

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

Online trailer parameter estimation using ultrasonic parking sensors

Online identifikace parametrů přívěsu s využitím ultrazvukových senzorů

DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Josef VEJLUPEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.

BRNO 2017



## Abstrakt

Disertační práce se zabývá možností využití „klasických ultrazvukových parkovacích senzorů“ pro asistenci řidiči při couvání s připojeným přívěsem. Klíčovými body práce je nalezení vhodných řešení stanovených cílů „online identifikace parametrů přívěsu“, zejména tedy určení odhadu okamžitého úhlu odklonu přívěsu od vozidla a dále určení odhadu délky oje přívěsu (vzdálenosti mezi tažným zařízením a osou nápravy přívěsu). V práci je zpracován model kinematiky vozidla s připojeným přívěsem, a model ultrazvukových parkovacích senzorů s přívěsem chápaným jako překážka.

## Abstract

This thesis deals with utilizing „the common ultrasonic parking sensors“ for assisting the driver with backing-up a trailer. Key issues solved in this thesis are „Online trailer parameter estimation:“ determining the estimate of angle between the car and the trailer, and determining the estimate of the length of the trailer shaft (distance from trailer coupling to trailer axle). Thesis contains the model of kinematics of the car with coupled trailer and ultrasonic sensor model together with the trailer viewed as an obstacle.



## **Bibliografická citace**

VEJLUPEK, J. Online identifikace parametrů přívěsu s využitím ultrazvukových senzorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 94 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D..



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma identifikace parametrů přívěsu s využitím ultrazvukových senzorů jsem vypracoval samostatně pod vedením svého školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně, Josef VEJLUPEK, 2017





## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji své rodině za podporu, důvěru a trpělivost.

Mé přítelkyni za lásku, důvěru a podporu.

Mému vedoucímu práce za cenné rady a čas.

Kolegům a přátelům z laboratoře za spolupráci na projektech, podněty a inspiraci.

Zaměstnavateli za trpělivost a pochopení pro mé školní aktivity.

Bohu za sílu a rovnováhu.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Formulace problémové situace, problému, cílů řešení</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Rešeršní studie</b>	<b>19</b>
3.1	Parkovací asistenty . . . . .	19
3.1.1	Řídicí jednotky VALEO . . . . .	20
3.1.2	Ultrazvukové snímače VALEO . . . . .	21
3.2	Asistenty couvání pro vozidla s přívěsem . . . . .	22
3.2.1	Asistent pro couvání s přívěsem automobilky Volkswagen	22
3.2.2	Asistent pro couvání s přívěsem automobilky FORD .	23
3.2.3	Asistent pro couvání s přívěsem TowGo . . . . .	26
3.3	Přehled publikací v oblasti zájmu . . . . .	26
3.4	Závěry rešeršní studie . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Postup řešení</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Použité metody</b>	<b>31</b>
5.1	Savitzky-Golay Filtr . . . . .	31
5.2	Řízení a kaskádní regulátory . . . . .	33
5.2.1	Stejnoseměrný kartáčkový motor . . . . .	33
5.2.2	Řízení malého stejnosměrného kartáčkového motoru . .	39
5.2.3	Řízení otáček motoru . . . . .	42
5.2.4	Řízení polohy motoru . . . . .	45
5.2.5	Kaskádní regulace . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Model kinematiky vozidla s připojeným přívěsem</b>	<b>49</b>
6.1	Sestavení modelu kinematiky . . . . .	49
6.2	Jack-knifing . . . . .	53

<b>7</b>	<b>Model překážky - přívěsu z pohledu snímačů</b>	<b>55</b>
7.1	Ultrazvukové parkovací senzory . . . . .	55
7.2	Model přívěsu jako překážky . . . . .	59
<b>8</b>	<b>Určení polohy a parametrů přívěsu</b>	<b>68</b>
8.1	Určení úhlu odklonu osy přívěsu od podélné osy vozidla $\hat{\tau}$ . . .	68
8.2	Určení délky oje přívěsu $\hat{L}_T$ . . . . .	74
	8.2.1 Stanovení délky oje výpočtem . . . . .	74
	8.2.2 Stanovení délky oje pomocí modelu . . . . .	79
<b>9</b>	<b>Asistent couvání s přívěsem</b>	<b>82</b>
9.1	Možnosti řízené veličiny a její zadání . . . . .	82
9.2	Využití určených parametrů přívěsu . . . . .	83
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Použité zkratky</b>	<b>91</b>
<b>B</b>	<b>Seznam příloh</b>	<b>92</b>
B.1	MATLAB a Simulink . . . . .	92

# Seznam obrázků

2.1	V-diagram vývoje řídicí jednotky motoru . . . . .	18
3.1	Řídicí jednotka PDC - Valeo . . . . .	21
3.2	Ultrazvukový senzor - Valeo . . . . .	21
3.3	Asistent couvání VW - Určení směru . . . . .	22
3.4	Asistent couvání VW - Vizualizace na kombi přístroji . . . . .	23
3.5	Asistent couvání VW - Určení směru . . . . .	23
3.6	Asistent couvání Ford F150 - F150 s přívěsem . . . . .	24
3.7	Asistent couvání Ford F150 - Záběr z parkovací kamery . . . . .	25
3.8	Asistent couvání Ford F150 - Určení směru . . . . .	25
3.9	Asistent couvání Ford F150 - Nepodporované typy přívěsů, ručně měřené rozměry . . . . .	25
5.1	Program „Termická“ vytvořený pro AluCast Tupesy v roce 2012	33
5.2	Model DC motoru - Elektrická část . . . . .	36
5.3	Model DC motoru - Mechanická část . . . . .	36
5.4	Model DC motoru - připravený model . . . . .	36
5.5	DC motor - odezva na jednotkový skok . . . . .	37
5.6	DC motor - srovnání různých frekvencí PWM . . . . .	41
5.7	P Regulátor otáček, I Regulátor otáček . . . . .	43
5.8	PI Regulátor otáček, příspěvky jednotlivých složek . . . . .	44
5.9	PI+FFWD Regulátor otáček, příspěvky jednotlivých složek . . . . .	44
5.10	P, I, PI regulátor polohy . . . . .	46
5.11	Kaskádní regulátor polohy . . . . .	48
6.1	Model kinematiky automobilu s Ackermanovým řízením, převzato z [9] . . . . .	51
6.2	Zjednodušený model kinematiky automobilu s přívěsem . . . . .	52
6.3	Implementace modelu kinematiky v prostředí MATLAB Si- mulink . . . . .	53
6.4	„Jack-Knifing“: Stanovení limitního úhlu . . . . .	54

7.1	Ultrazvukový snímač Valeo . . . . .	56
7.2	Model dráhy zvuku mezi aktivním senzorem, čelem přívěsu a pasivními senzory: $\tau = 0$ . . . . .	61
7.3	Model dráhy zvuku mezi aktivním senzorem, čelem přívěsu a pasivními senzory: $\tau = 28^\circ$ . . . . .	62
7.4	GUI pro konfiguraci nárazníku s rozmístěním senzorů - ovládací rozhraní programu vytvořeného pro Škoda Auto a.s. . . . .	63
7.5	Model dráhy zvuku mezi aktivním senzorem, čelem přívěsu a pasivními senzory: virtuální průsečík. . . . .	64
7.6	Střídání aktivního senzoru: dráhy signálu. Aktivní senzor: vlevo nahoře S1, vpravo nahoře S2, vlevo dole S2, vpravo dole S4, . . . . .	65
7.7	Model kinematiky a model senzorů - prostředí MATLAB Simulink . . . . .	66
7.8	Vykreslení dráhy vozidla a přívěsu . . . . .	66
7.9	Simulace měřených vzdáleností: data ze senzorů . . . . .	67
8.1	Metoda společné tečny elips . . . . .	70
8.2	Model rozšířený o algoritmus odhadu úhlu odklonu . . . . .	72
8.3	Realizace kvantizační funkce . . . . .	72
8.4	Simulace jízdy: odhad úhlu na základě měření senzorů . . . . .	73
8.5	Model doplněný o výpočet odhadu délky oje . . . . .	77
8.6	Odhad délky oje - průběh . . . . .	78
8.7	Stanovení odhadu délky oje pomocí modelu . . . . .	80
8.8	Stanovení odhadu délky oje pomocí modelu . . . . .	81
9.1	Rovnovážný stav při couvání s přívěsem . . . . .	84

# Seznam tabulek

5.1	Katalogové údaje motoru RE25 #118740 . . . . .	35
5.2	Katalogové údaje enkodéru a převodovky . . . . .	38
6.1	Model kinematiky vozidla a přívěsu . . . . .	50
7.1	Model řídicí jednotky a přívěsu . . . . .	60
8.1	Algoritmus pro stanovení odhadu úhlu odklonu $\hat{\theta}$ . . . . .	71
8.2	Algoritmus pro stanovení odhadu délky oje přívěsu $\hat{L}_T$ . . . . .	75

# Kapitola 1

## Úvod

Zvyšování bezpečnosti a komfortu posádky osobních automobilů je oblast, které je dlouhodobě věnováno mnoho pozornosti. Na bezpečnost automobilu lze nahlížet různými způsoby: bezpečnost posádky během a po kolizi automobilu (jakým způsobem jsou navrženy deformační zóny, výbava airbagy, ochrana před vznícením paliva po kolizi, odjištění zámků dveří, systém e-call), bezpečnost chodců (tvarování karoserie, přítomnost ochranných rámců, aktivní ochrana chodců, viditelnost z vozidla při couvání,...), přístupnost servisních míst (výměna žárovek<sup>1</sup>, umístění výměna rezervy) a dále pak především aktivní bezpečnost, tedy způsoby jak kolizi předejít. O aktivní funkce se zpravidla starají řídicí jednotky, jejichž počet se s novými generacemi vozidel neustále zvyšuje. Příkladem aktivních jednotek bezpečnosti a komfortu mohou být parkovací asistenty, adaptivní světlomety, noční vidění, aktivní tempomat, a další systémy.

S nárůstem počtu řídicích jednotek ve vozidlech tak roste i složitost celého systému. Aby při uvedení vozidla na trh byla zajištěna správná funkce všech systémů, je zapotřebí jednotlivé části i funkce všech jako celku otestovat. O tyto testy se obvykle v automobilce stará oddělení vývoje elektroniky, respektive integračních testů. Zde se dávají dohromady jednotlivé řídicí jednotky, elektronické a elektromechanické subsystémy dohromady a testuje se jejich funkčnost v rámci dílčích subsystémů tak i kompletního celku. Jednou z používaných metod při testování řídicích jednotek je HIL<sup>2</sup> simulace. Jedná se o techniku, při které se části elektroniky - obvykle senzory a aktuátory nahradí speciálními počítači, na nichž pak běží jejich simulační modely a

---

<sup>1</sup>Například u vozu Renault Megane (cca 2007), který v testech NCAP obdržel hodnocení 5\* není výměna žárovky světlometu rozhodně jednoduchým úkonem bezpečně zvládnutelným v krajním případě v noci na krajnici na silnici či dálnici, neboť vyžaduje demontáž předního kola [8].

<sup>2</sup>HIL - Hardware-In-the-Loop



simulace reálného prostředí.

V rámci spolupráce laboratoře mechatroniky FSI VUT v Brně (MechLab) a automobilky Škoda Auto a.s. jsme se postupně zabývali vývojem několika testovacích přípravků právě pro řídicí jednotky komfortních asistentů: Prvním projektem byl HIL simulátor parkovacího asistentu [10] realizovaný Ing. Petrem Krejčím PhD. Cílem tohoto projektu, řešeném v letech 2012-2013 bylo nahradit ultrazvukové senzory počítačovou simulací, která umožní uživateli definovat velikost a polohu překážky a testovat tak chování řídicí jednotky i navázaných systémů v nejrůznějších situacích. Byla tedy vyvinuta elektronika, nahrazující ultrazvukové senzory na základě počítačové simulace překážky definované uživatelem. Řešení bylo postaveno dle požadavků automobilky na platformě PXI od firmy National Instruments a zakomponováno do většího testovacího celku. Po úspěšném předání vyvinutého řešení vzešel ze strany Škoda Auto a.s. požadavek na vývoj dalšího zařízení pro testování řídicích jednotek parkovacího asistentu ve verzi pro individuální testování. S ohledem na požadavek na výrobu více kusů a tedy i tlakem na cenu jednotlivých přípravků byla zvolena „embedded“ verze, implementovaná částečně na mikrokontroléru. Realizace probíhala v letech 2013-2014, následně byl firmware ještě několikrát aktualizován podle nových verzí testovaných řídicích jednotek, řešitelem projektu byl autor této práce. Třetím řešeným projektem je přípravek pro testování asistentu otevírání pátých dveří, kdy cílem projektu je testování řídicích jednotek a elektromechanických komponent systému. Projekt byl zadán v roce 2014, v roce 2015 byl dodán první kus, v současné době se již pracuje na třetím kuse. Autor této práce se podílel převážně na vývoji a sestavení prvního prototypu, na druhém již s ohledem na nové zaměstnání jen částečně spolupracoval.

Právě druhý projekt vývoje přípravku pro testování řídicích jednotek parkovacího asistentu [11], stál u zrodu myšlenky této práce (přibližně přelom 2013/2014): automobily jsou dnes již celkem běžně vybavovány parkovacími asistenty, které nejčastěji využívají ultrazvukové senzory. Funkce asistentu je však při připojení přívěsu vyřazena a jednotka je deaktivována, jelikož by nezachycovala překážku, ale právě přívěs. Dnes již rovněž existují i automobily, které disponují asistentem pro parkování, respektive couvání s přívěsem, avšak jako senzor využívají kameru [1],[3]. Prvotní nápad pro tuto práci vznikl ještě před nástupem této technologie a od řešení automobilek se odlišuje právě v použití ultrazvukových senzorů. V principu by stávající parkovací asistenty využívající ultrazvukové senzory mohly být rozšířeny o funkcionalitu asistentu couvání s přívěsem a to na základě metod prezentovaných v této práci.

Tato práce nebyla iniciována ze strany automobilky ani jiného subjektu, nápad vznikl v hlavě autora dříve a nezávisle od komerčních řešení „asistentu

couvání s přívěsem“ během vývoje testovacích přípravků pro řídicí jednotky parkovacích asistentů s ultrazvukovými senzory. Od komerčních produktů se řešení uvedené v této práci odlišuje způsobem získávání dat - stanovení parametrů a odklonu přívěsu pomocí měření vzdálenosti prostřednictvím ultrazvukových sensorů.

## Kapitola 2

# Formulace problémové situace, problému, cílů řešení

Jak již bylo popsáno v úvodu, cílem této práce je navrhnout možné rozšíření sady algoritmů pro řídicí jednotky parkovacího asistentu PDC<sup>1</sup> v osobních automobilech, založených na snímání vzdálenosti od překážky pomocí ultrazvukových senzorů o možnost asistovat řidiči při couvání s připojeným přívěsem. Principiálně jde o to, že přívěs lze fakticky z pohledu PDC stále chápat jako překážku, ale na rozdíl od úlohy PDC, kde se stanovuje vzdálenost od překážky a její poloha, budeme určovat především úhel odklonu přívěsu a dále pak odhad některých parametrů přívěsu podstatných pro řízení asistenčního systému.

Jelikož k automobilu můžeme připojit libovolný přívěs, je pro účely řízení následného couvání potřeba umět určit jeho parametry, které se mohou pro různé přívěsy lišit, a které jsou pro řízení couvání podstatné. Jde především o délku oje přívěsu, respektive vzdálenost mezi tažným zařízením a nápravou. Tato vzdálenost ovlivňuje „zatačivost“ přívěsu - polohu okamžitého středu otáčení přívěsu příslušnému úhlu odklonu přívěsu a úhlu natočení přední nápravy vozidla.

Dále je potřeba stanovit způsob zadání požadavku od řidiče, kterým předá řídicí jednotce informaci o tom, kam chce zacouvat. Ta musí naplánovat vhodnou trajektorii a následně celou soupravu řídit tak, aby stanovenou trajektorii projela. Jednodušší varianta je pouze řízení odklonu přívěsu na konstantní, nebo řidičem aktivně řízenou hodnotu.

Abychom získali funkční řešení asistentu couvání s přívěsem, potřebujeme vyřešit několik problémů:

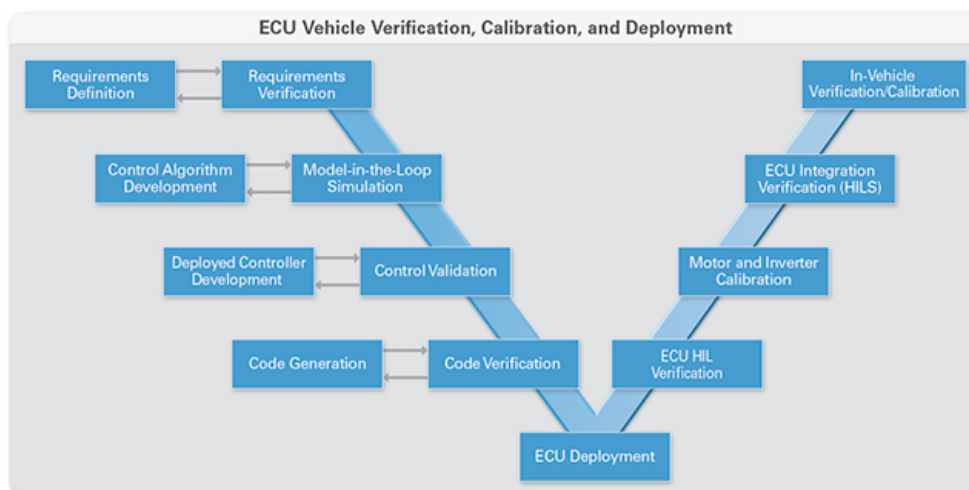
1. Určení úhlu odklonu osy přívěsu od podélné osy vozidla.

---

<sup>1</sup>PDC - Park Distance Control, případně PLA - Parallel parking Assistant

2. Určení vzdálenosti nápravy od tažného zařízení.
3. Vytvoření regulátoru, který na základě vstupů od řidiče bude řídit pohyb soupravy vozidla s připojeným přívěsem.
4. Formulace způsobu respektive formy zadání řídicí veličiny - vstupu od řidiče, jakým bude určen pohyb soupravy (ovládací prvek respektive směr, dráha, úhel odklonu přívěsu, ...)

Pro řešení úkolu jsme zvolili počítačové modelování podpořené reálnými experimenty a zkušenostmi z několika projektů uvedených v úvodu. Jedná se o v praxi obvyklý postup: vytvoření dostatečně podrobného matematického modelu problémové situace a následný vývoj algoritmů a metod pro řešení problému. Dalším krokem je pak obvykle implementace na prototypovém HW (RCP) [5]



Obrázek 2.1: V-diagram vývoje řídicí jednotky motoru

Tato práce se zabývá pouze prvními dvěma až třemi kroky V-diagramu. Neklademe si za cíl vývoj finální řídicí jednotky, ale pouze ověření konceptu, přípravu a ověření algoritmů.

# Kapitola 3

## Rešeršní studie

V současné době jsou asistenční systémy parkování s přívěsem pro osobní automobily již na trhu [1],[3], avšak tyto systémy využívají ke stanovení úhlu odklonu přívěsu analýzy obrazových dat z parkovací kamery umístěné na zadní části automobilu.

V akademické sféře se parkováním, případně couváním vozidla s připojeným přívěsem zabývalo rovněž několik skupin, viz dále, ale opět využívaly jiný typ snímače pro stanovení úhlu odklonu.

### 3.1 Parkovací asistenty

Parkovací asistenty pro osobní automobily lze řadit do několika kategorií podle principu funkce a také podle schopností. Nejjednodušším příkladem jsou přídavné parkovací senzory, které se do nárazníku automobilu montují dodatečně a jsou aktivovány zařazením zpátečky - elektronika je napájena přímo od žárovky zpátečky a jednoduchý modul ukazuje vzdálenost od překážky buď přímo v centimetrech, nebo barevnou škálou na displeji. Další oblíbené řešení, zejména pro dodávky je montáž kamery nejčastěji nad zadními dveřmi a přidání monitoru do palubní desky u řidiče.

Mezi standardními řešeními montovanými přímo ve výrobě lze najít v podstatě období obojího, avšak indikace překážky bývá integrována přímo do palubních přístrojů: vzdálenost a poloha překážky se při aktivaci zpátečky (parkovacího asistentu) zobrazuje přímo na displeji autorádia, stejně tak bývá zobrazován i obraz z kamery na některém z panelů palubní desky. Kromě zobrazení polohy překážky existují i pokročilá řešení, která například v kombinaci s elektromechanickým posilovačem řízení umožňují řidiči jeho automobil zaparkovat automaticky do mezery v řadě stojících vozidel, přičemž auto si samo řídí natočení nápravy („samo točí volantem“) a řidič ovládá pouze

řazení, plyn, brzdu a v případě manuální převodovky i spojku.

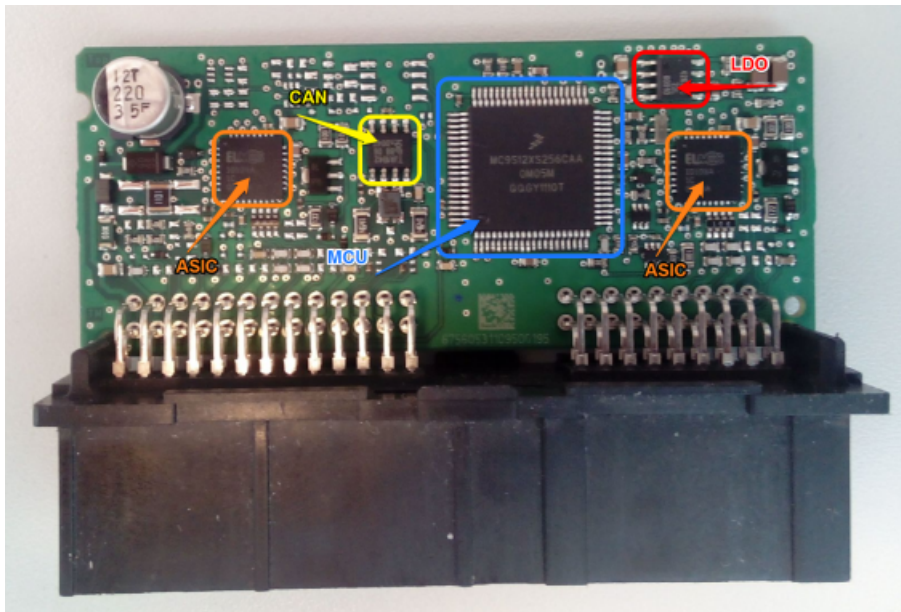
Zmíněné parkovací senzory jsou zpravidla ultrazvukové snímače s dosahem řádově v jednotkách metrů a velmi širokým vyzařovacím úhlem. Tato technologie je levná a přitom dostatečně robustní pro relativně náročné požadavky automobilového průmyslu.

### 3.1.1 Řídicí jednotky VALEO

Při vývoji HIL Simulátoru pro Škoda Auto a.s. jsme pracovali s řídicími jednotkami a senzory od firmy Valeo, která dodává tyto komponenty do části koncernu VW (Audi, Seat, VW, Škoda), viz obrázky 3.1 a 3.2. Existuje několik variant řídicích jednotek. U některých typů bývá ovšem jediný rozdíl v takzvaném kódování jednotky. To znamená, že řídicí jednotky mají identický hardware a jediným rozdílem je tedy jejich interní nastavení parametrů, různé modely vozidel se mohou lišit tvarem nárazníku a tedy i umístěním senzorů, počtem senzorů, a dále i tím, jestli má vozidlo snímače pouze na zadním nárazníku, nebo je-li vybaveno i snímači v předním nárazníku, případně na bocích vozidla. Důvod je především ekonomický, z mnoha hledisek se vyplatí vyrábět řídicí jednotku, kterou lze posléze upravit pouhým přehráním parametrů pro libovolný model vozidla. Někdy se jednotky liší už jen na úrovni HW - osazením jen části desky plošných spojů. Během vývojových úkolů jsme se setkali s dvěma základními typy řídicích jednotek VALEO:

- PDC (Park Distance Control) - tato řídicí jednotka dává řidiči optickou a akustickou informaci o vzdálenosti překážky za, případně před vozidlem. Neumožňuje automatické parkování.
- PLA (Parallel parking Assistant) - Tato řídicí jednotka kromě signalizace polohy překážky umožňuje i aktivní asistenci při parkování: a to jak při podélném, tak příčném.

Z hlediska HIL simulace se jednotky od sebe neliší jinak než počtem kanálů. PDC bývá čtyř, nebo osmi-kanálová, zatímco PLA má obvykle dvanáct kanálů, kdy na každém nárazníku jsou čtyři senzory a další čtyři senzory jsou umístěny na bocích vozidla. Tyto boční snímače umožňují vozidlu vyhledat mezeru v řadě stojících automobilů při podélném parkování.



Obrázek 3.1: Řídicí jednotka PDC - Valeo

### 3.1.2 Ultrazvukové snímače VALEO

Jako snímač vzdálenosti pro parkovací jednotky jsou využívány ultrazvukové snímače. Pro koncern VW a tedy i automobilku Škoda Auto a.s. dodává spolu s řídicími jednotkami i tyto senzory firma VALEO. Ultrazvukové snímače jsou vestavěny do zadních a předních nárazníků, v případě jednotek PLA jsou další 4 snímače umístěny na bocích vozidla, zpravidla jsou ještě montovány do dílu nárazníku v okrajové části blízko podběhu.

Snímač je řízen řídicí jednotkou parkovacího asistentu. Jeho pracovní dosah je přibližně 2 – 3m. Vyzařovací úhel snímače je velmi široký, experimentálně byla ověřena funkce i u překážek umístěných v úhlu 60° od osy snímače.



