ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY

Odbor mechaniky a mechatroniky

# Bakalářská práce

## Experimentální model vozidla s asistentem pro couvání s přívěsem

**Praha, 2016** **Ladislav Vrbský**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vrbský** Jméno: **Ladislav** Osobní číslo: **419779**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Experimentální model vozidla s asistentem pro couvání s přívěsem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Experimental model of vehicle with an assistant for reversing with a trailer**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principy funkce asistenta pro couvání vozidla s přívěsem. 2. Navrhněte a sestavte experimentální model vozidla s přívěsem z komponent LEGO Mindstorms. 3. Sestavte systém asistenta pro couvání v prostředí Matlab / Simulink. 4. Implementujte asistenta do experimentálního modelu a ověřte jeho funkčnost. Očekávaný rozsah práce: cca 35 stran

Seznam doporučené literatury:

- Bazjuk, L., Couvání vozidla s přívěsem, bakalářská práce, ČVUT v Praze, 2014 - LaValle, S.M., Planning Algorithms, University of Illinois, 1999 - S?rdalen, O.J., Conversion of the Kinematics of a Car with n Trailers into a Chained Form, IEEE Computer Society Press, ICRA 1, page 382-387, 1993 - Divelbiss, A.W., Wen, J.T., Trajectory Tracking Control of a Car-Trailer System, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 5, No. 3, 1997

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Beneš Ph.D.**

Jméno a pracoviště konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2016** Termín odevzdání bakalářské práce: 12-08-2016

Platnost zadání bakalářské práce: _____

| Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky) |
|---|---|---|

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

| 25.4.2016 | Ladislav Vrbský |
|---|---|
| Datum převzetí zadání | Podpis studenta(ky) |



© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

# Anotační list

| | |
|---|---|
| **Jméno autora:** | **Ladislav Vrbský** |
| **Název bakalářské práce:** | Experimentální model vozidla s asistentem pro couvání s přívěsem |
| **Anglický název:** | Experimental model of vehicle with an assistant for backing up with trailer |
| **Akademický rok:** | 2015/2016 |
| **Obor studia:** | bez oboru |
| **Ústav/odbor:** | Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky<br>Odbor Mechaniky a mechatroniky |
| **Vedoucí bakalářské práce:** | Ing. Petr Beneš, Ph.D. |
| **Bibliografické údaje:** | Počet stran: 34<br>Počet obrázků: 19<br>Počet příloh: 1 x CD |

**Klíčová slova:**

Couvání, přívěs, couvání s přívěsem, asistent pro couvání, model vozidla s přívěsem

**Keywords:**

Backing up, trailer, backing up with trailer, backing up assistant, model of vehicle with trailer

**Anotace:**

Couvání vozidla s přívěsem může být i pro zkušeného řidiče náročnou úlohou. Například má-li přívěs projet přesně danou dráhou, při couvání v úzké ulici nebo při parkování. Práce se zabývá vytvořením parkovacího asistenta, který práci řidičům usnadní tak, že jim umožní přímo ovládat natáčení a rychlost přívěsu a na základě toho řídí natočení kol a rychlost vozidla.

**Abstract:**

Backing up of the vehicle with the trailer can be a hard task even for an experienced driver. For example, if the trailer needs to follow exactly the given path, when reversing in narrow streets or during parking. The thesis deals with creating a parking assistant, that controls front wheels and speed of the vehicle and allows driver to control directly the rotation and speed of the trailer.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze, dne …… ……

Podpis

## Poděkování

Především bych rád poděkoval Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, čas, který mi při jejím vypracovávání věnoval, pomoc při výběru tématu této bakalářské práce a za cenné rady. Dále bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni za podporu při práci na ní.

Děkuji

# Obsah

Anotační list ..... 3
Prohlášení ..... 4
Obsah ..... 6
Seznam obrázků ..... 7
1. Úvod ..... 8
2. Cíle práce ..... 8
2.1. Úkoly ..... 8
3. Současný stav zkoumané problematiky ..... 9
3.1. Couvací asistenti dostupní na trhu ..... 9
3.2. Poznatky o problematice ..... 10
3.2.1. Přehled proměnných pro popis pohybu vozidla a přívěsu ..... 11
3.2.2. Závislost pohybu vozidla na pohybu přívěsu ..... 12
3.2.3. Úhel natočení předních kol vozidla ..... 14
4. Nástroje pro realizaci práce ..... 15
4.1. LEGO MINDSTORMS ..... 15
4.2. Matlab Simulink ..... 15
5. Výroba vlastních součástí modelu ..... 15
5.1. Rotační čidlo pro LEGO Mindstorms ..... 16
5.1.1. Princip optického inkrementální enkodéru ..... 16
5.1.2. Zapojení rotačního čidla ..... 18
5.2. Kabely ..... 19
6. Vhodná konstrukce modelu ..... 20
6.1. Zatáčení předních kol ..... 21
6.2. Konstrukce modelu přívěsu ..... 23
6.3. Umístění rotačního čidla ..... 23
6.4. Ovladač ..... 25
6.5. Tabulka významných rozměrů modelu vozidla a přívěsu ..... 25
7. Vytvoření programu couvacího asistenta ..... 26
7.1. Doplněk LEGO EV3 pro Matlab Simulink ..... 26
7.2. Vytvoření bloků kinematických rovnic ..... 27
7.3. Rychlost modelu vozidla ..... 28
7.4. Výsledný model couvacího asistenta ..... 28
8. Navázání komunikace hardwaru se softwarem a implementování modelu couvacího asistenta ..... 29
8.1. Navázání komunikace ..... 29
8.2. Implementování a spuštění modelu ..... 30
9. Testování funkcí couvacího asistenta ..... 30
9.1. Analýza videa pomocí programu Tracker ..... 30
9.2. Vyhodnocení experimentů ..... 31

