ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

(Teoretický základ strojního inženýrství)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh modelu automobilu pro automatické řízení

Design of vehicel model for testing automatic control

Vyhotovil(a): Václav Kovařík

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Neusser, Ph.D

Praha 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně ve spolupráci s vedoucím bakalářské práce Ing. Zdeňkem Neusserem, Ph.D a za použití uvedené literatury a pramenů.

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

V Praze dne …

……

Jméno Příjmení

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi při vypracování bakalářské práce pomáhali. Především děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňkovi Neusserovi, Ph.D za pomoc při zpracování dat z měření. Děkuji také rodině za psychickou podporu při vypracování.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá návrhem modelu pro testování automatického řízení. Součástí práce je návrh konstrukčních prvků, výběr vhodných senzorů a testování ultrasonického senzoru. Dále jsou v práci popsány principy fungování dvou algoritmů, otestování pohonné jednotky a na závěr simulace kolony vozidel.

Klíčová slova

Model automobilu, typy senzorů, princip fungování akcelerometrů, ABS, systém sledování vozidla, testování pohonné jednotky, simulace kolony

Summary

This bachelor thesis deals with design of model for testing automatic control. The part of this work is, design of constructs elements, choose of appropriate sensors and testing of ultrasonic sensor. In the next part, there are described principles of working two algorithms, testing of the drive unit and in the end, there is simulation of vehicle column.

Key words

Model of vehicle, types of sensors, principles of working accelerometers, ABS, system of following vehicle, testing drive unit, simulation of vehicle column

Obsah

1. Úvod ... 6
2. Výběr konstrukčních prvků modelu ... 7
2.1. Požadavky na mechanický model ... 7
2.2. Shrnutí variant, porovnání, výhody a nevýhody ... 7
2.2.1. LEGO Mindstorms ... 7
2.2.2. VEX Robotics ... 8
2.2.3. RC modely ... 9
2.3. Konečné rozhodnutí ... 11
3. Přehled senzorického vybavení vozidla ... 11
3.1. Senzory polohy ... 11
3.1.1. Typy senzorů polohy pro model ... 12
3.2. Akcelerometry (senzory zrychlení) ... 15
3.2.1. Teorie principu akcelerometrů ... 16
3.2.2. Analogový kapacitní akcelerometr ADXL50 ... 18
3.3. Shrnutí k senzorům ... 19
4. Testování senzoru k udržování vzdálenosti vozidel v koloně ... 20
4.1. Základní parametry senzoru ... 20
4.2. Měření ... 20
4.2.1. Úvod k měření ... 20
4.2.2. Část kódu programu, řídící senzor ... 21
4.2.3. Tabulka naměřených hodnot ... 21
4.2.4. Zpracování dat ... 21
4.2.5. Závěr a vyhodnocení měření ... 22
4.3. Celkové shrnutí použitelnosti senzoru ... 22
5. Základní elektronické systémy ... 23
5.1. Elektronický systém brzdění a ABS ... 23
5.1.1. Adhezní charakteristika ... 23

5.1.2. Momentová rovnováha kola s kontaktem s vozovkou 25
5.1.3. Kontrolní cykly systému ABS 26
5.1.4. Potřebné senzorové vybavení pro systém ABS 28
5.1.5. Shrnutí elektronického systému brzdění 28
5.2. Návrh systému sledování stopy sledovaného vozidla 29
5.2.1. Princip fungování sledování 30
5.2.2. Úskalí navrženého systému 31
6. Výběr řídící elektroniky modelu 32
6.1. Požadavky na řídící elektroniku 32
6.2. Struktura řídící elektroniky 33
6.3. INTEL Galileo Gen 2 34
6.4. Ostatní prvky schémata 34
6.5. Rozložení schéma v modelu 35
7. Testování pohonné jednotky 36
7.1. Motor 36
7.2. ESC (Electronic Speed Control) 37
7.3. Měření 38
7.3.1. Postup měření a vyhodnocení 38
7.3.2. Závěr měření 40
8. Simulace kolony vozidel 41
8.1. Schéma v prostředí Simulink 42
8.2. Výsledný graf závislosti rychlosti na čase 42
9. Závěr 44
10. Seznam obrázků 45
11. Seznam použitých zdrojů 47

1. Úvod

Předmětem této bakalářské práce je návrh modelu automobilu, ze kterého bude posléze složena celá kolona. Cílem je dosáhnout plně autonomního řízení vozidel. Práce začíná návrhem konstrukčních prvků, pokračuje přes výběr senzorů modelu, výběru řídící elektroniky a zakončena je simulací chování vozidel v dopravě. Protože je důležité, aby každé vozidlo kolony bylo schopno se samo autonomně řídit, je návrhu tohoto modelu zaměřena drtivá většina práce. Součástí práce jsou i dvě praktická měření. Jedno z nich je testování senzoru a druhé je testování pohonné jednotky.

O autonomní řízení vozidel je v dnešní době čím dál tím větší zájem. Důvodů proč tomu tak je, je více. Jedním z nich je postupné prosazování se elektromobilů do dopravy. Výhodou elektromobilů v tomto ohledu je ten, že nepotřebují složité řídící jednotky se spoustou senzorů, a protože celé řízení vozu je již elektronice přenecháno, zapracování autonomního řízení je jednoduší. Dalším důvodem je určitě rozvoj elektroniky a celkové automatizace ve strojírenství.

Primárním cílem autonomního řízení je bezpečnost dopravy. I přesto, že čas od času i elektronika vyhodnotí něco chybně, potlačení lidského faktoru by mělo veliký význam v bezpečnosti dopravy.

2. Výběr konstrukčních prvků modelu

Je velice důležité, aby konstrukční zpracování modelu auta vyhovovalo požadavkům předpokládaného testování a nebránilo ani pozdějšímu vývoji a zkoušení dalších prvků řízení automobilu, jako je např. systém ABS. Proto se tato kapitola musí v mém návrhu objevit. Pro model je potřeba najít mechanickou část, pohon a elektroniku s řízením, ideálně vše v jednom balíčku. Moje první návrhy směřovaly ke stavebnicím typu LEGO Mindstorms nebo VEX Robotics. Bohužel ani jedna z nich nesplňovala některé požadavky, a proto jsem se nakonec uchýlil do kategorie RC modelů.

2.1. Požadavky na mechanický model

Je potřeba, aby model splňoval určitá kritéria. Jendo z hlavních kritérií je hmotnost, které bude třeba přizpůsobit vybraný pohon. Protože se jedná o model automobilu, řízená přední náprava je samozřejmostí, vyjma testování ACC, pro zkoušení algoritmů jízdy vozidel v koloně lze použít vozidla jedoucí jen vpřed a vzad. Dalším důležitým parametrem je velikost modelu. Pokud bude model malý, nebude možné na něj instalovat senzory, kterých bude potřeba hodně, a naopak s rostoucí velikostí poroste zase hmotnost modelu. Model by měl být konstrukčně co nejjednodušší, tudíž přední náprava nebude hnaná. Co se týče aktivních prvků mechanického modelu, celý podvozek by měl být odpružen. Na zadní nápravě bude muset být plnohodnotná hnací soustava. To znamená: diferenciál, kloubové hřídele a brzdy.

2.2. Shrnutí variant, porovnání, výhody a nevýhody

2.2.1. LEGO Mindstorms

LEGO Mindstorms je programovatelná robotická stavebnice, dnes již třetí verze EV3, která využívá stavební prvky z dílny LEGO Technic. Stavebnice má rozsáhlé senzorové vybavení, především pro stavbu robotů, které je připojeno do tzv. „programovatelné kostky“. Kostka slouží jako napájecí a řídící centrum. Kostka disponuje čtyřmi vstupy pro senzory a čtyřmi výstupy pro krokové motory. Dále jedním výstupem microUSB pro

Obrázek 1: Model ze stavebnice LEGO Mindstorms [zdroj 4]

připojení k PC, jedním USB vstupem pro Wi-Fi adaptér a jedním slotem pro SD kartu na ukládání programů [zdroj 4]

Výhody a nevýhody LEGO Mindstorms

Pokud začnu s výhodami stavebnice LEGO, musím uvést hlavně velikou škálu dílů a schopnost postavit ze stavebnice vše co potřebuji, a to i konstrukčně jednoduše, dokonce i dost specifických prvků pro model automobilu, jako je např.: diferenciál, nebo odpružení náprav. Dále je to dobrá kompatibilita s Matlabem, jako nástrojem pro zpracovávání výsledků. Bohužel je koncept celé stavebnice postaven na základním seznámení hravých jedinců s robotickým programováním, a tudíž pro moji aplikaci nepoužitelné. Pokud jen zkráceně shrnu důvody proč, tak je to hlavně nedostatečná pevnost dílů, veliké vůle mezi díly, absence ložisek a elektronické vybavení je značně omezeno. Obecně by se dalo říci, že programovatelná kostka je nepoužitelná, jak z hlediska počtu vstupů a výstupů, tak celkovou sofistikovaností a zjednodušeností právě pro laickou veřejnost.

2.2.2. VEX Robotics

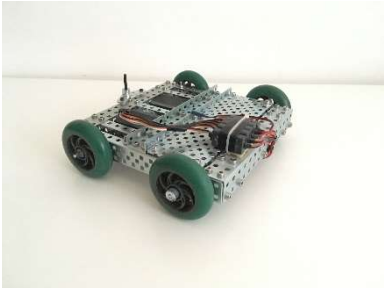
Obrázek 2: Model ze stavebnice VEX EDR [zdroj 5]

VEX Robotics je společnost, která vyrábí více typů robotických stavebnic. Jedná se o VEX IQ, což je stavebnice podobná LEGU Mindstorms, z plastu, možná trochu robustnější, ale konstrukčně chudší, za to je ale elektronické vybavení na vysoké úrovni. Dále je to VEX EDR. Stavebnice je již z kovu, tedy značně pevnější nežli verze IQ. Disponuje spoustou mechanických prvků, hlavně tedy základními (kluznými) ložisky. Co se týče elektronického vybavení VEX EDR, používá programovatelnou desku založenou na ARM Cortex procesoru. Lze použít nespočet senzorů a motorů. Posledním typem stavebnice VEX je VEX PRO. Tato stavebnice je

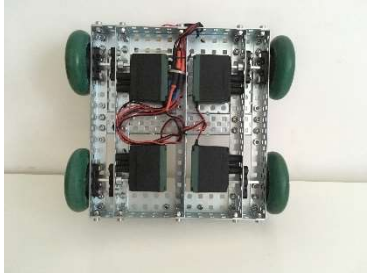
vylepšenou verzí EDR, především v konstrukčních dílech, dostupnou pouze na americkém trhu. [zdroj 5].

Výhody a nevýhody VEX EDR

Jak je v nadpise uvedeno, pro navrhovaný model jsem zvažoval verzi EDR. Pevností, cenou a dostupností se tato varianta jevila jako velice dobrá, také protože již mám stavebnici koupenou. Problém nastal ve chvíli, kdy jsem začal konstrukčně navrhovat řízenou přední nápravu. Tím, že VEX je hlavně robotická stavebnice především pro soutěže s roboty, je zatáčení řešeno jednoduchým způsobem Rychlost kol na jedné straně vozidla je rozdílná od rychlosti na straně druhé a díky prokluzu dojde k zatočení vozidla. Dalším nedostatkem bylo odpružení náprav. Když sečteme odpružení a řízení přední nápravy objeví se problém, který s VEX EDR rozhodně nelze řešit. Protože původním tématem byl jen systém ACC, již mám podvozek z VEXu postaven, v minulosti jsem ho používal jako dálkově řízený vozík pro kameru.



Obrázek 4: Podvozek ze stavebnice VEX



Obrázek 3: Podvozek ze stavebnice VEX, pohled z dola

2.2.3. RC modely

Zkratka RC vychází z anglického názvu Radio Controlled a pod pojmem RC modely je zahrnuta obrovská škála výrobků od mnoha firem. Zpravidla se jedná o napodobeniny dopravních prostředků, ať už je to automobil, loď nebo dokonce tank, všechny modely spojuje jedna věc, a to dálkové řízení, tedy RC. Český telekomunikační úřad (ČTÚ) má pro tyto modely vyhrazeno několik frekvenčních pásem. Jejich frekvence se pohybují od stovek MHz až do 2,4 GHz. Protože jsou RC modely velice rozšířeny mezi lidmi, pořádají se s nimi i závody. Pokud přeskočíme plastové hračky za několik stovek korun, dostaneme se právě do kategorie, která má již podvozky podobně řešeny jako u automobilů.

Obrázek 5: Příklad propracovanosti podvozku RC modelů [zdroj 9]

Motivace pro výběr modelu z kategorie RC

Právě po návrzích modelů ze stavebnic jsem usoudil, že najít stavebnici, která by dostatečně splňovala požadavky bude velice těžké. Rozhodl jsem se poohlédnout v oblasti RC modelů, protože nenajdu lepší podvozek, který by nejvíce odpovídal skutečnému autu. V RC modelech se používá zásadně elektronika jen na dálkové ovládání, takže musím počítat, že kompletní elektronické vybavení budu muset navrhnout. Dále budu muset dobře rozmýšlet umístění senzorů, protože úchyty na tyto senzory budu muset dodatečně vyrábět.

Roztřídění RC modelů

Základní dělení je podle velikosti. Podle mých předběžných návrhů, kde mě omezují hlavně senzory pro systém ABS a podobně, kde bude potřeba zaprvé snímání rychlosti každého kola ale zadruhé hlavně čtyři na sobě nezávislé brzdy, řízené elektronicky, vychází velikost od 1/10 nebo 1/8 a větší.

Obrázek 6: Porovnání označovaných poměrů velikostí [zdroj 6]

Další dělení je podle typu modelu automobilu. Rozlišuje se On-Road, tedy na cesty nebo Off-Road, mimo ně. Dále se dělí podle typu podvozků, většinou podle druhu motoru (elektrický nebo spalovací) a podle povrchu po kterém jezdí. Pokud bych měl vyjmenovat ty nejznámější, tak je to Monster truck (Off-Road, vysoký podvozek, zpravidla do nejhoršího terénu), Truggy (Off-Road, nižší podvozek než u Monster trucku), Buggy (rychlý Off-Road, nízký podvozek) a Rally (zpravidla modely skutečných závodních automobilů).