Obrázek 3.2: Ultrazvukový senzor - Valeo

## 3.2 Asistenty couvání pro vozidla s přívěsem

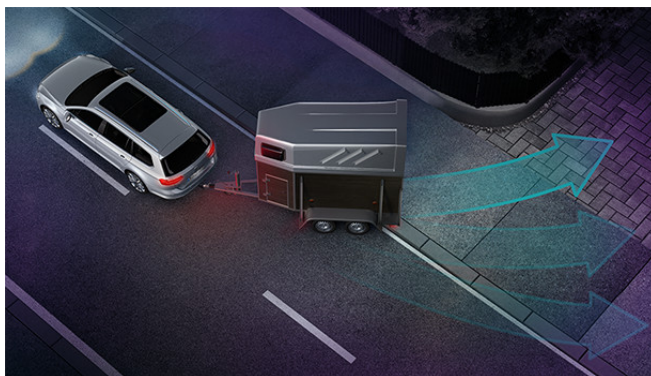
Stručný přehled aktuálně dostupných komerčních řešení:

### 3.2.1 Asistent pro couvání s přívěsem automobilky Volkswagen

Jedním z prvním komerčně dostupných řešení asistentu couvání (parkování) s přívěsem přišel pravděpodobně koncern VW [3] u vozu Passat. Systém „Trailer Assist“ je jedním z kategorie „asistenčních systémů na podporu řidiče.“ Popis z webu VW:

- „Systém Trailer Assist Vám pomůže s couváním ve chvílích, kdy za vozem potáhnete přívěs. Stačí jednoduše zadat směr, do kterého chcete zajet, a náš asistent sám provede manévr s přívěsem. Na Vás zůstane jen řazení převodových stupňů, zrychlování a brzdění. Manévrování s velkým přívěsem se stane hračkou.“
- „Stačí jednoduše zařadit zpátečku, stisknout tlačítko pro parkování a prostřednictvím spínače pro nastavení zrcátka zadat požadovaný směr. Systém Trailer Assist automaticky převezme řízení, zatímco Vy budete jen zrychlovat a brzdit.“

Z popisu, obrázků a z videa na webu je patrné, že řidič zadává požadovaný úhel odklonu mezi vozidlem a přívěsem, viz obrázek 3.3. Zadání probíhá prostřednictvím ovladače zpětných zrcátek, který slouží jako náhrada volantu, který je v tu chvíli ovládán nikoliv řidičem, ale právě asistenčním systémem. Zadaný úhel je vizualizován na displeji kombi přístroje, viz obrázek 3.4.



Obrázek 3.3: Asistent couvání VW - Určení směru





Obrázek 3.4: Asistent couvání VW - Vizualizace na kombi přístroji



Obrázek 3.5: Asistent couvání VW - Určení směru

### 3.2.2 Asistent pro couvání s přívěsem automobilky FORD

Automobilka Ford přišla [1] s obdobným řešením asistentu couvání, respektive parkování s přívěsem u vozu F-150.

Principiálně se jedná o řešení dost podobné systému VW, snad s jediným rozdílem, a to že Ford má pro nastavení úhlu odklonu přívěsu dedikovaný ovládací prvek - otočný ovladač na středním přístrojovém panelu, viz obrázek 3.8. Pro určení úhlu odklonu přívěsu využívá rovněž analýzy obrazových dat z parkovací kamery, přičemž systém potřebuje mít na oji přívěsu umístěnou značku, viz 3.7. Podle informací v brožuře Fordu k parkovacímu asistentu [2] je dále potřeba automobilu zadat několik parametrů, které musí řidič změřit, viz obrázek 3.9 vpravo:

1. Poloha tažného zařízení - horizontální vzdálenost čepu tažného zařízení

od definovaného bodu na karoserii.

2. Horizontální vzdálenost nalepené značky od závěsu tažného zařízení.
3. Celková vzdálenost mezi zadní parkovací kamerou a nalepenou značkou.
4. Horizontální vzdálenost mezi definovaným bodem na karoserii a osou nápravy (středem os náprav).

Systém rovněž nefunguje s některými druhy přívěsů, které neumožňují vhodné umístění vizuální značky, viz levá část obrázku 3.9.

U automobilu F-150 se už nejedná úplně o obvyklou kategorii osobního automobilu, alespoň ne z pohledu „běžného Evropana“, ale o tzv. „truck“ - nákladní auto, z našeho pohledu v podstatě pick-up. Typickou aplikací pak je například couvání / parkování s přepravníkem na čluny. Lze předpokládat, že automobilka Ford časem přidá tuto funkcionalitu i do svých osobních automobilů.



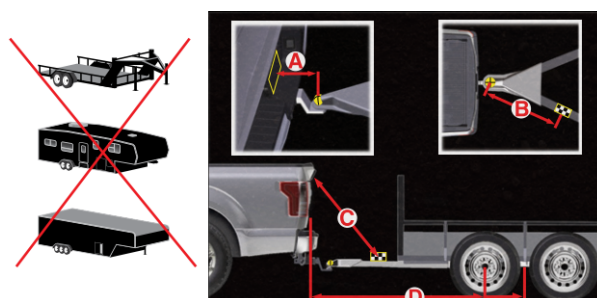
Obrázek 3.6: Asistent couvání Ford F150 - F150 s přívěsem



Obrázek 3.7: Asistent couvání Ford F150 - Záběr z parkovací kamery



Obrázek 3.8: Asistent couvání Ford F150 - Určení směru



Obrázek 3.9: Asistent couvání Ford F150 - Nepodporované typy přívěsů, ručně měřené rozměry

### 3.2.3 Asistent pro couvání s přívěsem TowGo

Asi nejnovějším zařízením, které se však teprve chystá přijít na trh je systém Tow-Go [4]. Tow-Go by mělo být nezávislé na výrobcu automobilu i přívěsu, zatím snad s jedinou podmínkou a to že kulový čep (tzv. „koule“) tažného zařízení je odnímatelná a lze tak instalovat snímač natočení přívěsu přímo do závěsného zařízení. Druhým instalovaným senzorem je snímač polohy volantu, který využívá akcelerometru a gyroskopu k určení polohy volantu. Třetí komponentou je chytrý telefon s nainstalovanou aplikací, která dává pokyn řidiči jak má otáčet volantem pro dosažení požadovaného směru.

Jde sice o zajímavý a ambiciózní nápad, nicméně v současné realizaci a ze známých informací mu lze vytknout hned několik přinejmenším nedořešených problémů:

- Senzor úhlu odklonu přívěsu je použitelný pouze pro specifický typ tažného zařízení. Dále by bylo možné pochybovat o homologaci (homologovatelnosti) takového zařízení, a to tím, že se instaluje (poměrně dost invazivně) jako „cizí“ komponenta do jinak schváleného tažného zařízení.
- Senzor polohy volantu nesnímá přímo natočení předních kol a pro různé modely automobilů bude poměr mezi natočením volantu a natočením přední nápravy různý. O dalších podstatných parametrech (rozchod kol, poloha tažného zařízení, maximální úhel natočení předních kol) vozu ani nemluvě.
- Systém, tím že je univerzální, nemá přesné informace o parametrech vozidla a buď musí odhadovat daleko více parametrů, nebo být velmi robustně řešený, což může mít vliv na přesnost řízení.
- Akční zásah regulace musí zajišťovat sám řidič, čímž mu k ovládní plynů a případně i spojky přibývá opět řízení volantu - což je v podstatě na celém asistentu jeden z největších přínosů pro řidiče, může-li tuto starost ponechat na asistentu.

## 3.3 Přehled publikací v oblasti zájmu

Diplomová práce [16] se zabývá návrhem regulátoru pro TPA (Trailer Parking Assist), autoři navrhli a aplikovali dva různé regulátory: První typu „gain-scheduling“ - systém je v několika bodech linearizován a regulátor přechází mezi jednotlivými nastaveními v závislosti na stavu soustavy. Dále pak regulátor navržený Lyapunovskou funkcí - často používaná metoda pro

nelineární systémy. Práce se dále zabývá plánováním trajektorie s pomocí potenciálových polí. Závěr je věnován reálnému testování: K osobnímu automobilu je připojen přívěs. Úhel natočení přívěsu je snímán potenciometrem připojeným k oji přívěsu. Automobil je upraven tak, aby jeho elektronický posilovač řízení přijímal zprávy z řídicího systému - dSPACE AutoBox, na kterém běží potřebné výpočty a který rovněž přebírá údaje o rychlosti z vozidla. V práci není řešen odhad parametrů přívěsu. Parametry musí být zadány ručně a pro regulaci typu „gain-scheduling“ musí být provedeno individuální naladění pro různá nastavení.

Článek [17] se zabývá plánováním trajektorie pro vozidla s připojeným přívěsem. Počítá však s přívěsem připojeným v ose zadní nápravy vozidla, což není obecný případ a pro osobní automobily neplatí, tento předpoklad zjednodušuje kinematický model. Trajektorie je plánována pomocí polynomu devátého řádu.

Článek [18] pojednává o optimálních trajektoriích pro samotné vozidlo při přesunu mezi dvěma zadanými body, včetně počáteční i koncové orientace, při omezeném počtu řazení mezi zpátečkou a dopřednou rychlostí. Je často citován jako jeden z nejstarších článků věnujících se této tematice.

Článek [19] řeší odhad parametrů připojeného přívěsu pomocí lineárních nejmenších čtverců. V článku je uveden přinejmenším nevhodný obrázek (Fig. 3.) kinematického modelu, kde bod okamžitého otáčení přívěsu a vozidla splývá v jeden, což obecně neplatí. V článku rovněž není uveden typ snímače.

Asi nejpokročilejším publikací v dané oblasti je článek [20], který počítá s dynamickým modelem, a testy navržených algoritmů jsou prováděny na reálném vozidle s připojeným přívěsem. Snímač natočení oje přívěsu je řešen snímačem polohy integrovaným v tažném zařízení, ale ani zde není řešen odhad parametrů přívěsu pro potřeby regulátoru.

### 3.4 Závěry rešeršní studie

Z rešeršní studie vyplývá, že problematikou asistentu parkování, respektive couvání s přívěsem se již zabývalo a zabývá několik jak vědeckých skupin, tak i automobilek. My se však v této práci především zaměřujeme na konkrétní problém a to využitelnost ultrazvukových snímačů a stávajících řídicích jednotek parkovacích asistentů, čímž se doposud zřejmě nikdo otevřeně nezabýval.

Analýza využitelnosti ultrazvukových parkovacích senzorů a stávajících řídicích jednotek parkovacích asistentů by vyžadovala dále ještě podrobnější

experimentální činnost a ověření, jenž už není předmětem této práce. Jak ale ukáží následující kapitoly, určitý potenciál zde existuje a jsou-li u konkrétního přívěsu splněny určité předpoklady, měl by takto navržený asistenční systém fungovat i na základě dat získaných na základě měření pomocí ultrazvukových parkovacích senzorů.

# Kapitola 4

## Postup řešení

Zvolený úkol lze rozdělit na několik dílčích problémů, které je možné řešit odděleně. Díky tomu můžeme u jednotlivých podproblémů testovat různé metody a způsoby řešení.

V první řadě potřebujeme sestavit model kinematiky soupravy vozidla s přívěsem, který nám nahradí reálné vozidlo a umožní testování algoritmů, jež jsou předmětem této práce. Výhodou modelu je rovněž možnost jeho parametrizace, která rozšiřuje možnosti testování algoritmů a může tak přispět k zvýšení jejich robustnosti.

Model kinematiky je pak dále doplněn o rozmístění ultrazvukových senzorů na zadním nárazníku vozidla a jedním z výstupů modelu jsou vzdálenosti mezi každým vysílajícím senzorem - nárazníkem - přijímacím senzorem a informace o tom, jestli daný přijímač signál obdržel. Tato část byla (v jednodušší podobě) již dříve předmětem vývojového projektu PDC HIL [10],[11] realizovaným pro Škoda Auto a.s., který zároveň stál i na počátku myšlenky této práce.

S ohledem na charakter jízdy při couvání jsme zanedbali model dynamiky: předpokládáme, že pohyby během couvání jsou dostatečně pomalé, stejně tak ani neuvažujeme případy mimo vodorovnou rovinu pohybu.

Dalším dílčím podproblémem je sestavení modelu základní části řídicí jednotky parkovacího asistentu, která zpracovává a vyhodnocuje signály z ultrazvukových senzorů. Tento model již rozšíříme o první z algoritmů, jež je cílem této práce, tj. *Určení úhlu odklonu osy přívěsu od podélné osy vozidla*. Stanovení úhlu odklonu přívěsu má význam pro řešení dalších podproblémů a lze provést několika způsoby.

Pro řešení podproblému *Určení vzdálenosti nápravy od tažného zařízení* je již potřeba využít pokročilejších technik, které umožňují pracovat s historií dat: naměřená dráha vozu a zaznamenaný průběh vypočteného úhlu odklonu přívěsu. K řešení využijeme online odhad parametru.

Abychom mohli uzavřít řídicí smyčku, je potřeba navrhnout regulátor a rovněž stanovit co bude vlastně na jeho vstupu jako pokyn od řidiče. Samotná realizace pak také může mít několik podob, podle toho jak vybavené vozidlo vezmeme do úvahy.

Práce je dále rozdělena na několik kapitol - logických celků, řešících jednotlivé podproblémy zadání:

V kapitole 6 se zabýváme výběrem a sestavením matematického modelu kinematiky vozidla s připojeným přívěsem. Vybraný model je popsán v sekci 6.1. V sekci 6.2 je pak vysvětlen pojem „Jack-knifing“ a řešena prevence proti dosažení tohoto stavu.

Kapitola 7 se pak v sekci 7.2 zabývá modelem přívěsu z pohledu ultrazvukových snímačů, popsány jsou v sekci 7.1, kdy je přívěs chápán svým způsobem obdobně jako je u parkovacích asistentů chápána překážka, nicméně tentokrát jsou měřené údaje zpracovávány ještě dalšími algoritmy.

V kapitole 8 se dostáváme k řešení dvou hlavních cílů této práce, jak byly specifikovány během SDZ. Sekce 8.1 popisuje metody použitelné pro stanovení odhadu úhlu odklonu osy přívěsu od podélné osy vozidla. Sekce 8.2 pak řeší určení odhadu délky oje přívěsu.

Kapitola 9 popisuje využití cílů této práce pro aplikaci v řídicí jednotce asistenta parkování s přívěsem. Oddíl 9.1 řeší možné zadání řídicí, respektive požadované veličiny. Oddíl 9.2 se pak zabývá přímo využitím získaných odhadů  $\hat{\tau}$  a  $\hat{L}_T$ .

Dále je zařazena kapitola 5, popisující některé ze základních metod a přístupů, využitých v této práci.



# Kapitola 5

## Použité metody

V této kapitole uvedeme několik obecných přístupů a metod použitých dále v této práci. Uvádíme zde popis digitálního filtru Savitzky-Golay a dále využití kaskádních regulátorů při řízení.

### 5.1 Savitzky-Golay Filtr

Pro filtraci dat zatížených šumem lze v závislosti na charakteru šumu vybrat mnoho nejrůznějších filtrů. V této práci jsme zvolili digitální filtr nazývaný podle svých autorů: Savitzky-Golay Filtr (dále SGF) [14]. SGF je primárně vhodný pro „uhlazení“ pomalu se měnících signálů zatížených šumem. Ač se jedná o digitální filtr, je aplikován na filtrovaný signál přímo v časové, nikoliv ve frekvenční (Fourierově) oblasti. Nejčastěji je využíván v analytické chemii, pro získání užitečných informací ze spektrometrických měření, viz dále. Asi nejzdařilejší popis SGF jsme našli v publikaci [22], volným překladem jej zde uvádíme:

*Nejjednodušší digitální filtry jsou takzvané FIR filtry (Finite Response Filter - Filtr s konečnou délkou odezvy). Každou hodnotu filtrovaných dat  $f_i$  nahrazují hodnotou  $g_i$ , která je lineární kombinací nahrazované hodnoty samé a určitého počtu okolních hodnot:*

$$g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n f_{i+n} \quad (5.1)$$

*kde  $n_L$  je počet zahrnutých bodů vlevo a  $n_R$  je počet bodů zahrnutých vpravo. Filtr, který „nehledí v budoucnost“  $n_R = 0$  se obvykle označuje jako kauzální (anglicky: „causal filter“).*

*Jedním z nejjednodušších digitálních filtrů je **plovoucí průměr**, tedy filtr, který v každém bodě filtrovaných dat určí hodnotu na základě průměru okolních*

bodů  $f_{i-n_L}$  až  $f_{i+n_R}$ , přičemž  $n_R = n_L$  a  $c_n = 1/(n_L + n_R + 1)$ . Je-li fundamentální funkce konstantní, nebo mění-li se lineárně s časem (roste, případně klesá), pak nedojde filtrací k ovlivnění výsledku: hodnoty na jedné straně vyvažují hodnoty na druhé straně od středu filtru. Je-li však druhá derivace fundamentální funkce nenulová, bude výsledek ovlivněn. Například lokální maximum bude sníženo. Na případě spektrometrie dojde k rozšíření a snížení původně tenké a vysoké spektrální čáry, což je pro danou aplikaci nežádoucí efekt.

Nicméně filtr typu „plovoucí průměr“ má tu vlastnost, že zachovává plochu pod grafem - „objem spektrální čáry“ - nultý moment, a také (je-li symetrický  $n_R = n_L$ ) polohu střední hodnoty - „polohu středu spektrální čáry“ - první moment. Naruší až druhý moment - „šířku spektrální čáry“.

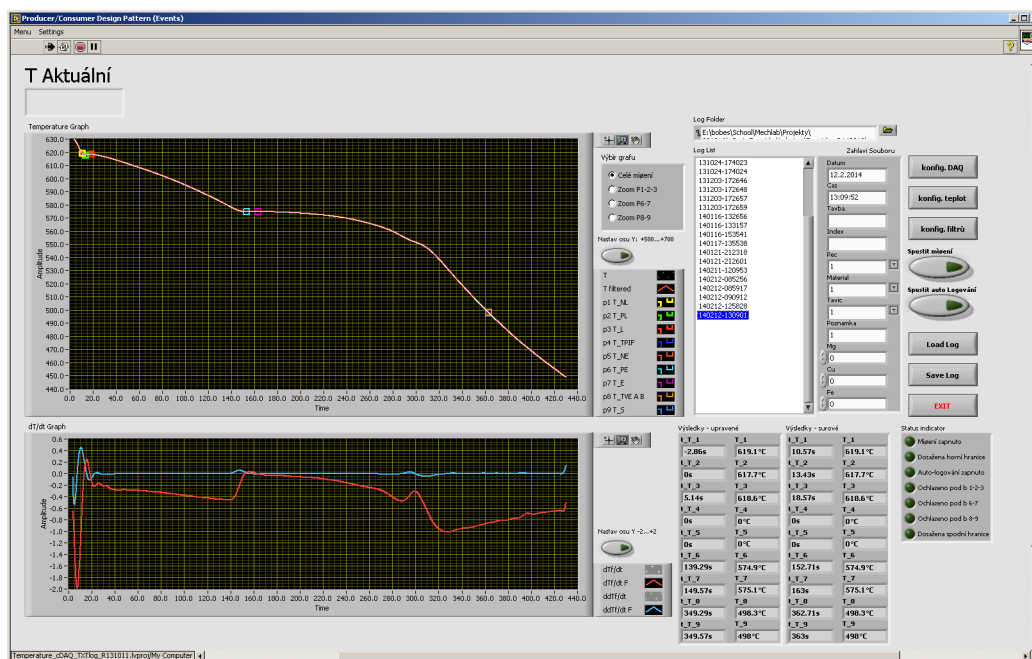
Myšlenka SGF spočívá v nalezení takových koeficientů  $c_n$ , které zachovají i vyšší momenty. Konkrétně tedy pak v aproximaci fundamentální funkce v rámci daného okna, ne pomocí konstanty, ale pomocí polynomu vyššího řádu, obvykle druhého, nebo čtvrtého. Pro každý bod  $f_i$ , je s pomocí metody nejmenších čtverců nalezen polynom daného řádu, tak aby prokládal všech  $n_L + n_R + 1$  bodů, hodnota  $g_i$  je pak vypočtena jako funkční hodnota polynomu v daném bodě. Všechny okolní funkční hodnoty jsou ignorovány. Aproximace metodou nejmenších čtverců probíhá pro každý jeden bod filtrované funkce znovu s novým posunutým oknem.

Díky tomu, že metoda nejmenších čtverců spočívá ve výpočtu inverze matice jsou koeficienty hledaného polynomu nalezeny přímo v daných bodech funkce. Díky tomu lze koeficienty polynomu určit obecně předem pro umělá vstupní data, ve všech bodech nulová s výjimkou jedné jedničky. Následný výpočet na reálných datech pak provedeme pouze lineární kombinací. A to je právě kouzlo SGF: právě autoři SGF vypočítali jako první sady koeficientů  $c_n$ , které lze použít nejen pro získání filtrovaných dat, ale i pro filtraci dat s přímým získáním derivace funkce.

V [22] je uvedena obecná funkce pro výpočet koeficientů pro daný stupeň polynomu, přičemž filtrovací okno nemusí být symetrické:  $n_L$  a  $n_R$  mohou být navzájem různé, dále je možné zvolit stupeň derivace. V prostředí MATLAB existuje funkce *sgolay*, která umožňuje pouze výpočet koeficientů pro symetrické okno a pouze pro funkci vyhlazení dat (nultá derivace). Na stránkách Mathworks [7] je ke stažení funkce *sgsdf*, která umožňuje zadat i nesymetrické okno, stupeň polynomu, stupeň diference a také bod v rámci okna, pro který bude počítána funkční hodnota.

SGF jsme v minulosti využili v projektu „Termická analýza“ pro Alu-Cast s.r.o. Jednalo se o program pro sběr a analýzu dat: měření teploty odlitého vzorku tavené slitiny hliníku, respektive analýzu křivky chladnutí. Program měří teplotu a počítá první a druhou derivaci - tedy jinak řečeno

rychlost chladnutí a změnu rychlosti chladnutí, viz 5.1. Jelikož je měření pomocí termočládku zatížené šumem, byl pro filtraci dat díky svým vlastnostem vybrán právě SGF, který umožnil vcelku spolehlivou analýzu měřených dat. Program byl vytvořen v programovacím prostředí LabView, SGF je v prostředí již implementován mezi dalšími běžnými typy digitálních filtrů.



Obrázek 5.1: Program „Termická“ vytvořený pro AluCast Tupesy v roce 2012

## 5.2 Řízení a kaskádní regulátory

V této části popisujeme na jednoduchém příkladu řízení stejnosměrného „DC“ kartáčkového motoru využití kaskádní regulace. Úloha řízení DC kartáčkového motoru byla vybrána pro svoji jednoduchost a principiální podobnost s úlohou řízení couvání vozidla s připojeným přívěsem. Využití kaskádní regulace při řízení couvání vozidla s připojeným přívěsem bylo publikováno v článku [12].

### 5.2.1 Stejnosměrný kartáčkový motor

Jako základ pro demonstrační úlohy poslouží motor firmy Maxon motor: RE 25, 10W [6]. Obecně lze stejnosměrný kartáčkový motor (DC motor) popsat

pomocí dvou diferenciálních rovnic 5.2a a 5.2b:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (u - Ri - k_V \omega) \quad (5.2a)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{I} (k_T i - b\omega - M_{Load}) \quad (5.2b)$$

Kde  $i$  je proud procházející motorem,  $L$  je indukčnost vinutí,  $u$  napětí na motoru,  $R$  odpor vinutí,  $k_V$  je „napěťová“ konstanta,  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení hřídele motoru,  $I$  je moment setrvačnosti,  $k_T$  je „momentová“ konstanta,  $b$  je součinitel viskózního tření, a  $M_{Load}$  je zátěžný moment. Katalogové údaje vybraného motoru jsou uvedeny v tabulce 5.1. Model z praktických důvodů dále ještě rozšíříme o optický enkodér #225805 a planetovou převodovku #406769, katalogové údaje jsou shrnuty v tabulce 5.2.

Veličiny použité v modelu jsou zvýrazněny. Ne všechny katalogové údaje jsou uvedeny v základních jednotkách tak jak jsou posléze dosazovány v modelu. U některých se jedná pouze o řádové přepočty (indukčnost vinutí), ale například u rychlostní konstanty je do rovnice potřeba dosadit hodnotu převrácenou a přepočtenou na úhlovou rychlost v radiánech za sekundu. Zde stojí za úvahu, zda-li držet tradiční konvenci rovnice 5.2a s napěťovou konstantou  $k_V$  a jednotkou  $\left[\frac{V}{rad \cdot s^{-1}}\right]$ , běžnější katalogový údaj je totiž převrácená hodnota - otáčková konstanta  $k_\omega = \frac{1}{k_V}$ , navíc tedy ale udávaná jako  $[rpm/V]$ .

Pro simulaci výstupu enkodéru je použita diskretizační funkce: enkodér má 512 dílků a dva kanály. Dále předpokládáme využití funkce případného mikrokontroléru, která umožňuje počítat vzestupné i sestupné hrany obou kanálů, tzn. výsledné rozlišení polohy je  $2 \cdot 4 \cdot 512 = 4096$  dílků na otáčku, tedy jeden dílek je  $0.00153398 rad$ . Jedním z výstupů modelu je tedy čítač QEI<sup>1</sup>

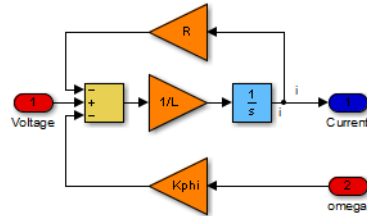
Pro implementaci matematického modelu je použito prostředí MATLAB Simulink a pro zápis parametrů m-skript prostředí MATLAB. Skript `DCMotor_parameters_R161115.m` i základní model `DCMotor_R161115.slx` je přílohou této práce. Model je na obrázku 5.4, jednotlivé subsystémy jsou pak na obrázcích 5.2 a 5.3. Dále je využíván jako volaný model ve všech dalších příkladech. Jako první příklad je odezva na skok<sup>2</sup>, průběhy zajímavých veličin jsou na grafech na obrázku 5.5.

<sup>1</sup>QEI = Quadrature Encoder Interface - označení používané pro mikroprocesorovou periférii kvadrurního enkodéru.