10. Závěr ..... 32
11. Použitá literatura ..... 33
12. Seznam příloh ..... 34

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Displej palubní desky Fordu F-150 s couvacím asistentem – převzato z [5] ..... 10
Obr. 2 – Pohyb modelu vozidla ..... 11
Obr. 3 –Pohyb modelu přívěsu ..... 12
Obr. 4 – Couvání vozidla s přívěsem ..... 14
Obr. 5 – Princip optického inkrementálního enkodéru – převzato z [9] ..... 16
Obr. 6 - Výstup optického inkrementálního enkodéru – převzato z [4] ..... 17
Obr. 7 – Schéma zapojení rotačního čidla ..... 18
Obr. 8 – Vlastní rotační čidlo ..... 19
Obr. 9 - Konektor RJ12 6p6c a konektor NXT/EV3 – upraveno po převzetí z [11] ..... 20
Obr. 10 – Vhodná kostrukce modelu vozidla s přívěsem ..... 21
Obr. 11 – Hřebenové řízení ..... 22
Obr. 12 – Model přívěsu ..... 23
Obr. 13 – Přichycení rotačního čidla ..... 24
Obr. 14 – Úmístění rotačního čidla ..... 24
Obr. 15 – Ovladač modelu ..... 25
Obr. 16 – Bloky v programu Matlab Simulink pro LEGO EV3 ..... 27
Obr. 17 - Blok rovnice (3.9), vlevo vnitřní schéma bloku, vpravo výsledný blok ..... 27
Obr. 18 – Blokové schéma modelu Couvacího asistenta ..... 29
Obr. 19 – Experiment s předem určenou dráhou přívěsu ..... 31

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Přehled proměnných – Pohyb modelu vozidla ..... 11
Tab. 2 - Přehled proměnných – Pohyb modelu přívěsu ..... 12
Tab. 3 - Přehled proměnných – Couvání vozidla s přívěsem ..... 14
Tab. 4 - Tabulka významných rozměrů modelu vozidla a přívěsu ..... 26

# 1. Úvod

Každý řidič osobního automobilu se může setkat se situací, kdy bude potřebovat couvat s přívěsem. Obzvlášť pro nezkušeného řidiče je úkol přesného couvání velmi náročný, ale i zkušený řidič někdy potřebuje na zaparkování přívěsu na přesně dané místo nebo při couvání úzkou příjezdovou cestou i několik pokusů.

Couvání s přívěsem by mohl řidičům usnadnit tzv. couvací asistent, který všem řidičům umožní ovládat přímo rychlost a směr přívěsu, a tím určit přesně jeho trajektorii. Zatím co se řidič soustředí na ovládání přívěsu, couvací asistent udává potřebnou rychlost vozidlu a řídí natočení jeho předních kol.

Tato bakalářská práce navazuje na předchozí teoreticky zaměřenou bakalářskou práci Bc. Ludvíka Bazjuka a přenáší poznatky v ní obsažené do reálného zmenšeného modelu osobního automobilu s přívěsem.

Model je sestaven z dílů robotické stavebnice LEGO Mindstorms a řízen pomocí softwaru Matlab Simulink. Z modelu je možné získat přesnější představu o vlastnostech a chování couvacího asistenta v reálném světě. Získané poznatky bude možné využít při vytváření jeho verze pro skutečný automobil.

Teorie nutná pro tuto úlohu, konstrukce experimentálního modelu a ovladače, popis řídícího programu a výsledky testů jsou popsány v následujících kapitolách, případně doplněny v přílohách a na přiloženém CD.

# 2. Cíle práce

Cílem této práce je shrnout dosavadní poznatky o problematice couvání vozidla s přívěsem. Na základě teoretických poznatků vytvořit program parkovacího asistenta, tak aby bylo v reálném čase možné řídit trajektorii přívěsu a využít jej v experimentálním modelu. Dalším cílem je implementovat program couvacího asistenta do modelu vozidla s přívěsem, popsat ho a ověřit jeho funkčnost.