Výhody a nevýhody RC modelů

Mezi jednu obrovskou výhodu patří hlavně sofistikované řešení podvozků modelů. Samozřejmě si musím vybrat správnou velikost a správnou propracovanost. Na druhou stranu, modely, které splňují moje požadavky na model, jsou již dost drahé. Další nevýhodou je uchycování senzorů. Určitě by se snadněji uchycovaly na nějaké stavebnici, ale vzhledem k velikosti modelů to snad nebude zase tak veliký problém. Výhodou je také to, že podvozek RC modelů se dá složit jen jedním způsobem, na rozdíl od stavebnic, kde by se muselo dlouho rozmýšlet, jak model postavit.

2.3. Konečné rozhodnutí

Rozhodl jsem se můj model automobilu postavit právě na podvozku Buggy o velikosti 1/5, takže délka modelu je přibližně 80 cm. Jedná se o Baja 5B SS od firmy Hpi Racing. V portfoliu této firmy mají spoustu hliníkových dílů právě pro tento model. Samozřejmě žádnou část z elektroniky bych nepoužil, a to včetně spalovacího motoru, spojky a převodovky. Robustní konstrukce tohoto modelu se mi zdá být dostatečná i pro dosažení vyšších rychlostí. U čeho jsem se trochu zarazil, byla hmotnost, protože celý model váží necelých 10 kg. Těžko odhadnout, kolik bude vážit bez motoru a převodovky. Další nepříjemnost, kterou bude potřeba řešit, je již zmiňované uchycení jednotlivých senzorů. Naštěstí, díky hliníkovým dílům, které jsou k dispozici, jak vpředu, tak vzadu včetně kompletního rámu, budou mírné úpravy možné.

Obrázek 7: Baja 5B SS [zdroj 6]

3. Přehled senzorického vybavení vozidla

Vzhledem k tomu, že se jedná o model poháněný elektrickým motorem, spousta typů měřících senzoru, které se běžně nachází v automobilech na spalovací motor, se navrhovaného modelu netýká. To jsou především senzory typu: teplota, průtok vzduchu, senzory hlídající spalovací proces, různé dotykové senzory a senzory hlídající hladiny kapalin. Dá se říci, že u navrhovaného modelu jsou potřeba jen senzory, které měří pohyb jednotlivých součástí, nebo celého modelu.

3.1. Senzory polohy

Senzory polohy jsou nejspíše nejpoužívanějším typem senzorů v automatizaci. Jsou využívány ke sledování obrovského spektra parametrů, jako je například indikace otevírání dveří, měření hladiny kapalin, sledování pozice nebo rychlosti jednotlivých částí podvozků, nebo měření rychlosti rotace součástí [zdroj 7].

Polohové senzory mohou být rozděleny podle několik kritérií. Zaprvé, zda senzor měří posunutí lineární nebo uhlové natočení, dále podle typu výstupní informace, jestli je absolutní nebo relativní, a nakonec jestli senzor měří polohu, změnu polohy (vzdálenost) nebo rychlost [zdroj 7].

3.1.1. Typy senzorů polohy pro model

Indukční senzory

Indukční senzor se skládá minimálně ze dvou částí, a to z pohybující se části a z cívky, která snímá pohyb pohybující se části v jejím induktančním poli. Pohybující se část je zpravidla feromagnetický materiál. Pohyb v indukčním poli cívky je zaznamenán změnou odporu v magnetickém poli senzoru. [zdroj 7]

Tabulka 1

Parametr	Charakteristický rozměr
Snímatelná vzdálenost	10 cm
Rozlišení	1 mm
Úhel snímání	90°
Odezva	1 ms
Cena	Nízká

Obrázek 8: Indukční průmyslový snímač [zdroj 8]

Kapacitní senzory

Kapacitní senzory se skládají z minimálně dvou rovnoběžných desek. Pohyb je zaznamenáván změnou kapacity. Napětí *U* mezi párem desek s nábojem *Q* je dáno rovnicí:

$$U = \frac{Q}{C}$$

C je kapacita senzoru ve Faradech. Kapacita může být měněna několika způsoby. Zaprvé změnou vzdáleností mezi deskami *(d)*, změnou plochou překryvu *(A)*, anebo změnou permitivity materiálu *(ε)*. Výsledný vztah pro kapacitu je potom:

$$C = \frac{d}{\varepsilon \cdot A}$$

Kapacitní senzory se nejčastěji používají tam, kde je zapotřebí přesného měření malé změny polohy, jako je například v měření tlaku nebo zrychlení. [zdroj 7]

Tabulka 2

Parametr	Charakteristický rozměr
Snímatelná vzdálenost	2 m
Rozlišení	1 cm
Úhel snímání	90°
Odezva	1 ms
Cena	Nízká

Obrázek 9: Kapacitní průmyslový snímač [zdroj 8]

Optické senzory

Optické senzory se standardně skládají ze tří částí. Zdroj světla, snímač světla a cílový předmět, se kterým je pohybováno mezi zdrojem a snímačem. Právě pohybující se část upravuje světlo, které dopadá na snímač. Tyto lineární i úhlové senzory používají zpravidla pulsní techniku k monitorování pohybu. [zdroj 7]

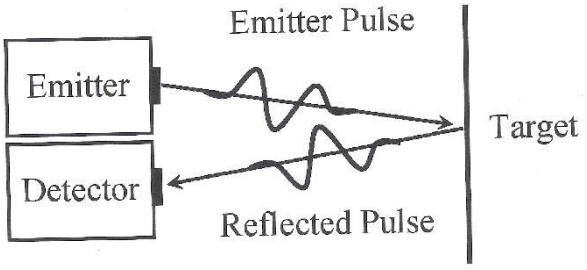
Optické senzory jsou atraktivní v automatizaci, protože mohou být levné, jsou vyrobené z plastových součástí a mají vysokou životnost právě kvůli nulovému mechanickému styku mezi snímacím cílem. Bohužel, protože využívají světelnou detekci, jejich využití se omezuje pouze na čisté prostředí, aby je nerušil prach a podobné negativní vlivy. [zdroj 7]

Tabulka 3

Parametr	Charakteristický rozměr
Snímatelná vzdálenost	100 m
Rozlišení	Nízké
Úhel snímání	Dobrý
Odezva	100 ms
Cena	Vysoká

Senzory založené na technologii radaru

Zkratka radar pochází z anglického RAdio Detection And Ranging. Jedná se o systémy, které využívají elektromagnetické vlnění k nalezení cíle, změření jeho vzdálenosti a případně i směru. Senzor vyšle na cíl vlnění, to se od něho odrazí a senzor zase zpětně zaznamená odraz. Čas mezi vysláním a zpětném získání vlnění se pomocí rychlosti šíření elektromagnetické vlny v daném prostředí přepočte na vzdálenost. [zdroj 7]



Obrázek 10: Princip odrážení vln [zdroj 7]

Senzory založené na radarovém systému mají veliké využití v automatickém řízení vozidel. Senzory umístěné na přední části vozidla se využívají u pomocných systému při dopravních zácpách. Stejně je tomu tak i na zadní části vozidla, kde zabraňují kolizi vozidla jedoucí za dotyčným vozidlem. Dalo by se říci, že tento typ senzorů na

vozidlech můžeme zařadit pod systém „adaptivní tempomat“ neboli ACC (Active cruise control). [zdroj 7]

Tabulka 4

Parametr	Charakteristický rozměr
Snímatelná vzdálenost	150 m
Rozlišení	10 mm
Úhel snímání	2°
Odezva	1 ms
Cena	Vysoká

Obrázek 11: Infračervený senzor pro Arduino

Ultrasonické senzory

Ultrasonické senzory fungují na podobném principu jako senzory radarové, avšak místo elektromagnetického vlnění využívají zvukové vlny. Tyto zvukové vlny jsou v neslyšitelném rozsahu člověka. Jedná se o frekvence nad 18 kHz. Ultrasonické technologie mají rozšířené využití, jako je například námořní sonar (SOund Navigation And Ranging), ultrazvukové snímky v lékařství, nebo různé kontroly struktury materiálů. [zdroj 7]

V automobilech se tyto senzory používají pro měření světlé výšky vozidla pro různé řídící systémy podvozku, ke sledování pozice hlavy řidiče a spolujezdce ke zvýšení bezpečnosti, nebo se ultrasonické senzory používají při různých parkovacích asistentech. [zdroj 7]

Tabulka 5

Parametr	Charakteristický rozměr
Snímatelná vzdálenost	<10 m
Rozlišení	10 mm
Úhel snímání	30°
Odezva	60 ms
Cena	Střední

Obrázek 12: Ultrasonický senzor HC-SR04 pro Arduino

3.2. Akcelerometry (senzory zrychlení)

Akcelerometr je elektromechanický převodník, který převádí mechanický pohyb určité hmoty na elektrický signál úměrně ke zrychlení té dané hmoty, tedy změny rychlosti za čas. Takový převod se řídí druhým Newtonovým pohybovým zákonem. Síla působící na měřící element je přímo úměrná ke zrychlení, které vyprodukuje.

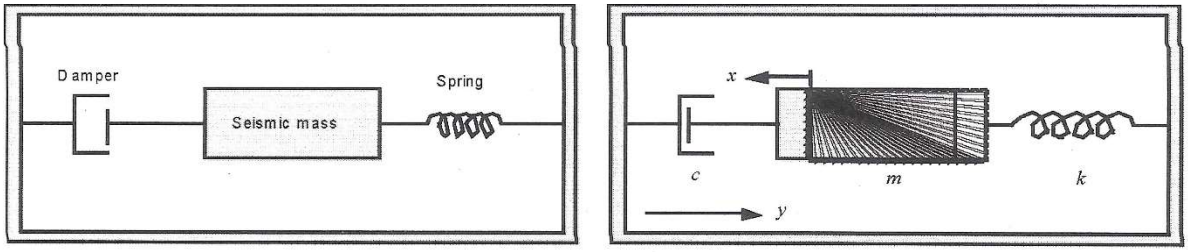
$$F = m \cdot a$$

Díky tomuto základnímu principu nahlížení na měření zrychlení se najde využití v obrovské řadě aplikací. Akcelerometry mohou být také konfigurovány tak, aby dokázaly měřit rychlost, pozici, vibrace a nárazy a vzhledem k tomu, že i bez dalšího působením nějaké síly, samotný akcelerometr se nachází v gravitačním poli, a tím je schopen měřit i pouhé natočení přístroje (pokud nebereme v potaz aplikace mimo Zemi). Jen pro automatizaci přístrojů je potřeba milionů takových akcelerometrů. Na automobilech jsou akcelerometry umísťovány tak, aby analyzovaly přesně stanovený nebo předpokládaný průběh zrychlení nebo rychlosti, aby byly schopny rozeznat nehodu od běžného provozu. Například, na rozhodnutí o tom, jestli se aktivuje airbag, je zapotřebí jen několik desítek milisekund. Dokonce s narůstající sofistikovaností použití akcelerometrů v autech se objevují i v systémech chránicí auto před ukradením. Dále můžou být akcelerometry použity i se spojením s GPS (General Position System), aby zpřesnily vyhodnocení pozice. [zdroj 7]

Akcelerometry se rozdělují podle typu převodních mechanismů senzoru. Nejčastěji používaným typem je tzv. třída „piezo“, která se dále dělí na piezorezistivní a piezoelektrické typy senzorů. Piezorezistivní efekt nastává ve chvíli, kdy materiál mění svůj elektrický odpor, jako reakcí na dané kmitání, kdežto piezoelektrické materiály vytvářejí elektrický náboj, když jsou vystavěny určité síle. Dalšími typy akcelerometrů jsou senzory kapacitní a optické. Akcelerometry s kapacitními snímacími elementy pracují na principu, že na měřící hmotě je jedna deska kondenzátoru a na základně (pevné části senzoru) je druhá. Ve chvíli, kdy na senzor začne působit zrychlení, měřící hmota uvnitř se začne vůči základně pohybovat a důsledkem pohybu se mění napětí procházející kondenzátorem. Optický akcelerometr používá senzor, který měří vzdálenost od membrány závislostí na intenzitě odraženého světla od membrány. [zdroj 7]

3.2.1. Teorie principu akcelerometrů

K nejjednoduššímu vysvětlení principu se využívá předpokladu hmoty uchycené k rámu pomocí tlumiče a pružiny. Jakmile na rám začne působit síla, tedy zrychlení, začne se hmota vůči rámu pohybovat. Když zrychlení přestane působit, pružina vrátí hmotu do její původní pozice. V ustáleném zrychlení, stav, kdy na hmotu působí konstantní zrychlení, se hmota vychýlí o určitou hodnotu, přesně danou poměrem tuhosti pružiny vůči danému zrychlení a tlumič je neaktivní. Použitím jednoduché mechanické pružiny, zrychlení v tomto případě bude přímo úměrné vzdálenosti, o kterou se hmota vychýlí. Viz obrázek č. 13.