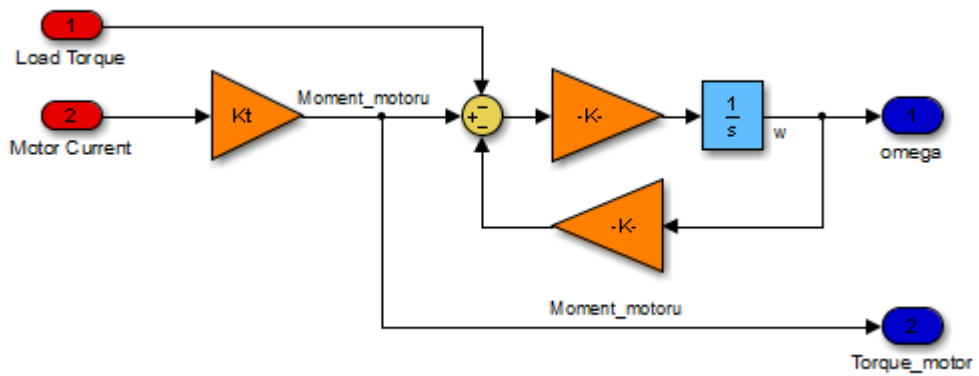
<sup>2</sup>Obvykle se udává odezva na jednotkový skok, v našem příkladu jsme provedli skok napětí z 0V na nominálních 4.5V

<b>Hodnoty při nominálním napětí:</b>	
<b>Nominální napětí</b>	4.5V
Otáčky naprázdno	5360rpm
Proud naprázdno	79.7mA
Nominální otáčky	4980rpm
Nominální zátěžný moment (maximální trvalé zatížení)	11.4mNm
Nominální proud (maximální trvalý proud)	1.5A
Záběrný moment	131mNm
Záběrný proud	16.5A
Maximální účinnost	89%
<b>Elektrické a mechanické vlastnosti:</b>	
<b>Odpor vinutí</b>	0.273Ω
<b>Indukčnost vinutí</b>	0.028mH
<b>Momentová konstanta</b>	7.99mNm/A
<b>Rychlostní konstanta</b>	1200rpm/V
Gradient rychlost / moment	40.9rpm/mNm
Mechanická časová konstanta	4.99ms
<b>Moment setrvačnosti rotoru</b>	11.7gcm <sup>2</sup>
<b>Teplná data:</b>	
Součinitel přestupu tepla plášť - okolí	14K/W
Součinitel přestupu tepla vinutí - plášť	3.1K/W
Teplná časová konstanta vinutí	13.6s
Teplná časová konstanta motoru	612s
Provozní teplota okolí	-20 ... + 85°C
Max. povolená teplota vinutí	+100°C
<b>Mechanická specifikace:</b>	
Typ ložisek	kuličková
Max. otáčky	5500rpm
Axiální vůle	0.05 – 0.15mm
Radiální vůle	0.025mm
Maximální axiální zátěž (dynamická)	3.2N
Maximální síla zatížení pro nalisování (statická)	64N
(statická, podepřená hřídel)	800N
Maximální radiální zátěž (5 mm od příruby)	16N
Hmotnost	130g
<b>Další údaje:</b>	
Počet pólových párů	1
Počet komutátorových segmentů	11

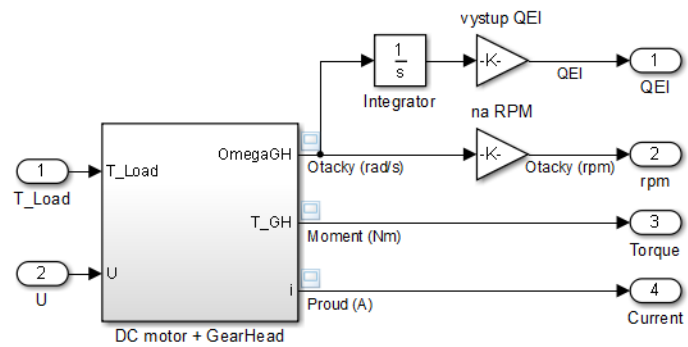
Tabulka 5.1: Katalogové údaje motoru RE25 #118740



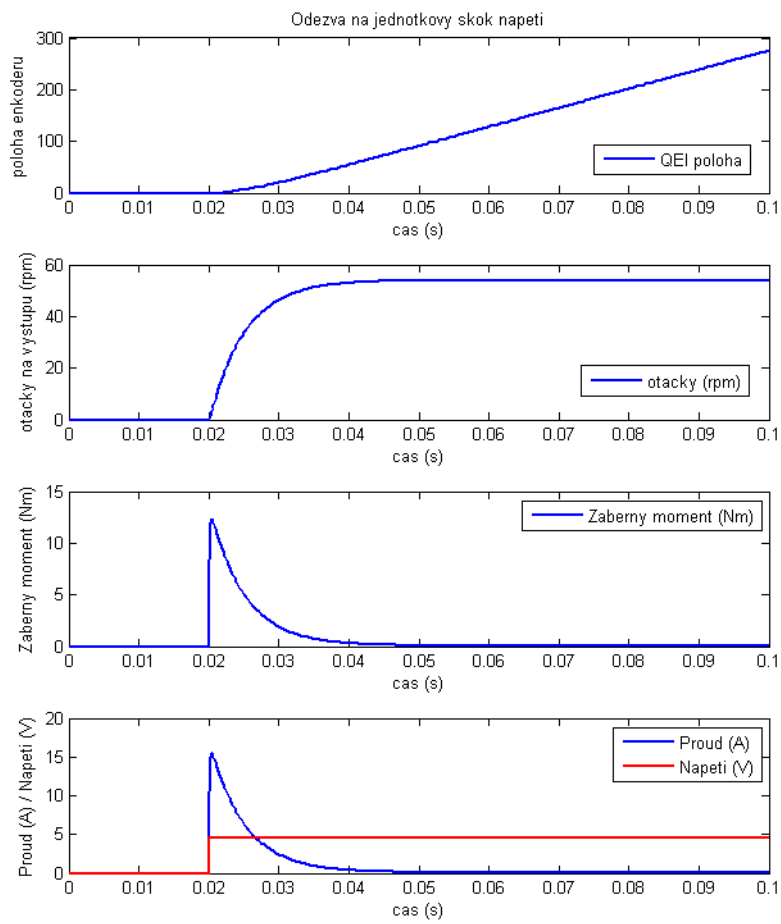
Obrázek 5.2: Model DC motoru - Elektrická část



Obrázek 5.3: Model DC motoru - Mechanická část



Obrázek 5.4: Model DC motoru - připravený model



Obrázek 5.5: DC motor - odezva na jednotkový skok

<b>Enkodér #225805:</b>	
<b>Rozlišení enkodéru</b>	512
<b>Počet kanálů</b>	2 + 1
<b>Planetová převodovka GP 26A #406769:</b>	
Převodový poměr	100 : 1
<b>Přesný převodový poměr</b>	204689 : 2057
Počet převodových stupňů	3
Maximální trvalý výstupní moment	4.5Nm
Maximální špičkový výstupní moment	6.2Nm
Maximální účinnost	70%
Průměrná radiální vůle	0.8°
<b>Moment setrvačnosti</b>	0.31gcm <sup>2</sup>
Maximální trvale přenášený výkon	20W
Maximální špičkově přenášený výkon	30W

Tabulka 5.2: Katalogové údaje enkodéru a převodovky



## 5.2.2 Řízení malého stejnosměrného kartáčkového motoru

Máme k dispozici malý stejnosměrný kartáčkový motor, který chceme řídit. V závislosti na typu úlohy můžeme motor řídit obvykle na jednu či více z veličin:

1. Poloha
2. Rychlost
3. Moment

Zpravidla se ale soustava kterou chceme řídit nesestává pouze z motoru s převodovkou, ale i z dalších mechanických komponent, zátěže atd. Jako příklad lze uvést například CNC obráběcí zařízení, u kterého budeme řídit posuvy jednotlivých os na polohu, rychlost otáček vřetene s případným omezením momentu respektive proudu.

Ať už řídíme jakoukoliv soustavu, je vždy vhodné si dopředu uvědomit vazby mezi jednotlivými veličinami. Máme-li k dispozici dobrý matematický model, můžeme se s jeho pomocí velmi dobře zorientovat v chování a vazbách soustavy. U stejnosměrného kartáčkového motoru tak lze například vyčíst přímou vazbu mezi napětím a otáčkami motoru skrze napěťovou (otáčkovou) konstantu, nebo mezi momentem a proudem skrze proudovou konstantu. Tyto závislosti plynou z rovnic 5.2a respektive 5.2b, uvažíme-li ustálené stavy, kdy se členy  $\frac{di}{dt} = 0$  respektive  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , dostáváme:

$$u = Ri + k_V\omega \quad (5.3a)$$

$$M_{Load} + b\omega = k_T i \quad (5.3b)$$

Těchto zjednodušených závislostí lze využít například pro „Feed-Forward“ regulaci, jak ukážeme dále.

Charakter zátěže může být rovněž podstatný pro model a je potřeba jej zohlednit. Například zátěžný moment může být na stavu motoru jak nezávislý, tak závislý: na proudu (momentu), či otáčkách (poloze).

- Postupné zvedání břemene bez možnosti zabrzdění motoru bude i při nulové rychlosti vyžadovat nenulový moment, respektive proud pro udržení polohy.
- Odebírání materiálu frézou bude mít proměnný průběh proudu v závislosti na charakteru materiálu a rychlosti frézování (objemu odebíraného materiálu za jednotku času).

V takových případech nestačí tedy k modelu připojit pouze nezávislou veličinu, nebo dokonce konstantu, reprezentující zátěžný moment. Jedná se o závislé veličiny a je potřeba podle toho model vhodně upravit. Pokud bychom totiž například připojili pouze konstantní zátěžný moment, fungoval by nám model ve chvíli, kdy by na vstupu napájecího napětí byla nula, v generátorickém režimu, což nemusí být vždy žádoucí chování modelu.

Další podstatná úvahou je, co je naší řídicí veličinou: U malých DC motorů to je zpravidla napětí ve formě buď přímé analogové hodnoty - například skrze výkonový operační zesilovač (budič), nebo napětí upravené pulzní šířkovou modulací na vhodné frekvenci<sup>3</sup>, skrze plný či poloviční H-můstek. Chování motoru pro nízké frekvence PWM je patrné z obrázku 5.6. Z výsledků simulací pro různé frekvence je patrné, že při nízkých frekvencích budou projevy patrné nejen v elektrické části - při měření proudu, ale i v mechanické části, kdy bude zvlnění patrné i na rychlosti otáčení motoru.

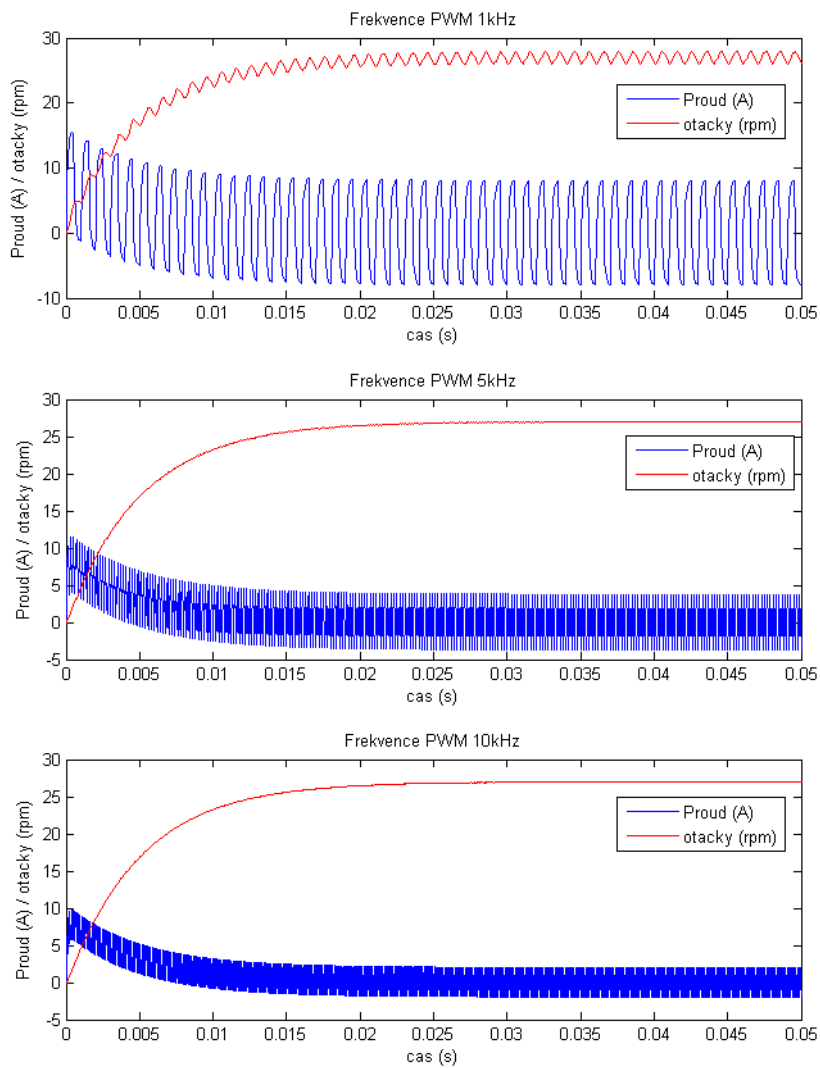
U malých pohonů (jednotky až první stovky Wattů) se obvykle využívá analogové řízení s posíleným posledním stupněm pomocí výkonného operačního zesilovače, nebo digitální řízení realizované pomocí H-můstku integrovaného jako diskretního elektronického obvodu, který často bývá vybavený speciálními funkcemi pro zajištění ochrany proti přetížení a zničení obvodu samotného. Zjednodušuje se tak uživatelské použití: není potřeba generovat řídicí signál pro čtyři transistory H-můstku, ale pouze (v minimalistické verzi) dva signály: jeden určující směr otáčení „Direction“, a druhý obvykle střihu a frekvenci „PWM“. Obvody obvykle mají ještě linku „Enable“ určující spolu s prvními dvěma linkami stav jednotlivých transistorů ve zvláštních případech.<sup>4</sup>

Ačkoliv lze realizovat řízení i regulaci na čistě analogové bázi, budeme se nadále zabývat řízením digitálním, které je pro tento účel názornější, avšak principiálně lze stále realizovat i jeho obvodovou analogovou variantu.

---

<sup>3</sup>Pulzní šířková modulace (PWM - Pulse Width Modulation) znamená, že na svorky motoru pouštíme plné napětí zdroje, který máme k dispozici, ale přitom jej modulujeme do pulzů o dané frekvenci a střídě. Frekvence by měla být dostatečně vysoká - ideálně alespoň o dva až tři řády vyšší než mechanická časová konstanta motoru, čímž se omezí vznik nežádoucích mechanických vibrací, pokud se podaří jít řádově i za elektrickou časovou konstantu motoru, omezí se i zvlnění proudu, kteréžto může být zdrojem elektromagnetického rušení. Střída *dc* - (duty cycle), hodnota nabývá 0 – 1, případně 0 – 100% pak udává výsledné efektivní napětí „vnímané“ motorem  $U_{Motor} = U_{Zdroje}dc$

<sup>4</sup>I při nulové střídě totiž lze rozlišit, jak budou transistory zapnuté či vypnuté. Závisí mj. na charakteru řízení motoru: unipolární/bipolární, atd.



Obrázek 5.6: DC motor - srovnání různých frekvencí PWM

### 5.2.3 Řízení otáček motoru

Pro jednoduchost budeme nyní uvažovat DC motor bez vnější proměnné či závislé zátěže. Asi nejjednodušší úlohou řízení DC motoru je řízení rychlosti otáčení. Jak bylo již zmíněno výše, v ustáleném stavu lze napěťovou rovnici motoru zjednodušit do tvaru 5.3a. Tedy na jedné straně rovnice máme napětí na motor  $u$ , což je pro náš regulátor *akční veličina*, na straně druhé pak členy  $Ri$  a  $k_V\omega$ , kde  $\omega$  je tedy *řídící a regulovanou veličinou*. Zde je tedy patrný přímý vztah mezi *akční a regulovanou veličinou*.

- P regulátor: reaguje na rozdíl *řídící veličiny a regulované veličiny*. Pokud bude  $e = w - x \neq 0$ , bude na výstupu regulátoru  $y = eP \neq 0$ <sup>5</sup> Za předpokladu, že by došlo k dosažení požadované rychlosti, bude  $e = 0$  a tudíž  $y = eP = 0$  - napětí z regulátoru spadne na nulu. V důsledku tedy dojde k ustálení (tedy, pokud se soustava nerozkmitá) ve stavu, kdy na výstupu regulátoru bude napětí na motoru, které odpovídá určitým aktuálním otáčkám rozdílným od požadované rychlosti, přičemž právě tento rozdíl (tvořící regulační odchylku) bude odpovídat skrze zesílení P aktuálním otáčkám. Odezvy regulátoru s různými hodnotami zesílení P jsou na obrázku 5.7.
- I regulátor: integruje *regulační odchylku e* zesílenou ziskem I. Oproti P složce bude reagovat pomaleji, ale odstraňuje ustálenou odchylku. Odezvy regulátoru s různými hodnotami zesílení I jsou na obrázku 5.7.
- P-I regulátor: kombinace P a I složky je dobře patrná na spodním grafu obrázku 5.8. P složka reaguje okamžitě a při změně *řídící veličiny* má hlavní slovo, postupně se však stáhne až do nuly, jelikož je absorbována I složkou. Z grafu příspěvků jednotlivých složek je dále patrné, že právě I složka má při regulaci rychlosti, kdy *akční veličinou* přímou vazbu: stav integrátoru zůstává konstantní, je-li *regulační odchylka e = 0*. Obecně lze říci, že I složka regulátoru se téměř nezbytně uplatní při řízení soustav, kde výstupem je energie. (Kinetická energie u řízení otáček motoru, tepelné ztráty u vytápění budovy.)
- „Feed-Forward (FFWD)“: neboli „dopředná vazba“ není regulátor v pravém slova smyslu, ale v regulaci se využívá. Obvykle se kombinuje například s PID regulátorem. Princip FFWD je v tom, že máme o řízené soustavě matematicky popsateľnou znalost chování, kterou dokážeme využít pro řízení. V případě řízení otáček DC motoru je to znalost rovnice 5.3a.

---

<sup>5</sup>Tedy za předpokladu, že  $P \neq 0$ .

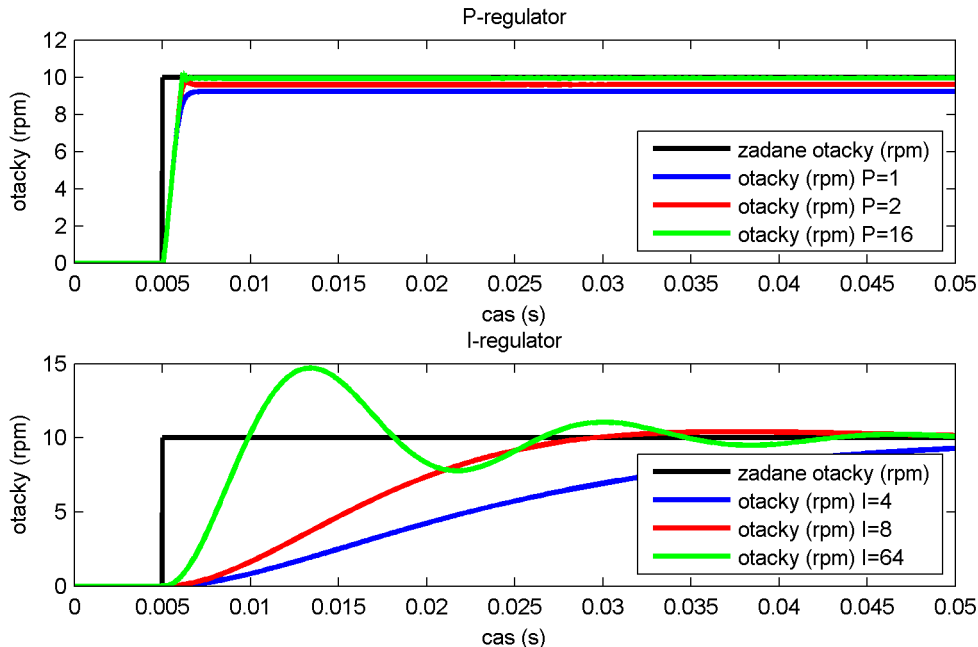
Rovnice obsahuje proud, který odpovídá zátěžnému momentu. Pro ilustraci budeme nyní ale řešit případ, kdy měření proudu nemáme k dispozici a ani nemáme informaci o zátěžném momentu. Rovnice 5.3a se nám tedy zjednoduší do tvaru  $u = k_V \omega$ . Pro FFWD větev využijeme této rovnice:  $k_V$  je katalogový údaj,  $\omega$  jsou naše požadované otáčky a  $u$  je tedy příspěvek FFWD části regulátoru. 5.9

Uvedené příklady regulátorů nebyli laděny pro neoptimálnější reakci, nicméně ze srovnání je patrné, že nejrychlejší odezvu bez překmitu má P-regulátor (P regulátor může překmitnout, případně se i rozkmitat). V případě řízení otáček DC motoru bude mít vždy ustálenou odchylku.

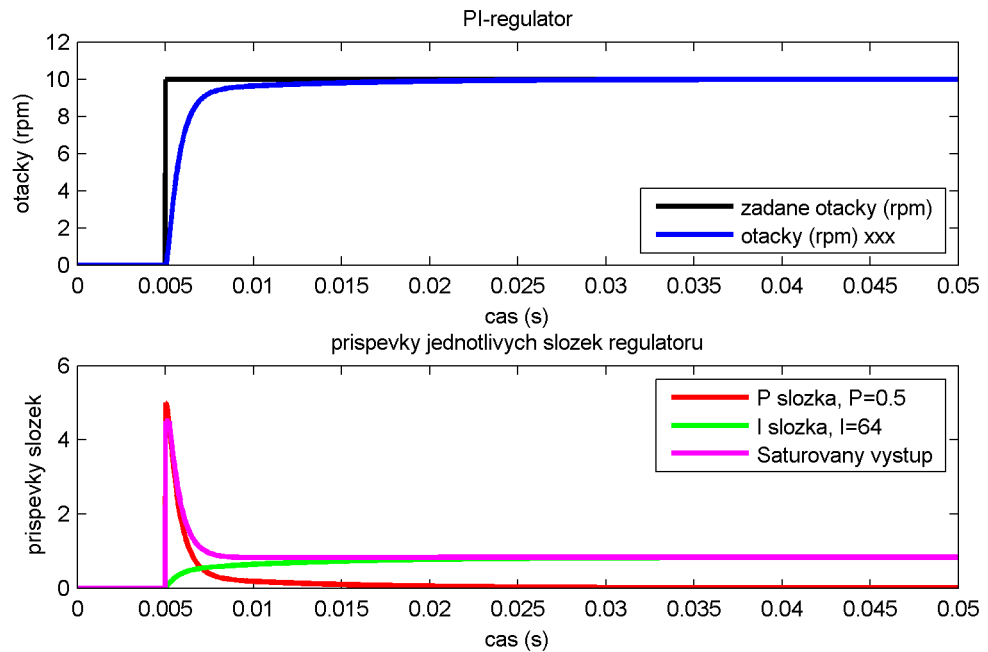
Samotný I-regulátor lze naladit tak, aby nepřekmitl, ale bude výrazně pomalejší, což může být někdy i žádoucí, například pro zajištění plynulého rozjezdu, případně plynulé změny rychlosti.

PI regulátor kombinuje výhody obou složek: rychlost reakce P složky a odstranění ustálené odchylky I složky.

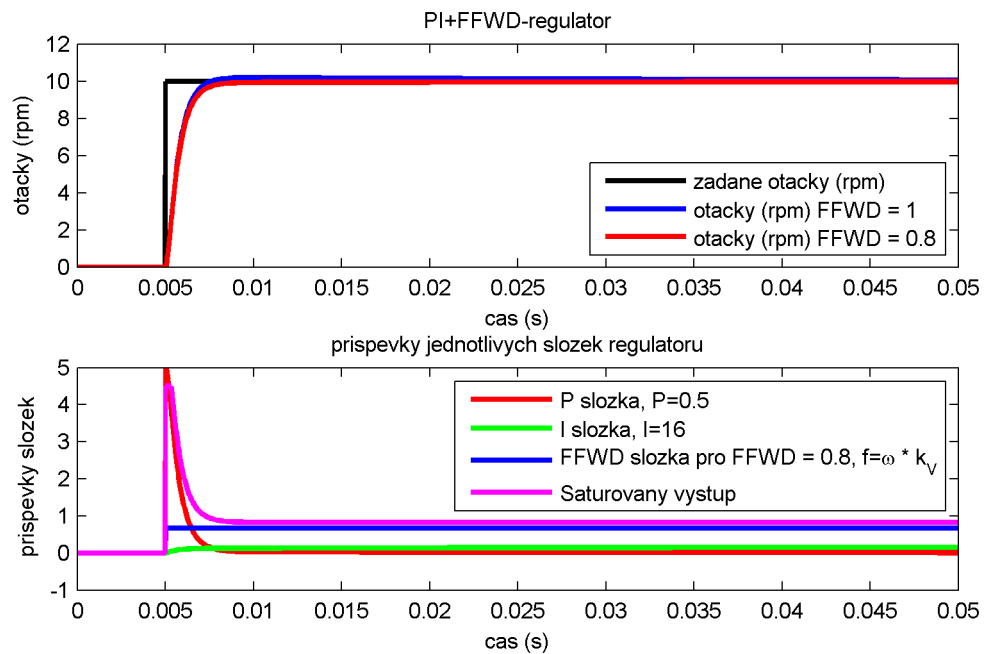
Přidáním FFWD větve můžeme regulátor ještě urychlit, pokud je ale FFWD složka příliš přesná, dojde vlivem I složky k překmitu. Pokud by byl nežádoucí, může být vhodné snížit vliv FFWD snížením zisku FFWD větve.