## 2.1. Úkoly

- Seznámit se s principy funkce asistenta pro couvání vozidla s přívěsem.
- Navrhnout a sestavit experimentální model vozidla s přívěsem z komponent LEGO Mindstorms.
- Sestavit systém asistenta pro couvání v prostředí Matlab Simulink.
- Implementovat asistenta do experimentálního modelu a ověřit jeho funkčnost.

# 3. Současný stav zkoumané problematiky

O zkoumané problematice teoreticky pojednává několik internetových publikací, knih a odborných prací. Zkoumají ji jak z kinematického, tak dynamického pohledu a uvažují více či méně vlivů na ni.

Přístup použitý a popsaný v této práci vychází především z teoretické práce pana Bc. Ludvíka Bazjuka. Jeho bakalářská práce obsahuje komplexní zdroj informací o daném tématu včetně rovnic popisujících chování modelu. V bakalářské práci pana Bazjuka již je jakýsi jednoduchý virtuální model popsán a jeho fungování ověřeno pomocí simulace v programu Matlab.

O problematiku se zajímají i některé firmy automobilového průmyslu. Několika z nich se povedlo couvacího asistenta převést do praxe a nabídnout ho zákazníkům, nicméně jedná se vždy o nadstandartní výbavu pouze do jejich nových aut.

## 3.1. Couvací asistenti dostupní na trhu

Na začátku roku 2015 se jako první na trhu objevil couvací asistent ve vozech značky Volkswagen. O necelý rok později se přidala i další velká automobilka Ford Motor Company.

Do jednoho ze svých modelů aut nabízejí obě automobilky velice podobný systém couvacího asistenta. Konkrétně se jedná o Volkswagen Passat s jeho Trailer Assist a dále o Pro Trailer Backup Assist™ pro Ford F-150. Auta mají v zadní části připevněnou kameru a obraz z ní je přenášen na displej palubní desky (Obr. 1). Tam je pak dobře vidět směřování přívěsu. Řidič zařadí zpátečku, dívá se na kameru, brzdí nebo přidává plyn a ovládá točením speciálního ovladače vedle obrazovky směr přívěsu. Volantem otáčí řídící jednotka automobilu. Je to velice elegantní řešení, které alespoň podle předváděcích videí funguje velice přesně.

Zadní kamera Volkswagenu umí určit úhel natočení mezi vozidlem a přívěsem. U Fordu snímá zadní kamera pohyb speciálních pruhových nálepek na přívěsu a na základě jejich pohybu určuje úhel mezi vozidlem a přívěsem. Po zadání rozměrů přívěsu do palubního počítače funguje asistent i pro různé typy přívěsů.

Traliler Assist ve Volkswagenu Passat je v současnosti jediným couvacím asistentem dostupným na trhu v České republice [1] [2] [3] [4].

Obr. 1 – Displej palubní desky Fordu F-150 s couvacím asistentem – převzato z [5]

Firma TowGO se snaží nabídnout couvacího asistenta téměř všem typům vozů. Řidič točí volantem, couvá a na displeji chytrého telefonu se mu ukazuje předpokládaný směr přívěsu. Zařízení se skládá ze tří částí, které spolu bezdrátově komunikují. Senzor úhlu pro tažné zařízení, senzor na volant, který pomocí gyroskopů snímá natočení volantu a aplikace pro chytrý telefon. Výhodou je nenáročná instalace zařízení, nevýhodou pak může být jeho nepřesnost, použitelnost pouze na určitý typ tažného zařízení a také to, že se na displeji ukazuje pouze grafika zobrazující úhel, nikoliv pohled kamery. Jedná o americký Kickstarter projekt[1], který prozatím nemá dostatek objednávek na to, aby zahájil sériovou výrobu [6].

### 3.2. Poznatky o problematice

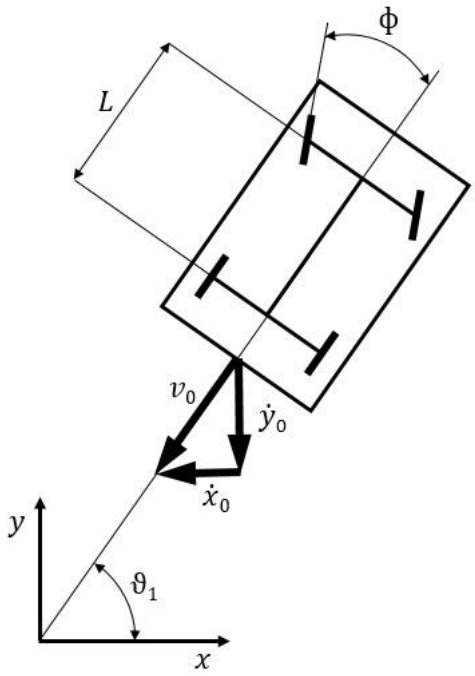
Nejprve je nutné se úlohou zabývat teoreticky. Zavést virtuální model vozidla s přívěsem a pomocí rovnic popsat chování modelu vozidla v závislosti na chování modelu přívěsu. Předpokládá se, že dynamika modelu na tento experiment nebude mít zásadní vliv a její účinky budou zanedbatelné, proto se bude jednat o kinematické rovnice. Z těchto rovnic pak získáme vztahy, které jsou jádrem couvacího asistenta.

