začít vysílat více uzlů najednou. Toto se řeší bitovou arbitráží - každá zpráva (rámec) obsahuje identifikátor nalézající se na začátku rámce a ten rozhoduje o prioritě zprávy. Rámce mohou být standardní nebo rozšířené s větším identifikátorem. U CAN se logická 0 značí jako *Dominantní* a logická 1 jako *Recesivní*. Logické úrovně jsou u sběrnice CAN charakteru diferenčního napětí mezi vodiči *CAN HIGH* a *CAN LOW*[4]. V kombinaci s vedením signálu po kroucené dvojlince tak vzniká vysoká odolnost proti rušení - rušení se naindukují na oba vodiče zároveň a rozdíl napětí mezi vodiči se nezmění.



Obrázek 3.1: Diferenční napětí sběrnice CAN



Obrázek 3.2: Standardní CAN zpráva



Obrázek 3.3: Rozšířená CAN zpráva

Zde je popis nejdůležitějších částí framu.

SOF Start of frame značí začátek rámce a slouží k synchronizaci uzlů.

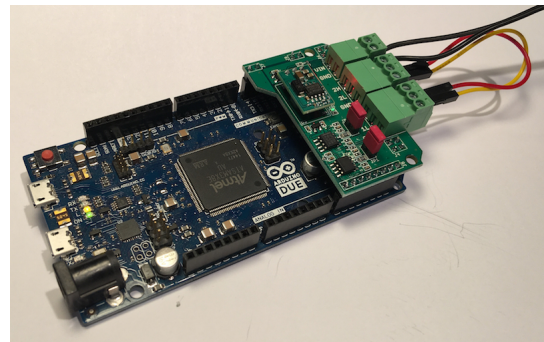
Identifier Identifikátor rozhoduje o prioritě rámce a k rozhodnutí, zda je informace pro daný uzel užitečná.

Data Samotná data mohou být tvořena až osmi byty.

Bitová arbitráž funguje tak, že ve chvíli, kdy je po odvysílání předchozího rámce možno znovu začít komunikaci, všechny uzly které mají data k odeslání, začnou odesílat. Bitová arbitráž funguje na postupném vyřazování nejvyšších bytů - rámce s nejnižším identifikátorem tak mají vyšší prioritu (nejvyšší má identifikátor s hodnotou 0). Všechny uzly tedy začnou vysílat bit *SOF*, čímž se sesynchronizují a následuje bitová arbitráž, kde jsou postupně vysílány všechny bity v pořadí od *MSB* po *LSB*. Jestliže různé uzly vysílají na sběrnici v jednu chvíli oba stavy, dominantní i recesivní, dominantní stav převládne a na celé sběrnici je v tu chvíli dominantní stav. Uzly zároveň vysílají a čtou co je na sběrnici a vyhodnocují svoji prioritu stálou kontrolou zda je na sběrnici jiný uzel s menším identifikátorem. Jestliže uzel vyše dominantní bit (0), na sběrnici bude dominantní stav a uzel může pokračovat. Jestliže uzel vyše recesivní bit (1) a jiný uzel vysílá dominantní bit, je na sběrnici dominantní stav. Uzel porovná stav na sběrnici s jeho aktuální stavem a vyhodnotí, že jeho vysílaný řád je vyšší než na sběrnici. Uzel tak zrovna nemá nejnižší identifikátor a přestává vysílat. Na konci by měl zůstat jediný uzel s aktuálně nejnižším identifikátorem, který zůstane vysílat. Z toho plyne, že na sběrnici nesmí být více uzlů se stejným identifikátorem.

3.2 Řídicí jednotka Arduino DUE + CAN shield

Řízení celé soustavy bylo zvoleno vyřešit na platformě Arduino - poskytuje přátelivé vývojářské prostředí, dostatek výkonu a snadné rozšíření pro další funkcionalitu v podobě shieldů. Arduino DUE bylo zvoleno, protože se k němu vyrábí shield disponující dvěma CAN porty. Celak *Arduino-Based ECU Development Board With Dual CAN Bus Interface* byl objednán od Copperhill Technologies.



3.2.1 Komunikace po CAN s použitím shieldu

Obrázek 3.4: Arduino DUE s CAN shieldem

Rozhraní má dva CAN porty a umožňuje jejich paralelní použití. Výrobce k shieldu poskytuje soubory s funkcemi pro použití a ukázkový program, na jehož základě lze snadno porozumět jak se shieldem pracovat. Porty jsou na shieldu označené 1 a 2 a v programu mají číslo 0, resp. 1[5].