Obrázek 13: Vysvětlení principu chování akcelerometru [zdroj 7]

Rovnice toho pohybu, kde *y* představuje dráhu celého rámu a *x* představuje dráhu hmoty, je:

$$m \cdot \ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{y}) - k(x - y)$$

Zbylé veličiny v této rovnici představují: *m*, velikost hmotnosti hmoty, *c*, parametr tlumiče, *k*, tuhost pružiny. Jestliže *x* je pohyb hmoty a *y* pohyb celého rámu, pak rozdíl *x – y = z*, kde *z* je relativní pohyb mezi hmotou a rámem. Jestliže budeme rám zatěžovat silou sinusového charakteru, tedy že *y = A sin ωt*, úpravou rovnice dostaneme rovnici:

$$m \cdot \ddot{z} + c \cdot \dot{z} + k \cdot z = m \cdot \omega^2 \cdot A \cdot sin\omega t$$

Rovnice je dobře známá jako chování systémů s jedním stupněm volnosti při nuceném kmitání. Řešení této rovnice v ustáleném stavu je ve formě *z = Zsin(ωt – ϕ)*, kde Z je amplituda pohybu hmoty a *ϕ* je fázové zpoždění vůči zatěžující síle. Standardním řešením rovnice jsou ve tvaru:

$$z = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot A}{\sqrt{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (c \cdot \omega^2)^2}} = \frac{A(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi \cdot (\omega/\omega_n)]^2}}$$

Tato rovnice poukazuje na nejdůležitější parametr, a to frekvenční poměr ω/ω_n a poměrné tlumení ξ. Typ senzoru závisí právě na vztahu mezi frekvencí, kterou měříme a resonanční frekvencí senzoru (kmitající soustavy). Pokud je vlastní frekvence senzoru ω_n mála v porovnání k frekvenci měřeného kmitání ω poměr ω/ω_n je vysoký. Amplituda relativního posunu Z se přiblíží hodnotám amplitudy kmitání A bez ohledu na hodnotu poměrného tlumení ξ. Za těchto okolností zůstává hmota stacionární, zatímco okolní rám se pohybuje s měřeným objektem. Takovýto typ senzorů se nazývá: seismometry.

Pokud ale vlastní frekvence senzoru ω_n je v porovnání s ω vysoká, výstup snímače je úměrný akceleraci. Jakmile tedy poměr ω/ω_n směřuje k nule, potom můžeme předešlé rovnice značně zjednodušit na tvar:

$$Z = \frac{\omega^2 \cdot A}{{\omega_n}^2} = \frac{akcelerace}{{\omega_n}^2}$$

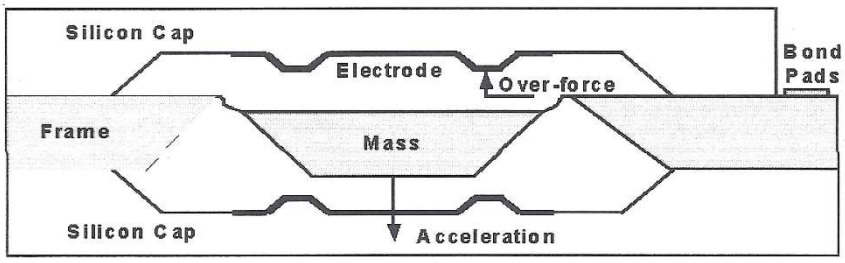
Z této rovnice je vidět, že Z (amplituda relativního pohybu hmoty vzhledem k rámu) odpovídá zrychlení násobené výrazem $1/{\omega_n}^2$. [zdroj 7]

Dále, pomocí těchto rovnic můžeme dospět až k samotnému dimenzování poměrného tlumení a frekvenčnímu poměru senzoru vůči měřenému objektu. Důvodem, proč jsem shrnul princip fungování akcelerometrů, je, že je velice důležité vybírat senzor podle aplikace. Výrobci sice udávají měřitelné spektrum, provozní teplotu, dobu odezvy atp., ale je potřeba si dát pozor na správné umístění a dobré upevnění, aby senzor měřil opravdu to, co po něm chceme.

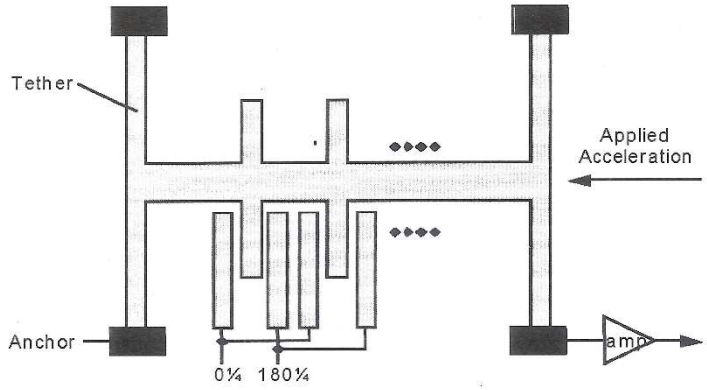
Vzhledem k veliké rozmanitosti, ať už podle typu principu, nebo stylem výroby, a odlišnosti v aplikaci, nemá cenu psát o jednotlivých typech akcelerometrů. Pro příklad ale uvedu alespoň jeden konkrétní, a to senzor, který se hojně používá v robotických aplikacích a s největší pravděpodobností bude vyhovovat i aplikaci v modelu auta.

3.2.2. Analogový kapacitní akcelerometr ADXL50

Jak je již z nadpisu zřejmé, jedná se o kapacitní akcelerometr. Kapacitní akcelerometry jsou vyráběny pod mikroskopem z jednoho kusu (krystalu) silikonu, základní struktura je znázorněna na obr. č. 14. Jedna z vodicích vrstev je nanesena na jednu část povrchu silikonového bloku a druhá je umístěna na pohybující se hmotě. Hmota je uchycena nosníky a je oddělena od základny senzoru vzduchovou mezerou. Obě poloviny senzoru jsou elektrostaticky spojeny. Pokud je to požadováno, elektronika zpracovávající signál může být součástí senzoru.



Obrázek 14: Základní struktura akcelerometru ADXL50 [zdroj 7]



Obrázek 15: Struktura paralelní elektrody akcelerometru ADXL50 [zdroj 7]

První komerčně dostupný, pod mikroskopem vyřezávaný do povrchu, se systémem kompletního měření zrychlení a vyrobený na jednom kusu včetně výpočetní elektroniky byl právě Analogový senzor ADXL50. Hmota se skládá ze sítě silikonu a pružinový systém je zakomponován ve čtyřech spojnicích, které propojují hmotu ke každému rohu. Spojnice jsou tvořeny krystalickým silikonem a jsou velmi stabilní a spolehlivě nahrazují mechanické pružiny. Jejich pevnost je dostatečná tak, že dovolí senzoru vydržet až 200 G přetížení. Na obrázku č. 15 je znázorněna struktura paralelní elektrody akcelerometru ADXL50. [zdroj 7]

Základní parametry senzoru ADXL50 [zdroj 10]

Parametr	Charakteristický rozměr
Měřitelný rozsah	od -50 do 50 g
Průsečná ovlivnitelnost	±2 %
Základní citlivost	od 16,1 do 21,9 mV/g

Provozní napětí	od 4,75 do 5,25 V
Provozní teplota	od -40 do +85 °C
Frekvence rezonance	24 kHz

3.3. Shrnutí k senzorům

Ne všechny typy senzorů budou na prvotním modelu použity, ale protože model bude postupně upravován, v budoucnu se nejspíš všechny druhy senzorů na modelu objeví.

Přehled také slouží pro další výběr senzorů k elektronickým systémům řízení.

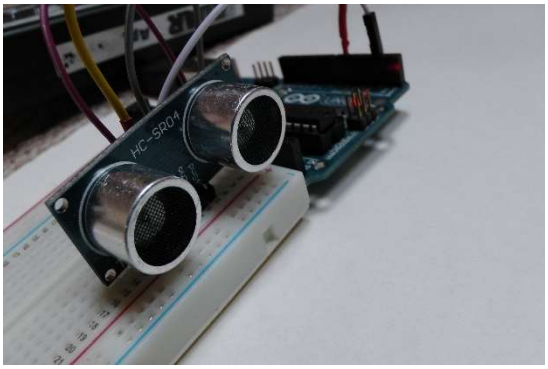
4. Testování senzoru k udržování vzdálenosti vozidel v koloně

Pro testování byl vybrán ultrasonický senzor HC-SR04. Tento senzor je hojně používán v robotických aplikacích, hlavně kvůli přesnému měření za přijatelnou cenu. Senzor lze pořídit okolo 80 Kč. Nejčastěji je viděn v aplikaci řídící deskou Arduino. Senzor má čtyři kontakty k připojení: Vcc, spoušť, echo, GND. Jako spoušť vnímá senzor TTL signál 10 mikrosekund dlouhý. Odpovědí neboli echem senzor posílá opět TTL signál dlouhý v závislosti na měřené vzdálenosti.

4.1. Základní parametry senzoru

Provozní napětí	DC 5 V
Provozní proud	15 mA
Pracovní frekvence	40 HZ
Maximální vzdálenost	4 m
Minimální vzdálenost	2 cm
Úhel měření	15°

Více viz datasheet senzoru: [zdroj 14]



Obrázek 16: Ukázka měření se senzorem HC-SR04

4.2. Měření

4.2.1. Úvod k měření

Základní cílem měření vzdálenosti se senzorem bylo zjistit jeho opakovatelnost a ověřit maximální měřitelnou vzdálenost. Ke zprovoznění bylo využito řídící jednotky Arduino UNO. Program byl naprogramován v programu Arduino verze 1.8.3. Měření bylo prováděno tak, že objekt byl postaven přesnou vzdálenost od senzoru, a ten měřil vzdálenost několikrát za sebou. Hodnoty byly vypisovány do tabulky.

4.2.2. Část kódu programu, řídící senzor

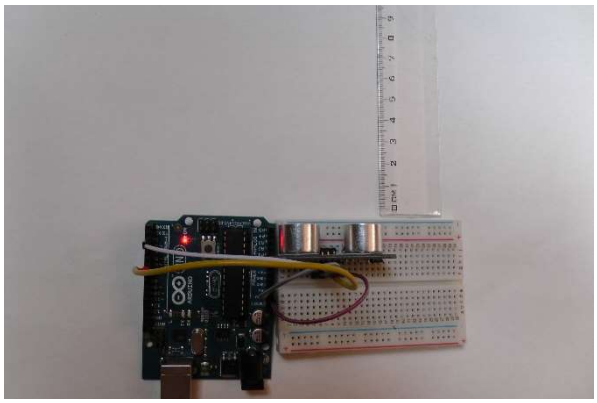
```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ECHOPIN, INPUT);
  pinMode(TRIGPIN, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(TRIGPIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIGPIN, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TRIGPIN, LOW);

  distance = pulseIn(ECHOPIN, HIGH);
  distance = distance*0.017315f;
  distance = distance - 1.3f;

  Serial.println(distance);
  delay(250);
}
```

Obrázek 18: Program pro řízení senzoru



Obrázek 17: Ukázka propojení a uložení měřidla

4.2.3. Tabulka naměřených hodnot

Tabulka 6

	Č. měření							
Vzdálenost (cm)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
5	4,9	4,78	4,88	4,9	4,86	4,85	4,9	4,88
10	10,99	10,99	11,1	10,99	11,1	11,1	10,99	10,99
15	16,38	16,36	16,36	16,38	16,36	16,36	15,96	16,38
20	20,03	20,03	20,03	19,93	19,93	20,03	20,03	19,98
30	29,9	30,77	30,78	30,89	30,01	29,9	30,35	30,47
40	39,88	39,88	39,77	39,77	39,41	39,41	39,77	39,88
50	49,69	49,69	50,11	49,8	49,69	50,14	49,8	49,69

4.2.4. Zpracování dat

Jako první byl spočten aritmetický průměr každé ze změřených vzdáleností podle vzorce

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

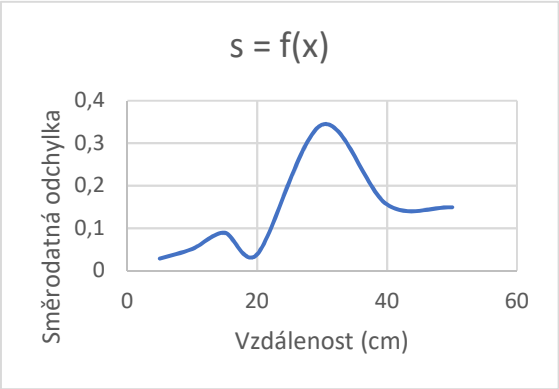
kde x_i jsou jednotlivá měření vzdáleností a $n = 8$, tedy počet měření. Dalším krokem bylo vypočtení směrodatné odchylky každého měření podle vzorce

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2}{n-1}}$$

Tabulka vypočtených hodnot:

Tabulka 7

Vzdálenost (cm)	Ar. Průměr	Směrodatná odch.
5	4,86875	0,0290625
10	11,03125	0,0515625
15	16,3175	0,089375
20	19,99875	0,0390625
30	30,38375	0,34375
40	39,72125	0,155625
50	49,82625	0,149375



Obrázek 19: Závislost odchylky na měřené vzdálenosti

4.2.5. Závěr a vyhodnocení měření

Tabulku vypočtených hodnot byl doplněn ještě grafem závislosti mezi měřenou vzdáleností a směrodatnou odchylkou. Z grafu je patrné, že s rostoucí vzdáleností přesnost senzoru klesá. Zajímavostí je veliká výchylka v hodnotě 30 cm. Ta mohla být způsobena špatným uložením objektu v měřící ploše.

Maximální hodnota změřitelné vzdálenosti byla 350 cm, to je o 50 cm méně, než je udáváno v dokumentaci senzoru. To mohlo být způsobeno nevhodným prostředím pro měření, po stranách měřící plochy mohlo docházet k dodatečnému odrážení zvukových vln.

4.3. Celkové shrnutí použitelnosti senzoru

I přesto, že senzor měří opravdu s dostatečnou přesností na to, za jakou cenu je pořízen, pro udržování vzdálenosti mezi vozidly vhodný není. Při měření nad vzdálenost 100 cm docházelo k občasnému výpadku hodnoty a při vzdálenosti kolem 300 cm to bylo až příliš časté. Pokud zvážíme i to, že 4 m dosah je opravdu limitní pro bezpečnou jízdu, výsledkem je, že senzor není vhodný pro tuto aplikaci. Vhodnější variantou bude použití radarového typu senzoru, přesto se senzor využije, právě při pomalých rychlostech, nebo jako parkovací senzor.