Pro zjednodušení úlohy jsou zanedbány vlivy rozdílných rychlostí zadních kol při zatáčení modelu automobilu a potřeby různých natočení předních kol. Automobil je pro výpočty uvažován jako motorka, tedy jednostopé vozidlo. Model přívěsu má jednu nápravu a není u něj uvažováno žádné zjednodušení. Pokud by měl přívěs náprav více, rovnice pro něj budou platit za podobných zjednodušení jako u modelu automobilu. Na tento konkrétní experiment tato zjednodušení a zanedbání nemají zásadní vliv. Při vytváření couvacího asistenta pro reálný automobil je jejich vliv nutné důkladněji prozkoumat.

[1] Kickstarter projekt – Internetová platforma pro financování projektů. Projekty mezi sebou soupeří o přímé finanční příspěvky lidí, které rozhodnou o dalším osudu projektu.

### 3.2.1. Přehled proměnných pro popis pohybu vozidla a přívěsu

Nejprve je potřeba zavést zvlášť proměnné významné pro popsání pohybu modelu vozidla a modelu přívěsu. Popsané jsou pomocí obrázků, na kterých jsou vozidlo i přívěs nakresleny v obecné poloze a je na nich naznačen jejich vektorový součin osových rychlostí. Proměnné modelu vozidla a jeho kinematika jsou znázorněny na Obr. 2, a podrobněji popsány v tabulce pod ním (Tab. 1).



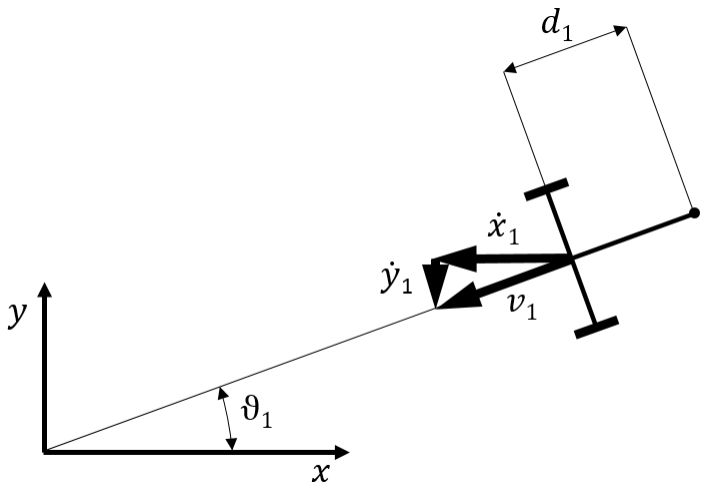

Obr. 2 – Pohyb modelu vozidla

**Přehled proměnných – Pohyb modelu vozidla**

| | |
|---|---|
| $\boldsymbol{v_0}$ | Tečná rychlost vozidla |
| $\boldsymbol{\dot{x}_0}$ | Rychlost v ose x |
| $\boldsymbol{\dot{y}_0}$ | Rychlost v ose y |
| $\boldsymbol{\vartheta_1}$ | Absolutní úhel natočení vozidla |
| ϕ | Úhel natočení předních kol |
| $\boldsymbol{L}$ | Rozvor vozidla |

Tab. 1 - Přehled proměnných – Pohyb modelu vozidla

Kinematika a proměnné důležité pro pohyb přívěsu jsou zobrazeny na Obr. 3. Vysvětleny pak v tabulce pod ním (Tab. 2).




Obr. 3 –Pohyb modelu přívěsu

**Přehled proměnných – Pohyb modelu přívěsu**

| | |
|---|---|
| $\boldsymbol{v_1}$ | Tečná rychlost přívěsu |
| $\boldsymbol{\dot{x}_1}$ | Rychlost přívěsu v ose x |
| $\boldsymbol{\dot{y}_1}$ | Rychlost přívěsu v ose y |
| $\boldsymbol{\vartheta_0}$ | Absolutní úhel natočení přívěsu |
| $\boldsymbol{d_1}$ | Vzdálenost tažného zař. od nápravy přívěsu |

Tab. 2 - Přehled proměnných – Pohyb modelu přívěsu

### 3.2.2. Závislost pohybu vozidla na pohybu přívěsu

V této kapitole dochází ke spojení vozidla s přívěsem. Postup je obdobný jako v [7]. Rovnice (3.1),(3.2) a (3.3) vyjadřují pohyb přívěsu v souřadnicovém systému $xy$, kde $\dot{x}_1$ a $\dot{y}_1$ jsou jeho rychlosti v příslušných osách a $\dot{\vartheta}_1$ je jeho úlová rychlost (Obr. 3).