Funkce pro použití sběrnice jsou implementovány v knihovně *DueCANLayer*. Knihovna *DueCANLayer* využívá knihovnu *due_can*.

```

1 #include "DueCANLayer.h"
2 // CAN Layer functions
3 extern byte canInit(byte cPort, long lBaudRate);

```

```

4 | extern byte canTx(byte cPort, long lMsgID, bool
   |     bExtendedFormat, byte* cData, byte cDataLen);
5 | extern byte canRx(byte cPort, long* lMsgID, bool*
   |     bExtendedFormat, byte* cData, byte* cDataLen);

```

canInit inicializuje port CAN. Argumenty jsou port (0, 1) a baudrate.

canRx ověří jestli je dostupný nový rámec a následně ho zpracuje

canTx zkomponuje a odešle rámec

Každá z funkcí má návratovou hodnotu, která může nabývat stavů *CAN_ERROR* a *CAN_OK* resp. 0 a 1. Návratová hodnota vyjadřuje, jestli při vykonání funkce nastala chyba. Funkce *canRx* a *canTx* přijímá parametry:

cPort výběr portu CAN - může být 0 nebo 1

lBaudRate komunikační rychlost sběrnice

lMsgID identifikátor rámce

bExtendedFormat informace o formátu CAN rámce

cData odesílaná data nebo proměnná pro uložení přijatých

cDataLen počet bitů dat

3.3 Snímač natočení volantu a zadní nápravy

Snímače z podvolantové jednotky Škoda nabízí absolutní snímání natočení a informace odesílají po sběrnici CAN. Jeden snímač bude použit pro zjištění natočení volantu a další snímač bude použit pro zjištění natočení zadní nápravy. Oba snímače vysílají rámce se stejnými identifikátory a tak nemůžou být oba připojeny do CAN sítě elektromobilu, protože jednotky které by chtěli pracovat s jejich informacemi by je nerozlišily. K Arduino byl však vybrán shield s dvěma CAN porty. Snímač u volantu se připojí do sítě automobilu stejně jako první port CAN Arduina a snímač u zadních kol se připojí do druhého portu. Informace o natočení zadních kol tak může zpracovávat pouze řídicí jednotka, a také může zprávu poskytnout do sítě pod jiným identifikátorem.

3.3.1 Data ze snímače

K volantu není veřejně dostupná dokumentace a proto bylo třeba jeho funkci otestovat. Součástí práce je tedy vytvoření dokumentace tohoto snímače. Bylo zjištěno, že zpráva se skládá z informace o aktuálním natočení a z informace o zrychlení nebo



Obrázek 3.5: Podvolantová jednotka používaná ve vozech Škoda

rychlosti otáčení. Pro nás je zajímavá pouze informace o poloze nalézající se v prvních dvou bytech zprávy. Výsledky testování a úprava hodnot byly zpracovány do následující tabulky. Pro referenční úhel byla zvolena středová poloha, protože jde dobře vizuálně poznat a díky tomu lze přesněji zjistit pootočení snímače o přesně jednu otáčku. Natočení snímače v hexadecimální soustavě vyjadřuje δ_{16} a v desítkové δ_{10} . Přírůstek (krok) o kolik se mění výstup snímače Δ_{10} je kladný při točení doleva, záporný při točení doprava. Znaménko úhlu natočení tedy ctí zaběhlé konvence (kladný směr je doleva).

Ref. úhel [°]	Byte0 ₁₆	Byte1 ₁₆	δ_{16}	δ_{10}	Δ_{10}
360	24	20	2024	8228	34
	02	20	2002	8194	34
	E0	1F	1FE0	8160	34
	...				
	45	00	0045	69	35
	22	00	0022	34	34
0	00	00	0000	0	0
	22	80	8022	32802	-35
	45	80	8045	32837	-34
	67	80	8067	32871	-34
	...				
	E0	9F	9FE0	40928	-34
	02	A0	A002	40962	-34
-360	24	A0	A024	40996	-35
	47	A0	A047	41031	

Tabulka 3.1: Data ze snímače natočení

Z naměřených a zpracovaných hodnot byly odvozeny následující vztahy: Záporné hodnoty stoupají s natočením stejně jako kladné, ale jsou odsazené o:

$$offset = 8000_{16} = 32768_{10}$$

Natočení se vždy mění o 34 nebo 35. Průměrná změna je:

$$\Delta_{10} = 34,29$$

Jedna otáčka je dlouhá:

$$\Delta_{10}(\pm 360^\circ) = \pm 8228$$

Hodnoty natočení se mění skokově a proto má sensor menší rozlišení než jaký má rozsah hodnot na výstupu. Na jednu otáčku tedy připadá n kroků po Δ [°]:

$$n = \frac{\Delta_{10}(360^\circ)}{\Delta_{10}} = \frac{8228}{34,29} = 240,0$$

$$\Delta = \frac{360^\circ}{n} = \frac{360}{240} = 1,500^\circ$$

Aktuální úhel natočení δ [°] se pro kladnou a zápornou část přepočte na stupně vztahy:

$$\delta = \frac{\delta_{10}}{\Delta_{10}(360^\circ)} 360^\circ \quad \text{a} \quad \delta = -\frac{\delta_{10} - 32768}{\Delta_{10}(360^\circ)} 360^\circ$$

Použitím zjištěných vztahů lze vyčíslit úhly pro natočení z předchozí tabulky.

Ref. úhel [°]	δ_{10}	Spočtený úhel [°]
360	8228	360,00
	8194	358,51
	8160	357,02
	...	
	69	3,02
	34	1,49
0	0	0,00
	32802	-1,49
	32837	-3,02
	32871	-4,51
	...	
	40928	-357,02
	40962	-358,51
-360	40996	-360,00
	41031	-361,53

Tabulka 3.2: Převedená data snímače natočení

Měření proběhlo na rozsahu $\pm 360^\circ$. Snímač lze ale natočit více. Maximální používané natočení se předpokládá $\pm 540^\circ$, což je přibližný úhel, o který se dá natočit volant ve vozidle (volant je propojený s řídicí tyčí nápravy a úhel je tak vázaný na převod v nápravě).