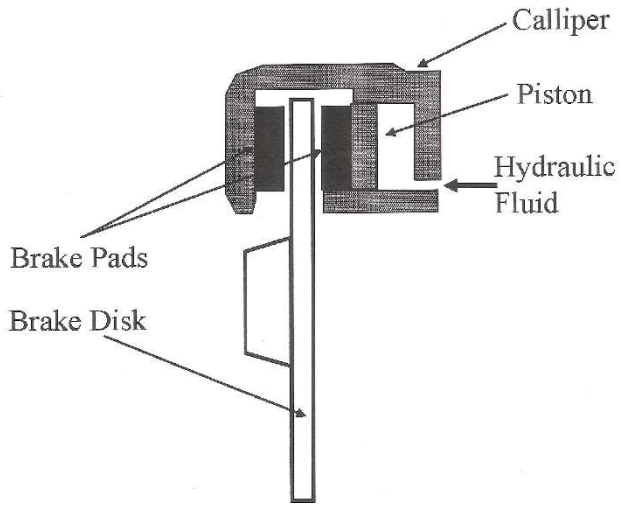
5. Základní elektronické systémy

V dnešní době, automobily disponují řadou elektronických systému, které pomáhají řidičům ve všech ohledech řízení vozidla. Od nejznámějšího systému ABS (Anti-Block System), přes stabilizační programy, označovány jako ESP (Electronic Stability Program), až po různé asistenty, např.: asistent rozjezdu do kopce.

Protože navrhovaný model bude řízen pouze elektronicky, bude jednoduší na něm elektronické systémy testovat. Samozřejmě model nebude disponovat stejným počtem řídících systémů a jejich sofistikovaností jako moderní automobily, ale je potřeba, aby byl model schopen sledovat vozidlo, udržovat bezpečnou vzdálenost, nebo bezpečně zabrzdit. Elektronický systém brzdění by bylo potřeba navrhnout, i kdyby se nejednalo o systém ABS, protože v modelu nebude žádná akční síla jako je např. sešlápnutí pedálu brzdy, a proto bude snazší do brzdicího systému ABS zakomponovat hned na počátku.

5.1. Elektronický systém brzdění a ABS

Principem každého brzdicího systému je přeměna kinetické energie pohybu na teplo. K tomu slouží brzdové destičky, pevně připojeny k rámu vozidla, a brzdový disk, který je připevněn ke hřídeli kola. Na obrázku č. 20 je nejčastější uspořádání součástí brzdového systému u automobilů. Hydraulický akční člen se skládá ze třmenu, pístu a brzdových destiček. Ve chvíli, kdy je brzda aktivována (zvýšení tlaku v brzdové kapalině), kapalina stlačí pístek a ten sevře disk mezi brzdové destičky. Třecí síla je přímo úměrná tlaku vyvolanému v brzdové kapalině.



Obrázek 20: Hydraulický brzdový systém automobilů [zdroj 7]

5.1.1. Adhezní charakteristika

Ve chvíli sešlápnutí brzdového pedálu, tlak v brzdové kapalině bude stoupat (u navrhovaného modelu to bude práce elektrického pístku nebo malého čerpadla) a způsobí, že brzdový disk bude brzděn. Pokud však tlak bude dostatečně vysoký, brzdový disk, a tedy i kolo se zastaví, ale nedojde k zastavení vozidla. V takové situaci

se se koeficient skluzu S_L rovná 100 %. Koeficient skluzu je definován jako rozdíl mezi rychlostí kola a rychlostí vozidla a převeden na procenta. S rostoucím koeficientem skluzu roste i deformace pneumatiky.

$$s_L = \frac{(v_f - v_R)}{v_f} \cdot 100$$

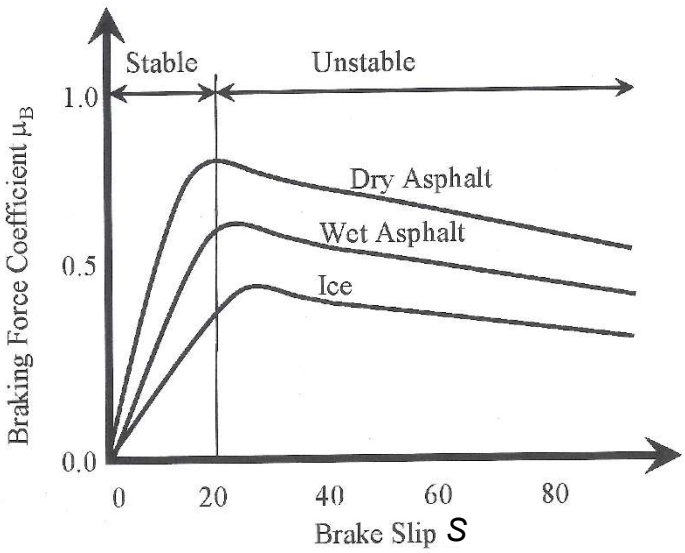
Rychlost kola můžeme vyjádřit pomocí úhlové rychlosti ω a efektivního poloměru kola r_{eff}.

$$v_R = \omega \cdot r_{eff}$$

Pokud si ještě vyjádříme závislost třecí síly, jako součin třecího součinitele μ_B a kontaktní silou mezi kolem a vozovkou F_Z:

$$F_{WL} = \mu_B \cdot F_Z$$

, poté můžeme vynést do grafu závislost mezi třecím součinitelem a koeficientem skluzu. Graf je rozdělen na dvě oblasti, a to oblast stabilní, kde je rozsah deformace pneumatiky malá a třecí součinitel vzhledem k deformaci pneumatiky značně stoupá, a oblast nestabilní, kde třecí součinitel postupně s rostoucí deformací pneumatiky klesá. [zdroj 7]



Obrázek 21: Závislost mezi koeficientem tření a skluzem pneumatiky [zdroj 7]

5.1.2. Momentová rovnováha kola s kontaktem s vozovkou

Uvolněním a sepsáním momentové rovnice kola při styku s vozovkou je lépe vysvětlitelné, jak dokáže systém ABS brzdit skoro maximální brzdnou silou. Obrázek č. 22 znázorňuje síly působící na kolo.

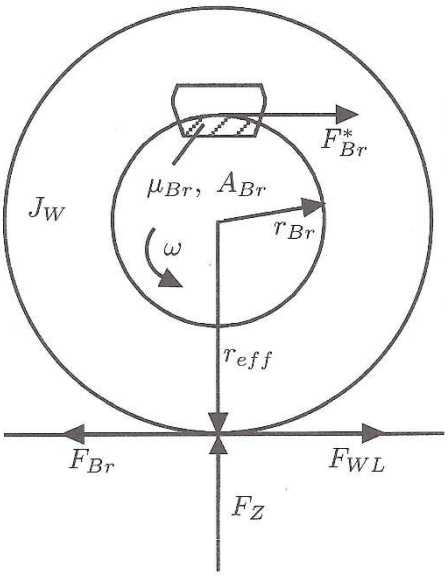
F_{Br}^{*} *brzdící síla působící na disk*

r_{Br} *efektivní rádius brzdné síly*

μ_{Br} *koeficient tření brzdy*

A_{Br} *plocha přenosu brzdné síly*

p_{Br} *tlak v brzdicí kapalině*



Obrázek 22: Působení sil a momentů na brzděné kolo [zdroj 11]

$F_{Br} = F_{Br}^{*} \cdot \frac{r_{Br}}{r_{eff}}$ *brzdicí síla v místě styku kola s vozovkou*

T_{Br} *brzdicí moment působící ve styku kola s vozovkou*

ω *úhlová rychlost kola*

J_W *moment setrvačnosti kola*

F_Z *reakce vozovky na styk kola*

$F_{WL} = \mu_L \cdot F_Z$ *třecí síla*

$T_{WL} = r_{eff} \cdot F_{WL}$ *třecí moment*

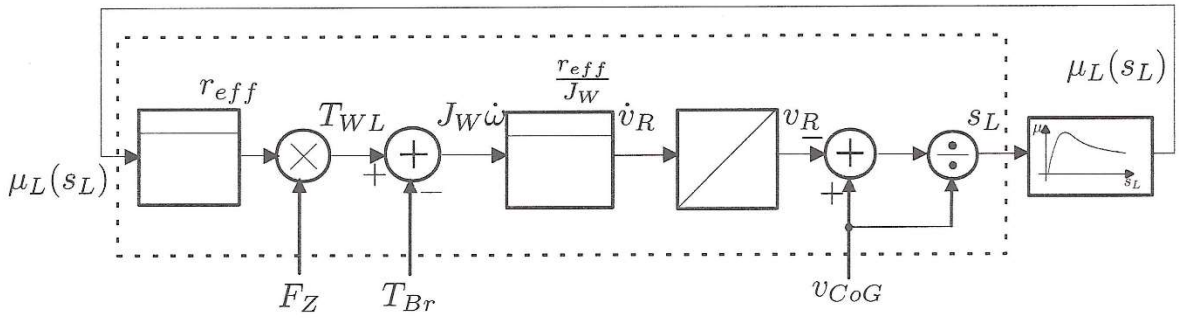
V hydraulicky řízených brzdách je hlavním parametrem pro vyjádření brzdného momentu tlak v brzdné soustavě p_{Br}:

$$T_{Br} = F_{Br} \cdot r_{eff} = r_{Br} \cdot \mu_{Br} \cdot A_{Br} \cdot p_{Br} = r_{eff} \cdot k_{Br} \cdot p_{Br}$$

Zanedbání hnacího momentu od motoru lze momentovou rovnici zapsat ve tvaru:

$$J_W \dot{\omega} = r_{eff} \cdot \mu_L \cdot F_Z - r_{eff} \cdot k_{Br} \cdot p_{Br}$$

Schematicky znázorněno na obrázku č. 23



Obrázek 23: Schéma pracovního algoritmu ABS [zdroj 11]

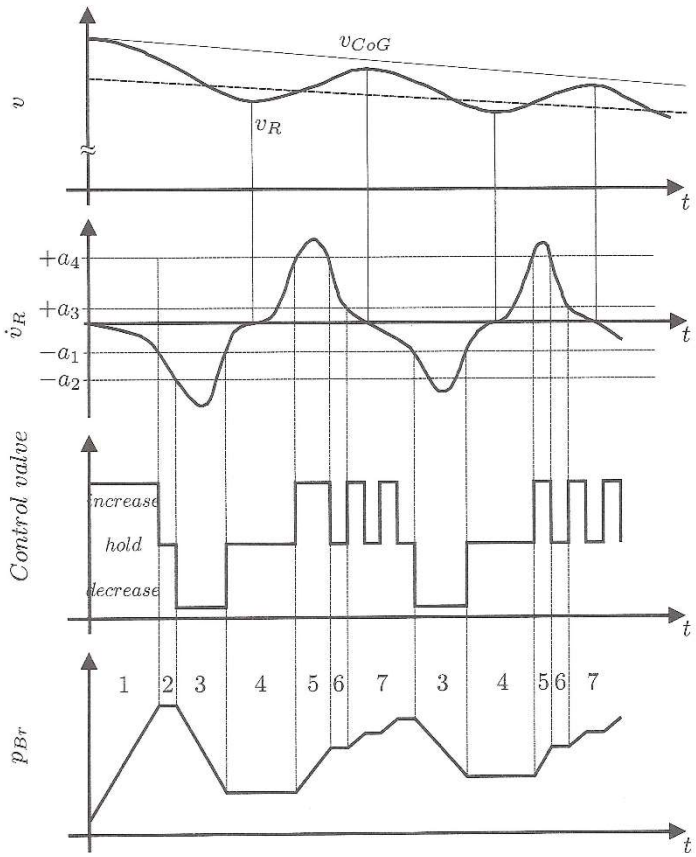
Po zvýšení tlaku v brzdné soustavě se začne zvyšovat brzdící moment. Rozdíl mezi třecím momentem a brzdicím momentem je záporný a výsledkem je zpomalování kola. Obvodová rychlost kola v_R (po integrování) se začne snižovat a důsledkem je zvyšování se skluzu s_L.Se zvyšováním se skluzu, dojde ke zvýšení součinitele tření μ_L (v předchozím odstavci μ_B). Závislost mezi skluzem a součinitelem tření $\mu_L(s_L)$ postupně vykresluje graf na obr. č. 21. Jakmile součinitel tření nabyde maximální hodnoty, graf změní znaménko gradientu a kontrolní cyklus pro změnu součinitel tření sníží. [zdroj 11]

5.1.3. Kontrolní cykly systému ABS

Kontrolní cykly jsou znázorněny na obr. č. 24. Při aktivaci brzdy dojde ke zvyšování tlaku v brzdné soustavě (fáze 1). Obvodová rychlost kola v_R je měřena a derivována na obvodové zrychlení kola $\dot{v}_R$. Bod maximální třecí síly se překročí ve chvíli, kdy se zrychlení kola dostane pod první kritický bod a_1.

$$\dot{v}_R < -a_1$$

Pouze při prvním cyklu, těsně po aktivaci brzd, se využívá ještě druhého kritického bodu



Obrázek 24: Kontrolní cykly algoritmu ABS [zdroj 11]

a_2. Mezi bodem a_1 a a_2 je tlak v soustavě udržován (fáze 2). Fáze 2 slouží k potlačení okolních vlivů, tudíž ke správnému aktivování kontrolních cyklů ABS. Pro

$$\dot{v}_R < -a_2$$

je tlak brzdové soustavy snižován (fáze 3). Kolo opět nabírá zrychlení, dokud neprojde znova hodnotou a_1. V tento moment je tlak soustavy znova udržován konstantní (fáze 4). Jakmile ale zrychlení kola projde kritickou hodnotou a_4

$$\dot{v}_R > a_4$$

tlak soustavy se začne znova zvyšovat, aby se kolo nedostalo na příliš nízké hodnoty skluzu (fáze 5). Mezi

$$a_4 > \dot{v}_R > a_3$$

se tlak soustavy udržuje konstantní (fáze 6) a pokud klesne

$$\dot{v}_R < -a_1$$

je krátce navyšován (fáze 7). Jestliže zrychlení kola klesne znova pod hodnotu

$$\dot{v}_R < -a_1$$

Začne se celý cyklus opakovat. Nyní je už však tlak snižován okamžitě bez toho, aniž by se čekalo na kritickou hodnotu a_2 (druhá fáze 3). Díky opakování těchto cyklů se docílí, aby byla rychlost kola udržována na takové hodnotě skluzu, že součinitel tření dosahuje skoro maxima.