Dále rovnice (3.4), (3.5) a (3.6), vyjadřují závislost rychlostí vozidla $\dot{x}_0$ a $\dot{y}_0$ v příslušných osách $xy$ a jeho úhlové rychlosti, na tečné a úhlové rychlosti přívěsu (Obr. 2). Další konstanty a proměnné vystupující v rovnicích jsou popsány v Tab. 3.

Tyto rovnice jsou sestavené pro ideální model, který musí splňovat podmínku $d_0 \neq 0$. Pokud by podmínka nebyla splněna a přívěs by byl uchycen přímo uprostřed zadní nápravy vozidla, bylo by nutné použít rovnice jiného modelu [7].

Dalším limitujícím prvkem je předpoklad, že v reálném modelu vozidla s přívěsem musí úhel natočení mezi nimi ($\varphi_{10}$) vždy splňovat nerovnost $|\varphi_{10}| < |\varphi_{10max}|$. Při překročení maximálního úhlu natočení mezi vozidlem a přívěsem ztratí couvací asistent schopnost ovládat přívěs. Tato schopnost bude obnovena, pokud nerovnost začne opět platit.

$$\dot{x}_1 = v_1 \cos \vartheta_1 \tag{3.1}$$

$$\dot{y}_1 = v_1 \sin \vartheta_1 \tag{3.2}$$

$$\dot{\vartheta}_1 = \omega_1 = fce(t) \tag{3.3}$$

$$\dot{x}_0 = (v_1 \cos \varphi_{10} + \omega_1 d_1 \sin \varphi_{10}) \cos \vartheta_0 \tag{3.4}$$

$$\dot{y}_0 = (v_1 \cos \varphi_{10} + \omega_1 d_1 \sin \varphi_{10}) \sin \vartheta_0 \tag{3.5}$$

$$\dot{\vartheta}_0 = \omega_0 = \frac{v_1}{d_0} \sin \varphi_{10} - \frac{\omega_1 d_1}{d_0} \cos \varphi_{10} \tag{3.6}$$

Pro řízení vozidla couvacím asistentem je nutné znát jeho potřebnou tečnou a úhlovou rychlost $v_0$ a $\omega_0$ v závislosti na tečné a úhlové rychlosti přívěsu $v_1$ a $\omega_1$. Vstupem do funkce couvacího asistenta jsou právě proměnné $v_1$ a $\omega_1$, které však nejsou funkcí času, ale hodnot získaných přímo z ovladače přívěsu. Po vektorovém součtu $\dot{x}_1$ a $\dot{y}_1$ ((3.1) a (3.2)) a vektorovém součtu $\dot{x}_0$ a $\dot{y}_0$ ((3.4),(3.5)) získáme vhodnější tvary (3.7) a (3.9) . Výsledkem jsou rovnice vhodné pro řídící funkci couvacího asistenta (3.7),(3.8),(3.9) a (3.6), odpovídající Obr. 4. Proměnné použité v Obr. 4 jsou vysvětleny v Tab. 3.

$$v_1 = fce(a) \tag{3.7}$$

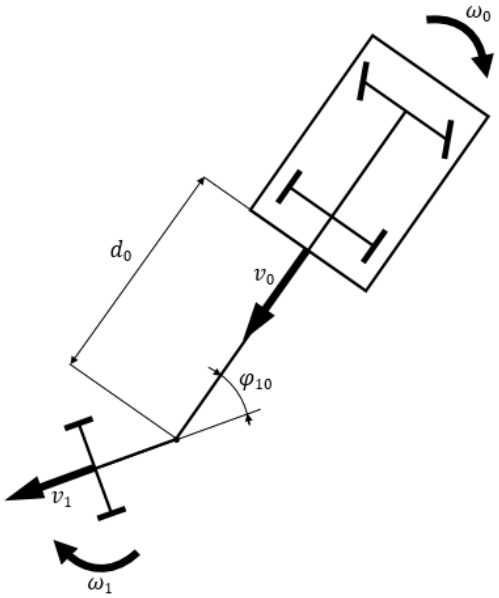
*(POZN. hodnotu a definuje řidič)*

$$\omega_1 = fce(b) \tag{3.8}$$

*(POZN. hodnotu b definuje řidič)*

$$v_0 = v_1 \cos \varphi_{10} + \omega_1 d_1 \sin \varphi_{10} \tag{3.9}$$

$$\omega_0 = \frac{v_1}{d_0} \sin \varphi_{10} - \frac{\omega_1 d_1}{d_0} \cos \varphi_{10} \tag{3.6}$$