Obrázek 5.7: P Regulátor otáček, I Regulátor otáček



Obrázek 5.8: PI Regulator otáček, příspěvky jednotlivých složek



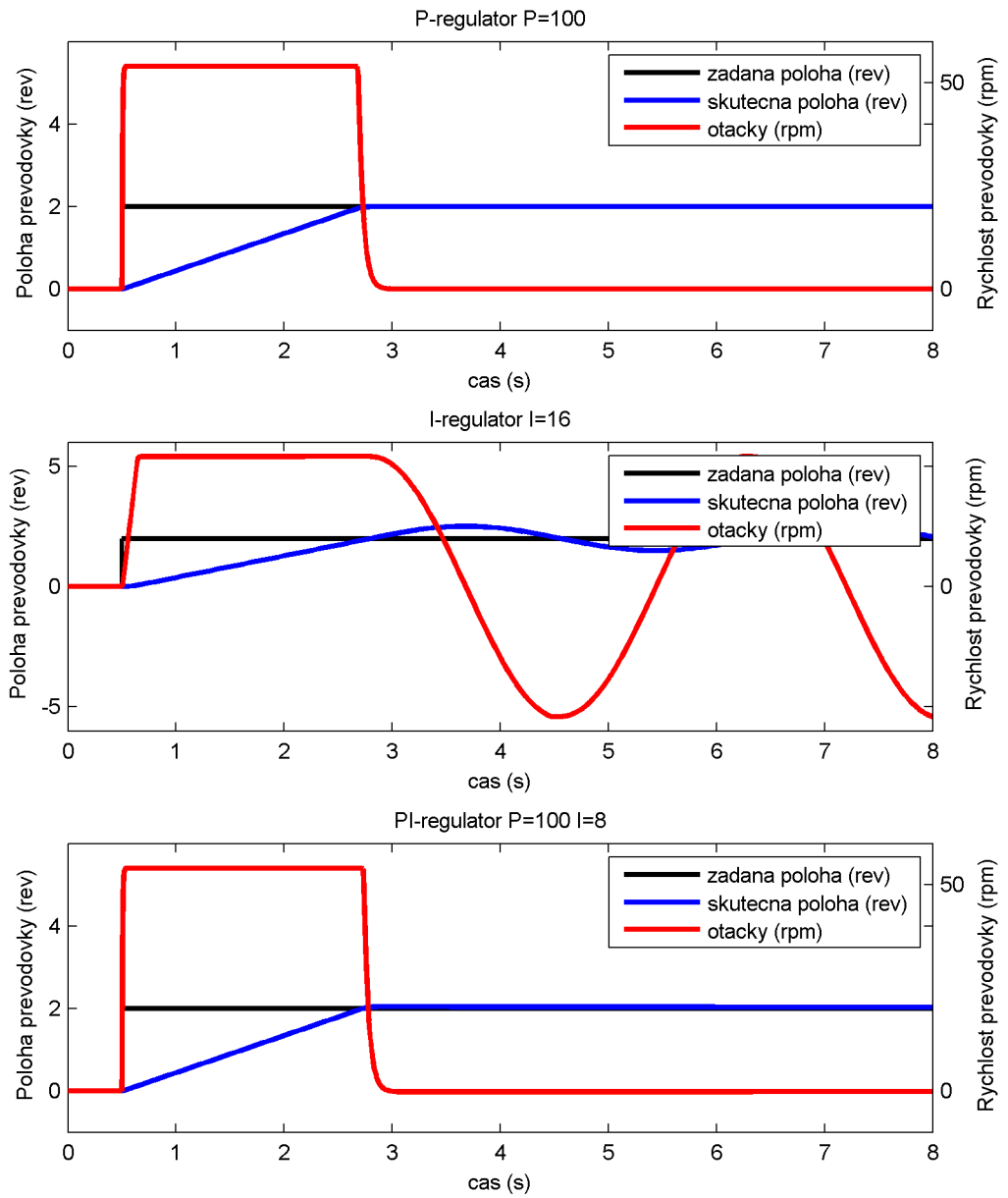
Obrázek 5.9: PI+FFWD Regulator otáček, příspěvky jednotlivých složek

## 5.2.4 Řízení polohy motoru

Stále uvažujeme stejný DC motor bez vnější zátěže, nyní budeme řídit polohu - sledovat odezvu na skok. Opět začneme jednotlivými složkami P a I.

- P regulátor: Chování regulátoru polohy motoru (výstupu převodovky) obsahujícího pouze P složku, jehož *akční veličinou* je napětí, je vidět na prvním grafu obrázku 5.10. Pakliže je změna *řídící veličiny* dostatečná a zesílení P-složky velké, dojde k saturaci *akční veličiny* a motor se okamžitě roztočí plnou rychlostí. V závislosti na velikosti zesílení P-složky dojde před dosažením žádané polohy k poklesu *akční veličiny* (napětí) a motor se postupně zastaví. V závislosti na pasivních odporech, tlumení, setrvačnosti soustavy a zisku regulátoru P může dojít k zastavení před, výjimečně na, nebo za požadovanou polohou, a vzniklá regulační odchylka už nemusí vést k rozpohybování motoru.
- I regulátor: Chování je patrné z druhého grafu na obrázku 5.10, v našem případě bude soustava téměř nevyhnutelně kmitat, a to především díky nízkému tlumení soustavy. Hlavní problém je v tom, že se *regulační odchylka* neustále integruje ve stavu I složky i přesto, že už se poloha pohonu začíná blížit k požadované hodnotě.
- PI regulátor: Průběhy jsou na třetím grafu obrázku 5.10, kombinací obou složek sice odstraníme regulační odchylku, ale téměř s jistotou dojde k překmitu, který může být nežádoucí.

Určitá nevhodnost I složky regulátoru je v daném případě dána tím, že po dosažení požadované polohy již není potřeba do soustavy dodávat energii, přičemž I složka bude mít nenulový stav integrátoru. Možným řešením je vynulování stavu integrátoru (reset). Situace by byla jiná například při řízení polohy břemene zvedaného pomocí navijáku (bez brzdy). Požadavek na udržení výšky (polohy) zavěšeného břemene by v takovém případě znamenal řízení na konstantní sílu v laně, respektive konstantní moment na navijáku. Což pro DC motor v podstatě znamená dle rovnice 5.2a řízení na konstantní proud  $i$ .



Obrázek 5.10: P, I, PI regulátor polohy



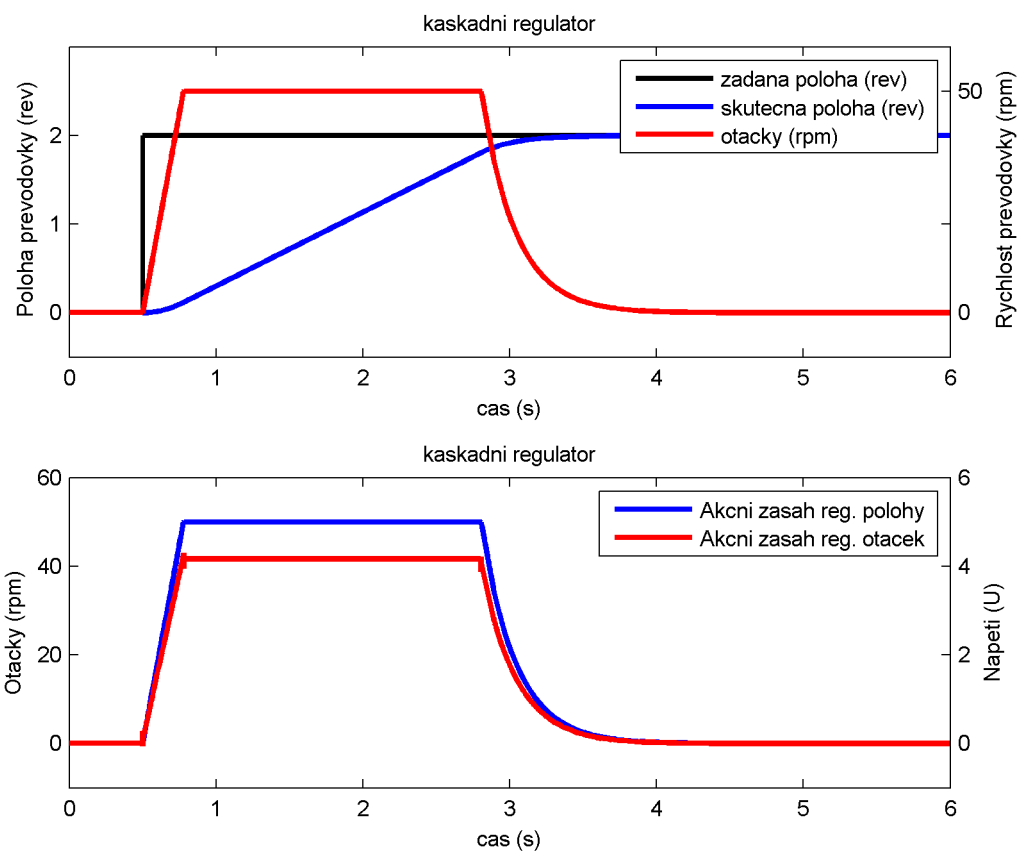
## 5.2.5 Kaskádní regulace

Jedním z možných řešení potíží při návrhu regulátoru polohy je využití kaskádní regulace: tedy zřetězení několika regulátorů, kdy každý má na starost určitou veličinu / stav řízené soustavy. Obvykle se kaskáda sestavuje podle fyzikálních principů: V případě DC motoru řízeného napětově (pomocí H-můstku, nebo analogově výkonovým operačním zesilovačem) bude přímým regulátorem řízení otáček (otáčky jsou přímo navázány na napětí) a o úroveň výše pak řízení polohy. Tedy pro regulátor otáček budou „řídící veličinou“ požadované otáčky a „akční veličinou“ napětí na motor. Pro regulátor polohy, který bude nadřazený, bude tedy „řídící veličinou“ požadovaná poloha a „akční veličinou“ budou otáčky. Jedná se o poměrně intuitivní strukturu, která navíc umožňuje snadnou implementaci dodatečných vlastností regulátoru, které mohou být vyžadovány: Omezení maximální rychlosti pomocí saturace výstupu regulátoru polohy; rychlostní rampa, opět pomocí omezení na výstupu regulátoru polohy.

Chování regulátoru je patrné z grafů na obrázku 5.11. Při řízení je využito možnosti omezení maximálních otáček a rovněž omezení maximálního zrychlení.

Určitou nevýhodou kaskádní regulace je navyšování počtu laděných parametrů, na druhou stranu však přináší daleko kvalitnější regulaci a intuitivnější ladění. Díky kaskádní regulaci můžeme například u úlohy řízení polohy DC motoru využít u vnitřní otáčkové smyčky FFWD větev. Další oblastí, kde se výhod kaskádní regulace využívá jsou větší pohony, případně pohony, kde je zapotřebí řídit moment, respektive proud. U velkých pohonů to může být u proudu například kvůli výkonovým prvkům, případně i z pohledu mechanického omezení záběrného momentu. Vnitřní smyčka pak řídí proud, což vzhledem k elektrické časové konstantě vyžaduje i vysokou rychlost řídicí smyčky. Hlavním benefitem je zde především snadná implementace proudového / momentového omezení.

S každou smyčkou rovněž přibývá řízená veličina, kterou je potřeba zjišťovat. V některých případech to může znamenat další snímač navíc, jindy je údaj k dispozici již prostřednictvím snímače využitého pro jinou smyčku. Na příkladu DC kartáčkového motoru lze při využití inkrementálního enkodéru získávat přímo údaj o poloze i rychlosti: Polohu získáváme načítáním počtu pulzů, rychlost otáčení pak z frekvence pulzů. V některých případech lze využít i výpočtu na základě matematického modelu: měříme-li proud procházející motorem a známe-li parametry motoru, můžeme s pomocí matematického modelu vypočítat otáčky a zátěžný moment.



Obrázek 5.11: Kaskádní regulátor polohy

# Kapitola 6

## Model kinematiky vozidla s připojeným přívěsem

Model kinematiky osobního automobilu s jednou řízenou nápravou je vcelku jednoduchý a popsán například v [23]. Pro účely této práce je však potřeba jej rozšířit o model kinematiky přívěsného vozíku. Při couvání s připojeným přívěsem je potřeba dbát zejména na udržení říditelnosti směru vozíku, které je omezeno limitním úhlem odklonu přívěsu, po jehož překročení by při pokračování v couvání již nevyhnutelně došlo ke kolizi vozidla s přívěsem.

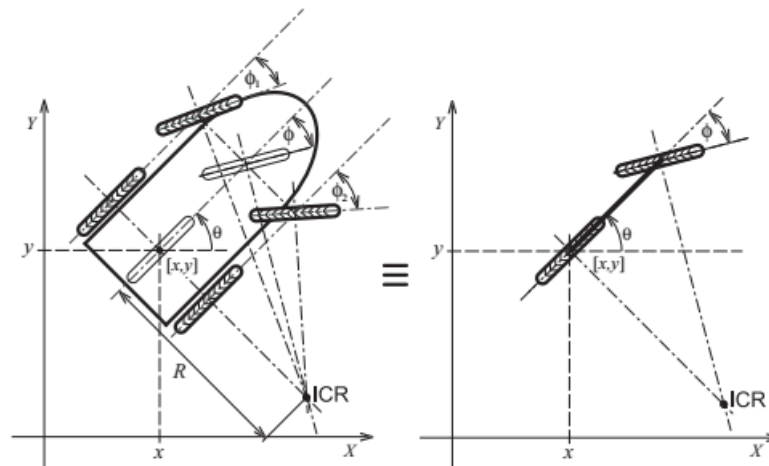
### 6.1 Sestavení modelu kinematiky

Pro vytvoření modelu kinematiky automobilu s připojeným přívěsem byl zvolen model bicyklu s přívěsem, rovněž jednostopým. Jedná se o běžné zjednodušení při modelování kinematiky automobilu.

Vytvořený model, publikován v [12], obsahuje několik zjednodušení - předpokladů:

- Kola se nedeformují, jejich svislé osy jsou kolmé k rovině povrchu po kterém se pohybují.
- Kola se pohybují bez prokluzu a pouze ve směru jejich natočení (v žádném směru nedochází ke smyku).
- Přední náprava je směrově řízená, zadní náprava je hnaná a pevná (neumožňuje natáčení kol).

Při modelování kinematiky automobilu s Ackermanovým řízením s přívěsem pomocí zjednodušení na bicykl jsou vždy obě kola jedné nápravy nahrazena



Obrázek 6.1: Model kinematiky automobilu s Ackermanovým řízením, převzato z [9]

jedním kolem uprostřed. Úhel natočení řízené nápravy - předního kola je takový, aby odpovídal okamžitý střed otáčení automobilu.

Stav soustavy vozidla s přívěsem je pak dán:

- Polohou a natočením zadní nápravy (zadního kola bicyklu).
- Úhlem natočení přední nápravy (řídítek bicyklu).
- Úhlem odklonu přívěsu.

Model kinematiky jízdního kola je popsán rovnicemi:

$$\dot{x}_V = v_V \cos \delta_V \quad (6.1a)$$

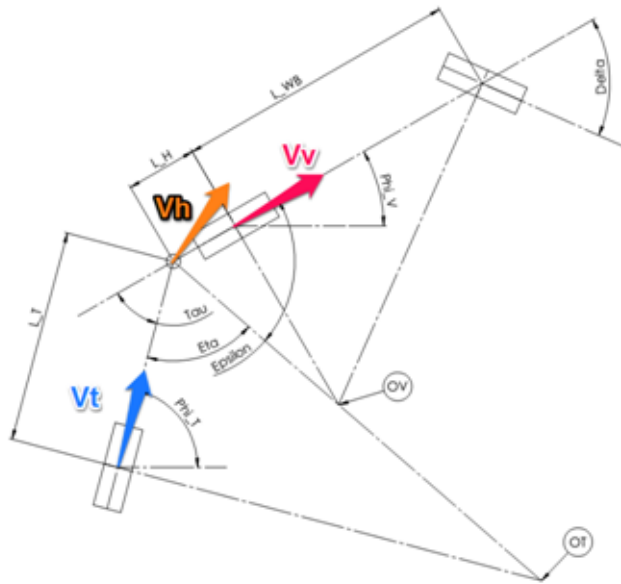
$$\dot{y}_V = v_V \sin \delta_V \quad (6.1b)$$

$$\dot{\varphi}_V = v_V \frac{1}{L_{WB}} \tan \delta_V \quad (6.1c)$$

<sup>1</sup>Úhel mezi ojí přívěsu a podélnou osou vozidla.

<b>Vstupní veličiny modelu kinematiky:</b>	
rychlost zadního kola	$v_V$
úhel natočení předního kola	$\delta_V$
<b>Parametry modelu kinematiky:</b>	
rozvor náprav automobilu	$L_{WB}$
maximální úhel natočení předního kola	$\delta_{max}$
vzdálenost tažného zařízení od zadního kola	$L_H$
délka oje přívěsu (závěs - náprava)	$L_T$
<b>Výstupy z modelu kinematiky:</b>	
rychlost respektive poloha vozidla	$\dot{x}_V, \dot{y}_V, x_V, y_V$
úhlová rychlost respektive poloha vozidla	$\dot{\varphi}_V, \varphi_V$
úhel odklonu přívěsu <sup>1</sup>	$\tau$
rychlost respektive poloha přívěsu	$\dot{x}_T, \dot{y}_T, x_T, y_T$
úhlová rychlost respektive poloha přívěsu	$\dot{\varphi}_T, \varphi_T$
<b>Pomocné veličiny a mezi-výpočty:</b>	
vypočtená rychlost tažného zařízení	$v_H$
vypočtená rychlost přívěsu	$v_T$
úhel mezi podélnou osou vozidla a spojnicí tažného zařízení s okamžitým středem otáčení vozidla a přívěsu	$\varepsilon$
úhel mezi podélnou ojí přívěsu a spojnicí tažného zařízení s okamžitým středem otáčení přívěsu a vozidla	$\eta$

Tabulka 6.1: Model kinematiky vozidla a přívěsu



Obrázek 6.2: Zjednodušený model kinematiky automobilu s přívěsem

Pro připojený přívěsný vozík pak platí:

$$\dot{x}_T = v_T \cos \delta_T \quad (6.2a)$$

$$\dot{y}_T = v_T \sin \delta_T \quad (6.2b)$$

$$\tau = \varphi_T - \varphi_V \quad (6.2c)$$

$$\eta = \pi - (\tau + \varepsilon) \quad (6.2d)$$

$$v_T = v_H \sin \eta \quad (6.2e)$$

$$\dot{\varphi}_T = -v_H \frac{\cos \eta}{L_T} \quad (6.2f)$$

Kde pro  $\delta_V \neq 0$ :

$$v_H = \frac{v_V \sqrt{\frac{L_{WB}^2}{\tan^2 \delta_V + L_H^2}}}{\frac{L_{WB}}{\tan \delta_V}} \quad (6.3a)$$

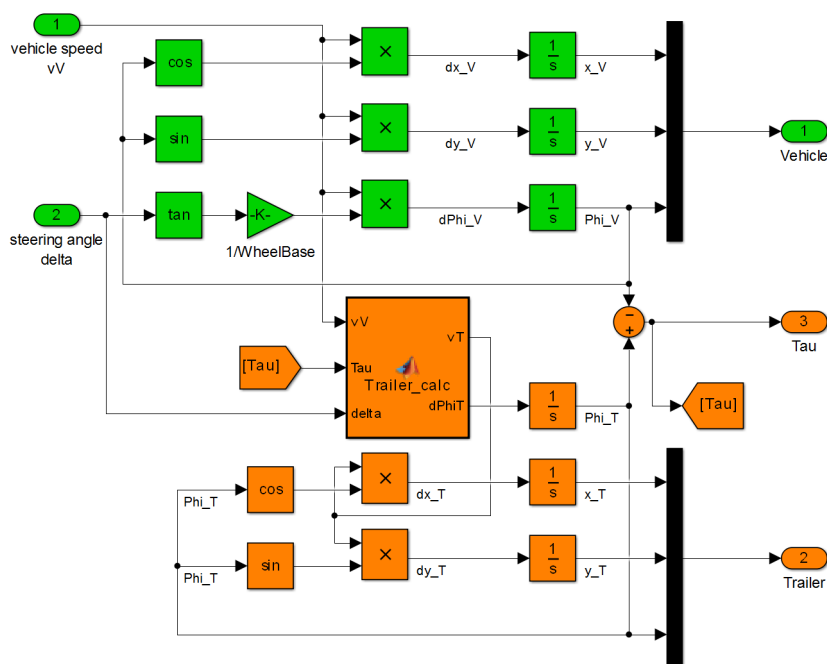
$$\varepsilon = \tan^{-1} \left( \frac{L_{WB}}{L_H \tan \delta_V} \right) \quad (6.3b)$$

A pro  $\delta_V = 0$ :

$$v_H = v_V \quad (6.4a)$$

$$\varepsilon = \pi/2 \quad (6.4b)$$

Popsaný model byl implementován v prostředí MATLAB - Simulink jako samostatný simulační model. Jeho struktura je patrná z obrázku 6.3. Přičemž parametry modelu jsou zadány formou proměnných načítaných z „workspace“. Veškeré modely popsané dále v této práci jsou koncipovány tak, že využívají stejný model kinematiky vozidla jako subsystém - externí model, uložený v souboru MODEL\_CarTrailer\_kinematics.slx. Vstupní parametry modelu jsou pak vždy rovněž nahrávány z jednotného m-skriptu SIMUL\_CarTrailer\_PARAMETERS.m.



Obrázek 6.3: Implementace modelu kinematiky v prostředí MATLAB Simulink

## 6.2 Jack-knifing

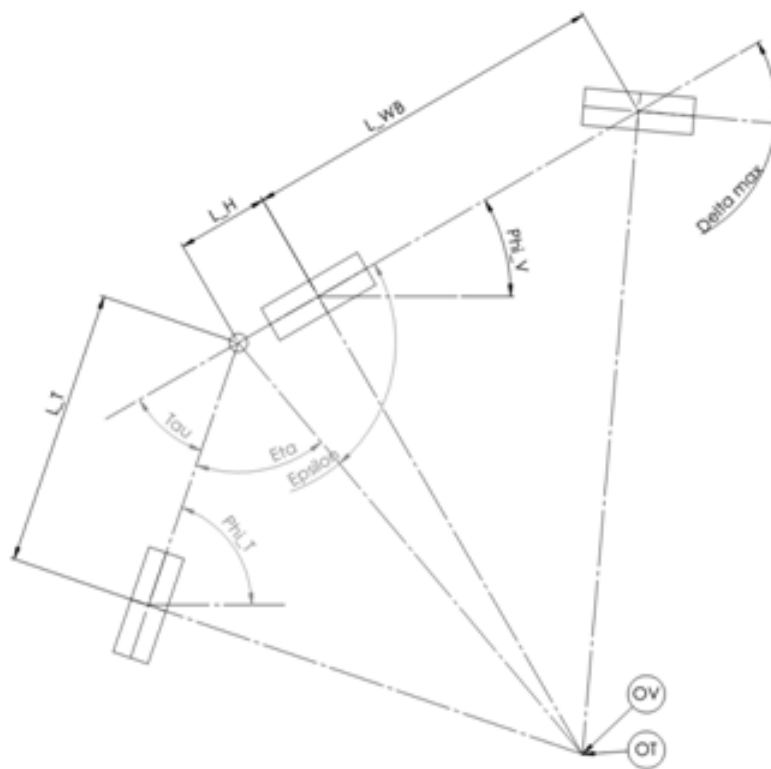
Při couvání vozidla s připojeným přívěsem hrozí nebezpečí, takzvaný „jack-knifing“, jde o stav, při kterém již není možné přívěs pouhým couváním srovnat a v případě že vozidlo bude pokračovat dále v couvání, může dojít ke kolizi vozidla a přívěsu. Tento úhel lze stanovit výpočtem z parametrů modelu. Je definován jako úhel, při kterém se „potká“ okamžitý střed otáčení přívěsu se s okamžitým středem otáčení vozidla při maximálním rejdu  $\delta_{Vmax}$ . Z pohledu kinematiky překročení limitního úhlu znamená, že se bod OT

- okamžitý střed otáčení přívěsu dostane blíže k tažnému zařízení než je možné dostat bod OV - okamžitý střed otáčení vozidla. Z hlediska couvacího manévru to znamená, že s vozidlem bude potřeba popojet dopředu a přívěs „srovnat“ alespoň tak, aby se okamžitý střed otáčení přívěsu OT dostal dál.

$$\tau_{lim} = \pi - \varepsilon_{lim} - \eta_{lim} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_{lim} = \tan^{-1} \left( \frac{L_{WB}}{L_H \tan \delta_{Vmax}} \right) \quad (6.6)$$

$$\eta_{lim} = \cos^{-1} \left( \frac{L_T \cos \varepsilon_{lim}}{L_H} \right) \quad (6.7)$$



Obrázek 6.4: „Jack-Knifing“: Stanovení limitního úhlu

Jack-knifing obecně hrozí i při jízdě vpřed, týká se ale už dynamických dějů: pokud automobil prudce zabrzdí, přívěs se může dostat do smyku a automobil „předjet“, a následně i narazit do automobilu z boku, popřípadě dostane i automobil do smyku. V této práci se však tímto případem nezabýváme s ohledem na řešený problém: primárním pohybem je couvání a dále předpokládáme nízké rychlosti a pohyby bez smyku, řešíme problém tedy pouze z pohledu kinematiky.



# Kapitola 7

## Model překážky - přívěsu z pohledu snímačů

Abychom mohli použít dat získaných prostřednictvím ultrazvukových snímačů ke stanovení úhlu odklonu přívěsu, je potřeba získat představu o tom, jak budou vypadat odezvy snímačů. Přívěs se totiž v tomto pohledu chápe jako překážka, ale na rozdíl od parkování samotného vozidla potřebujeme získávat jiné informace, především tedy potřebujeme určit úhel odklonu přívěsu. V této kapitole tedy popíšeme samotné ultrazvukové parkovací senzory používané pro systémy parkovacího asistentu v osobních automobilech. Dále pak model přívěsu jako překážky vnímané právě ultrazvukovými senzory, včetně jeho implementace v prostředí MATLAB a jeho zapojení do modelu kinematiky vozidla s přívěsem popsaném v [6.1](#).

### 7.1 Ultrazvukové parkovací senzory

Asi nejrozšířenějším typem senzoru pro systém parkovacího asistentu jsou ultrazvukové senzory. Automobilka Škoda Auto a.s. a i další značky koncernu VW využívají ultrazvukové senzory a řídicí jednotky parkovacích asistentů dodávané firmou Valeo. Ultrazvukové snímače, se kterými jsme se setkali při řešení zakázek zaměřených právě na testování parkovacích asistentů pro Škoda Auto a.s. jsou vybaveny vnitřní elektronikou, která zajišťuje vybuzení senzoru při vysílání, předzpracování přijímaného odrazu a komunikaci s řídicí jednotkou.

Použité ultrazvukové senzory Valeo mají efektivní dosah přibližně dva metry a dále poměrně široký úhel záběru jak pro vysílání, tak pro příjem. Z experimentů odhadujeme, že se jedná o úhel až  $120^\circ$ . To má význam pro spolupráci sensorů mezi sebou, kdy obvykle jeden ze sensorů vysílá pulz,

následně pak i spolu s dalšími senzory čeká na zachycení odraženého signálu. Díky tomu lze lépe určit polohu překážky a případně zachytit i překážku, která nemá plochu kolmou k ose vysílače, tedy nemusí dojít k odražení signálu zpět do senzoru, který signál vyslal, byť překážka může být blízko.