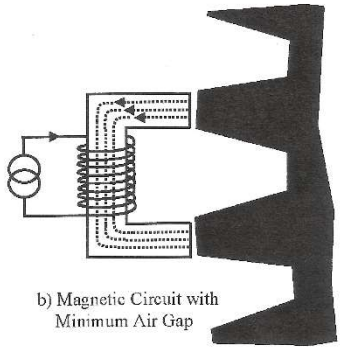
V případě velikého momentu setrvačnosti kola, malého součinitele tření a pomalého navyšování tlaku v brzdicí soustavě, může dojít k zablokování kola ještě před dosažením kritické hodnoty $-a_1$ (například na zledovatělé vozovce). Pro tento případ je v algoritmu opatřena podmínka, bez ohledu na výše uvedené cykly, a to taková, že tlak brzdové soustavy je snížen ve chvíli, kdy dojde k situaci:

$$v_R < \left(1 - s_{L,max}\right) \cdot v_{CoG}$$

kde v_{CoG} je rychlost vozidla vůči vozovce a $s_{L,max}$ je maximální přípustná hodnota skluzu kola. Tato podmínka zajistí, že nedojde k překročení dovoleného skluzu, i přesto že by nebylo dosaženo maximálního součinitele tření μ_L. [zdroj 11]

5.1.4. Potřebné senzorové vybavení pro systém ABS

Snímání rychlosti každého kola je samozřejmostí pro systém ABS, otázkou zůstává, který typ senzoru pro navrhovaný model zvolit. Jednou z variant je indukční snímač, který ke své činnosti potřebuje ozubený disk z kovu (viz obrázek č. 25), aby byl schopen počítat frekvenci pulsů, a tedy počet otáček za minutu.



Obrázek 25: Rychlostní snímač u kol automobilů [zdroj 7]

Další variantou je použití optického senzoru, který by měřil na podobném principu jako indukční snímač – počítání pulzů. V tomto případě to nebude ozubené kolo, ale pásek pro optické senzory, na kterém jsou za sebou černé a bílé proužky. Výhodou takovýchto optických senzorů je mnohem větší rozlišení než u senzorů indukčních, ale nevýhodou je vyšší cena.

I přesto, že hlavní řídící veličinou je tlak v brzdové soustavě, tlakový senzor není nutností (používá se jen na detekci úniku kapaliny). Avšak senzor, který by mohl být užitečný, je akcelerometr. Pomocí akcelerometru by se dala měřit rychlost vozidla bez aproximace rychlosti ze senzorů na kolech. Toto řešení má ale určitý nedostatek. Ten spočívá v tom, že do algoritmu ABS budou vstupovat dvě chyby v měření. Jedna ze senzorů rychlosti na kolech a druhá právě z akcelerometru. Když algoritmus bude pracovat jen s hodnotami ze senzorů rychlosti, chyby se vůči sobě vynulují. Pokud bude ale rychlost vozu měřena akcelerometrem, kvůli dvojím chybám měření nemusí kontrolní cykly probíhat plynule a hladce.

5.1.5. Shrnutí elektronického systému brzdění

Vzhledem k tomu, že výše navrhovaný systém je značně komplikovaný, a to jak na aplikování řídícího algoritmu do řídící elektroniky, tak i mechanickým provedením na navrhovaném modelu. Bude potřeba nespočet testování a optimalizování systému, než dojde k reálné aplikaci na model. Bohužel, model nebude mít do té doby k dispozici žádný jiný brzdný prostředek, protože vybraný motor má brzdící vlastnosti velmi špatné.

5.2. Návrh systému sledování stopy sledovaného vozidla

Stejně jako je tomu u elektronického systému brzd, kde není k dispozici žádná akční síla na brzdění, i v tomto případě bude muset být model schopen podle určitého algoritmu zatáčet. Samozřejmě při testování různých dalších systémů bude v záloze dálkové řízení servomotoru pro řízení kol. Tento systém je opravdu v rané fázi vývoje a v budoucnu bude sloužit k monitorování vozidla před modelem, vypočítat jeho trajektorii, a tím být schopen se udržovat v koloně vozidel, takto řízených.

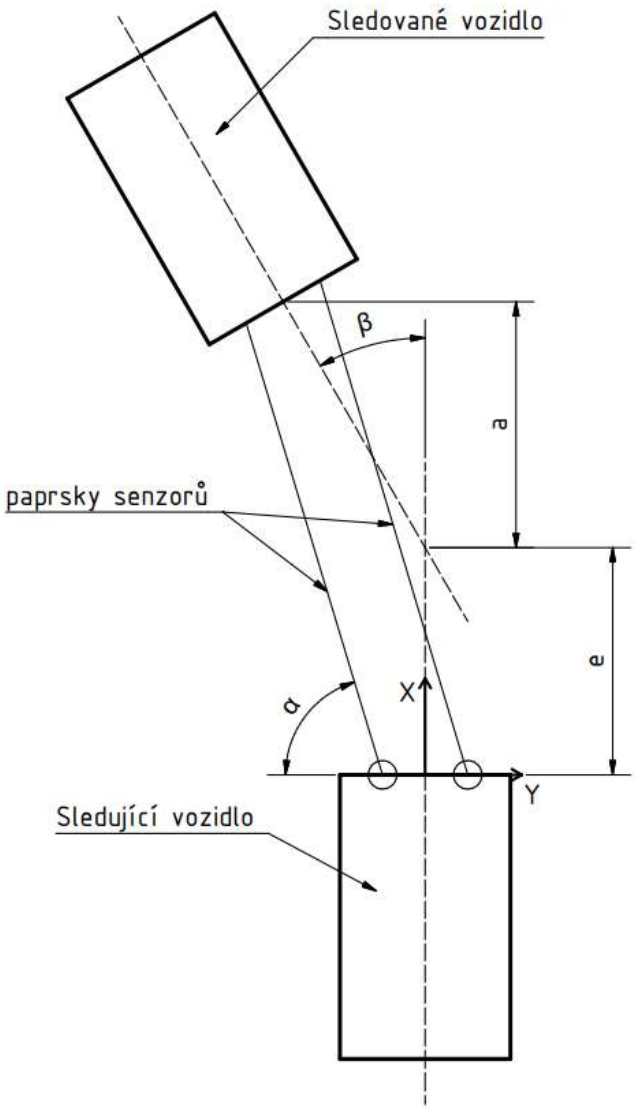
Základní stavebním kamenem tohoto systému budou dva optické senzory měřící vzdálenost na principu infračervených paprsků. Uloženy budou na otáčejícím se podstavci, aby bylo možné sledování vozidla i v zatáčce. Otáčející podstavec bude poháněn krokovým motorem, kvůli zpětné informaci o natočení. O pohon se bude starat jen jeden motor, aby nedocházelo k různému natočení mezi dvěma senzory. Celý systém bude pracovat na jedné jediné podmínce, a to že infračervené senzory musí na měřený cíl dopadat vždy přibližně pod pravým úhlem.

K obrázku č. 26:

β $natočení\ vozidel\ vůči\ sobě$

α $natočení\ IR\ senzorů$

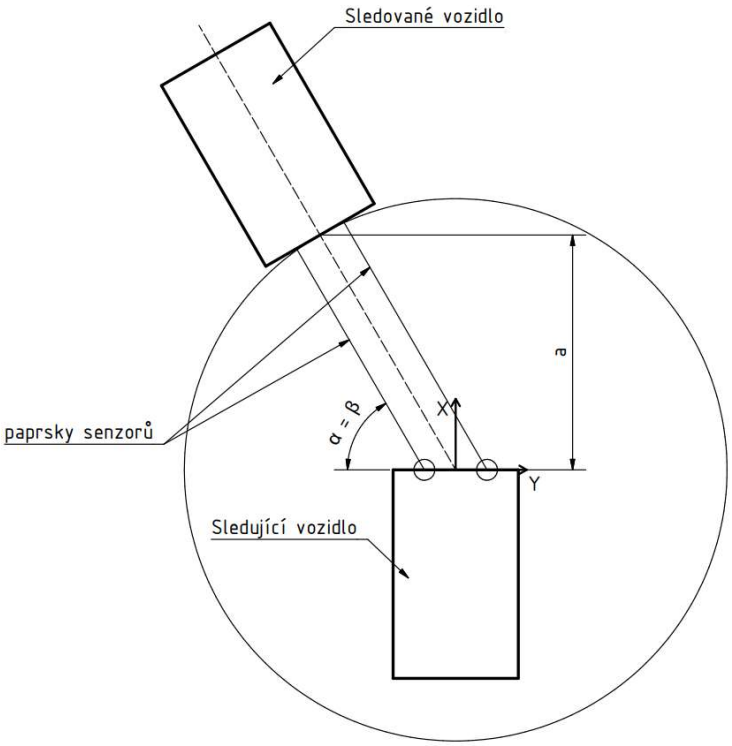
a, e $vzdálenost\ vozidel\ ve\ směru\ x$



Obrázek 26: Geometrie řešeného problému sledování vozidla

5.2.1. Princip fungování sledování

Vzhledem ke geometrii zobrazené na obrázku č. 26 a vzhledem k podmínce, že úhel dopadajících paprsků musí být 90°, dojde ke zjednodušení, která je znázorněna na obrázku č. 27. Začneme ve stavu, kdy je úhel $\beta = 0°$. Algoritmus kontroluje měřenou vzdálenost obou senzorů. Pokud je stejná, sledované vozidlo jede stále rovně. Ve chvíli, kdy algoritmus rozpozná rozdíl ve změřených vzdálenostech, začne senzory natáčet na tu stranu, kde je vzdálenost menší a ve stejný moment začne mírně navyšovat rychlost oproti sledovanému vozidlu. Dále si začne zapisovat do paměti úhel natočení vozidla jako funkci vzdálenosti (nebo také poloměru kružnice viz obrázek č. 27). Podle této závislosti si vypočte závislost natočení přední nápravy na uražené vzdálenosti, a podle té se bude nadále řídit. Jakmile sledované vozidlo přestane vůči sledujícímu měnit úhle natočení, to algoritmus pozná tak, že se změní tendence růstu rozdílu vzdáleností mezi jednotlivými senzory, řídící algoritmus vyrovná rozdílnou rychlost, kterou v prvním kroku zvýšil, a začne pomocí natočení senzorů udržovat úhel dopadajících paprsků senzorů kolmý. Ve chvíli, kdy se začne úhel β snižovat, systém začne snižovat rychlost a natočení senzorů až do chvíle, kdy bude opět $\beta = 0°$ a celý proces se může opakovat.



Obrázek 27: Zjednodušení geometri kvůli podmínce kolmosti paprsků

Snižování a zvyšování rychlosti je z důvodu parametru *a,* který je zřetelný na obrázku č. 27. Protože je sinusově závislý na poloměru kružnice, tedy i závislý na poloměru křivosti trajektorie projížděné sledovaným vozidlem.

5.2.2. Úskalí navrženého systému

Mezi první problémy patří nalezení správných senzorů. Senzory musí rozpoznat zatočení vozidla dříve, než se jim ztratí z dohledu, to může při vyšších rychlostech být rozlišení řádově v milimetrech na vzdálenosti několika metrů. Další nepříjemností bude stále zpomalování a zrychlování v zatáčkách, které nejspíše povede i ke ztrátě stability vozidla, především, když sledované vozidlo prudce zatočí, v takové situaci bude algoritmus nucen prudce zrychlit, aby vozidlo neztratil, a to do prudké zatáčky nebude to nejlepší. A jako třešničkou na dortu bude celá komplikovanost algoritmu, příliš vstupujících hodnot, všechny nelineárně závislé a výsledkem toho bude řízení celého modelu (natočení senzorů, natočení kol, rychlost vozidla). Na druhou stranu, výhodou toho systému je, že navrhovaný model nebude potřebovat žádný systém udržování bezpečné vzdálenosti jako je např. ACC (Active Cruise Control).

6. Výběr řídící elektroniky modelu

Existuje nepřeberné množství různých řídících jednotek, od plně uzavřených vůči zásahu uživatele, jako je např. právě již zmíněné LEGO Mindstorms, přes otevřenější systémy, kterým disponuje např. stavebnice VEX, až po plně přizpůsobitelné jednotky, nazývané tzv. jednodeskové počítače. Takovéto jednotky primárně sloužili proto, aby se na nich testovaly různé algoritmy a v konečném výrobku byl co nejvíce specializovaný (přesný počet vstupů a výstupů potřebný k aplikaci) mikrokontroler. V dnešní době se již samotné testovací desky používají přímo v aplikaci. Na trhu se vyskytuje několik výrobců takovýchto desek. Jako příklad uvedu asi tři nejznámější: STMicroeletronics, Raspberry Pi, Arduino.