Obr. 4 – Couvání vozidla s přívěsem

**Přehled proměnných – Couvání vozidla s přívěsem**

| | |
|---|---|
| $\boldsymbol{v_1}$ | Tečná rychlost přívěsu |
| $\boldsymbol{\omega_1}$ | Úhlová rychlost přívěsu |
| $\boldsymbol{v_0}$ | Tečná rychlost vozidla |
| $\boldsymbol{\omega_0}$ | Úhlová rychlost vozidla |
| $\boldsymbol{\varphi_{10}}$ | Absolutní úhel natočení přívěsu |
| $\boldsymbol{d_0}$ | Vzdálenost tažného zař. od zadní nápravy vozidla |

Tab. 3 - Přehled proměnných – Couvání vozidla s přívěsem

### 3.2.3. Úhel natočení předních kol vozidla

Pro ovládání auta je stěžejní znát úhel natočení předních kol $\phi$ v závislosti na již známé úhlové rychlosti $\omega_0$. Tento vztah popisuje rovnice (3.10) .

$$\omega_0 = \frac{v_0}{L} \tan \phi \tag{3.10}$$

Z něj pak snadno vyjádříme $\phi$, o které mají být v danou chvíli natočená přední kola vozidla (3.11).

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_0 L}{v_0}\right) \tag{3.11}$$

# 4. Nástroje pro realizaci práce

## 4.1. LEGO MINDSTORMS

LEGO MINDSTORMS je pro stavbu experimentálního modelu ideální. Nabízí celou škálu motorů a dílků, které je možné ještě doplnit speciálními rozšiřujícími sety. Díky variabilitě stavebnice je možné z jejích prvků vytvořit různé typy modelů vozidel a měnit dle potřeby jen jejich části, což je při hledání vhodného modelu výborná vlastnost. Neméně důležitá je snadno programovatelná řídící jednotka, také nazývaná LEGO kostka, dodávaná ke stavebnici. Napájí jí ji 6 tužkových baterií nebo akumulátor.

V současné době firma LEGO nabízí dvě varianty stavebnice MINDSTORMS. Starší verzi NXT, která má 4 vstupní a 3 výstupní porty. Vzhledem k času, po který je dostupná na trhu, je její výhodou široká podpora originálních i neoriginálních dílů. Nevýhodou pak může být pomalejší rychlost oproti novějšímu modelu, či nutnost drátové komunikace s počítačem při nahrávání programu. Novější verze nese název EV3 a disponuje 4 vstupními a 4 výstupními porty. Je o poznání rychlejší než starší NXT a umožňuje bezdrátovou komunikaci s počítačem i při nahrávání nového programu. Nemá však zatím takovou podporu neoriginálních dílů a programů jako NXT.

S ohledem na lepší dostupnost a další zmíněné výhody byla pro sestavení experimentálního modelu zvolena verze EV3.

## 4.2. Matlab Simulink

Vhodné prostředí pro vytváření řídících schémat je program Matlab Simulink. Konkrétně je v této práci používána verze Matlab R2015b. Velkou výhodou je komptabilita se stavebnicí LEGO MINDSTORMS. Vývojáři od Mathworks nabízejí oficiální doplňující balíček pro NXT i pro EV3. Matlab Simulink je možné získat na oficiálních webových stránkách http://www.mathworks.com/.

# 5. Výroba vlastních součástí modelu

Zásadní informace pro funkci couvacího asistenta, kterou nutně potřebuje znát je úhel mezi vozidlem a přívěsem $\varphi_{10}$. Je nutné vyřešit problém, jak tento úhel číst. Stavebnice LEGO Mindstorms obsahuje motory, které umí odeslat údaj o jejich natočení nebo takzvaný Gyrosenzor, který může kromě zrychlení vysílat i informaci o svém natočení. Použitím dvou Gyrosenzorů tedy lze odečítat úhel $\varphi_{10}$. Nicméně přesnost takového odečítaní je $\pm 1°$, chyba navíc s časem roste a po dvaceti sekundách jsou tyto údaje velmi nepřesné.

V úvahu také připadají motory z této stavebnice, které umí odeslat informaci o jejich natočení, ale jsou nevhodné pro příliš velký odpor proti otáčení způsobený převodem. Oficiální i neoficiální prodávaná rotační čidla bohužel pro LEGO Mindstorms nelze použít, protože nejsou podporované Matlabem.

Řešením je sestavit si vlastní senzor kompatibilní s kostkou LEGO EV3, který je dále uváděn jako rotační čidlo.

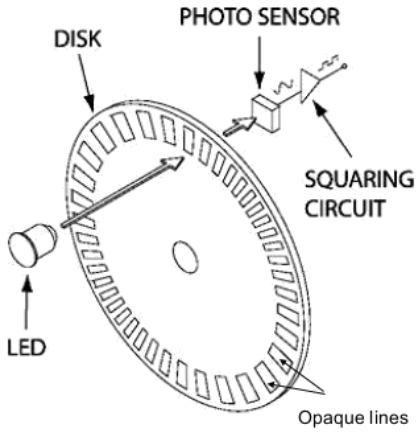
Pro pohodlné ovládání je také třeba vyrobit dostatečně dlouhé kabely, které vedou k ovladači.