Obrázek 7.1: Ultrazvukový snímač Valeo

Zapojení senzorů je třívodičové, kdy dva vodiče slouží pro přivedení napájecího napětí (GND a +12V), třetí vodič slouží pro obousměrnou komunikaci. Senzor přijímá několik druhů zpráv, které jsme pracovníčně označili jako:

- Inicializační sekvence - provádí nastavení senzoru, bez odpovědi.
- Nastavení do aktivního módu - aktivuje senzor pro vysílání i příjem.
- Nastavení do pasivního módu - aktivuje senzor pro příjem.
- Reset - senzor reaguje odpovědí.

Jelikož, jak již bylo v úvodu práce zmíněno, vše podléhá utajení, nemáme informace a ani přístup k informacím o přesném popisu komunikace. Veškeré uvedené informace jsou získány experimenty se samotnou řídicí jednotkou, parkovacími senzory a posléze naší řídicí jednotkou / simulátorem senzorů, kterou jsme v rámci zakázky pro Škoda auto a.s. realizovali.

Inicializační sekvenci se nepodařilo dekodovat, máme však zato, že obsahuje 72 bitů (9 Bajtů) dat, pravděpodobně slouží k nastavení citlivosti, délky vysílaného pulzu, a doby čekání na příjmu. Inicializační sekvence bývá spuštěna pouze jednou, při aktivaci řídicí jednotky, případně opakovaně, pokud se některý ze senzorů nehlásí, nebo se nechová korektně.

Nastavení do aktivního módu probíhá jedním krátkým pulzem, senzor nepotvrzuje přijetí přímo, ale začne vysílat ultrazvukový pulz, který však zároveň funguje i jako odpověď řídicí jednotce tím, že se zobrazí na komunikační lince. Obvykle je aktivní vždy pouze jeden senzor na dané straně vozidla: v případě jednotek, které mají senzory na předním i zadním nárazníku

mohou být aktivní senzory dva, jeden vpředu, druhý vzadu. Je-li vozidlo vybaveno ještě dalšími senzory umístěnými na bocích vozidla<sup>1</sup>, pak mohou být v činnosti například oba boční senzory<sup>2</sup>. Aktivní sensor krom vysílání umožňuje samozřejmě i příjem odraženého signálu. Jakmile jej přijímá<sup>3</sup>, projeví se to na komunikační lince pulzem trvajícím po dobu přijímání signálu. Pokud nastane situace, že překážka je příliš blízko, může vysílaný signál splynout s odrazem - odražený signál se již potkává se senzorem v momentě kdy ještě nepřestal vysílat. Řídicí jednotka může takovýto signál rovněž vyhodnotit, nicméně už může být větší problém určit přesnou vzdálenost.

Pasivní mód je aktivován jedním delším pulzem, jehož druhá hrana je obvykle synchronní s druhou hranou pulzu aktivního módu. Sensor nepotvrzuje přijetí pulzu, pouze čeká na případný odraz od překážky.

Posledním typem zprávy jsme pracovně nazvali „reset“, spíše se ale jedná o jakýsi „ping“, kterým řídicí jednotka ověřuje přítomnost a především tedy funkčnost senzoru. Na tuto zprávu složenou ze dvou pulzů sensor reaguje odpovědí dvěma pulzy. Pokud nezareaguje, vysílá řídicí jednotka inicializační sekvenci a i nadále se pokouší komunikovat se senzorem. Pokud se během několika pokusů komunikace neobnoví, vyhlásí řídicí jednotka příslušnou poruchu, kterou lze pomocí diagnostického rozhraní vyčíst a určit, na kterém senzoru je porucha.

Jak plyne z názvu, ultrazvukový sensor používá ke zjištění vzdálenosti překážky ultrazvukový signál - vysílá pulz obvykle o délce přibližně 1.2ms. Vzdálenost překážky od senzoru lze pak určit z doby, po které dorazí odpověď, která odpovídá době šíření  $t$  [s] vyslaného signálu, rychlost zvuku ve vzduchu o teplotě  $T$  [°C] je:

$$c = 331.57 + 0.607T \text{ [m/s]} \quad (7.1)$$

Vzdálenost překážky pak určíme pomocí vztahu:

$$d = \frac{ct}{2} \quad (7.2)$$

Ke stanovení času šíření signálu  $t$  pro výpočet vzdálenosti překážky z odpovědi sensorů se při experimentech osvědčila metoda měření doby mezi středem vysílaného pulzu a přijímaného odraženého pulzu, který v závislosti na vzdálenosti, prostředí, odrazové ploše a dalších vlivech může být značně kratší - sensor má pravděpodobně nastavitelný práh citlivosti (threshold level), aby „pouštěl“ pouze dostatečně silné odpovědi. Pro názornost můžeme

<sup>1</sup>U parkovacích asistentů umožňujících aktivní asistenci při parkování do podélného stání.

<sup>2</sup>Senzory bývají umístěny v okolí podběhů kol.

<sup>3</sup>Přijímá signál o dostatečné intenzitě.

určit vzdálenost překážky, při které dojde ke splnutí vysílaného a přijímaného signálu. Vysílaný pulz má, jak jsme již uvedli přibližně  $1.2ms$ . Při teplotě  $T = 20^{\circ}C$  se zvuk šíří rychlostí:

$$c = 331.57 + 0.607 \cdot 20 = 343.71 [m/s = mm/ms] \quad (7.3)$$

Pokud zanedbáme útlum signálu a budeme odraz považovat za ideální, bude kritická vzdálenost překážky:

$$d_{krit} = \frac{ct}{2} = \frac{343.71 \cdot 1.2}{2} = 206mm \quad (7.4)$$

V takovém případě dojde k splnutí signálů na komunikační lince senzoru, avšak řídicí jednotka má stále šanci takovou situaci rozpoznat, jelikož naměří namísto pulzu o délce  $1.2ms$  pulz o až dvojnásobné délce, respektive kratší, bude-li překážka blíže.

Jak již bylo zmíněno, senzorů je na nárazníku umístěno vždy více a jsou schopny spolupracovat, respektive řídicí jednotka umí vyhodnocovat signály ze všech senzorů najednou. Obvyklý počet senzorů na nárazník je čtyři, některé vozy disponují další sadou senzorů i pro přední nárazník, pak je řídicí jednotka osmikanálová. Automobily, které jsou vybavené pokročilejší verzí parkovacího asistentu umožňující automatizované podélné parkování mají pak obvykle dvanáct senzorů: čtyři vzadu, čtyři vpředu a dva na každém boku. Boční senzory se starají o nalezení mezery v podélném stání a rovněž hlídají hranu obrubníku. U nejobyčejnějších verzí parkovacích asistentů funguje spolupráce senzorů za účelem zjištění vzdálenosti a přibližné polohy překážky: Sensory se střídají ve vysílání echa přibližně s periodou  $40ms$  tj.  $f = 25Hz$ . Starší verze (přibližně 2012-2014) řídicích jednotek Valeo vždy používaly najednou pouze tři senzory, čtvrtý byl nevyužitý a jednotka s ním v daný okamžik vůbec nekomunikovala. Novější řídicí jednotky (2015+) mají upravenou sekvenci: u čtyř-kanálových jednotek jsou stále využity jen tři senzory, na čtvrtém však probíhá ověřovací sekvence „reset“. U dvanácti-kanálových jednotek je pak sekvence složitější: pokud jsou aktivovány boční senzory, vysílá pravý i levý bok zároveň, přičemž poslouchají oba krajní senzory a na prostředních proběhne ověřovací sekvence „reset“. Pakliže vysílá některý z krajních zadních senzorů, poslouchá i boční na příslušné straně.

Během vývoje přípravku pro testování parkovacích asistentů v laboratořích integračního testování Škoda Auto a.s. byla vyvinuta elektronika, která nahrazuje ultrazvukové parkovací senzory: jejím úkolem je simulovat ultrazvukové senzory a překážku za, případně před vozidlem. Tato elektronika se připojuje k testované řídicí jednotce parkovacího asistentu namísto ultrazvukových senzorů, tak, že řídicí jednotka asistentu nepozná, že je připojena

k simulátoru. Nicméně z principu zapojení ji lze připojit i obráceně a po úpravě řídicího firmware je možné ji použít jako řídicí jednotku parkovacího asistentu - po připojení ultrazvukových senzorů. Této možnosti jsme využili při testování samotných senzorů, jelikož nám umožnila vyhodnocovat jejich odpovědi pomocí našich vlastních algoritmů.

## 7.2 Model přívěsu jako překážky

Pro řešení úlohy asistentu couvání s přívěsem lze přívěs z pohledu řídicí jednotky parkovacího asistentu považovat za překážku. Pro účely této práce přijmeme několik zjednodušení a předpokladů:

- Přívěsný vozík má dostatečně rovné (rovinné) přední čelo, od kterého se bude signál odrážet zpět k nárazníku, respektive bude po odražení přijímán ultrazvukovými senzory. Čelo je pro úhel odklonu přívěsu  $\tau = 0$  (vozidlo s přívěsem jsou vyrovnány za sebou) rovnoběžné se zadním nárazníkem vozu.
- Oj vozidla neblokuje signály a nevytváří falešné odrazy.
- Dále model zjednodušíme o korekci rychlosti zvuku podle teploty, budeme předpokládat teplotu  $20^\circ C$ . Měření teploty vně vozidla není problém, většina vozidel tento údaj sleduje například pro potřeby řízení motoru, řízení teploty kabiny atd. Korekce na teplotu není nevýznamná  $\left(0.607 \frac{m/s}{^\circ C}\right)$ , avšak pro účely této práce není podstatná. Není problém jí do výpočtů zahrnout, avšak pro zpřehlednění modelu ji vypustíme.
- Úlohu řešíme v rovině (2D), uvažujeme, že senzory jsou umístěny v jedné rovině a že čelo přívěsu má ve stejné rovině dostatečnou odrazovou plochu. Oj přívěsu neuvažujeme.
- Vozidlo se pohybuje pomalou rychlostí - měřená vzdálenost není významně ovlivněna relativním pohybem vozidla.

Jsou-li tyto předpoklady splněny, můžeme získávat data o úhlu natočení přívěsu a o vzdálenosti vozidla a čela přívěsu. Zaznamenáváme-li pak jízdní data, respektive dráhu vozidla a synchronně i průběh úhlu natočení přívěsu, můžeme pomocí dalších metod získat navíc odhad délky oje k nápravě přívěsu. Tyto údaje pak mohou sloužit při plánování a řízení manévrů během couvání.

<b>Vstupy modelu řídicí jednotky a přívěsu:</b>	
úhel odklonu přívěsu <sup>4</sup>	$\tau$
<b>Parametry modelu řídicí jednotky a senzorů:</b>	
počet senzorů	$S_n$
poloha senzorů na nárazníku vzhledem k souřadnému systému vozidla	$S_{n_{XY}}$
vlastnosti senzorů: dosah, vysílací úhel, přijímací úhel	$S_{n_{CHAR}}$
algoritmus sekvence senzorů: perioda mezi vysíláním, pořadí senzorů	$S_{ALG}$
<b>Parametry modelu přívěsu:</b>	
vzdálenost čela přívěsu	$L_{FD}$
šířka čela přívěsu	$L_{FW}$
<b>Výstupy modelu řídicí jednotky vyhodnocující zdrojová data:</b>	
časy odpovědí, respektive přepočtené na vzdálenosti naměřené jednotlivými senzory v relaci k aktuální konfiguraci (ID aktivního senzoru).	$DISTANCES [n \times n]$

Tabulka 7.1: Model řídicí jednotky a přívěsu

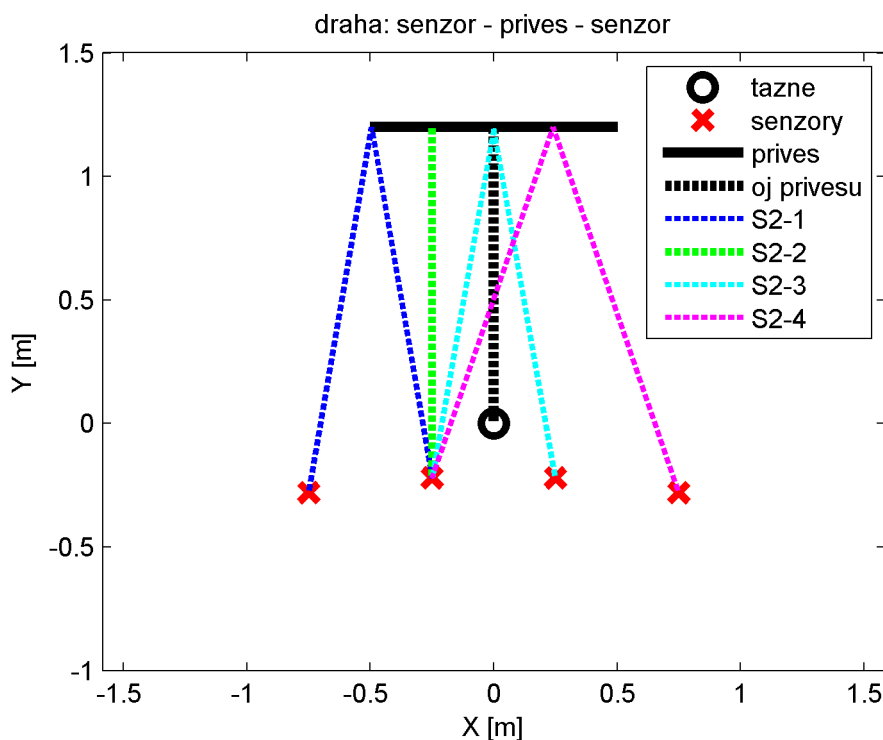
Dalším krokem pro získání počítačového modelu vozidla s připojeným přívěsem po namodelování kinematiky je právě model ultrazvukových senzorů a přívěsu jako překážky, který bude simulovat výstupy senzorů, respektive jejich vyhodnocení řídicí jednotkou parkovacího asistenta / asistenta couvání s přívěsem.

Model bere do úvahy šířku čela přívěsu a vyhodnocuje, došlo-li k odrazu signálu k danému snímači. Obrázky 7.2 a 7.3 zobrazují simulaci dráhy šíření<sup>5</sup> ultrazvukového signálu mezi aktivním senzorem (druhý zleva), čelem přívěsu a pasivními senzory. V prvním případě je přívěs v ose vozidla  $\tau = 0^\circ$ , čelo je tedy rovnoběžné s nárazníkem vozidla. V druhém případě je úhel  $\tau = 28^\circ$  a je patrné, že vyobrazená dráha mezi senzorem 2 a senzorem 1 nebude ve skutečnosti reálná, model ji proto vyhodnotí jako bez odrazu, příslušná proměnná bude obsahovat hodnotu  $Inf$  - nekonečno.

První model překážky vznikl v rámci projektu simulace senzorů parkovacího asistenta pro Škoda Auto a.s. První verze modelu řešila simulaci signálů od překážky rovnoběžné s nárazníkem, u které šlo definovat její vzdálenost od nárazníku a od podélné osy vozidla a její šířku. Druhá verze modelu již počítala i se směrem natočení senzorů a polohu na nárazníku

<sup>4</sup>Úhel mezi ojí přívěsu a podélnou osou vozidla.

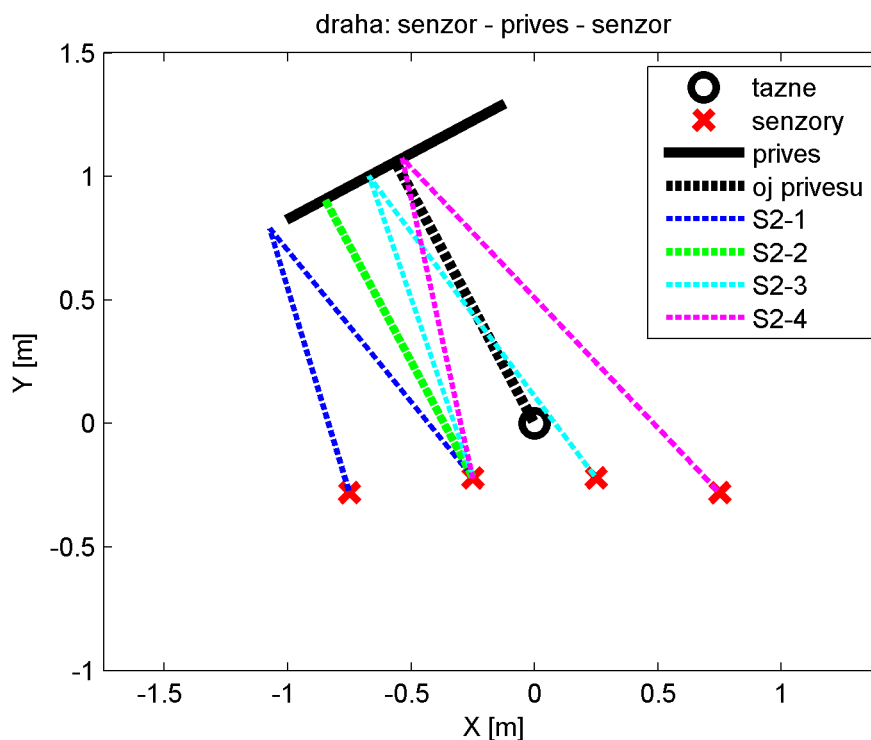
<sup>5</sup>Senzor vysílá vlnu ve větším záběru, ale nás zajímá pouze konkrétní část - „paprsek“, který se odrazí od překážky zpět k senzoru.



Obrázek 7.2: Model dráhy zvuku mezi aktivním senzorem, čelem přívěsu a pasivními senzory:  $\tau = 0$

v druhé ose - podélné ose vozidla. Úhel natočení sensorů má v modelu pouze vliv na to, kam až senzor „vidí“. Model kontroluje, pod jakým úhlem senzor signál vyslal / přijal a pokud není v povoleném rozsahu, je daná dráha ignorována. Vizualizace poloh sensorů včetně vymezení vysílacího úhlu v konfiguračním rozhraní ovládacího software projektu je na obrázku 7.4.

Pro simulaci přívěsu už je oproti předchozím modelům navíc potřeba řešit natočení překážky - čela přívěsu. Vycházíme stále ze zákona odrazu: *Úhel odrazu je roven úhlu dopadu, přičemž odražené vlnění zůstává v rovině dopadu. Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu (v rovině dané dopadajícím paprskům a kolmicí dopadu) a svírá s kolmicí dopadu úhel odrazu, který je stejně velký jako úhel dopadu.* Sestavili jsme model, který vypočítá všechny kombinace drah mezi senzory a přívěsem pro daný úhel. Model byl sepsán ve skriptovacím jazyce MATLABu a je přílohou `f_trailer_model.m` této práce. Krom vzdáleností počítá i úhly dopadu/odrazu od čela přívěsu, souřadnice dopadu/odrazu ultrazvukového paprsku a kontroluje, že daný paprsek se od čela skutečně odrazil (při výpočtu se čelo v prvním kroku uvažuje jako nekonečně dlouhá přímka, podrutina `HITS` kontroluje souřadnice zásahu).

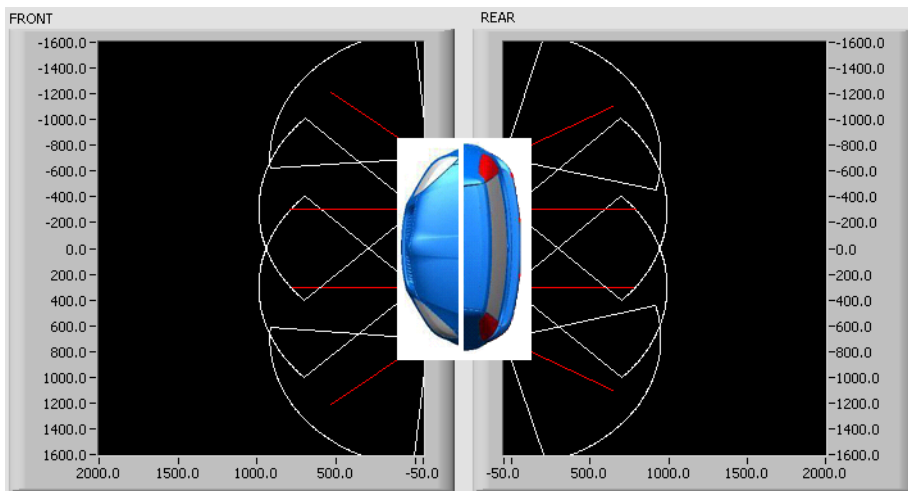


Obrázek 7.3: Model dráhy zvuku mezi aktivním senzorem, čelem přívěsu a pasivními senzory:  $\tau = 28^\circ$

Na obrázku 7.5 je zobrazen virtuální průsečík drah pro aktivní senzor S2. Senzory jsou číslovány odleva. Délka dráhy mezi čelem přívěsu a virtuálním průsečíkem odpovídá vždy délce dráhy mezi aktivním senzorem a čelem přívěsu. Tato závislost plyne z geometrických pravidel zákona odrazu. Stejný princip využíváme i v další části pro obrácenou úlohu, kdy na základě známých drah hledáme úhel odklonu přívěsu: v podstatě získáváme průsečík  $n$  kružnic ( $n$  je počet senzorů, respektive naměřených drah), který by právě měl odpovídat poloze virtuálního průsečíku a dále dopočteme odhad úhlu  $\hat{\tau}$ .

Další možností pro stanovení délky dráhy ultrazvukového signálu mezi aktivním senzorem, překážkou - čelem přívěsu a pasivním senzorem by mohla být numerická metoda, spočívající v „procházení“ linie čela přívěsu a hledající bod, ze kterého uvidí příslušný aktivní i pasivní senzor pod stejným úhlem od kolmice v daném bodě. V případě že předpokládáme, že čelo je rovinné - z našeho pohledu tedy přímka, respektive úsečka, šla by snadno použít některá z jednodušších iterativních metod. Pro náš případ je jednodušší a rychlejší využít geometrických zákonitostí. Numerické metody by





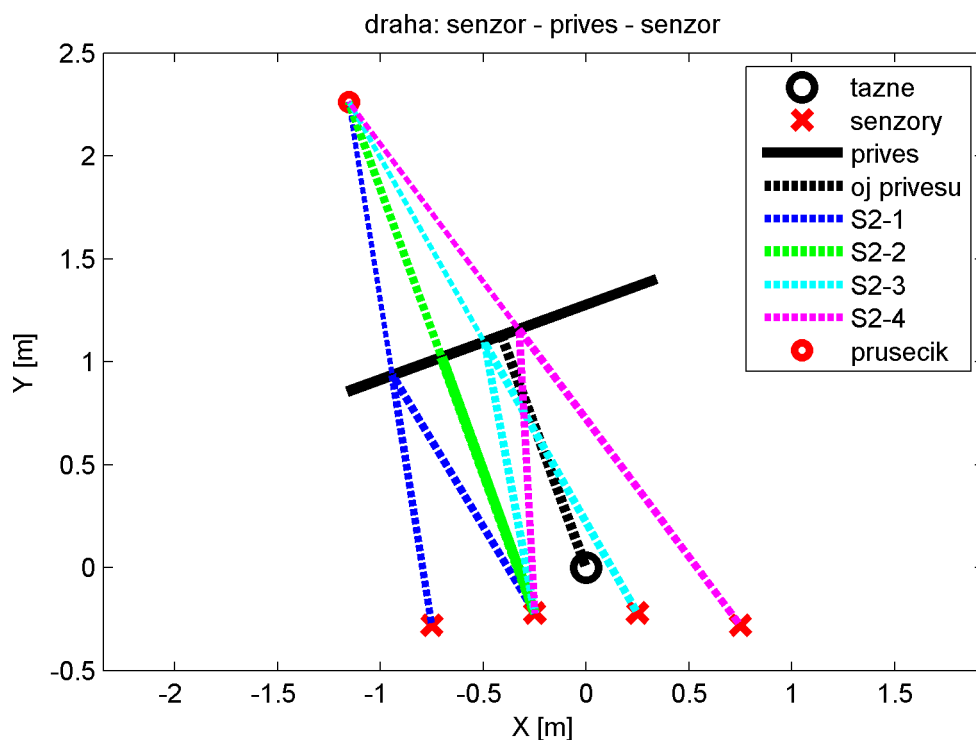
Obrázek 7.4: GUI pro konfiguraci nárazníku s rozmístěním senzorů - ovládací rozhraní programu vytvořeného pro Škoda Auto a.s.

byly vhodné pro řešení úloh při kterých by byla definována geometrie a poloha překážek a řešili bychom šíření ultrazvukových signálů mezi senzory a překážkami v obecnějším případě. Nadále se tedy touto metodou nebudeme v práci zabývat.

Funkce `f_trailer_model.m` byla upravena i pro model v prostředí Simulink, zde má opět podobu skriptu, `sensor_output_model`. Liší se tím, že provádí výpočet pouze pro daný aktivní senzor, tedy výstupem funkce není matice vzdáleností  $n \times n$  ( $n$  je počet senzorů), ale pouze vektor  $n \times 1$ . Na jejím vstupu je navíc proměnná identifikující stav v minulém kroku výpočtu, kterou lze využít pro stanovení aktivního senzoru v daném kroku. Lze tedy experimentovat s různým pořadím aktivního senzoru. Během experimentů se však neukázala potřeba s pořadím více pracovat, osvědčila se jednoduchá opakující se sekvence střídání aktivního senzoru 1,2,3,4<sup>6</sup>. Vizualizace drah při střídání aktivního senzoru je na obrázku 7.6. Průběhy měřených vzdáleností během jízdy jsou pak demonstrovány pomocí simulace v prostředí Simulink dále. Pro srovnání lze použít sekvenci řídicích jednotek parkovacího asistenta Valeo, kde sekvence 4 kanálové jednotky vypadá takto: 1,4,2,3... přičemž po každém třetím měření probíhala „reset“ sekvence.