3.3.2 Aplikace zjištěných vztahů v programu

Nejdříve se přijmou data, následně se upraví do jedné proměnné a nakonec se vypočte natočení volantu.

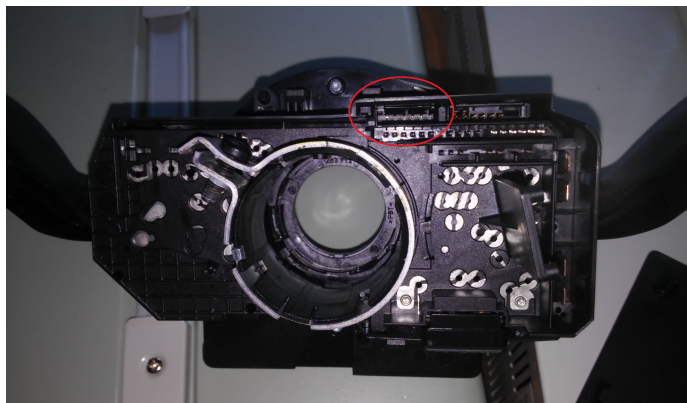
```
1  canRx(0, &IMsgID, &bExtendedFormat, &cRxData[0], &
    cDataLen); //ziskani ramce z volantu
2
3  word angleDataSWRx; //SW = Steering Wheel; data
    prijata z volantu
4  float angleDegreesSW; //prepocet dat na uhel
5  angleDataSWRx = cRxData[1]; //uprava prijateho
    ramce do jedne promenne
6  angleDataSWRx <<= 8;
7  angleDataSWRx |= cRxData[0];
8
9
10 if (angleDataSWRx < 32767) {
11     angleDegreesSW = float(angleDataSWRx) / 8228.0 * 360.0;
    //vypocet uhlu pro kladne hodnoty (smer CCW)
12 }
13 else {
14     angleDegreesSW = -(float(angleDataSWRx) - 32767.0)
    / 8228.0 * 360.0; //to same pro CW
15 }
```

3.3.3 Zapojení snímače

Jednotka nemá veřejně dostupné informace o rozložení svých pinů a bylo tedy potřeba jejich rozložení zjistit. Za pomoci vedoucího bylo zjištěno následující rozložení:

Piny zakroužkované na obrázku, pořadí zleva:

1. klíček zapalování (+12 V)
2. +12 V trvale
3. GND
4. CANH
5. CANL
6. nezapojeno



Obrázek 3.6: Piny na podvolantové jednotce

3.4 Servoměnič k motoru

Protože synchronní motor se dá regulovat přesně - natočení rotoru by se mělo rovnat natočení magnetického pole vytvořeného kontrolérem na statoru, takže se dá jednoduše nastavit výsledná poloha - bylo by vhodné použít kontrolér s polohovou regulací, tzn. že regulátor přijme zprávu, nejlépe po CAN, obsahující požadovanou polohu (natočení) motoru a sám k ní motor dovede.

Dále je potřeba uvést, že měnič s motorem byl nejproblematičtější částí práce a celou ji zdržel tak, že nebylo možné dosáhnout cílů daných na začátku.

3.4.1 Keya Electron - KYDBL4830-1E

Jako první byl vybrán měnič od Výrobce Keya Electron. Výrobce udává, že kontrolér umí polohovou regulaci - v praxi to znamená poslání zprávy po CAN s údajem, o kolik se má hřídel motoru otočit. Kontrolér však na takovou zprávu vůbec nereagoval. Z CAN zpráv uváděných v návodu reagoval pouze na některé a to pouze způsobem točit/netočít (šlo také nastavit rychlost), resp. se točil dokud mu přicházely zprávy po CAN, že se točit má. Navíc točení motorem bylo občas doprovázeno silnými záškuby (testování probíhalo na stole a tím, jak sebou motor škulb dělал hlasité rány o stůl). Tyto rány byly pozorovány při ovládání Arduinem i při použití výrobcem dodaného programu určeného k testování a konfiguraci kontroléru. Bohužel v aplikaci jako je tato, kde jde i o bezpečí lidí je takovéto chování kontroléru nepřijatelné.

Protože opatření prvního kontroléru trvalo dlouho a nakonec byl k ničemu, bylo ztraceno spousta času a práce se výrazně zpozdila. Autor ani vedoucí práce kontroléry od čínské firmy Keya Electron nedoporučují.