### 5.1. Rotační čidlo pro LEGO Mindstorms

LEGO lze ‘‘obelhat‘‘ a číst úhel natočení z vlastního čidla pokud se tváří a vysílá stejné signály jako LEGO motor. Není tak problém ani s komptabilitou, protože tuto funkci motoru Matlab podporuje. Signály z motoru vysílá malý optický inkrementální enkodér, jeho rozlišení však bez převodovky není dostatečné. Nahradíme ho proto větším dostatečně přesným.

#### 5.1.1. Princip optického inkrementální enkodéru

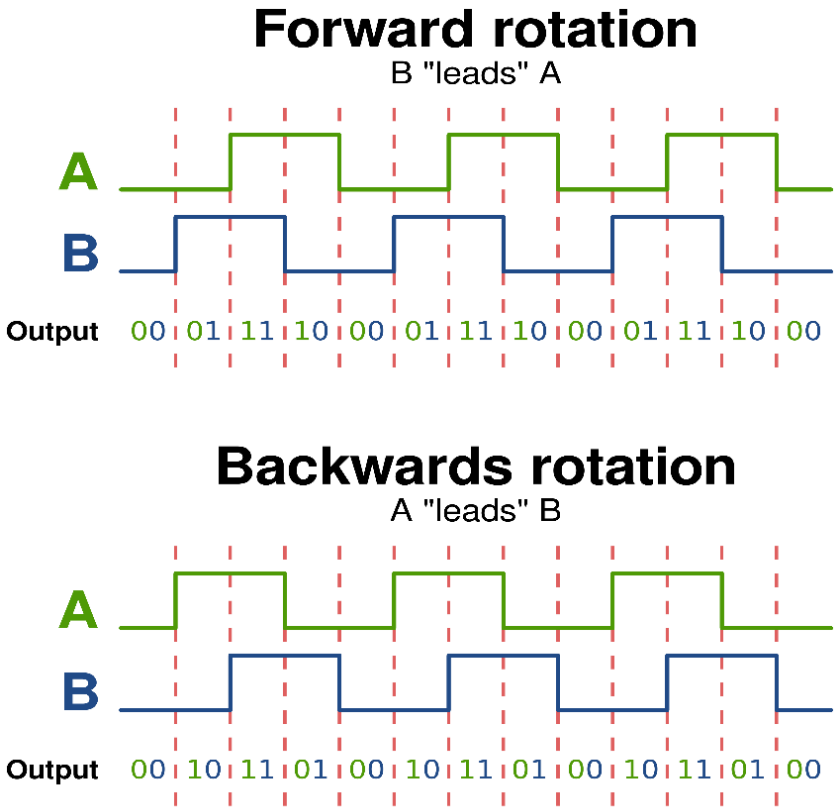
Základním principem optického inkrementální enkodéru (čidla) je detekování přítomnosti či nepřítomnosti světla na přijímači. Světlo je vysíláno z diody přes kotouč s dírami, tudíž otáčení kotouče na přijímači způsobuje změny napětí v důsledku změny množství detekovaného světla, viz Obr. 5. Lze tak zjistit, o kolik se kotouč pootočil [8].




Obr. 5 – Princip optického inkrementálního enkodéru – převzato z [9]

Optický inkrementální kvadraturní enkodér má ještě jeden senzor, který je umístěn tak, že jeho signál je s původním signálem fázově posunut o 90°. Jeho výstupem jsou poté dva kanály A a B, na kterých při otáčení čidlem naměříme signály (pulzy), vzájemně fázově

posunuté. Software (např. v kostce EV3) dále převede pulzy jednotlivých kanálů na posloupnost jedniček a nul podle přítomnosti respektive nepřítomnosti signálu. Z posloupnosti pak pozná, zda se jedná o rotaci "dopředu" (Foward rotation) nebo rotaci "dozadu" (Backwards rotation) viz Obr. 6. Díky tomu můžeme kromě pootočení určit i směr pohybu [10].




Obr. 6 - Výstup optického inkrementálního enkodéru – převzato z [4]