Model `SIMUL_CarTrailerKinematics_SensorOutput.slx` v Simulinku je součástí přílohy této práce, pro jeho spuštění slouží m-skript: `SIMUL_Car-`

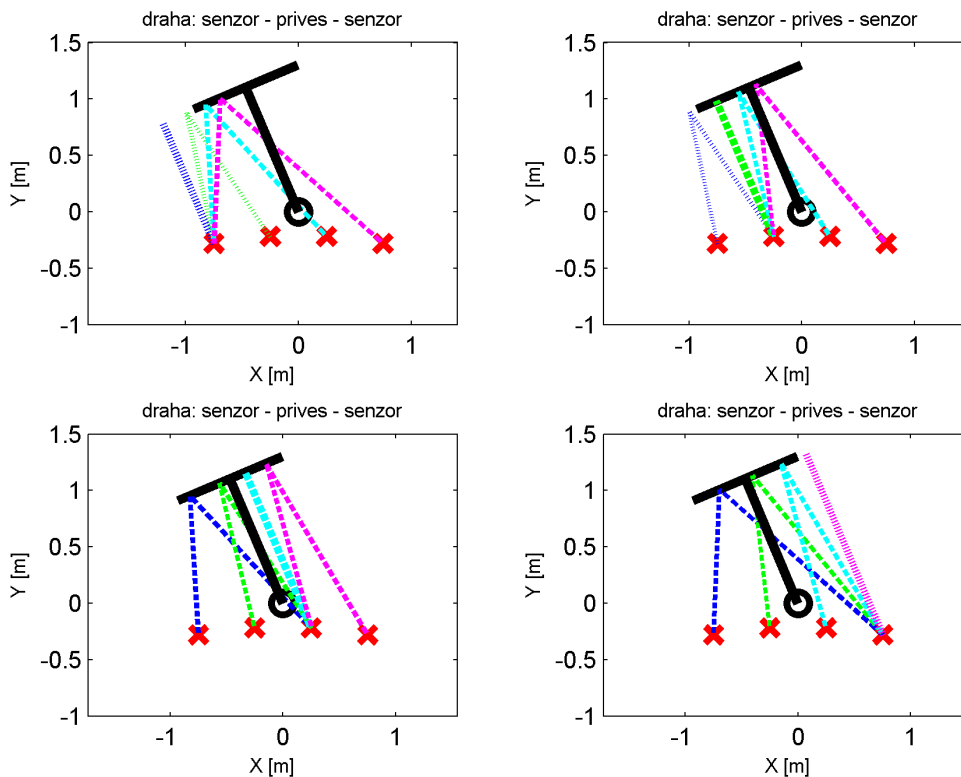
<sup>6</sup>číslování senzorů je zleva doprava: 1 - vlevo na kraji, 2 - vlevo uprostřed, 3 - vpravo uprostřed, 4 - vpravo na kraji



Obrázek 7.5: Model dráhy zvuku mezi aktivním senzorem, čelem přívěsu a pasivními senzory: virtuální průsečík.

`TrailerKinematics_SensorOutput_RUN.m`. Model je na obrázku 7.7, simulovaná data jsou pak na obrázku 7.9 první graf zachycuje průběh úhlu odklonu přívěsu od podélné osy vozidla  $\tau$ , další čtyři grafy pak zachycují průběhy měřených vzdáleností pro jednotlivé aktivní senzory: ty se během simulace sekvenčně střídají s periodou  $40ms$ , což odpovídá skenovací periodě řídicích jednotek parkovacích asistentů Valeo. V druhém grafu (aktivní senzor 1) je patrné vynechání senzoru v momentě, kdy algoritmus vyhodnotil, že nedojde k odrazu vlny od čela zpět k senzoru.

Model kinematiky vozidla s přívěsem (Car-Trailer kinematics model), který byl popsán v kapitole 6.1 je zde a i v dalších modelech volán jako externí model, abychom zachovali stejné podmínky pro všechny simulace. Parametry modelu lze měnit prostřednictvím proměnných uložených ve workspace MATLABu, respektive samostatném m-file. Výstupem z modelu kinematiky je úhel  $\tau$  (v modelu „Tau“), který dále vzorkujeme s periodou odpovídající měřicí periodě řídicí jednotky v automobilu, již zmíněných  $40ms$ . Úhel je pak vstupem do funkce `sensor_output_model`, která na základě vstupního úhlu  $\tau$ , parametrů přívěsu (délka oje k čelu, šířka čela) a para-

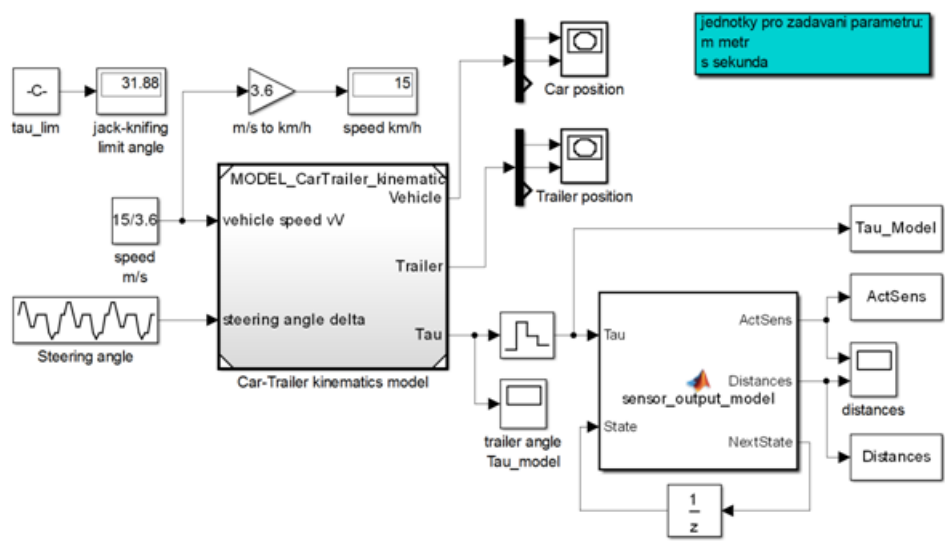


Obrázek 7.6: Střídání aktivního senzoru: dráhy signálu. Aktivní senzor: vlevo nahoře S1, vpravo nahoře S2, vlevo dole S2, vpravo dole S4,

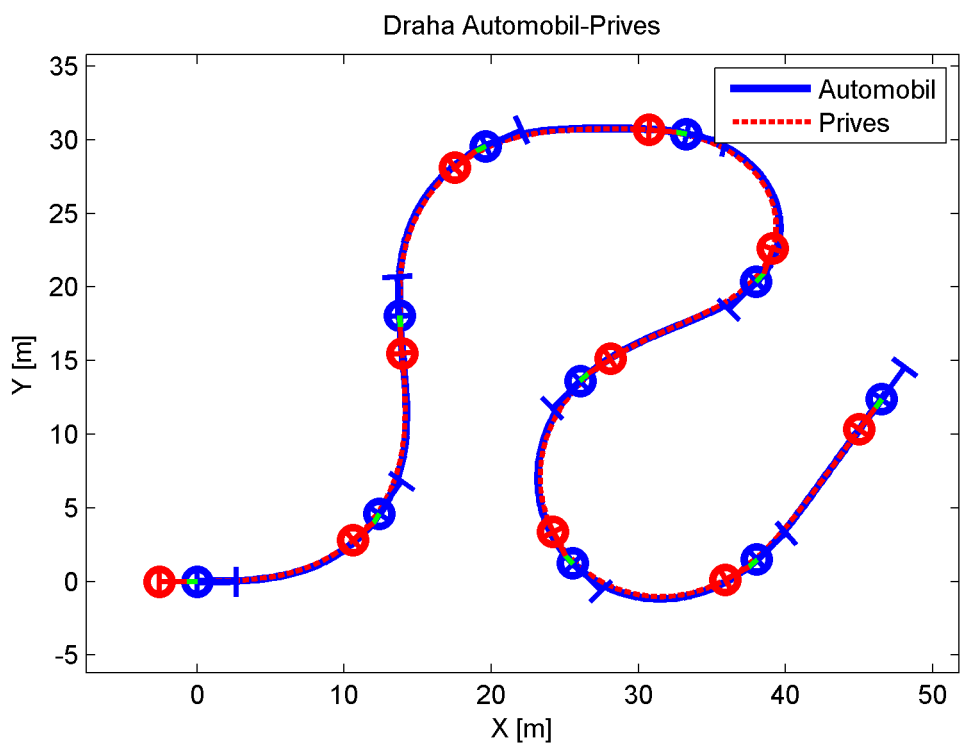
metrů nárazníku (rozmístění senzorů vůči poloze tažného zařízení) a vstupu **State** (má význam aktivního senzoru), vypočítává odezvy jednotlivých senzorů.

Pro vykreslení dráhy projaté soupravou byl napsán skript (m-file), který je přílohou této práce: `SIMUL_CarTrailer_TrajectoryPLOT.m`. Skript vykreslí data uložená během simulace, lze jej zavolat na závěr libovolného modelu, který ukládá data trajektorií do příslušných proměnných (`Car_XY` a `Trailer_XY`). Příklad výstupu je zobrazen na obrázku 7.8. Podobným způsobem funguje i skript `SIMUL_CarTrailer_TrajectoryANIMATE.m`, který však vytváří animaci průjezdu soupravy po projaté dráze<sup>7</sup>.

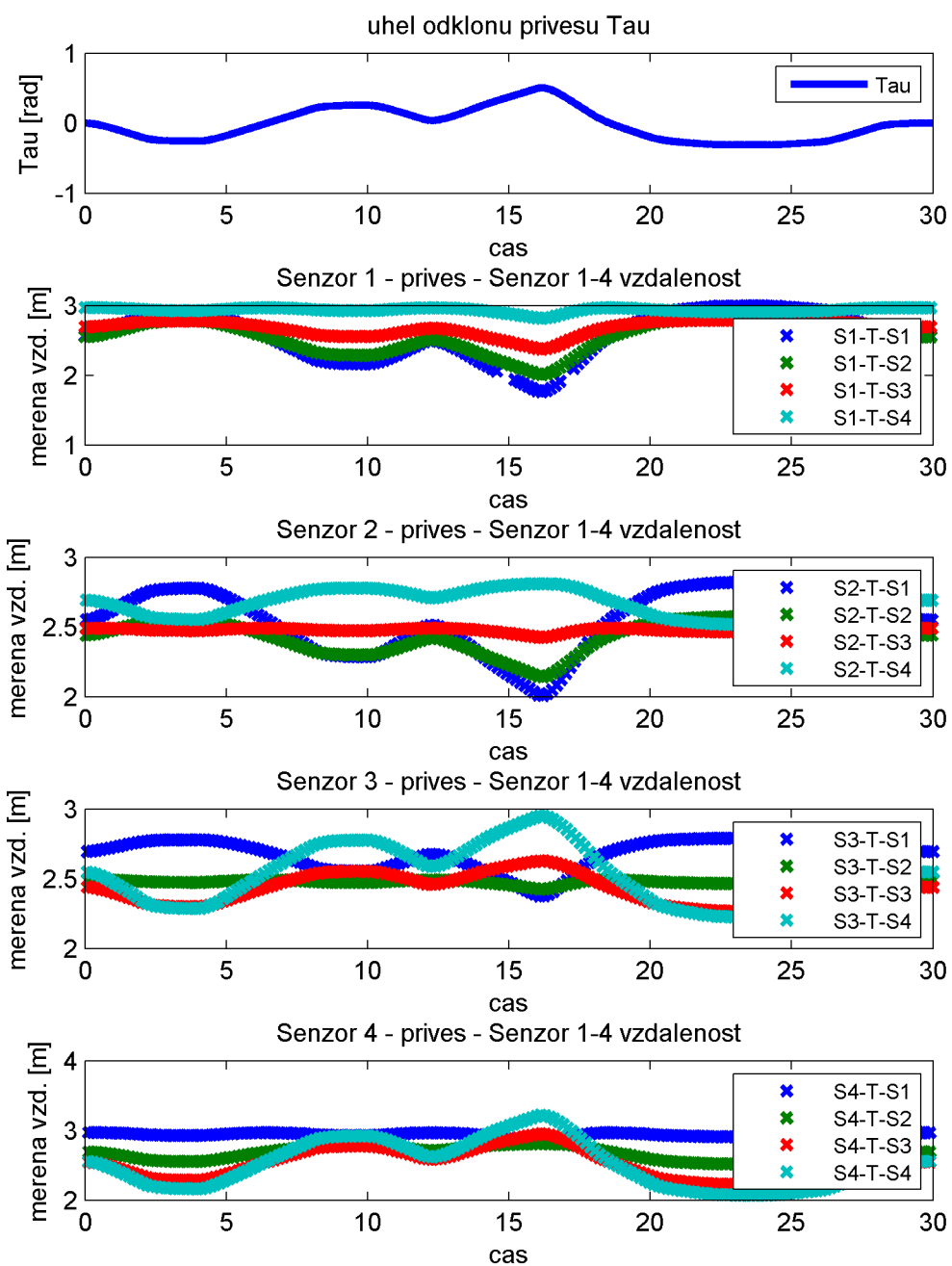
<sup>7</sup>Rychlost animace při druhém běhu koresponduje s reálným časem - reálnou rychlostí pohybu vozidla, při prvním běhu je animace teprve vytvářena z jednotlivých snímků a závisí tak na výkonu PC.



Obrázek 7.7: Model kinematiky a model senzorů - prostředí MATLAB Simulink



Obrázek 7.8: Vykreslení dráhy vozidla a přívěsu



Obrázek 7.9: Simulace měřených vzdáleností: data ze senzorů

# Kapitola 8

## Určení polohy a parametrů přívěsu

Tato kapitola se zabývá řešením dvou hlavních cílů této práce, a to:

1. *Určení úhlu odklonu podélné osy přívěsu od podélné osy vozidla*
2. *Určení délky oje přívěsu (vzdálenosti nápravy od tažného zařízení)*

Úloha určení úhlu odklonu podélné osy přívěsu od podélné osy vozidla je v zásadě úlohou inverzní k modelu přívěsu jako překážky, respektive výstupu senzorů, kteroužto jsme se zabývali v kapitole 7.2. Platí zde stejná geometrická pravidla.

Úloha určení vzdálenosti nápravy od tažného zařízení je pak o něco komplikovanější, jelikož ji již nelze řešit pouze ze statických dat a je potřeba mít jízdní data manévrujícího vozidla a synchronní záznam průběhu úhlu odklonu přívěsu, ze kterých pak lze opět s pomocí modelu kinematiky získat odhad délky oje přívěsu.

### 8.1 Určení úhlu odklonu osy přívěsu od podélné osy vozidla $\hat{\tau}$

Určení úhlu odklonu přívěsu od podélné osy vozidla je prvním předpokladem pro řízení couvání. S pomocí ultrazvukových senzorů je možné tento úhel stanovit. Teoreticky stačí k výpočtu úhlu data ze dvou snímačů, větší počet snímačů pak zvyšuje přesnost a spolehlivost měření, zejména v situacích, kdy některý ze snímačů nepřijímá odražený signál.

Jak již bylo předesláno, je úloha určení úhlu odklonu osy přívěsu od podélné osy vozidla úlohou inverzní k modelování výstupu snímačů pro vozidlo s připojeným přívěsem. Neznámou je v tomto případě úhel  $\tau$ , respektive

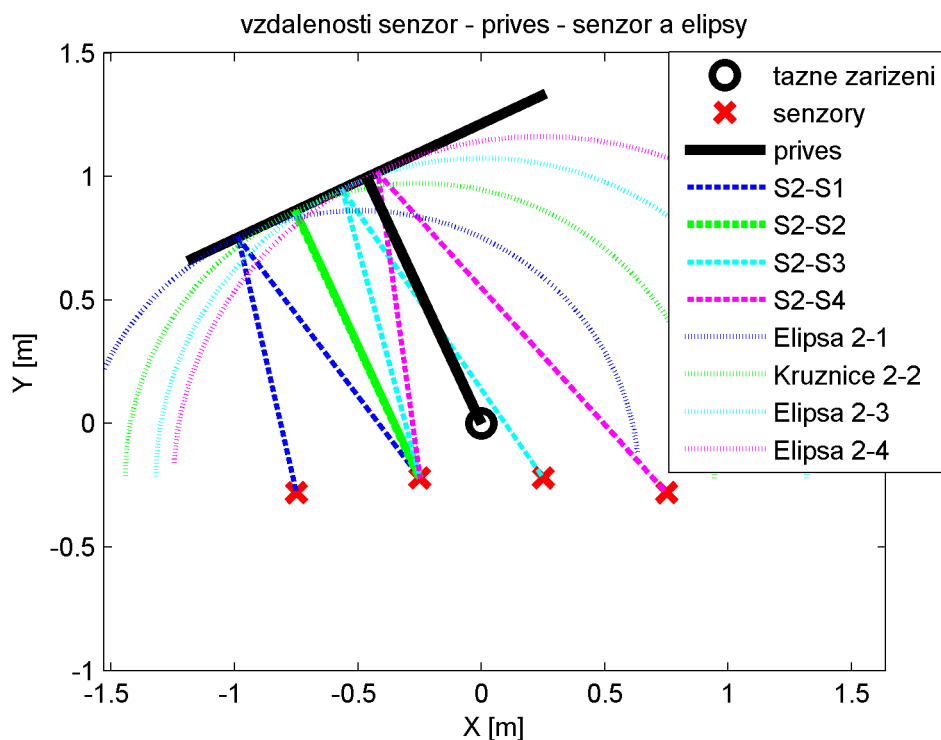
tedy jeho odhad  $\hat{\tau}$ , rovněž budeme předpokládat, že neznáme ani délku oje k čelu  $L_{FD}$ , kterou budeme rovněž odhadovat  $\hat{L}_{FD}$ . Můžeme provést i určitý odhad šířky čela přívěsu  $\hat{L}_{FW}$  a to na základě výpadků signálu od krajních senzorů během manévrování, avšak tento parametr není pro řízení couvání s přívěsem podstatný, navíc jej lze stanovit pouze za určitých podmínek. Pro výpočet vzdálenosti čela a stanovení úhlu odklonu přívěsu v daném okamžiku stačí jedna sada měření od minimálně dvou senzorů, tzn.: jeden senzor je aktivní: vysílá i přijímá signál, druhý senzor je pasivní, signál pouze přijímá.

Krom již zmíněného zákona odrazu by bylo možné ještě použít metodu hledání společné tečny několika elips, kdy každý ze dvou senzorů páru aktivní - pasivní tvoří jedno z ohnisek elipsy a celková dráha k překážce a od překážky je součtem obou průvodičů. Pro případ kdy je signál odražen zpět do aktivního senzoru je elipsa redukována na kružnici<sup>1</sup>. Analytické řešení této metody je však poměrně dost komplikované. Jako jednodušší možnost se jeví numerická metoda, při které můžeme například vyjít ze signálu přijatého aktivním senzorem a postupně počítat rovnice přímek - tečen kružnice A-A (Aktivní - Aktivní) a následně pak její průsečíky s elipsami A-P (Aktivní - Pasivní). Tato metoda nepřináší zjevné výhody oproti metodě založené na zákonu odrazu, která je i z výpočetního hlediska daleko jednodušší, což je podstatné i z pohledu následné implementace algoritmu do řídicího mikrokontroléru. Princip metody společné tečny je ilustrován na obrázku 8.1. Pro ilustraci je využit základní model pro výpočet drah, respektive vzdáleností mezi senzorem - přívěsem - senzorem, navíc je doplněn o výpočet elips. Model je přílohou této práce jako m-skript `model_prekazky_DIS_elipsa.m`.

Pro stanovení úhlu odklonu pomocí metody založené na úhlu odrazu jsme sestavili algoritmus, který vypočte souřadnice virtuálního průsečíku na základě kosinové věty: známe všechny tři strany trojúhelníku tvořeného vrcholy A-I-P<sup>2</sup>. Strana A-I má délku dráhy A-T-A, strana I-P má délku dráhy A-T-P, strana A-P je pak vzdálenost mezi aktivním a pasivním senzorem na nárazníku. Princip určení vzdáleností ilustruje již obrázek 7.5. Úhel odklonu přívěsu  $\hat{\tau}$  pak již snadno dopočteme, jelikož předpokládáme, že dráha A-T-A (A-I) je kolmá k čelu přívěsu a tedy rovnoběžná s osou přívěsu. Algoritmus je opět implementován v MATLABu pomocí m-skriptu a to v souboru `f_angle_calc.m`, který je přílohou této práce. Vstupem jsou naměřené vzdálenosti, jako parametry pak polohy senzorů na nárazníku, výstupem jsou vypočtené

<sup>1</sup>Kružnice je zvláštní případ elipsy, jejíž obě poloosy mají shodnou délku - poloměr kružnice.

<sup>2</sup>A - Aktivní senzor, I - Virtuální průsečík (Intersection), P - Pasivní senzor, T - Přívěs (Trailer)



Obrázek 8.1: Metoda společné tečny elips

úhly odklonu a odhady délky oje. Algoritmus zpracovává obecně vstupní data pro  $n$ -senzorů ve všech kombinacích. Algoritmus byl pro model v Simulinku upraven tak, aby odpovídal možné implementaci v reálné řídicí jednotce a byl v souladu s modelem uvedeným v kapitole 7.2. Souhrn vstupů, parametrů a výstupů algoritmu uvádí tabulka 8.1.

Simulační model jízdy je opět sestaven v prostředí Simulink, soubor `SIMUL_CarTrailerKinematics_SensorOutput_TauEST.slx` a m-skript s parametry modelu se zpracováním a vyobrazením dat ze simulace `SIMUL_CarTrailerKinematics_SensorOutput_TauEST_RUN.m` jsou přílohou této práce. Oproti modelu kinematiky a senzorů je model doplněn o blok funkce `angle_estimator`, která obsahuje algoritmus `f_angle_calc.m` upravený pro prostředí MATLAB Simulink a především pro jednorozměrná data, tedy jednu sadu měřených vzdáleností a ID aktivního senzoru. Mezi modelem senzorů a algoritmem je vřazen blok `uP kvantizace`, což je subsystem, simulující kvantizaci způsobenou senzory, respektive rozlišením časovače případného mikrokontroléru. Princip funkce je takový, že pro stanovený takt hodin 5 MHz (rozlišení  $0.2 \mu s$ ) je vypočtena hodnota, kterou by čítač mikrokontroléru naměřil, ta je zaokrouhlena na celočíselnou hodnotu a pak převedena zpět na míru vzdálenosti.

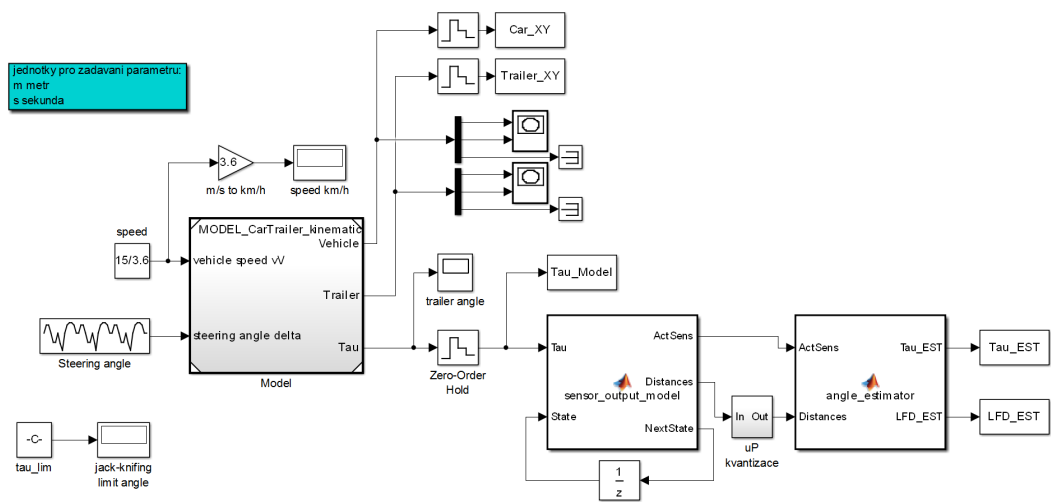


<b>Vstupy algoritmu:</b>	
Vzdálenosti (časy) naměřené jednotlivými senzory ID aktivního senzoru	$DISTANCES [n]$ $n_A$
<b>Parametry algoritmu</b>	
počet senzorů	$S_n$
poloha senzorů na nárazníku vzhledem k souřadnému systému vozidla	$S_{n_{XY}}$
vlastnosti senzorů: dosah, vysílací úhel, přijímací úhel	$S_{n_{CHAR}}$
<b>Výstupy algoritmu:</b>	
odhad úhlu odklonu přívěsu od podélné osy vozidla	$\hat{\tau}$
odhad délky oje k čelu přívěsu	$\hat{L}_{FD}$

Tabulka 8.1: Algoritmus pro stanovení odhadu úhlu odklonu  $\hat{\tau}$

Obsah bloku (subsystem) je na obrázku 8.3. V modelu je stále uvažována konstantní rychlost zvuku ve vzduchu určená pro stanovenou teplotu  $20^\circ C$ .