Obrázek 3.7: Kontrolér od Keya Electron

3.4.2 DMM Technology Corp. - DYN2-TLC6S-00



Obrázek 3.8: Kontrolér od DMM

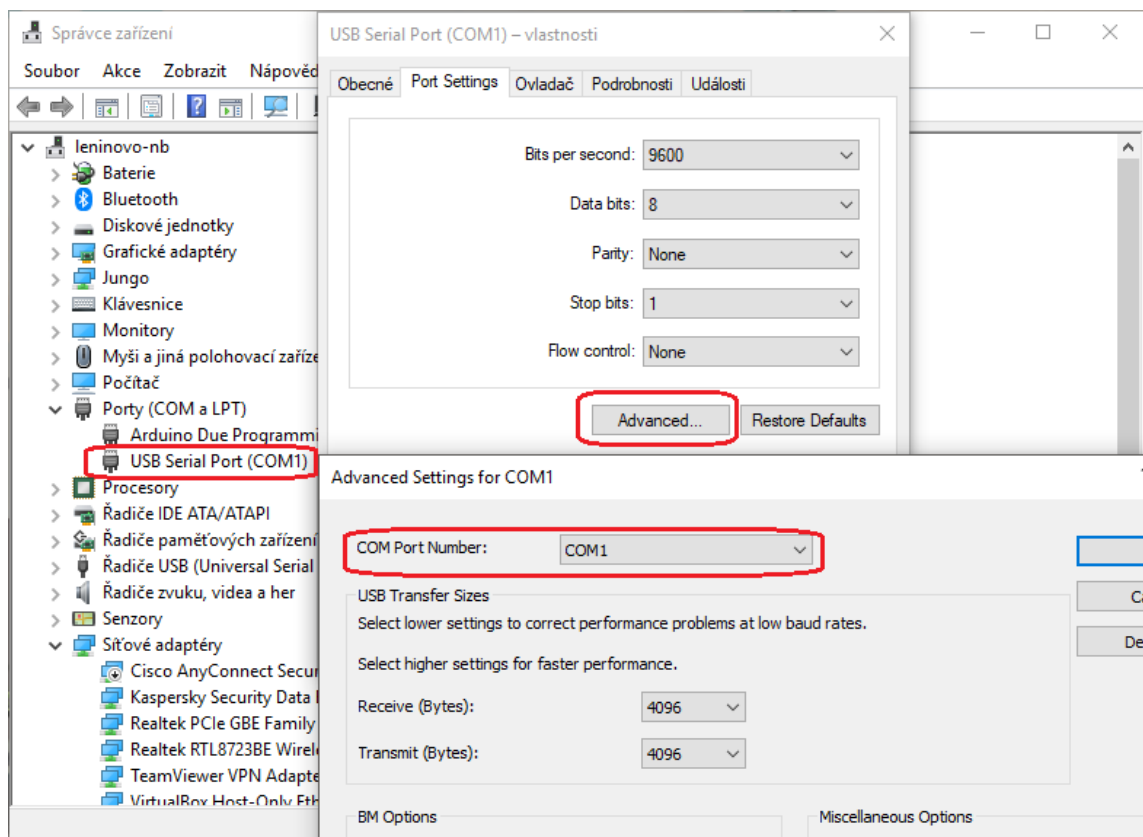
Jako druhý byl zvolen kontrolér od Kanadské firmy Dynamic Motor Motion Technology Corporation. Zde už byl brán větší zřetel na výběr, aby zase nebylo pořízeno něco, co nefunguje.

Servoměnič disponuje několika módy funkčnosti včetně požadované polohové regulace a má ochranu proti vysokému proudu, napětí, teplotě, výkonu, ztrátě pozice a polohovou vazbu.

	Parametr	Specifikace
Vstup	Napětí	24-75 VDC
	Nominální napětí	60 VDC
	Proud	16 A
Výstup	Nominální napětí	+75 VDC mezi dvěma fázemi
	Nominální proud	20 A

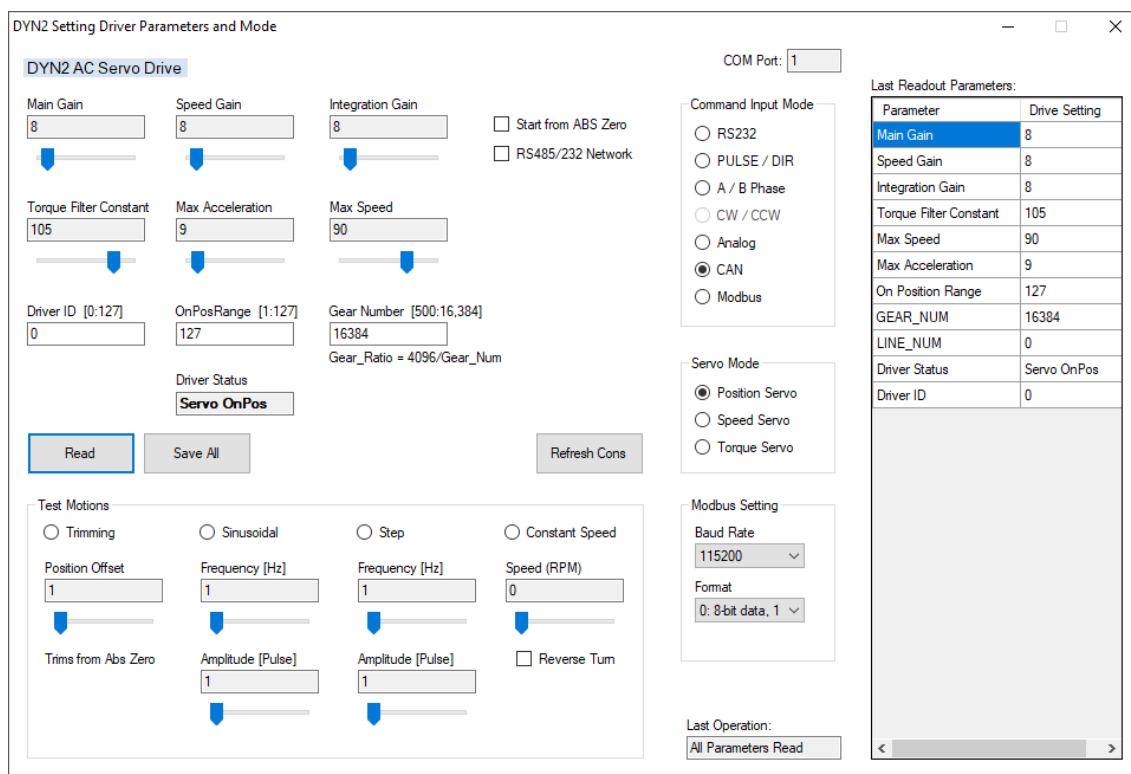
Tabulka 3.3: Elektronické specifikace servoměniče DYN2-TLC6S-00[6]