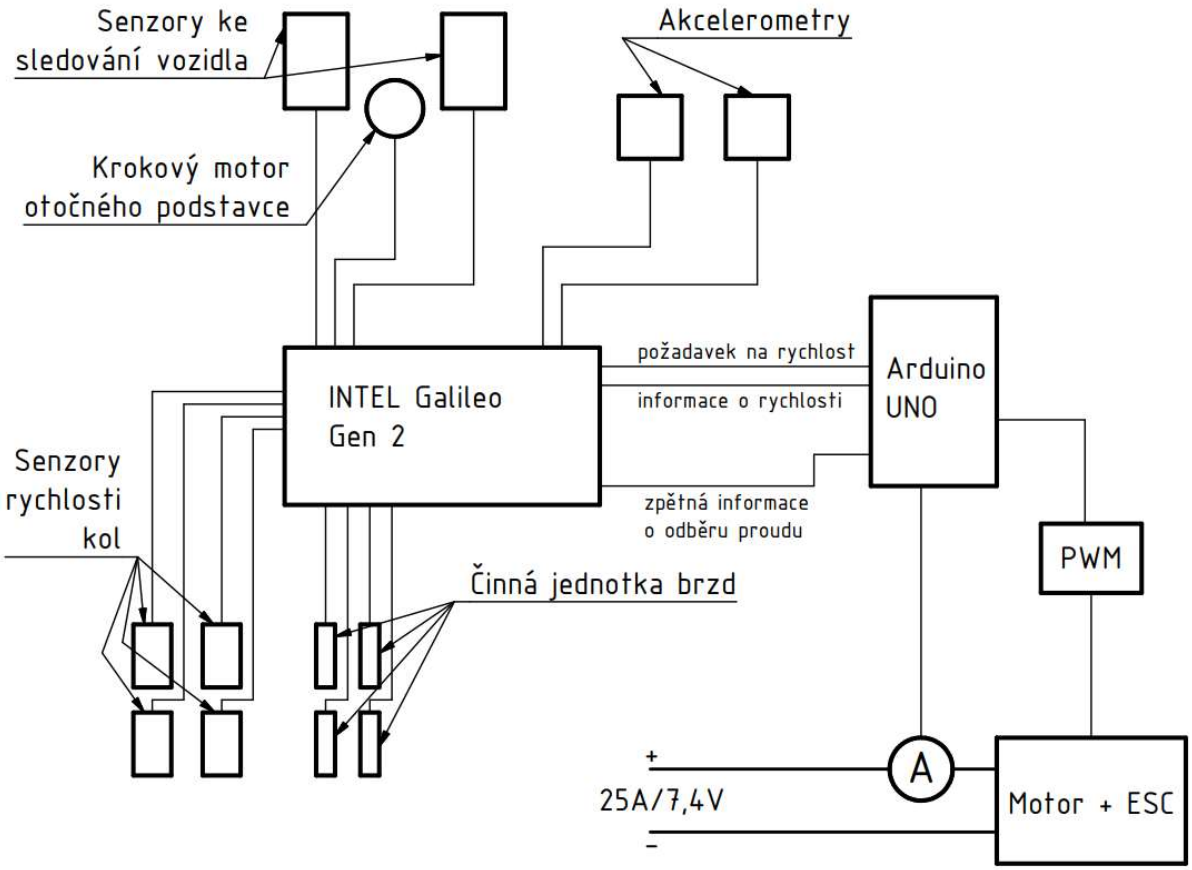
Obrázek 28 STM Discovery Kit [zdroj 12]

6.1. Požadavky na řídící elektroniku

Jedním z požadavků, který musí vybraná řídící deska splňovat je dostatek vstupů a výstupů. Dál je nutné, aby programování algoritmů bylo co nejjednodušší a programátora nezdržovalo zdlouhavé pročítání knihoven, jako je tomu např. u STMicroeletronics. Bude potřeba veliký výpočetní výkon, protože pokud bude v budoucnu potřeba zpracovávat obraz z nějaké kamery, bylo by nepraktické kvůli tomu měnit veškerou elektroniku na modelu. Také bude potřeba více řídících desek. Navrhl jsem určitou hierarchii uspořádání jednotek, protože do jediné jednotky nemůžou vstupovat všechny senzory na jednou, aby je jednotka najedou zpracovávala. Bude jedno hlavní výpočetní středisko, které by mělo být schopno pomocí několika parametrů řídit zbylé součásti elektroniky, a také posílat informace pomocí Wi-Fi modulu do kontrolního počítače. Vzhledem k jednoduchosti programování, tomu, že všechny jednotky by měli mít stejný programovací jazyk a bylo možné mít velikou škálu desek s různými výpočetními výkony, vybral jsem řídící jednotky kompatibilní s jazykem Arduino.

6.2. Struktura řídící elektroniky

Navrhovaný model zatím není v žádném stádiu výrobu, tudíž navrhované schéma určitě není kompletní. V další kapitole bude pro jasnější přehled ještě doplněno rozložení senzorů na modelu.

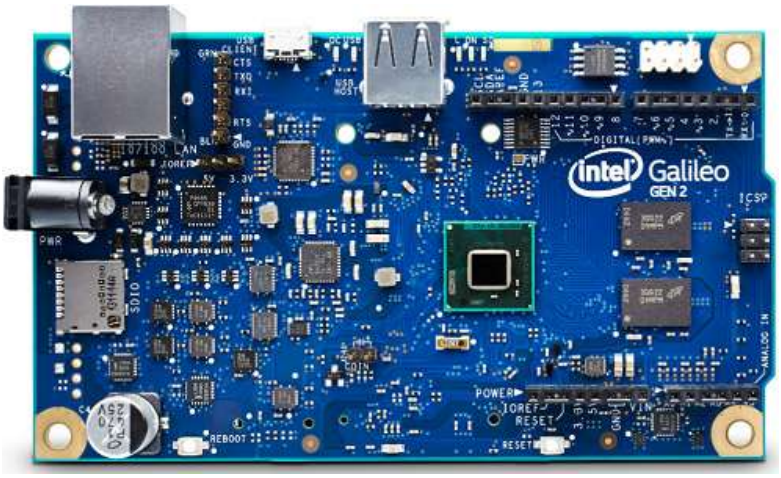


Obrázek 29: Schéma navrhované řídící elektroniky

Zatím směřuje většina senzorů do hlavní řídící jednotky INTEL Galileo Gen 2. Otázkou je, jestli se jednotka povede naprogramovat tak, aby nedocházelo k nějakému nechtěnému zpomalování výpočtových cyklů nebo k chybovému chování modelu.

6.3. INTEL Galileo Gen 2

Intel Galileo je deskový počítač od firmy Intel. O výpočetní výkon se stará procesor Intel Quark X1000 s kmitočtem až 400 MHz. Tato jednotka byla vyrobena tak, aby podporovala všechny doplňky k deskám Arduino a mohl se používat i stejný software. Deska získala i certifikaci o kompatibilitě s Arduino.



Obrázek 30: Intel Galileo Gen 2 [zdroj 13]

Základní parametry Intel Galileo Gen 2

TDP	12,5 W
Procesor	Intel Quark SoC x1000
Vstupní napětí	7 - 15 V
Typ paměti	DDR3 800
Maximální velikost paměti	256 MB
Rozšiřitelné sloty	PCI Express 2.0 x1
Počet USB portů	3
Verze USB portů	2.0
Počet LAN portů	1

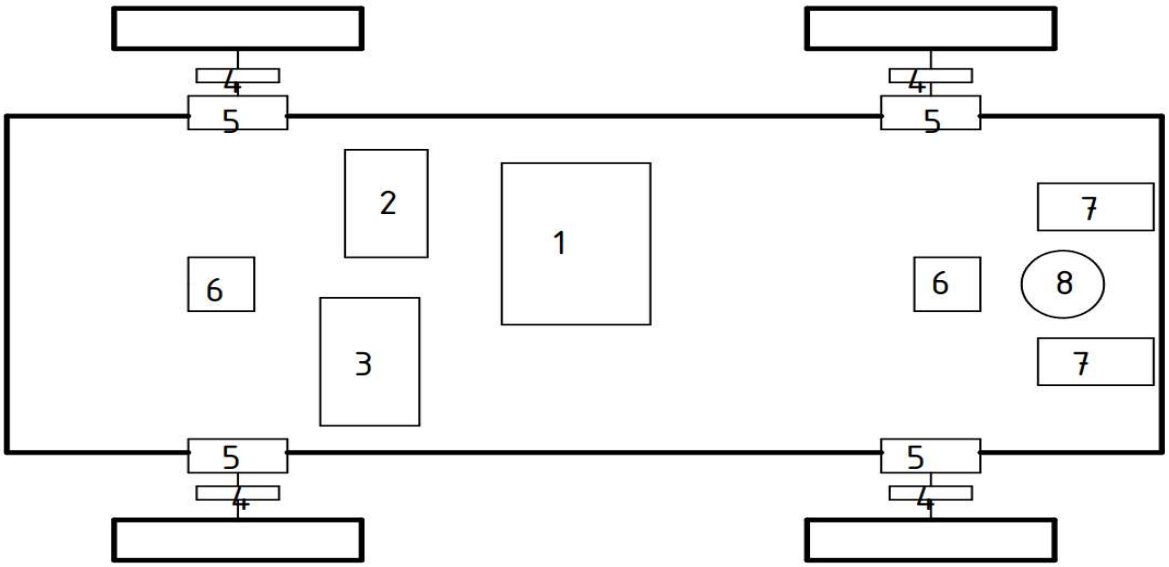
Více informací o parametrech desky viz datasheet [zdroj 13]

6.4. Ostatní prvky schémata

Arduino UNO slouží jako kontrolní jednotka pro pohon. Od Galilea Gen 2 dostane požadavek na rychlost, a podle toho vyšle signál do PWM generátoru, který vygeneruje signál pro ESC motoru. O motoru a ESC bude popsáno více v kapitole o testování pohonné jednotky. Ampérmetr slouží jako základní údaj o zatížení motoru. Protože motor se může při přetížení zastavit a jeho odběr proudu v tu chvíli bude minimální, jednotka to musí rozeznat. Zpětná informace o odběru proudu jednotce Galileo je pouze jen, aby byla informace odeslána do kontrolního počítače přes Wi-Fi.

Obrázek 31: Ampermetr ACS712 pro Arduino

6.5. Rozložení schéma v modelu



Obrázek 32: Rozložení řídící elektroniky v modelu

1- Intel Galileo Gen 2
2- Arduino UNO
3- Motor + ESC
4- Brzdící elementy
5- Senzory rychlosti kol
6- Akcelerometry
7- Senzory pro sledování vozidla
8- Krokový motor

Obrázek 33: Arduino UNO

7. Testování pohonné jednotky

Motivací ke měření pohonné jednotky, bylo zjištění momentové charakteristiky motoru v závislosti na otáčkách nebo na vstupní hodnotě PWM signálu. Protože vybraný motor není pro aplikace na vozidlech běžný, o to více je testování a navrhování instalace na model zajímavější. K měření bylo využito zařízení v laboratoři Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky na Fakultě Strojní ČVUT. Měření bylo prováděno na setrvačníku, který byl s motorem spojen pružnou spojkou. Natočení hřídele bylo snímáno inkrementálním snímačem Renishaw SR030A, data byla zpracována hardwarem a softwarem od firmy dSPACE a následně exportována do Matlabu.

7.1. Motor

Pro návrh modelu byl vybrán motor MS 2216 1100KV od firmy T-Motors. Motor je používán hlavně na multikopterách. Jedná se o bez-komutátorový, třífázový, synchronní motor s permanentními magnety na rotoru (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Machine). Jak je ale zvykem, že rotor je uvnitř, a stator na vnější straně, u tohoto motoru je to právě naopak.

Základní parametry motoru

KV	1100
Váha	75 g
Max. kontinuální proud	23 A
Max. kontinuální výkon	253 W
Max. účinnost	>76 %
Vnitřní odpor	103 mΩ

Více viz dokumentace motoru: [zdroj 15]

Obrázek 34: T-Motors MS2216 1100KV [zdroj 15]

KV je počet otáček za minutu vztažená na jeden Volt. Maximální kontinuální proud je taková hodnota proudu, kterou je motor schopen odebírat trvale aniž by došlo k poškození jakékoli části motoru. Maximální kontinuální výkon je přibližně to samé jako max. kontinuální proud, jen je hodnota vztažena i vzhledem k napětí, protože to není vždy konstantní.

7.2. ESC (Electronic Speed Control)

ESC, jak je již z nadpisu zřejmé je tedy elektrický kontrolér rychlosti, jinak taky řídící elektronika motoru. Protože motor je napájen třífázovým střídavým proudem a baterie poskytuje pouze stejnosměrný proud, ESC zároveň slouží jako generátor střídavé sítě. Dále fungují samozřejmě i jako regulace. Ta není řízena napětím, jak je tomu u standardních DC motorů, nýbrž ESC má další vstup, a to logický. Tím je mu dodávaná informace v podobě PWM signálu o tom na kolik procent otáček (synchronní stroj – frekvence sítě) má motor pracovat.

Pro tento motor byl vybrán regulátor od stejné firmy, tedy T-Motors. Protože proud odebíraný motorem nesmí přesáhnout limitní hodnoty regulátoru, a ani přehnané předimenzování regulátoru není žádoucí, navrženým regulátorem je T-Motors Flame 25 A

Základní parametry ESC

Vstupní napětí	6,4 - 17,4 V
PWM	3–5 V
Max. kontinuální proud	25 A
Maximální proud	30 A
Frekvence PWM signálu	30–500 Hz
Provozní teplota	-10–50 °C

Obrázek 35: ESC od T-Motors Flame 25 A [zdroj 16]