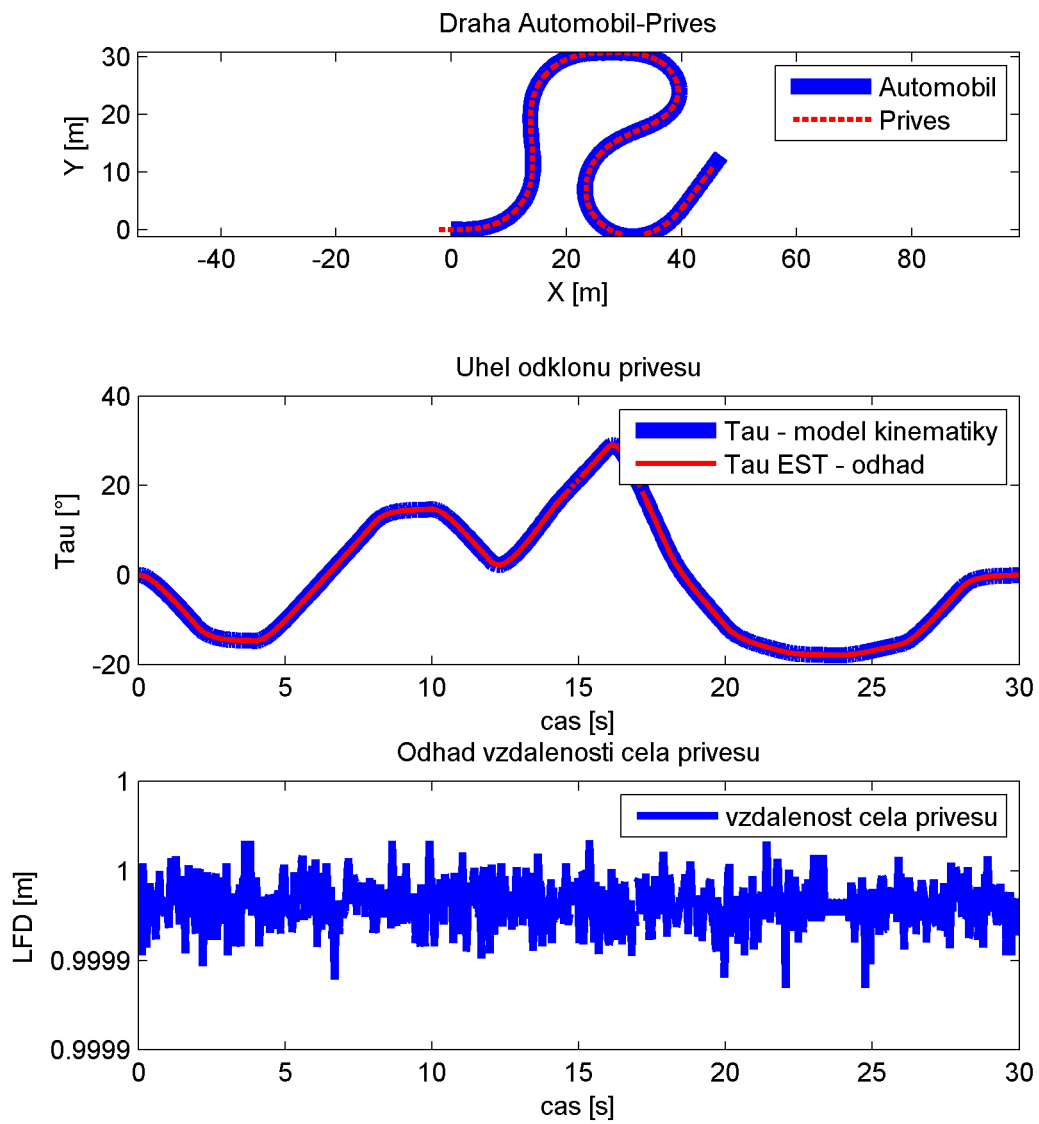
Na obrázku 8.4 je výsledek simulace: první část zobrazuje dráhu vozidla a přívěsu (dráha bodu zadního kola bicyklu, kola přívěsu - ekvivalent středu příslušných náprav), počátek pro automobil je na souřadnicích  $[0, 0]$ . Druhý graf ukazuje průběh úhlu odklonu přívěsu od vozidla: modrou barvou je úhel počítaný modelem kinematiky, červenou barvou je pak vyneseno odhad úhlu stanovený algoritmem. Na třetím grafu je pak okamžitý odhad vzdálenosti čela přívěsu stanovený algoritmem.



Obrázek 8.2: Model rozšířený o algoritmus odhadu úhlu odklonu



Obrázek 8.3: Realizace kvantizační funkce



Obrázek 8.4: Simulace jízdy: odhad úhlu na základě měření senzorů

## 8.2 Určení délky oje přívěsu $\hat{L}_T$

Určení délky oje přívěsu  $\hat{L}_T$  (vzdálenost nápravy přívěsu od tažného zařízení) je jedním z podstatných vstupních parametrů pro algoritmus plánující dráhu couvání soupravy. Její hodnotu však nelze určit z dat získaných měření stojící soupravy, tak jak je to možné například u stanovení úhlu odklonu přívěsu či vzdálenosti čela. Pro stanovení odhadu  $\hat{L}_T$  potřebujeme, aby se souprava pohybovala a úhel odklonu přívěsu  $\tau$  byl buď nenulový, nebo se měnil. V této kapitole popíšeme několik metod, jak odhad hodnoty  $\hat{L}_T$  stanovit. Metody jsou opět založeny na modelu kinematiky jízdní soupravy a na již popsaných způsobech určení hodnoty odhadu úhlu odklonu přívěsu  $\hat{\tau}$ , který je jednou ze vstupních veličin.

### 8.2.1 Stanovení délky oje výpočtem

První metodou je přímý výpočet hodnoty  $\hat{L}_T$  na základě výpočtu vyjádřením z modelu kinematiky uvedeného v kapitole 6.1, konkrétně pak vyjádřením  $L_T$  z rovnice 6.2f:

$$\hat{L}_T = -v_H \frac{\cos \eta}{\dot{\varphi}_T} \quad (8.1)$$

Z rovnice 8.1 vyplývá, že odhad lze provádět pouze pokud je hodnota  $\dot{\varphi}_T \neq 0$  ((úhlová) rychlost otáčení přívěsu v globálních souřadnicích), jak ukážeme dále kritérium velikosti změny (derivace) úhlového natočení přívěsu je vhodné pro stanovení důvěryhodnosti vypočtené hodnoty, respektive čím větší je hodnota  $\dot{\varphi}_T$ , tím věrohodnější<sup>3</sup> je vypočtený odhad  $\hat{L}_T$ . Úpravou rovnic 6.2a-6.2e, 6.3a, 6.3b, 6.4a a 6.4b dostaneme po dosazení do rovnice 8.1:

Pro  $\delta_V \neq 0$ :

$$\hat{L}_T = -v_V \frac{\sqrt{\frac{L_{WB}^2}{\tan^2 \delta_V + L_H^2}} \cos \left( \pi - \left( \hat{\tau} + \tan^{-1} \frac{L_{WB}}{L_H \tan \delta_V} \right) \right)}{\frac{L_{WB}}{\tan \delta_V} \dot{\varphi}_T} \quad (8.2)$$

A pro  $\delta_V = 0$ :

$$\hat{L}_T = -v_V \frac{\cos \left( \frac{\pi}{2} - \hat{\tau} \right)}{\dot{\varphi}_T} \quad (8.3)$$

<sup>3</sup>V principu jde o SNR (Signal to Noise Ratio) - poměr mezi úrovní užitečného signálu a úrovní šumu - v našem případě je šum představován především kvantizační chybou.

<b>Vstupy algoritmu:</b>	
rychlost zadního kola	$v_V$
úhel natočení předního kola	$\delta_V$
odhad úhlu odklonu přívěsu	$\hat{\tau}$
úhlová poloha vozidla	$\varphi_V$
<b>Parametry algoritmu</b>	
rozvor náprav automobilu	$L_{WB}$
vzdálenost tažného zařízení od zadního kola	$L_H$
minimální hodnota změny úhlové polohy přívěsu pro výpočet odhadu	$\dot{\varphi}_{Tmin}$
<b>Výstupy algoritmu:</b>	
odhad délky oje přívěsu	$\hat{L}_T$

Tabulka 8.2: Algoritmus pro stanovení odhadu délky oje přívěsu  $\hat{L}_T$

Fakt, že ve jmenovateli je derivace hodnoty, která je navíc závislá na odhadu je poměrně velkou komplikací. Čím větší bude hodnota derivace, respektive v případě diskrétního výpočtu na mikrokontroléru difference, tím spolehlivější bude stanovení hodnoty odhadu  $\hat{L}_T$ . Na prvním grafu obrázku 8.6 je okamžitý odhad délky oje  $\hat{L}_T$  stanovený výpočtem přímo ze simulace bez jakéhokoliv dalšího zpracování. Při srovnání s druhým grafem zachycujícím průběh změny úhlové polohy přívěsu (v globálních souřadnicích) lze vidět, že výpočet odhadu  $\hat{L}_T$  nebyl aktivní v momentech, kdy se úhlová poloha neměnila. Algoritmus je doplněn o prahování - pokud je změna nižší než stanovená hodnota  $\dot{\varphi}_{Tmin}$ , není výpočet odhadu spouštěn. Nejde pouze o ochranu před dělením nulou, ale i velmi malými čísly. Z grafu je rovněž patrné, že odhad je nejpřesnější a nejstabilnější pokud se nemění úhel odklonu přívěsu, respektive při větších hodnotách  $\hat{\tau}$  se odhad zhoršuje. Souhrn vstupů, parametrů a výstupů algoritmu uvádí tabulka 8.2.

Třetí graf na obrázku 8.6 zobrazuje vyhodnocení odhadovaných hodnot právě pomocí dělení do tříd (histogram). Přičemž třídy jsou navrženy staticky na hodnoty od  $1m$  do  $3m$  s krokem  $2cm$ . Tato metoda je v daném případě efektivní a vhodná i díky své nenáročnosti na výpočetní výkon při implementaci na mikrokontroléru. Rozvržení tříd lze měnit i dynamicky s ohledem na paměťovou náročnost při implementaci na mikrokontroléru.

Na čtvrtém grafu obrázku 8.6 je pak zachycen výsledek FFT<sup>4</sup> odhadu  $\hat{L}_T$ , ze kterého nás zajímá pouze stejnosměrná složka ( $f = 0$ ).

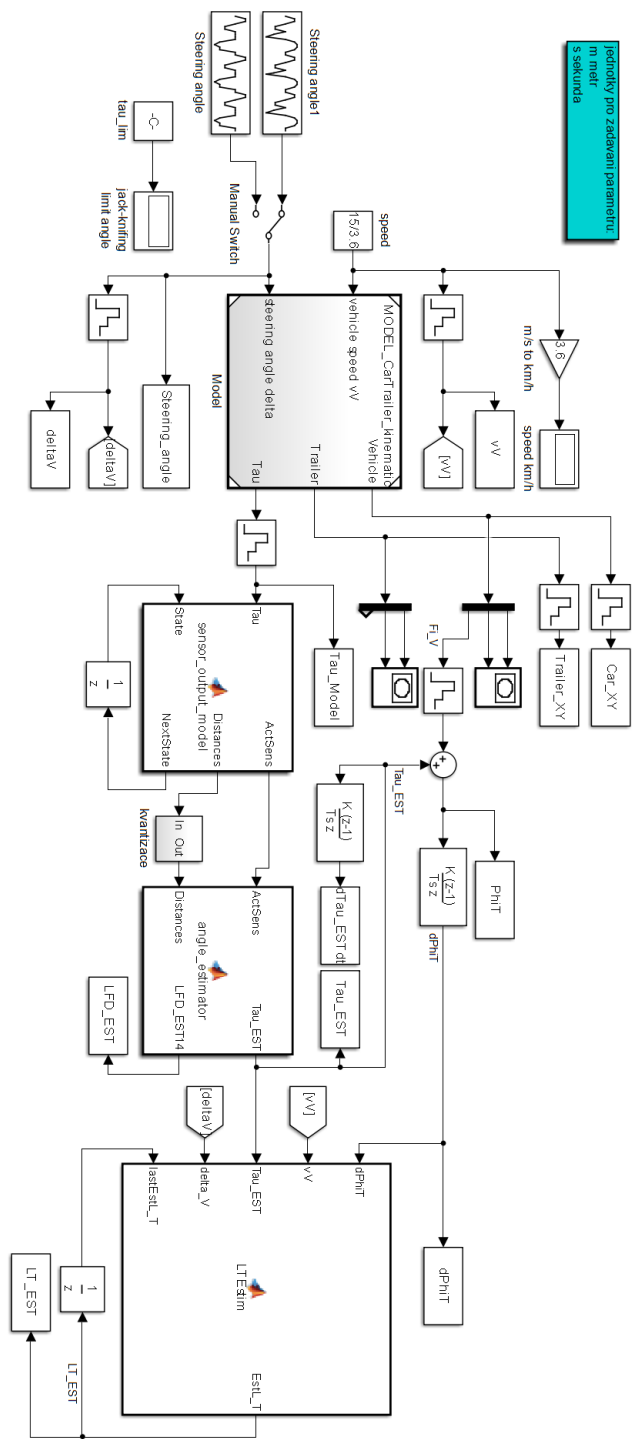
Pro případ, že by měřená data, především tedy odhad úhlu odklonu  $\hat{\tau}$ , byla zatížena větším šumem byl uvažován digitální filtr Savitzky-Golay[14],

<sup>4</sup>FFT - Fast Fourier Transform, Rychlá Fourierova transformace

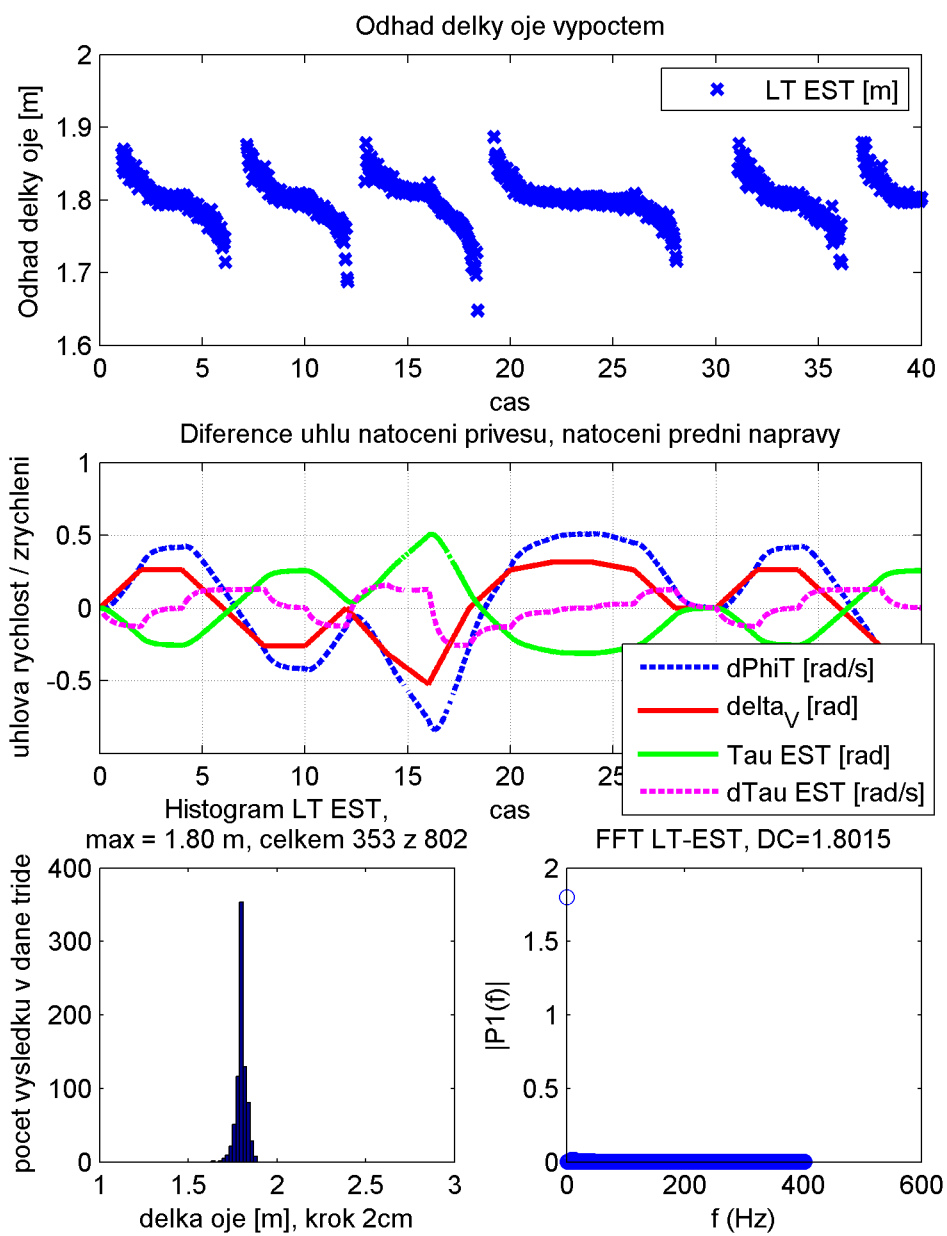
který je popsán v podkapitole 5.1. K jeho aplikaci nakonec nedošlo, avšak lze předpokládat, že při reálné aplikaci bude měření celkově více zatíženo šumem a pak půjde s výhodou využít vlastností SGF, především tedy možnosti snadno<sup>5</sup> získat první derivaci měřených dat, tedy  $\hat{\tau}$ .

---

<sup>5</sup>s nízkými nároky na výpočetní výkon.



Obrázek 8.5: Model doplněný o výpočet odhadu délky oje



Obrázek 8.6: Odhad délky oje - průběh



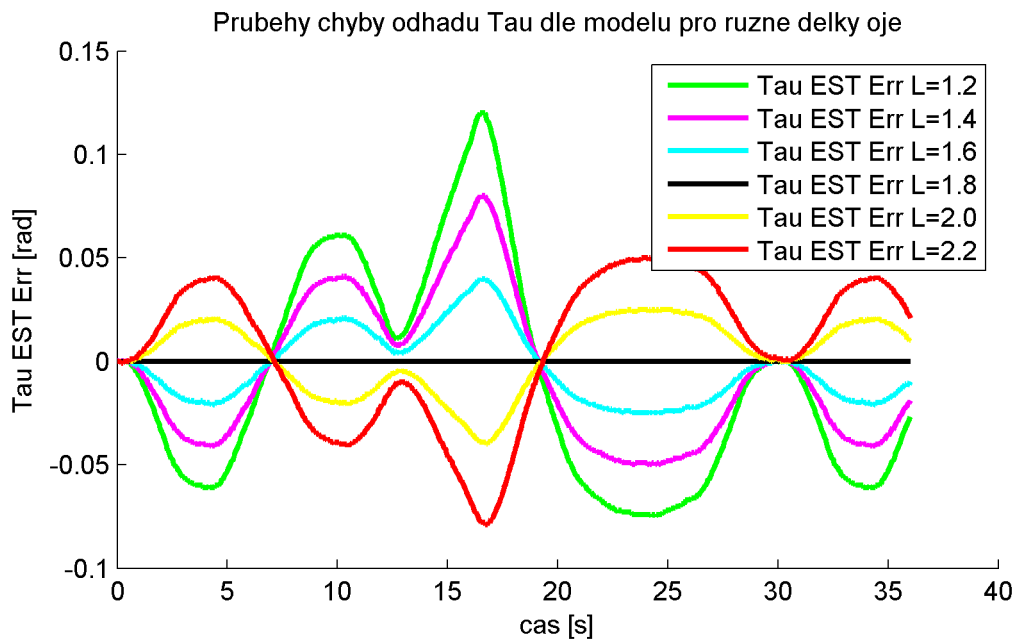
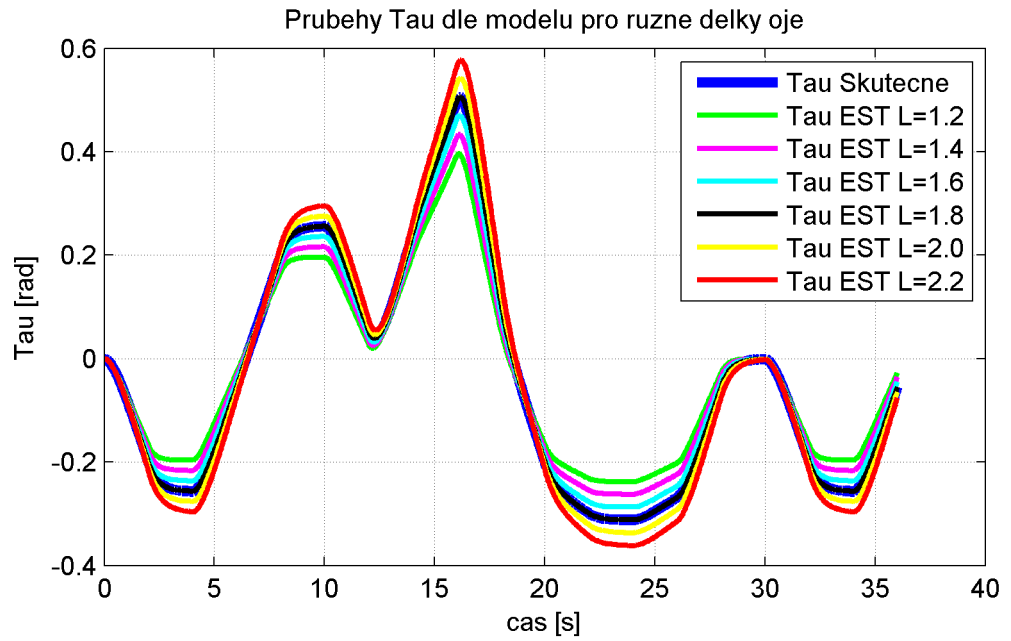
## 8.2.2 Stanovení délky oje pomocí modelu

Dalším způsobem jak lze stanovit odhad  $\hat{L}_T$  je pomocí iterační metody z jízdních dat a modelu: pro spuštění výpočtu je potřeba záznam jízdních dat, přičemž je potřeba aby splňovala obdobná kritéria jako v předchozím případě: měnila se úhlová poloha přívěsu v globálních souřadnicích. Princip metody je ilustrován v horním grafu na obrázku 8.7. Zvolíme počáteční odhad délky oje  $\hat{L}_{T0}$  a spustíme model kinematiky, kde vstupními daty budou data z řízení vozidla: rychlost zadního kola  $v_V$  a úhel natočení předního kola  $\delta_V$ . Z modelu dostaneme jako výstup průběh úhlu odklonu přívěsu  $\tau_0$ , ten pak můžeme porovnat s úhlem počítaným za jízdy  $\hat{\tau}$ . V dalším kroku pak vybereme novou hodnotu odhadu  $\hat{L}_{T1}$  v závislosti na velikosti a především na znaménku chyby, kde chybou rozumíme rozdíl průběhů  $\Delta\hat{\tau} = \hat{\tau} - \tau_0$ . Tato metoda vyplývá z jednoduché úvahy: přívěs s delší ojí se bude za rovně jedoucím vozidlem srovnávat déle, než přívěs s krátkou ojí. Z rozdílu  $\Delta\hat{\tau}$  při daném směru zatáčení lze rovněž určit, zdali je aktuální odhad  $\hat{\tau}_n$  větší, nebo menší než skutečná hodnota  $\hat{\tau}_0$ . To je ilustrováno v dolním grafu na obrázku 8.7. Tedy pro kladný úhel  $\hat{\tau}$  znamená kladná chyba že příslušný odhad je menší než hledaná hodnota, záporná chyba pak znamená že příslušný odhad je větší. Je-li úhel záporný a chyba také záporná, je odhad menší; je-li chyba kladná, pak značí že odhad je větší. Metodu lze tedy snadno algoritmizovat:

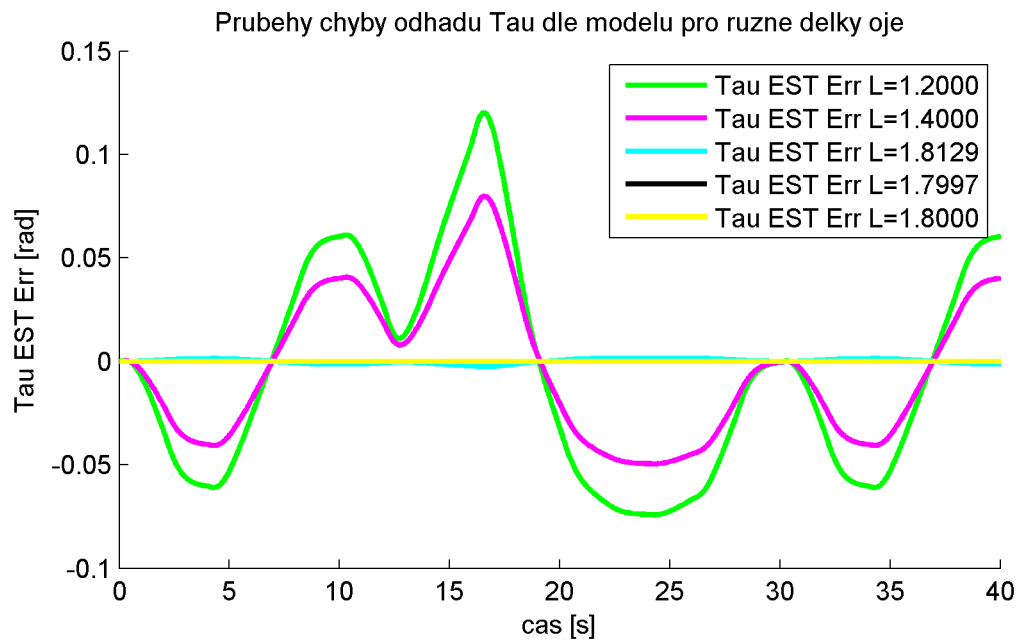
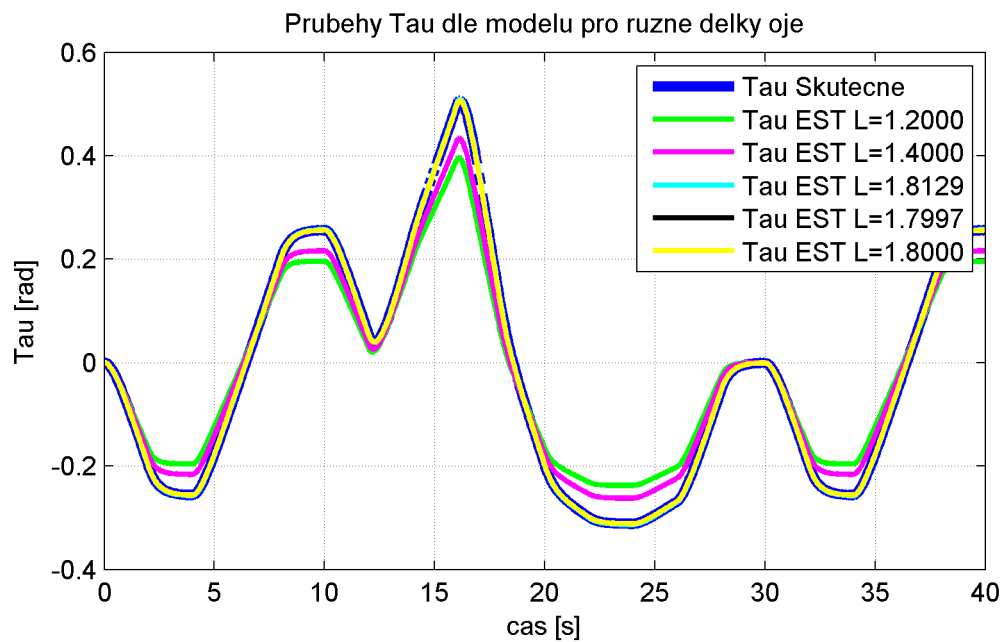
1. Stanovíme počáteční odhad  $\hat{L}_{T1}$
2. Necháme model vypočítat průběh úhlu  $\tau f(\hat{L}_{T1})$  a porovnáme jej s na základě měření průběžně počítaným odhadem  $\hat{\tau}$ .
3. Stanovíme druhý odhad  $\hat{L}_{T2}$  dle výsledku srovnání v předchozím bodě: pokud byla absolutní hodnota vypočteného průběhu větší než hodnota získaná z měření, odhad snížíme, byla-li menší, odhad zvýšíme. Krok lze volit, ale při první iteraci je vhodné aby byl spíše větší. Znovu spustíme výpočet a provedeme srovnání.
4. Další odhad(y)  $\hat{L}_{Tn}$  stanovíme pomocí numerické iterační metody sečen, viz rovnice 8.4. Přičemž jako kritérium pro zastavení iterací lze použít změnu velikosti kroku odhadu  $\Delta\hat{L}_T$

Metoda je implementována v m-skriptu `SIMUL_CarTrailerKinem_SensOut-TauEST_ShaftESTIterSecny_RUN` a průběh iterací je zřejmý z obrázku 8.8.

$$\hat{L}_{Tn} = \hat{L}_{Tn-1} - \frac{\left(\Sigma\hat{\tau} - \tau f\left(\hat{L}_{Tn-1}\right)\right)\left(\hat{L}_{Tn-1} - \hat{L}_{Tn-2}\right)}{\left(\Sigma\hat{\tau} - \tau f\left(\hat{L}_{Tn-1}\right)\right) - \left(\Sigma\hat{\tau} - \tau f\left(\hat{L}_{Tn-2}\right)\right)} \quad (8.4)$$



Obrázek 8.7: Stanovení odhadu délky oje pomocí modelu



Obrázek 8.8: Stanovení odhadu délky oje pomocí modelu

# Kapitola 9

## Asistent couvání s přívěsem

Tato kapitola shrnuje využití výsledků dosažených v předchozích kapitolách a jejich využití pro cílovou aplikaci, tedy návrh aktivního asistenta couvání s připojeným přívěsem.