Výrobce k servoměniči poskytuje obslužný program použitelný pro konfiguraci, otestování funkčnosti nebo čtení dat ze snímače natočení. Servoměnič lze k PC připojit USB kabelem. Program je třeba po spuštění manuálně propojit s COM portem počítače, kde je zapojený servoměnič. Zde může nastat problém s připojením - obslužný program nabízí připojení pouze na portech 1-8. Jestliže bylo USB servoměniče přiřazeno operačním systémem na vyšší port, obslužný program servoměniče nenažde. Je tedy potřeba ručně změnit port, na který je připojeno USB od servoměniče. Program byl testován na systému Windows, který je patrně i jediný podporovaný operační systém. V systému Windows se port změnit ve správci zařízení:



Obrázek 3.9: Nastavení portu v systému Windows

Obslužný program nabízí nastavení servoměniče. Je to ale dobré pouze pro odladění, protože po odpojení napájení měnič nastavení zapomene.



Obrázek 3.10: Obslužný program servoměniče DYN2 - nastavení

3.4.3 DYN2 - Komunikace po CAN

V první řadě, servoměnič si po vypnutí nepamatuje výchozí pozici a po zapnutí za výchozí považuje pozici aktuální. Pro zjištění výchozí pozice se použije druhý snímač z podvolantové jednotky s absolutním snímáním polohy. Protože do servoměniče nejde nastavit, v jaké se zrovna nachází pozici, tak se místo nastavení výchozí pozice bude muset uzpůsobit výpočet na základě dat z podvolantové jednotky. Servoměnič si bohužel po vypnutí nepamatuje ani nastavení maximální rychlosti a zrychlení.

Po spuštění a také v průběhu programu (kvůli možnému výpadku napájení servoměniče) tak musí řídicí jednotka do servoměniče posílat zprávy s nastavením. Při výpadku proudu se také resetuje nulová pozice na aktuální. Požadovaná poloha se tak bude muset vypočítávat na základě toho, kde si servoměnič myslí, že s motorem je (od servoměniče lze vyžádat rámec s informací o aktuální natočení) a na základě skutečného natočení nápravy.

Informace o akci požadované od servoměniče jsou obsaženy v odesílaných datech a nestandardně i v identifikátoru. Identifikátor tak obsahuje požadovanou akci v dolních pěti bitech a v horních šesti pak samotné číslo servoměniče. Parametry

k požadované akci jsou obsaženy v datech rámce.

Níže je zobrazeno odeslání rámce s nastavením rychlosti a akcelerace uložených do pole *motorInit*, kde první hodnota je požadovaná rychlost a druhá je akcelerace. Dále pak rámec obsahující *motorRead*, vyžadující od servoměniče informaci o aktuální poloze. Servoměnič vrátí rámec s aktuální polohou a stejným identifikátorem.

```
1 byte motorInit [] = {0x5A, 0x09};
2 byte motorRead [] = {0x1b};
3 canTx(0, 0x11, false, motorInit, 2);
4 //id = 0x0, prikaz = 0x11; 0x11: nastav parametry
5 canTx(0, 0x0e, false, motorRead, 1); //prikaz 0x0e; 0
   x0e: cti pozici
```

Poloha motoru se nastavuje odesláním rámce s informací o požadovaném absolutním natočení. Servoměnič se sám postará o plynulé dojetí na cílovou polohu a zastavení. Data při točení doprava (záporné natočení) se kódují pomocí dvojkového doplňku.

```
1 if(angleDataSWRx < 32767) {
2     //prepocet dat z volantů na data do menice motoru
3     angleDataMotorTx = angleDataSWRx*7*30;
4 }
5 else {
6     //prepocet na data do menice pro zaporne hodnoty
7     angleDataMotorTx = (angleDataSWRx-32767)*7*30;
8     angleDataMotorTx = ~angleDataMotorTx;
9     angleDataMotorTx++;
10 }
11
12 //vytvoreni dat pro odeslani v ramci do menice
13 cTxData0[3] = angleDataMotorTx;
14 angleDataMotorTx >>= 8;
15 cTxData0[2] = angleDataMotorTx;
16 angleDataMotorTx >>= 8;
17 cTxData0[1] = angleDataMotorTx;
18 angleDataMotorTx >>= 8;
19 cTxData0[0] = angleDataMotorTx;
20
21 canTx(0, 0x01, false, cTxData0, 4);
```