7.3. Měření

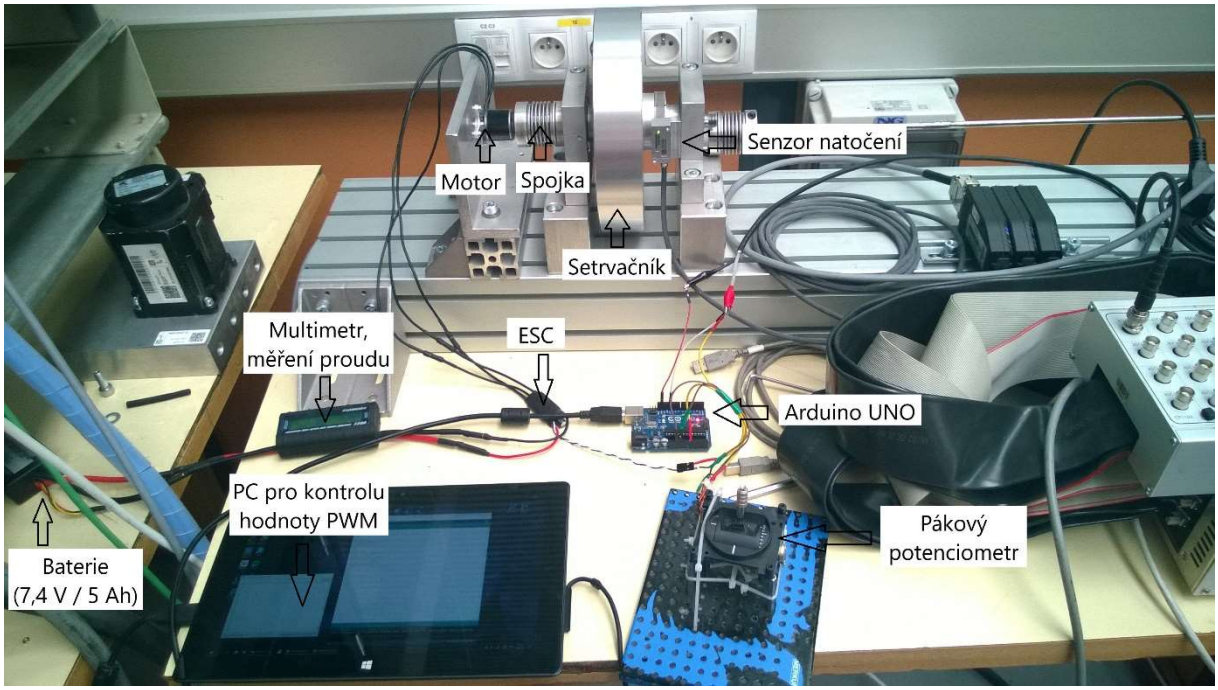
Měření jsem prováděl opět pomocí vývojové desky Arduino UNO, která sloužila jako generátor PWM signálu řídící jednotce motoru. K Arduinu byl připojen pákový potenciometr, kterým se reguloval PWM signál. Část programu, který čte hodnotu natočení potenciometru, přepočítá hodnotu na procenta a vygeneruje PWM signál jednotce ESC, viz obrázek č. 37.

```
int analogPin = A0;
float x = 0;
float val = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(11, OUTPUT);

}
void loop() {
  val = analogRead(analogPin);
  //Serial.println(x);
  x = (0.0006625*val)+0.361225;
  digitalWrite(11, HIGH);
  delayMicroseconds(x*2000);
  digitalWrite(11, LOW);
  delayMicroseconds(2000-(x*2000));
}
```

Obrázek 36: Program pro generování PWM



Obrázek 37: Schéma s popisem prováděného měření

7.3.1. Postup měření a vyhodnocení

Bylo provedeno několik měření. Začínalo se měřit přibližně od 500 otáček za minutu, protože motor nebyl schopen setrvačník z nulových otáček roztočit. Horní hranice otáčet zase byla omezena bezpečností měření, tak byl horní strop nastaven na 2000

otáček za minutu. Ze senzoru bylo snímáno natočení setrvačníku, z desky Arduino byl brán PWM signál, který řídil kontrolér motoru. Měřeno bylo jak zrychlování, tak i brzdění, protože kontrolér byl nastaven v aktivním režimu brzdění.

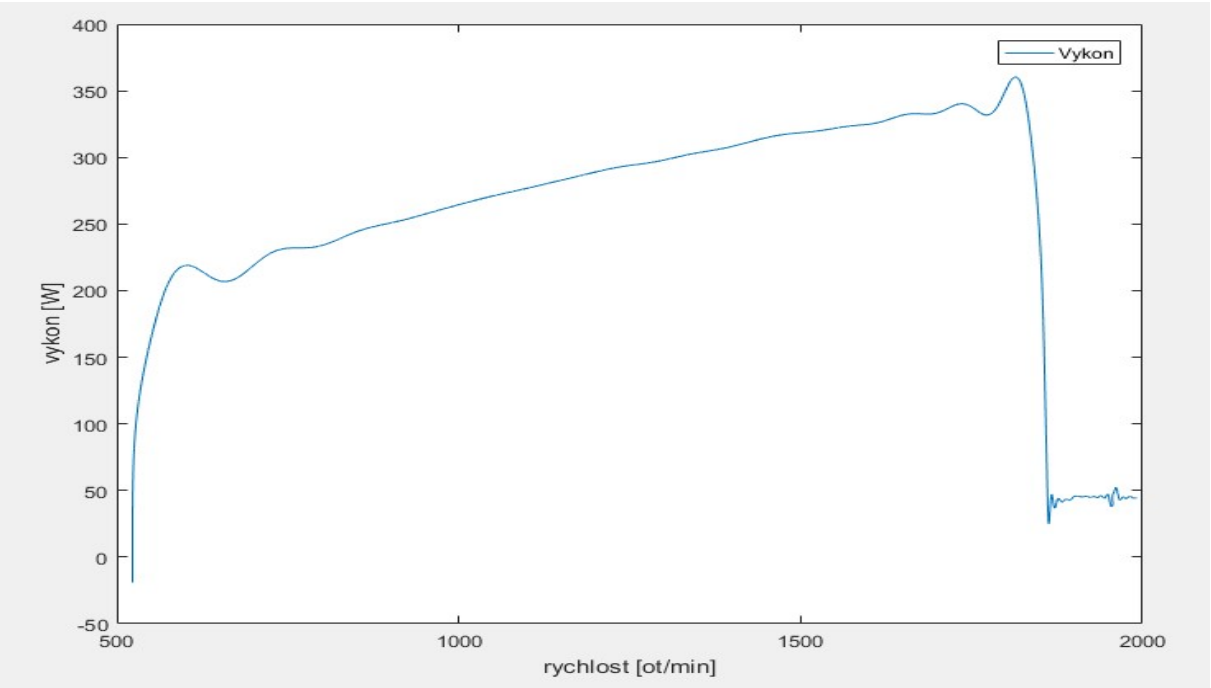
Naměřená úhlová poloha byla numericky zderivována na úhlovou rychlost, následně filtrována filtrem s dolní propustí 5 Hz v prostředí Matlab. Derivací filtrované úhlové rychlosti a následným filtrováním filtrem s dolní propustí 1 Hz bylo získáno úhlové zrychlení. Z úhlového zrychlení jsem již mohl získat hnací moment motoru jednoduchou rovnicí (se zanedbáním pasivních účinků):

$$J \cdot \ddot{\varphi} = M$$

kde *J* je moment setrvačnosti setrvačníku v $(kg \cdot m^2)$, $\ddot{\varphi}$ je úhlové zrychlení v (rad/s^2) a *M* je moment v $(N \cdot m)$.

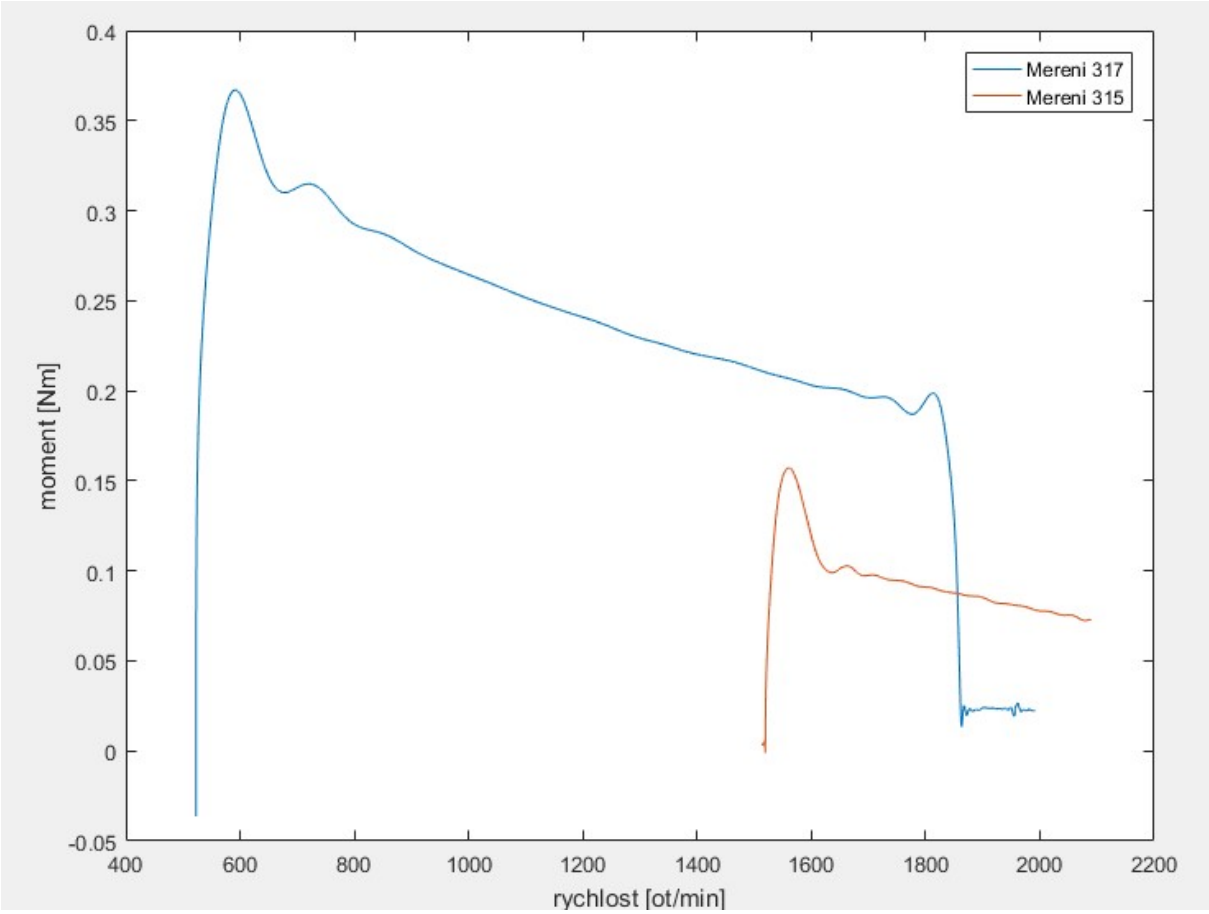
Výkon motoru se spočte:

$$P = M \cdot \dot{\varphi}$$



Obrázek 38: Závislost výkonu na otáčkách

Z obrázku č. 38 je patrné, že výkon s rostoucí rychlostí otáček stoupá. Prudký nárůst je v místě, kde začalo měření. Mírné zvlnění při prudkém nárůstu a razantním poklesu, kdy měření skončilo, může být způsoben vlivem filtrů, nebo řídicím algoritmem kontroléru.



Obrázek 39: Porovnání dvou měření závislosti momentu na otáčkách

Na obrázku č. 39 je porovnání průběhu momentu v závislosti na otáčkách motoru ze dvou nezávislých měření. Jedno měření začínalo při 500 ot/min a druhé při 1500 ot/min. Z grafu je patrné, že moment s rostoucími otáčky klesá.

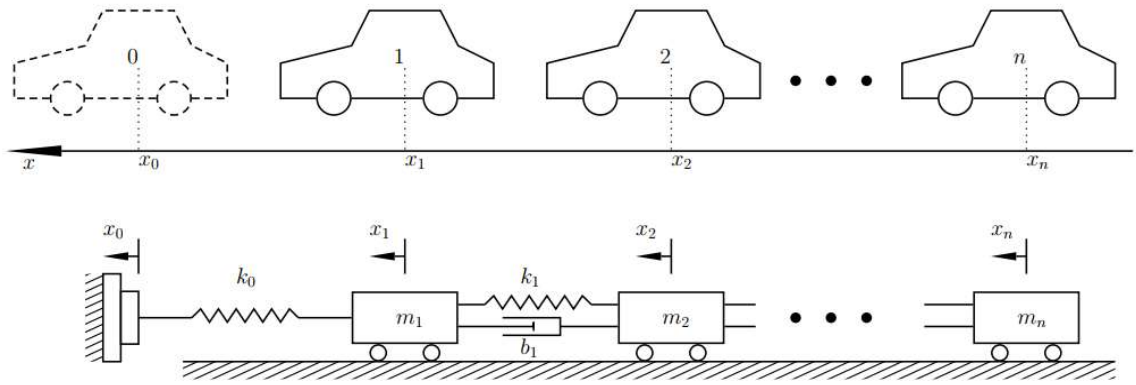
7.3.2. Závěr měření

Cílem měření bylo otestovat, zda je motor vhodný k aplikaci na modelu. I přes trochu komplikované zpracování dat, charakteristika motoru znázorněna na obou grafech je důkazem správného měření.

Vzhledem k tomu, že motor nedokázal setrvačník při nulových otáčkách roztočit, na modelu bude potřeba použít odstředivá spojka, která bude zabezpečovat plynulý rozjezd navrhovaného modelu.

8. Simulace kolony vozidel

Tato simulace je opravdu jen úvodem do chování kolony vozidel. Protože navrhovaný model bude součástí takové kolony a je potřeba ukázat výhody těchto autonomních vozidel. Simulace byla prováděna v programu Matlab Simulink. Snahou bylo co nejvíce se simulací přiblížit reálnému provozu na komunikacích. Jednotlivé parametry byly pouze odhadnuty, protože pro pozdější řízení kolony se budou muset parametry



Obrázek 40: Princip sestavení rovnic podle souřadnic [zdroj 1]

matematicky vyjádřit.