### 9.1 Možnosti řízené veličiny a její zadání

Prvním podstatným úkolem je formulace zadání úlohy asistenta couvání s přívěsem. První pracovní název „Asistent parkování s přívěsem“ byl totiž mírně zavádějící, jelikož úlohu je potřeba řešit více obecněji. Z pohledu řidiče řídicího vozidlo s přívěsem je, pomineme-li běžné „dopředné“ řízení soupravy tak aby bylo bezpečné s ohledem na připojený přívěs, právě úloha couvání. A to ať už se jedná o couvání v přímém směru, do zatáčky, do vjezdu, nebo podélného parkovacího stání. Je zřejmé, že typových úloh může být několik.

Podíváme-li se na již existující řešení automobilek VW viz 3.2.1 a Ford viz 3.2.2, jev obou případech řízenou veličinou úhel odklonu přívěsu  $\tau$ . Řidič jej zadává prostřednictvím, v případě VW otočného ovladače nastavení zpětných zrcátek viz obrázek 3.5, a v případě Fordu pak prostřednictvím dedikovaného otočného ovladače viz obrázek 3.8.

Zůstaneme-li u prvotní úvahy, totiž že by byl asistent jakousi aktualizací stávajících řídicích jednotek parkovacích asistentů, musíme hledat vhodný ovládací prvek již ve stávajících automobilech. Z technického pohledu jde tedy o ovladač nejlépe ve formě inkrementálního enkodéru, nebo jiné formě otočného ovladače, jakým tedy je například ovladač zpětných zrcátek, případně ovladač autorádia. Není potřeba ani vyloučit možnost doplnění přídatného modulu s dedikovaným ovladačem díky tomu, že v automobilech je využívána sběrnice CAN a instalace by tak mohla být relativně jednoduchá.

Lze hledat i jiné způsoby jak usnadnit řídicí práci při couvání s přívěsem,

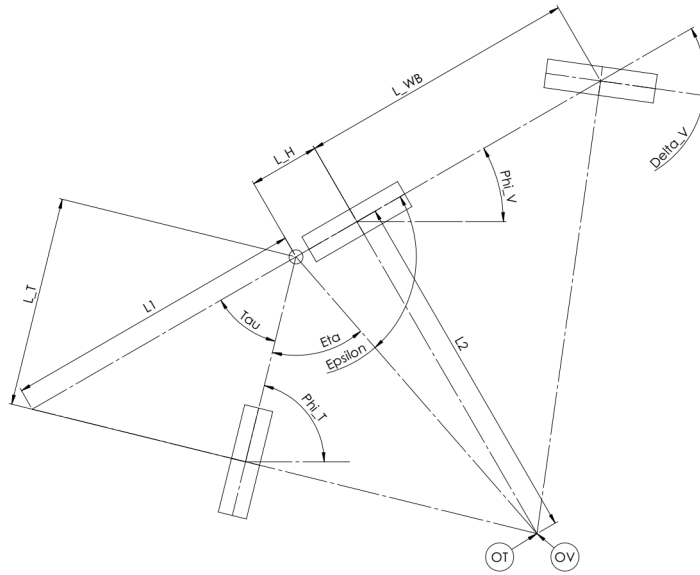
lze si například představit typizované úlohy jako je zacouvání do kolmého vjezdu, přičemž by řidič dal vozidlu informaci o začátku a konci (respektive šířce) vjezdu v momentě kdy jej míjí, vjezd pak následně přešel o již určenou vzdálenost a vozidlo by si pak již samo řídilo manévr couvání s už jen drobnými korekcemi od řidiče. Obvykle tedy nejde jen o samotný směr do kterého chceme přívěs dostat, ale i dráha po které se chceme více či méně přibližně (v závislosti na okolních překážkách) pohybovat. Zadat takovou dráhu by obecně bylo dost obtížné, proto pro další úvahy zůstaneme tedy u již osvědčených řešení a tedy u řízení úhlu odklonu přívěsu  $\tau$ .

## 9.2 Využití určených parametrů přívěsu

K řízení couvání vozidla s přívěsem potřebujeme znát především řízenou veličinu a to je směr, kterým chceme couvat, respektive směřovat přívěs. V předchozí části jsme však určili, že řízenou veličinou je úhel odklonu přívěsu  $\tau$ , který si stanoví řidič. Úkolem asistentu je tento úhel dosáhnout, udržet a dbát přitom i na bezpečnost soupravy. Určení odhadu samotného úhlu  $\hat{\tau}$  na základě dat z ultrazvukových senzorů bylo jedním z hlavních cílů této práce, dalším cílem, který má pro řešení tohoto úkolu klíčový význam je určení odhadu délky oje přívěsu  $\hat{L}_T$ , a to jednak při samotném řízení, tak i pro stanovení limitního úhlu odklonu  $\tau_{lim}$  jakožto ochranou proti neovladatelnosti přívěsu vedoucí až ke kolizi přívěsu s vozidlem v důsledku tzv. „Jack-Knifing“, viz oddíl 6.2.

Význam odhadu délky oje přívěsu  $\hat{L}_T$  při řízení spočívá v určení ustáleného stavu - určení úhlu  $\delta_V$  pro který platí, že středy okamžitého otáčení přívěsu a vozidla se potkají v jednom bodě, viz obrázek 9.1.

Z pohledu regulace lze na celkový systém řízení nahlížet jako na kaskádní regulátor, přičemž nejvyšší úroveň regulace vykonává sám řidič: na základě požadovaného výsledného směru dává nižší úrovni - vozidlu, (potažmo asistentu couvání s přívěsem) požadovaný úhel odklonu přívěsu  $\tau_{Req}$ . Výstupem asistentu pak je úhel  $\delta_V$ , popřípadě úhlová rychlost natáčení přední nápravy  $\dot{\delta}_V$  (volantu) v kombinaci s rychlostí pohybu vozidla  $v_V$ . Úhel natočení přední nápravy  $\delta_V$  pro odpovídající úhel  $\tau_{Req}$  pak lze stanovit pomocí výpočtu a



Obrázek 9.1: Rovnovážný stav při couvání s přívěsem

využít jej pro FFWD složku regulátoru:

$$\delta_{V_{FFWD}} = \frac{\pi}{2} - \tan\left(\frac{L_2}{L_{WB}}\right) \quad (9.1a)$$

$$L_2 = (L_1 + L_H) \tan\left(\frac{\pi}{2} - \tau_{Req}\right) \quad (9.1b)$$

$$L_1 = \frac{L_T}{\cos \tau_{Req}} \quad (9.1c)$$

Řízení směru couvání bylo již částečně řešeno v článku [12], na úloze zacouvání soupravy vozidla s přívěsem do vjezdu kolmého k původní orientaci soupravy. Vstupní veličinou je tedy požadovaná orientace přívěsu. Navržený kaskádní regulátor se skládá ze tří smyček:

1. Vnitřní smyčka s I regulátorem se saturací řídí úhel natočení přední nápravy  $\delta_V$ . Saturace zde představuje maximální rychlost změny natočení přední nápravy - otáčení volantem.
2. Druhá úroveň využívá P regulátor pro řízení rychlosti změny úhlu odklonu přívěsu  $\tau$ .
3. Nejvyšší - třetí úroveň pak opět pouze s pomocí P složky a saturace řídí požadované úhlové natočení přívěsu. V tomto případě je saturace využita pro předejití „Jack-knifing“.

# Kapitola 10

## Závěr

Pro tuto práci byly stanoveny dva hlavní řešené cíle a to: *Stanovení odhadu úhlu odklonu osy přívěsu od podélné osy vozidla*, a dále pak *Určení vzdálenosti nápravy přívěsu od tažného zařízení*. V obou případech byla podmínka využití měření prováděného s využitím běžných automobilových ultrazvukových parkovacích senzorů s řídicí jednotkou integrovanou do palubní sítě řídicích jednotek<sup>1</sup>. Oba hlavní cíle se podařilo naplnit a jejich řešení je popsáno především v kapitole 8.

Předchozí kapitoly se zabývají sestavením matematického modelu kinematiky automobilu s připojeným přívěsem a modelem ultrazvukového senzoru, potažmo připojeného přívěsu jako překážky.

Prínosy této práce lze shrnout do následujících bodů:

- Sestavení modelu kinematiky jízdní soupravy automobil s připojeným přívěsem a jeho navázání na model parkovacích senzorů. Model kinematiky vozidla i přívěsu je založený na zjednodušení na jednostopý model bicyklu, toto zjednodušení respektuje a zachovává veškeré podstatné vlastnosti běžného automobilu s jednou řízenou nápravou a s připojeným přívěsem. Řešení je uvedeno v kapitole 6. Výsledek byl publikován v článku [12].
- Sestavení matematického modelu přívěsu jako překážky z pohledu parkovacích senzorů umístěných na zadním nárazníku. Výsledky jsou založeny na experimentech provedených při plnění vývojového úkolu „Vývoj HIL simulátoru parkovacích senzorů“ realizovaném pro Škoda Auto a.s. Závěry byly publikovány v článku [11]. Popis řešení je obsahem kapitoly 7.

---

<sup>1</sup>Instalovanou výrobcem vozidla.

- Sestavení a ověření algoritmu pro stanovení odhadu úhlu odklonu přívěsu od osy vozidla<sup>2</sup>. Odvození algoritmu je popsáno v podkapitole 8.1. Zvolený algoritmus vychází ze zákona o úhlu dopadu a odrazu, rovněž pro úplnost uvádíme další možnost řešení: pomocí hledání společné tečny n-elips, kde n je počet senzorů. Přidaným výstupem zvoleného algoritmu je také odhad vzdálenosti čela přívěsu, který lze případně dále využít například při kontrole věrohodnosti výstupů algoritmu. Výsledek a popis experimentu pro ověření výpočtu úhlu byl publikován v článcích [12] a [13].
- Sestavení a ověření algoritmu pro stanovení odhadu vzdálenosti nápravy přívěsu od tažného zařízení<sup>2</sup>. Odvození algoritmu je popsáno v podkapitole 8.2. Jsou uvedeny dva přístupy: v sekci 8.2.1 popisujeme stanovení odhadu délky oje výpočtem. Druhou možností je pak stanovení pomocí modelu kinematiky iterační metodou, tento způsob je popsán v sekci 8.2.2. Výsledek byl publikován v článku [13].
- Návrh jednoduchého kaskádního regulátoru pro asistenci řízení couvání vozidla s přívěsem byl publikován v článku [12]. V práci je uveden jen stručně v kapitole 9.2. Podkapitola 5.2 pak více obecně popisuje výhody kaskádních regulátorů. Tato podkapitola byla do této práce zařazena pro pedagogický přínos.
- Vypracování přehledu aktuálního stavu řešené problematiky. Rešerše shrnuje aktuální stav, i po dobu vypracovávání této práce, živě se rozvíjející problematiky parkovacích asistentů. Jak rešerše ukazuje, jedná se o aktuální téma, které zdaleka ještě není uzavřené a je stále co vylepšovat. Navíc se tento systém zdaleka ještě nerozšířil mezi automobilkami a o to více je téma aktuální a zajímavé. Popis je obsahem kapitoly 3.
- Vývoj elektroniky parkovacího / couvacího asistentu, umožňující testování vyvinutých algoritmů. Elektronika byla vyvinuta při řešení již zmíněného vývojového úkolu „Vývoj HIL simulátoru parkovacích senzorů“ realizovaném pro Škoda Auto a.s. Její další verze, určená pro experimenty a také pro projekt Car4 [24],[25],[26] byla realizována jako součást bakalářské práce Jiřího Otáhalo [21] vypracované v roce 2014 pod vedením autora této disertační práce.

Za přínosné považujeme nalezení a popis možnosti jak dále využít řídicí jednotky parkovacích asistentů využívající ultrazvukové snímače pro rozšíření

---

<sup>2</sup>Na základě dat získaných z měření ultrazvukovými parkovacími senzory.



jejich funkcionality o asistenci řidiči při couvání s přívěsem. Jak ukazují trendy v automobilovém průmyslu, jedná se o aktuální téma, byť automobilky zvolily primárně jiný způsob získávání dat o stavech přívěsu. I tak by ale mohl být tento způsob uplatnitelný, buď jako levnější varianta bez využití kamery, nebo jako doplňkový zdroj dat právě pro systémy, které kameru již využívají, ale i tak jsou vybaveny i ultrazvukovými senzory.

Z dostupných informací k systému používaným automobilkou Ford je patrné, že nejen využití ultrazvukových senzorů, ale i jen samotného modelu kinematiky spolu s algoritmem stanovení vzdálenosti nápravy přívěsu od tažného zařízení by mohlo přispět ke zjednodušení práce se současnými couvacími asistenty. Řidiči by mohli odpadnout některé úkony při nastavování parametrů řídicí jednotky.

Během řešení vzniklo několik matematických modelů, které byly implementovány v prostředí MATLAB, případně MATLAB - Simulink, a které lze využít pro další pokračování v tomto tématu, případně i ve výuce, jako zdroj příkladů a informací pro studenty zajímající se o trendy a přístupy nejen v automobilovém průmyslu. Vzniklé modely jsou přílohou této práce.

# Literatura

- [1] ALL-NEW PRO TRAILER BACKUP ASSIST FOR 2016 FORD F-150 MAKES BACKING UP AND PARKING A TRAILER EASIER THAN EVER — FORD MEDIA CENTER:, <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2015/05/21/all-new-pro-trailer-backup-assist-for-2016-ford-f-150-makes-back.html>, 2.12.2016
- [2] 2016 F-150 PRO TRAILER BACKUP ASSIST - QUICK START GUIDE:, [http://www.fordservicecontent.com/Ford\\_Content/Catalog/owner\\_information/2016-F-150-TBA-QSG-Version-1\\_EN-US\\_09\\_2015.pdf](http://www.fordservicecontent.com/Ford_Content/Catalog/owner_information/2016-F-150-TBA-QSG-Version-1_EN-US_09_2015.pdf), 2.12.2016
- [3] ASISTENT PRO COUVÁNÍ S PŘÍVĚSEM AUTOMOBILKY VOLKSWAGEN — THINK NEW:, <http://thinknew.volkswagen.com/cz/cs/innovations/driver-assistance/trailer-assist.html>, 2.12.2016
- [4] BACKUP TRAILER BOAT TRAVEL CAMPER RV ASSISTANT TOWGO:, <http://www.towgo.com>, 2.12.2016
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS - ADVANCING SUBARU HYBRID VEHICLE TESTING THROUGH HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION:, <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-15982>, 20.11.2009
- [6] RE 25 Ø25mm, PRECIOUS METAL BRUSHES CLL, 10 WATT:, <http://www.maxonmotorusa.com/maxon/view/product/motor/dcmotor/re/re25/118740>, 15.11.2016
- [7] SAVITZKY-GOLAY SMOOTHING AND DIFFERENTIATION FILTER MATLAB IMPLEMENTATION BY JIANWEN LUO:, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4038-savitzky-golay-smoothing-and-differentiation-filter>, 17.12.2016

- [8] FIFTH GEAR CHANGE A LIGHT BULB:, <https://www.youtube.com/watch?v=nXCZ2v-nIF4>, 10.04.2017
- [9] JAKUB HRABEC: *Modelování a řízení mobilních robotů s několika řízenými koly*, Vysoké Učení Technické v Brně, 2010
- [10] KREJČÍ P.: *Testing of Automotive Park Assistant Control Unit by HIL Simulation*, In *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*. Mechatronics. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2013
- [11] VEJLUPEK J., GREPL R., KREJČÍ P., LESÁK F., MATOUŠ K.: *Hardware-In-the-Loop Simulation for Automotive Parking Assistant Control Units*, In *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*. Brno: Brno University of technology, 2014
- [12] VEJLUPEK J.: *Trailer Parking Assistant*, In *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*. Brno: Brno University of technology, 2014
- [13] VEJLUPEK J.: *Trailer backing-up assistant using ultrasound sensors based control units to safely back-up the car with trailer*, 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), Prague, 2016
- [14] ABRAHAM. SAVITZKY AND M. J. E. GOLAY: *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.*, *Analytical Chemistry* 36 (8), 1627-1639, 1964
- [15] PŘEMYSL JANÍČEK: *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky. Hledání souvislostí*, Nakladatelstvím VUTIUM, 2007
- [16] NILSSON J.; ABRAHAM S.: *Trailer Parking Assist*, Chalmers university of technology, 2013
- [17] GHILARDELLI, F.; LINI, G.; PIAZZI, A: *Path Generation Using  $\eta^4$ -Splines for a Truck and Trailer Vehicle*, *Automation Science and Engineering*, IEEE Transactions on, vol.11, no.1, pp.187,203, Jan. 2014
- [18] REEDS, J. A.; SHEPP, L. A.: *Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards.*, *Pacific Journal of Mathematics* 145, 1990

- [19] KIM, YOUNGSHIK; KIM, JINSUL: *Linear Kinematic Model-Based Least Squares Methods for Parameter Estimation of a Car-Trailer System Considering Sensor Noises*, Information Science and Applications (ICISA), 2014 International Conference on , vol., no., pp.1,3,, May 20114
- [20] WERLING, M.; REINISCH, P.; HEIDINGSFELD, M.; GRESSER, K.: *Reversing the General One-Trailer System: Asymptotic Curvature Stabilization and Path Tracking*, Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp.627,636, April 2014
- [21] OTÁHAL, J.: *Řídicí jednotka pro automobilové parkovací senzory*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014
- [22] PRESS WILLIAM H., TEUKOLSKY SAUL A., VETTERLING WILLIAM T., FLANNERY BRIAN P.: *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing, 3rd Edition*, Cambridge University Press ISBN:9780521880688, September 2007
- [23] GREPL R.: *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2007
- [24] VEJLUPEK J., LAMBERSKÝ V.: *Multi-purpose Mobile Robot Platform Development*, In: Jabłoński R., Březina T. (eds) *Mechatronics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011
- [25] VEJLUPEK J., LAMBERSKÝ V., KLIMEŠ D.: *Development of Mobile Robot with 4WD and 4WS Capability*, Technical Computing Prague 2011, 2011
- [26] R. GREPL, J. VEJLUPEK, V. LAMBERSKY, M. JASANSKY, F. VADLEJCH AND P. COUPEK: *Development of 4WS/4WD Experimental Vehicle: platform for research and education in mechatronics*, 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, Istanbul, 2011, pp. 893-898. doi: 10.1109/ICMECH.2011.5971241, 2011

# Příloha A

## Použité zkratky

- CAN** CAN bus - Controller Area Network: sběrnice používaná v automobilech pro komunikaci mezi jednotlivými řídicími jednotkami.
- FFT** Fast-Fourier-Transform: rychlá Fourierova transformace
- FW** Firm-Ware: vnitřní programové vybavení řídicí jednotky
- HIL** Hardware-In-the-Loop: metoda testování (vyvíjené) elektroniky - řídicích jednotek. Řídicí jednotka je prostřednictvím IO karet připojena k Real-Time počítači, na kterém běží simulační model relevantního prostředí a generuje / analyzuje signály pro / z řídicí jednotky.
- PDC** Park Distance Control: asistenční systém pro parkování / couvání, může být pouze zadní, případně i přední sada senzorů. (označení Škoda Auto a.s., respektive koncern VW)
- PLA** Parallel parking Assistant: asistenční systém pro paralelní parkování, obsahuje zadní, přední a boční sadu senzorů. (označení Škoda Auto a.s., respektive koncern VW)
- RCP** Rapid-Control-Prototyping: metoda rychlého vývoje prototypu pomocí specializovaných nástrojů (HW+SW), pro rychlé ověření konceptu na vyšších úrovních abstrakce.
- SW** Soft-Ware: programové vybavení výpočetní techniky vyšší úrovně (PC)
- SUT** System-Under-Test: označení pro konkrétní řídicí jednotku, nebo sestavu, která je testována, například HIL metodou.

# Příloha B

## Seznam příloh

### B.1 MATLAB a Simulink

**DIR: REGULACE** modely regulátorů a příklady použití regulace na DC motoru

- **DCMotor\_fPWM\_RUN.m** skript volající model s různými frekvencemi PWM - demonstrace vlivu na zvlnění proudu.
- **DCMotor\_parameters\_R161115.m** skript ve kterém jsou uloženy parametry DC motoru
- **DCMotor\_Regulator\_Pos\_KaskadniPID\_RUN.m** skript pro spuštění modelu s kaskádním regulátorem polohy
- **DCMotor\_Regulator\_Pos\_PID\_RUN.m** skript pro spuštění modelu s PID regulátorem polohy
- **DCMotor\_Regulator\_Spd\_PID\_RUN.m** skript pro spuštění modelu s PID regulátorem rychlosti
- **DCMotor\_StepResponse\_RUN.m** skript pro spuštění modelu s jednotkovou odezvou na skok - samotný DC motor
- **DCMotor\_LowFPWM.slx** model ke skriptu pro demonstraci efektů změny frekvence PWM
- **DCMotor\_QEI\_R161115.slx** model kartáčkového DC motoru, který má navíc emulaci periferie mikrokontroléru kvadraturního enkodéru - vhodné pro simulace diskrétního řízení.

- **DCMotor\_R161115.slx** model kartáčkového DC motoru využívaný v simulacích regulátorů
- **DCMotor\_Regulator\_Pos\_KaskadniPID.slx** model kaskádní PID regulace polohy
- **DCMotor\_Regulator\_Pos\_PID.slx** model PID regulace polohy
- **DCMotor\_Regulator\_Spd\_PID.slx** model PID regulace rychlosti
- **DCMotor\_StepResponse.slx** model pro test odezvy motoru na jednotkový skok na napájecím napětí

**DIR: BIKE MODEL** simulační modely založené na modelování automobilu jako jízdního kola

- **SIMUL\_CarTrailer\_PARAMETERS.m** skript obsahující parametry vozidla, skript je společný pro všechny modely
- **SIMUL\_CarTrailer\_TrajectoryANIMATE.m** skript pro vytvoření animace průjezdu vozidla s přívěsem
- **SIMUL\_CarTrailer\_TrajectoryPLOT.m** skript pro vytvoření vizualizace průjezdu vozidla s přívěsem
- **SIMUL\_CarTrailerKinem\_SensOut\_TauEST\_ShaftESTCycle\_RUN.m** skript pro spuštění modelu pro demonstraci vlivu délky oje přívěsu na průběh úhlu odklonu přívěsu během jízdy
- **SIMUL\_CarTrailerKinem\_SensOut\_TauEST\_ShaftESTIterSecny\_RUN.m** skript pro demonstraci určení délky oje přívěsu pomocí modelu kinematiky a iterační metody sečen.
- **SIMUL\_CarTrailerKinematics\_SensorOutput\_RUN.m** skript pro demonstraci průběhu výstupních dat z jednotlivých ultrazvukových senzorů
- **SIMUL\_CarTrailerKinematics\_SensorOutput\_TauEST\_LEST\_RUN.m** skript pro demonstraci určení délky oje přívěsu pomocí přímého výpočtu a zpracování dělením do tříd, případně FFT.
- **SIMUL\_CarTrailerKinematics\_SensorOutput\_TauEST\_RUN.m** skript s odhadem vzdálenosti čela přívěsu a odhadem úhlu odklonu přívěsu

- **MODEL\_CarTrailer\_kinematics.slx** model kinematiky automobilu (bicyklu) s přívěsem - využíván ve všech simulačních modelech
- **SIMUL\_CarTrailerKinematics\_SensorOut\_TauEST\_SEST\_LTEST.slx** model pro demonstraci určení délky oje přívěsu pomocí přímého výpočtu
- **SIMUL\_CarTrailerKinematics\_SensorOutput.slx** základní model kinematiky a výstupu ultrazvukových senzorů
- **SIMUL\_CarTrailerKinematics\_SensorOutput\_TauEST.slx** model s blokem pro odhad úhlu odklonu a vzdálenosti čela přívěsu
- **SIMUL\_CarTrailerKinematics\_SensorOutput\_TauEST\_ShaftEST\_LTEST.slx** model s blokem pro odhad úhlu odklonu, vzdálenosti čela přívěsu a odhadem délky oje na základě výpočtu

#### **DIR: OBSTACLE MODEL** modely překážky

- **f\_angle\_calc.m** funkce počítající úhel odklonu přívěsu na základě dat měřených ultrazvukovými senzory
- **f\_trailer\_model.m** funkce počítající výstupy ultrazvukových senzorů na základě polohy (úhlu odklonu) přívěsu.
- **model\_prekazky\_DIS.m** skript s modelem přívěsu jako překážky
- **model\_prekazky\_DIS\_elipsa.m** skript demonstrující určení polohy čela přívěsu metodou hledání společné tečny několika elips
- **model\_prekazky\_DIS\_kosinovaveta.m** skript pro vizualizaci drah zvuku pro střídající se aktivní senzor
- **model\_prekazky\_DIS\_ZakonOdrazu.m** skript pro demonstraci aplikace zákona odrazu I.
- **model\_prekazky\_DIS\_ZakonOdrazuJedenParSenzoru.m** skript pro demonstraci aplikace zákona odrazu II.