3.5 Servomotor

Motor *640-DST-A6TK1* byl objednán spolu se servoměničem od stejného výrobce Dynamic Motor Motion. Pohon má v sobě snímač polohy a rozhraní pro komunikaci se servoměničem. Servomotor motor byl vybrán pro vysokou účinnost a proto, že lze přesně regulovat jeho pohyb.

Motor byl vybrán vedoucím dle výkonu potřebného k otočení nápravy, kde výkon potřebný aby otočil nápravou s použitím šnekové převodovky byl 345,1 W a motor byl vybrán o výkonu 400 W.



Obrázek 3.11: Servomotor 640-DST-A6TK1[7]

Nominální napětí	60 V
Nominální výkon	0,4 kW
Nominální proud	8,4 A
Nominální kroutící moment	1,27 N m
Nominální rychlost	3000 ot/min
Enkodér polohy	16-bitový absolutní
Hmotnost	1,65 kg
Krytí	IP65

Tabulka 3.4: Specifikace motoru DMM 640-DST-A6TK1[8]

3.6 Šneková převodovka

Jelikož má motor pro tuto aplikaci nízký moment, ale lze dosáhnout relativně vysokých otáček, byla použita převodovka. Šneková převodovka byla použita z důvodu její samosvornosti. Vybrán byl typ NMRV040-30 od výrobce ToAuto.

Převod	30:1
Účinnost η	0,70
Hmotnost	2,3 kg

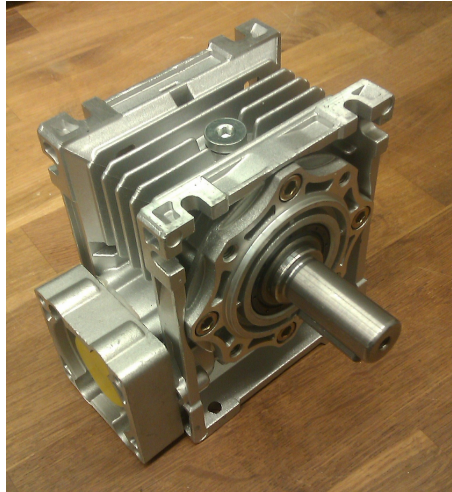
Tabulka 3.5: Parametry převodovky NMRV040-30

Aby výkon na vstupu řídicího ústrojí byl takový, jaký je požadován, je potřeba výkon motoru ještě zvýšit, protože v převodovce jsou výkonové ztráty:

$$P_2 = P_1 \times \eta$$

kde P_1 [W] je výkon vstupní, P_2 [W] výstupní a η [1] účinnost. Požadovaný výstupní výkon je dán nápravou elektromobilu, potřebný výkon motoru s převodovkou je tedy:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{245,1}{0,70} = 345,1 \text{ W}$$



Obrázek 3.12: Šneková převodovka

3.7 Měnič napájecího napětí

Hlavní baterie elektromobilu má napětí 120 V. Protože byl sehnán měnič s motorem na 60 V, je třeba napětí baterie snížit a to konkrétně na 60 V.

K dispozici je měnič napětí ze 120 V na 60 V. U měniče bylo zjištěno, že při vypnutém stavu do něj na jeho výstupu teče signifikantní proud asi 5 mA. Měnič ze 60 V na 120 V tak bude třeba opatřit na vstupu i výstupu relátky, která se při vypnutém stavu měniče rozepnou.