Kolona vozidel vyobrazená na obrázku č. 40, znázorňuje auta s jejich polohou. Celá kolona může být simulována jako řetěz spojených hmot, mezi kterými jsou pružiny a tlumiče, kde pružiny mají tuhost k_i a tlumiče tlumení b_i. První (nulové) auto je bráno jako nehmotné. Pohyb jednotlivých vozidel může být sepsán rovnicí:

$$m_i \cdot \ddot{x}_i = \mathrm{k}_i(x_{i+1} - x_i) + k_{i-1}(x_{i-1} - x_i) + \mathrm{b}_i(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + b_{i-1}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i)$$

Vzhledem k tomu, že já jsem se snažil simulovat reálnou kolonu vozidel, řízenou lidmi, kde většina řidičů nesleduje chování vozidla za sebou, parametry (k, b) s indexem *i* nezahrnuji do simulace. [zdroj 1] Výsledná rovnice, podle které se simulace chová je:

$$m_i \cdot \ddot{x}_i = k_{i-1}(x_{i-1} - x_i) + b_{i-1}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i)$$

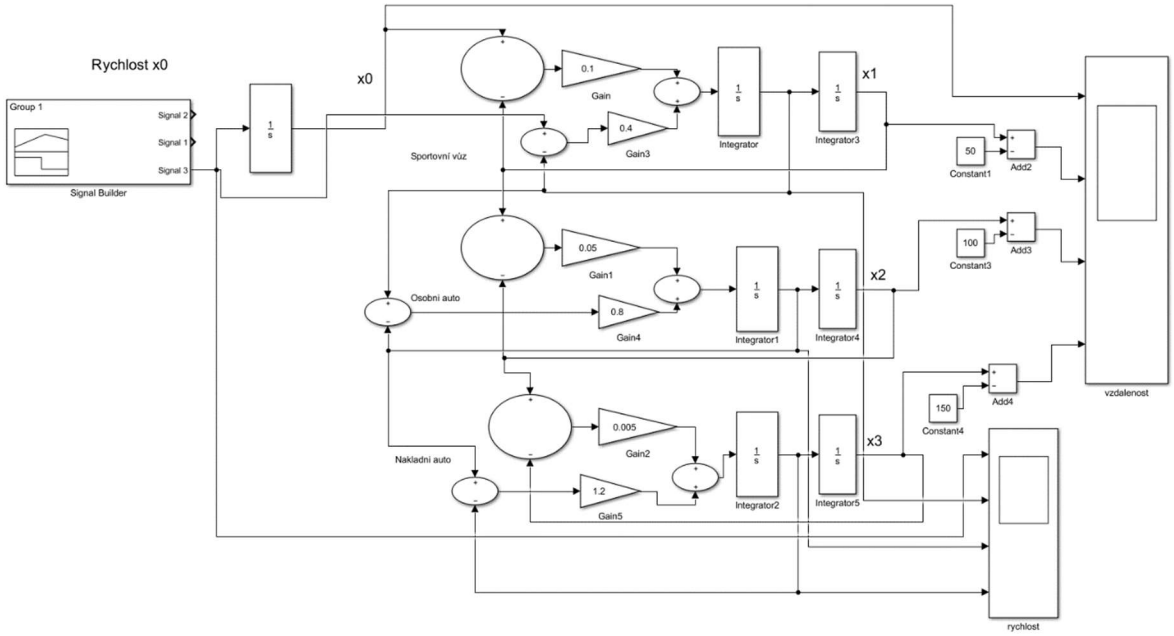
Upravenou:

$$\ddot{x}_i = \frac{k_{i-1}}{m_i}(x_{i-1} - x_i) + \frac{b_{i-1}}{m_i}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i)$$

kde parametry $\frac{k_{i-1}}{m_i}$ a $\frac{b_{i-1}}{m_i}$ vyjadřují chování řidiče, podle toho, jaký vůz řídí.]

V simulaci se vyskytují tři vozidla, jedoucí za sebou: sportovní vůz, osobní automobil a nákladní automobil. Před sportovním vozem, bude vůz, který nebude nikým brzděn, a bude projíždět simulovanými světelnými křižovatkami. Na výsledném grafu bude patrný průběh rychlostí jednotlivých vozidel.

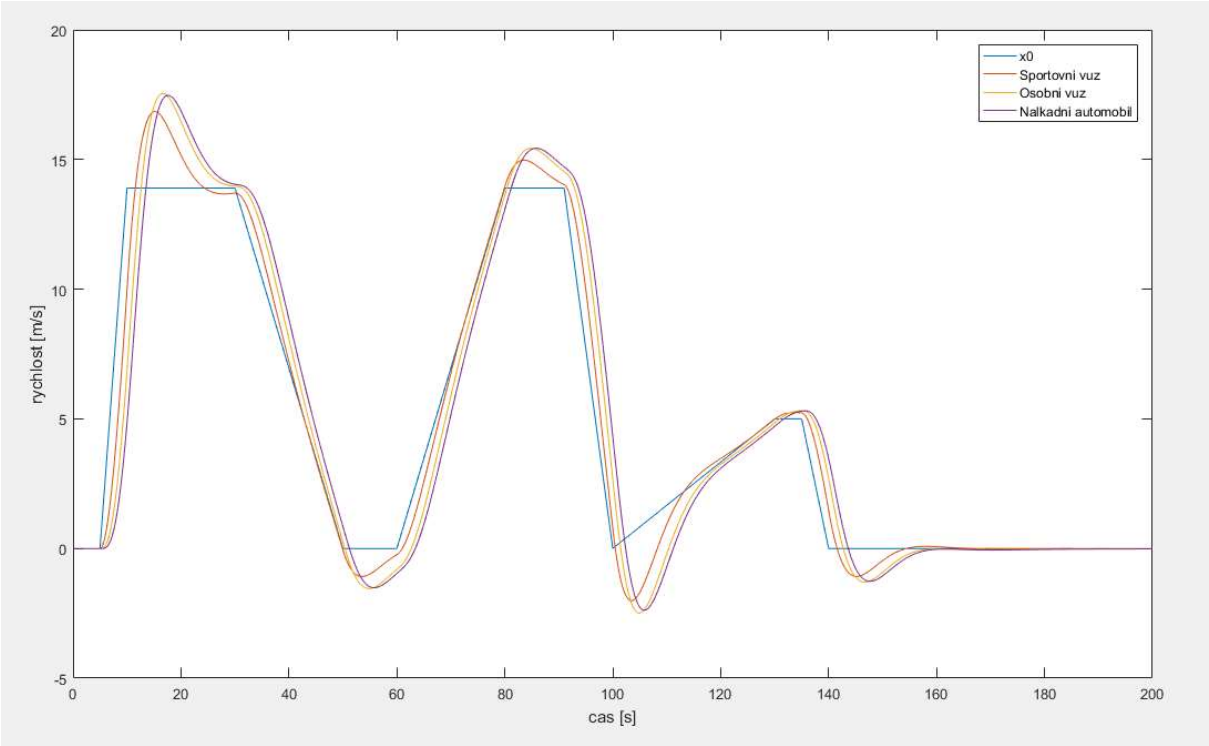
8.1. Schéma v prostředí Simulink



Obrázek 41: Schéma v prostředí simulink

8.2. Výsledný graf závislosti rychlosti na čase

Na grafu je vidět rychlost reakce jednotlivých vozidel na změnu rychlosti. Samozřejmě v oblasti kolem nuly, simulované rychlosti nabývají záporných rychlostí, což ve skutečnosti není možné. Na sportovním vozu je patrné, jak dokáže rychleji reagovat na změnu. Mezi osobním vozidlem a nákladním automobilem není rozdíl tak zřetelný, to závisí na nastavení parametrů.



Obrázek 42: Graf simulovaných rychlostí v čase

9. Závěr

Jak bylo cílem této bakalářské práce, vybral jsem konstrukční prvky modelu, zhodnotil výhody a nevýhody ostatních návrhů. Nastínil jsem problémy, které budou potřeba vyřešit i u vybrané varianty.

V dalším kroku jsem hodnotil použitelnost různých typů senzorů na modelu, jejich použití v reálných vozidlech a shrnul princip fungování. Posléze jsem přiblížil problémy s použitím akcelerometrů (senzory zrychlení), vybral jsem jeden vhodný pro aplikaci na modelu a vysvětlil princip jeho fungování. Otestoval jsem ultrasonický senzor na měření vzdálenosti za účelem posouzení opakovatelnosti měření, aby se předešlo chybným hodnotám při zakomponování senzoru do algoritmu.

Snažil jsem se podrobně rozebrat princip fungování elektronického systému ABS, okolnosti jeho použití na modelu, a na závěr jsem dodal, jaké budou potřeba senzory, případně co jejich použití bude obnášet. Navrhl jsem systém sledování vozidla a jaké k tomu budou potřeba senzory. Zhodnotil jsem jeho případné problémy s aplikací na modelu.

Následovala kapitola o výběru řídící elektroniky, kde bylo potřeba naznačit jednotlivé prvky řídící elektroniky, vyznačit, jak budou v modelu umístěny a případně dovysvětlit jejich funkci.

V kapitole o testování pohonné jednotky jsem vybral příslušný motor a jeho kontrolér. Byly vyhodnoceny naměřená data a provedl jsem závěrečné zhodnocení měření.

Simulace kolony uzavřela návrh modelu do jednoho celku. Ukázala, co je důvodem takovýchto návrhů autonomních vozidel.

Tato práce by se měla značně přispět k sestavení navrhovaného modelu. Určitě bude potřeba doladit několik drobností, jako například spojka mezi motorem a rozvodným systémem, nebo zakomponování algoritmy pro řízení přední nápravy. Pevně však věřím, že v navazující práci bude již samotné testování fyzického modelu vozidla.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Model ze stavebnice LEGO Mindstorms [zdroj 4] 7
Obrázek 2: Model ze stavebnice VEX EDR [zdroj 5] 8
Obrázek 3: Podvozek ze stavebnice VEX, pohled z dola 9
Obrázek 4: Podvozek ze stavebnice VEX 9
Obrázek 5: Příklad propracovanosti podvozku RC modelů [zdroj 9]..... 9
Obrázek 6: Porovnání označovaných poměrů velikostí [zdroj 6] 10
Obrázek 7: Baja 5B SS [zdroj 6] 11
Obrázek 8: Indukční průmyslový snímač [zdroj 8] 12
Obrázek 9: Kapacitní průmyslový snímač [zdroj 8]..... 12
Obrázek 10: Princip odrážení vln [zdroj 7] 13
Obrázek 11: Infračervený senzor pro Arduino 14
Obrázek 12: Ultrasonický senzor HC-SR04 pro Arduino 14
Obrázek 13: Vysvětlení principu chování akcelerometru [zdroj 7] 16
Obrázek 14: Základní struktura akcelerometru ADXL50 [zdroj 7]..... 18
Obrázek 15: Struktura paralelní elektrody akcelerometru ADXL50 [zdroj 7]..... 18
Obrázek 16: Ukázka měření se senzorem HC-SR04 20
Obrázek 17: Ukázka propojení a uložení měřidla 21
Obrázek 18: Program pro řízení senzoru..... 21
Obrázek 19: Závislost odchylky na měřené vzdálenosti 22
Obrázek 20: Hydraulický brzdový systém automobilů [zdroj 7]..... 23
Obrázek 21: Závislost mezi koeficientem tření a skluzem pneumatiky [zdroj 7] 24
Obrázek 22: Působení sil a momentů na brzděné kolo [zdroj 11]..... 25
Obrázek 23: Schéma pracovního algoritmu ABS [zdroj 11]..... 26
Obrázek 24: Kontrolní cykly algoritmu ABS [zdroj 11] 26
Obrázek 25: Rychlostní snímač u kol automobilů [zdroj 7] 28
Obrázek 26: Geometrie řešeného problému sledování vozidla 29
Obrázek 27: Zjednodušení geometri kvůli podmínce kolmosti paprsků..... 30
Obrázek 28 STM Discovery Kit [zdroj 12] 32
Obrázek 29: Schéma navrhované řídící elektroniky 33
Obrázek 30: Intel Galileo Gen 2 [zdroj 13]..... 34
Obrázek 31: Ampermetr ACS712 pro Arduino..... 34
Obrázek 32: Rozložení řídící elektroniky v modelu..... 35

Obrázek 33: Arduino UNO 35
Obrázek 34: T-Motors MS2216 1100KV [zdroj 15] 36
Obrázek 35: ESC od T-Motors Flame 25 A [zdroj 16] 37
Obrázek 36: Program pro generování PWM 38
Obrázek 37: Schéma s popisem prováděného měření 38
Obrázek 38: Závislost výkonu na otáčkách 39
Obrázek 39: Porovnání dvou měření závislosti momentu na otáčkách 40
Obrázek 40: Princip sestavení rovnic podle souřadnic [zdroj 1] 41
Obrázek 41: Schéma v prostředí simulink 42
Obrázek 42: Graf simulovaných rychlostí v čase 43

11. Seznam použitých zdrojů

[1] VALÁŠEK, M., Z. NEUSSER a T. GORDON. Wave-based control for intelligent longitudinal traffic column. In: *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks* [online]. 2016, s. 9 [cit. 2017-08-24]. DOI: 10.1201/b21185-21. ISBN 978-1-138-02885-2.

[2] PACEJKA, Hans B. *Tyre and vehicle dynamics*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 07-506-5141-5.

[3] Matlab Simulink. *MathWorks* [online]. [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=srchtitle

[4] *LEGO Minstorms* [online]. LEGO Group, 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: https://www.lego.com/cs-cz/mindstorms

[5] *VEX Robotics* [online]. Innovation First International, 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: https://www.vexrobotics.com/vexedr

[6] Baja 5B SS. *HPI Racing* [online]. HPI Racing, 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: https://www.hpiracing.com/en/kit/112457

[7] EDITED BY JOHN TURNER. *Automotive sensors*. New York: Momentum Press, 2009. ISBN 978-160-6500-095.

[8] Senzor. In: *Automatizace* [online]. 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html

[9] HPI Baja 5B SS. *RC-Nieuws* [online]. 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: http://www.rc-nieuws.nl/hpi-baja-5b-ss-buggy/

[10] *Datasheet ADXL 50* [online]. [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/2044696ADXL50.pdf

[11] KIENCKE, U. a Lars NIELSEN. *Automotive control systems*. New York: Springer-Verlag, c2000. ISBN 35-406-6922-1.

[12] STM discovery. In: *RS-Online* [online]. 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: http://uk.rs-online.com/web/p/processor-microcontroller-development-kits/7587554/

[13] Datasheet Intel galileo gen 2. *Intel-products* [online]. Intel, 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: http://ark.intel.com/products/83137/Intel-Galileo-Gen-2-Board

[14] *Datasheet HCSR04* [online]. ElecFreaks, 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf

[15] *Datasheet T-Motors MS2216 KV 1100* [online]. Germany Aerolab PRO UG, 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: https://www.aerolab.de/brushless-motoren/t-motor-ms/t-motor-ms2216-kv1100/a-107003/

[16] Datasheet T-Motors Flame 25 A. *FoxTech* [online]. 2017 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: https://www.foxtechfpv.com/t-motor-flame-25a-esc.html