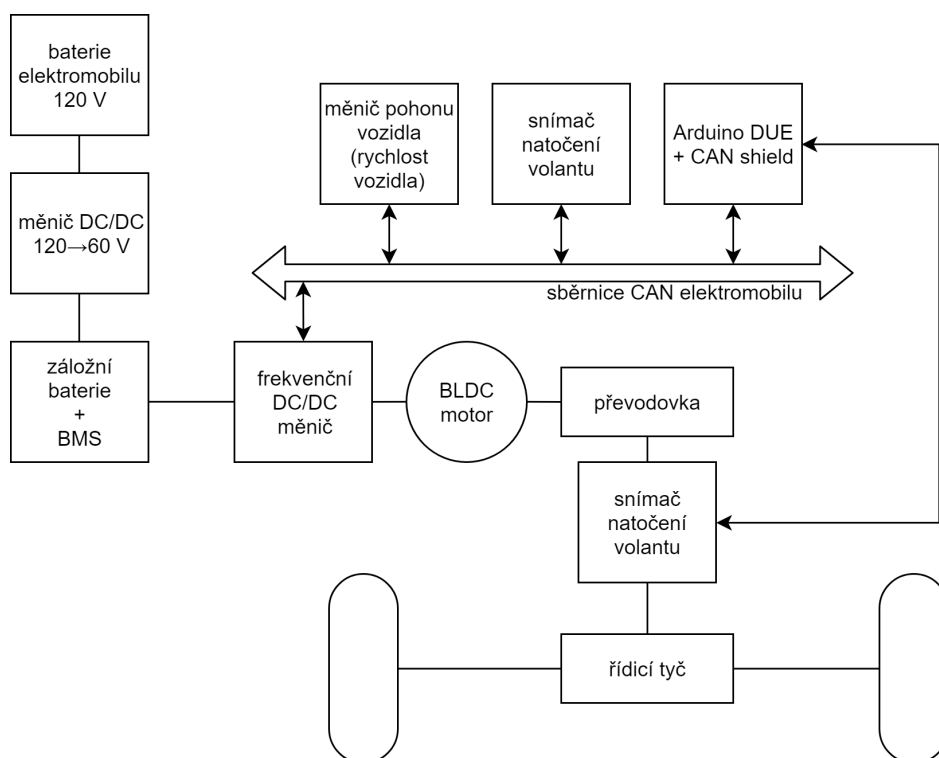
3.8 Záložní napájení a BMS

Z bezpečnostních důvodů je třeba opatřit napájení měniče, zdroje silové elektřiny, záložním zdrojem - baterií. Ta by nastoupila ve chvíli, když by se vyskytla nějaká porucha na napájecím měniči. Záložní baterie by mohla být sestavená z 16 článků LiFePo o napětí 3,6 V a celkové napětí by tedy dalo 57,6 V při nabitém stavu. Baterie by měla být k primárnímu napájení připojena pomocí BMS (Battery Management System). Ten se postará o připojení baterie a o její nabíjení.

4 Kompletace systému a bezpečnost

4.1 Blokové schéma systému

Zapojení kompletního systému pro přiřizování zadních kol by mělo vypadat podle následujícího schématu. Řídicí jednotka Arduino komunikuje po sběrnici CAN s ostatními členy soustavy. Přijímá informace od snímače natočení volantu snímajícího volant, snímače natočení volantu přimontovaného na výstupní hřídeli šnekové převodovky a od měniče hlavního pohonu vozidla vysílajícího informace o rychlosti vozidla. Arduino ovládá servoměnič natočení zadní nápravy, který točí s motorem a ten přes převodovku otáčí se vstupní hřídelí říditelné nápravy. Servoměnič je napájen z baterie elektromobilu, jejíž napětí se snižuje měničem napětí a proti výpadku je to jištěné záložní baterií připojenou přes BMS.



Obrázek 4.1: Blokové schéma kompletního systému

4.2 Kompletace

Původně zamýšlená instalace do experimentálního elektromobilu bohužel nebyla realizována kvůli problémům s dodáním součástí systému, zejména s dodáním servoměniče k motoru, kde první objednaný měnič nefungoval jak měl a jeho funkce trpěla záškuby po nepravidelné době. Druhý měnič sice už fungoval jak měl, nicméně přišel až 23.4.2018 - tři týdny před odevzdáním, kdy měli práce na bakalářce již vrcholit. Co se týče zpožděného dodání dalších komponent, tak motor byl dodán také pozdě, protože byl dodáván spolu se servoměničem a šneková převodovka přišla také se zpožděním. Kvůli zpožděnému dodání hlavních komponent nebylo možné stihnout uvést celý systém do provozu, jak bylo původně zamýšleno.

Systém se stihlo realizovat pouze do fáze, kde pohon řízení funguje dle navrženého zjednodušeného algoritmu na zkušebním pracovišti mimo vozidlo.

4.3 Další práce

Protože systém se nestihlo sestavit jak bylo zamýšleno, zbývá na něm ještě práce. Bude třeba zapojit komponenty na stávající sběrnici vozidla a uvést celý systém do provozu. Ve výsledku by se měl systém fyzicky nainstalovat do elektromobilu, což by obnášelo připojení na měnič napájecího napětí a záložní baterii a mechanické přimontování motoru s převodovkou na zadní nápravu. Dále pak přimontování snímačů natočení na volant a mezi převodovku a nápravu. Části s přimontováním motoru a převodovky by se měl nejlépe ujmout někdo z fakulty strojní.

4.4 Bezpečnost s použitými komponenty

Celý systém je navržený jako experimentální s ohledem na jednoduchost návrhu a není zamýšlen pro použití v běžném provozu, ostatně jako celý školní experimentální elektromobil. Ač se zde vyskytují komponenty zřejmě splňující automobilové normy, jako snímač natočení volantu od Škody, jsou zde použity komponenty jako Arduino nebo převodovka z AliExpressu, jež nesplňují automobilové normy o spolehlivosti či rozsahu pracovních teplot a další. Systém rovněž není předimenzován a postaven aby vydržel všemožné zacházení a rozmanité pracovní podmínky.

5 Závěr

V bakalářské práci byl představen školní experimentální elektromobil a zjištěn výkon potřebný k otáčení hřídelí zatáčejícího ústrojí v zadní nápravě. Výkon byl zjištěn za základě momentu potřebného k otočení nápravou a předpokládané potřebné rychlosti otáčení hřídelí. Dále byl nadimenzován na výsledný potřebný výkon $P = 245,1 \text{ W}$.

V druhé kapitole byly představeny již existující a používané systémy a následuje stručný popis geometrie řízení ukazující teoretický výsledný efekt při zatáčení zadních kol automobilu - zmenšený rádius otáčení nebo vyšší laterální rychlost vozidla. Funkčností současných systémů byl inspirován návrh vlastního řídicího algoritmu pro výpočet úhlu natočení zadních kol. Algoritmus při nižších rychlostech vozidla (do 40 km h^{-1}) zatáčí nesouhlasně, tzn. obráceně než přední kola a nad přechodovou rychlostí zatáčí souhlasně, tzn. stejným směrem jako přední kola. Maximální vychýlení zadních kol bylo zvoleno přibližně na 5° a je dosaženo pouze při plném rejdu předních kol a nízké nebo naopak vysoké rychlosti vozidla. Natočení se mění plynule - nejvyšší vychýlení je při nulové rychlosti, postupně se zvyšuje až při přechodové rychlosti 40 km h^{-1} je nulové a při dalším zrychlování se - už pomaleji - zvyšuje až do nejvyššího vychýlení při rychlostech nad 100 km h^{-1} .

Výpočetní jednotkou přířizovacího systému bylo zvoleno Arduino DUE s CAN shieldem pro komunikaci po sběrnici CAN. Arduino by mělo dostávat informace o natočení volantu (přední náprava je s volantem napevno spojená) a natočení zadní nápravy, na což byl použit snímač natočení volantu pro automobily Škoda. Dále přijímá informace od silového měniče pohonu vozidla o rychlosti vozidla. Řídicí jednotka vypočítá natočení a ovládá servoměnič a AC motor. Motor přes šnekovou převodovku otáčí s hřídelí zatáčejícího ústrojí zadní nápravy. Pro napájení servoměniče bylo navrženo použít baterii elektromobilu a její napětí snížit napěťovým měničem ze 120 V na 60 V . Dále by mělo být napájení jištěno záložní baterií, připojenou skrze jednotku BMS, která by se postarala o udržování baterie a připojení v případě výpadku měniče napětí od baterie elektromobilu.

Realizace systému byla nejbolestivější částí práce, protože byly problémy se zpožděním dodaných komponent, především servoměniče spolu s motorem a převodovky. Servoměniče byly objednány dva - první dorazil v únoru místo před vánoci jak bylo očekáváno a bylo zjištěno, že neumí slibovanou polohovou regulaci a vlastně vůbec nejde použitelně ovládat a navíc trpí záškuby po nepravdělné době. Kromě špatné funkcionality by byl v této aplikaci i nebezpečný. Druhý servoměnič přišel také opožděně a to 23.4.2018, kdy už nezbývalo mnoho času na realizaci. Tento servoměnič už fungoval správně a nevykazoval náznaky nebezpečného chování. Převodovka přišla také někdy v květnu. Motor byl objednávan v obou případech spolu se servomě-

ničem kvůli již v motoru implementovanému polohovému snímači komunikujícímu pouze se silovou jednotkou od výrobce. Projekt byl nakonec realizován pouze z části, kde řídicí jednotka ovládá motor pouze na základě zjednodušeného algoritmu řízení, založeném pouze na úhlu natočení volantů.

Literatura

- [1] WAN, Mark. *Steering*. AutoZine [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.autozine.org/technical_school/traction/Steering_3.html
- [2] Steering. *Wikipedia* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Steering#Four-wheel_steering
- [3] ZF Friedrichshafen AG [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.zf.com/>
- [4] CORRIGAN, Steve. *Introduction to the Controller Area Network (CAN)* [online]. In: . Březen 2016, s. 17 [cit. 2018-04-10].
- [5] COPPERHILL TECHNOLOGIES. *Arduino-Based ECU Development Board With Dual CAN Bus Interface - Copperhill* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://copperhilltech.com/arduino-based-ecu-development-board-with-dual-can-bus-interface/>
- [6] DMM Technology Corp. *DYN2 Series: AC Servo Drive Specification* [online]. In: . s. 72 [cit. 2018-04-11].
- [7] *DST 0.4kW AC Servo Motor - DMM Technology Corp. Online Store* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://store.dmm-tech.com/products/dst-0-4kw-ac-servo-motor>
- [8] DMM TECHNOLOGY CORP. *DHT / DST SERIES AC SERVO MOTOR SPECIFICATION MANUAL* [online]. In: . říjen 2017, s. 23 [cit. 2018-04-29].

Přílohy

Obsah přiloženého CD:

- Text bakalářské práce
 - bakalarska_prace_2018_Rompotl_Tomas.pdf
- Zdrojový kód pro Arduino
 - rear_steering (složka obsahuje projekt Arduino a použité knihovny)
- Referenční tabulka výpočtu algoritmu
 - algoritmus.xlsx
- Data snímače natočení
 - podvolantová_jednotka.xlsx
- Datasheet převodovky
 - NMRV040-30.pdf
- Návod a datasheety k DMM servoměniči a motoru
 - DMM servo (složka)
- Doporučená literatura
 - Doporučená literatura (složka)