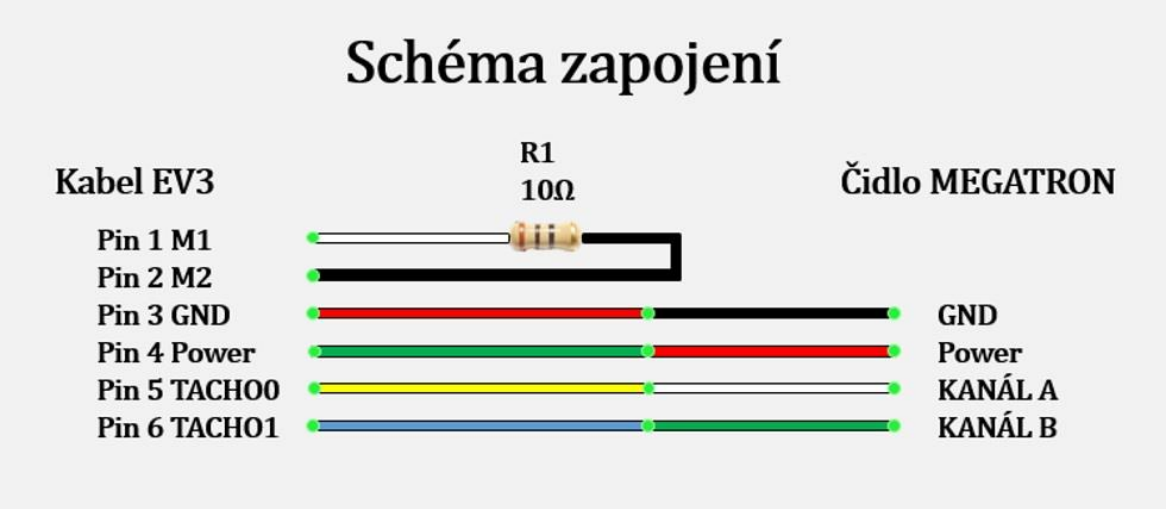
U inkrementálních enkodérů je důležité jejich rozlišení. Čím je větší, tím je čidlo přesnější, avšak také náročnější na výrobu a zvyšuje se jeho cena. Obzvlášť u dražších čidel enkodérů se totiž jedná o přesnou mechaniku a díry (drážky) v kotouči musí být velmi malé a přesné. Rozlišení se udává v ppr (pulses per revolution) neboli v počtu pulzů za otáčku. Pokud vydělíme 360° tímto údajem, zjistíme, jaké nejmenší pootočení ve stupních bude enkodér rozlišovat.

### 5.1.2. Zapojení rotačního čidla

Pro rotační čidlo je zvolen rotační enkodér značky Megatron s napájecím napětím 5V, což přibližně odpovídá výstupu z NXT/EV3. Jeho rozlišení je 2000 ppr proto úhly natočení rozeznává s přesností $\pm 0{,}09°$. Tato přesnost je pro tuto aplikaci dostatečná. Cena čidel se rozlišením 2000 ppr se pohybuje kolem 1000-2000 Kč.

Čidlo je třeba zapojit podle schématu na Obr. 7. Vlevo jsou výstupy jednotlivých pinů NXT/EV3, jejichž pořadí a barvy odpovídají originálním NXT/EV3 kabelům. Vpravo jsou pak výstupy z čidla Megatron.

Piny 1 a 2 slouží k napájení a řízení motoru. Jsou propojeny odporem 10Ω, který simuluje odpor vinutí motoru. Bez této úpravy by LEGO nepovažovalo čidlo za motor a nekomunikovalo by s ním. Pin 3 je ground (zem) a pin 4 je naopak power (napájení). Tyto LEGO výstupy se spojí se stejně pojmenovanými výstupy inkrementálního enkodéru Megatron. Piny 5 a 6 jsou obzvlášť důležité, neboť se spojí s kanálem A a B inkrementálního enkodéru a přenáší informace o jeho změně jeho natočení.




Obr. 7 – Schéma zapojení rotačního čidla

Piny levé strany musí být možné zasunout do zásuvky NXT/EV3. Ta má sama o sobě specifické rozměry pouze pro originální NXT/EV3 konektor. Je několik možností jak do ní toto nově sestavené čidlo připojit.

První možností je přestřihnout originální kabel a jeho polovinu využít pro připojení k inkrementálnímu enkodéru.

Druhou možností je zakoupit originální konektory spolu se speciálními kleštěmi pro nacvaknutí pinů do konektoru. Tato možnost je však nejnákladnější.

Nejekonomičtější možností je možnost třetí. Vyrobení si vlastních konektorů z běžně dostupných telefonních konektorů. Tato možnost byla použita v této práci také pro vytvoření vlastních delších kabelů. Podrobněji je popsána v následující kapitole.

Obr. 8 – Vlastní rotační čidlo

### 5.2. Kabely

Konektory u kabelů pro NXT/EV3 se velmi podobají šesti-žilovým telefonním konektorům s označením MODULAR RJ12 6p6c. S malou úpravou, je lze použít místo originálních NXT/EV3 konektorů a po nacvaknutí na šesti-žilový telefonní kabel AWG28, vzniknou vlastní kabely kompatibilní s NXT/EV3.

Když jsou kabely nastříhány na požadovanou délku, je třeba nacvaknout telefonní konektory na konce kabelů pomocí specializovaných krimpovacích kleští. Poté se konektory upraví podle Obr. 9, na kterém je vlevo telefonní konektor a vpravo originální konektor NXT/EV3.

V čelní části se musí zbrousit, případně odříznout celá oblast *A*. Dále je třeba upravit jazýček v horní části konektoru.

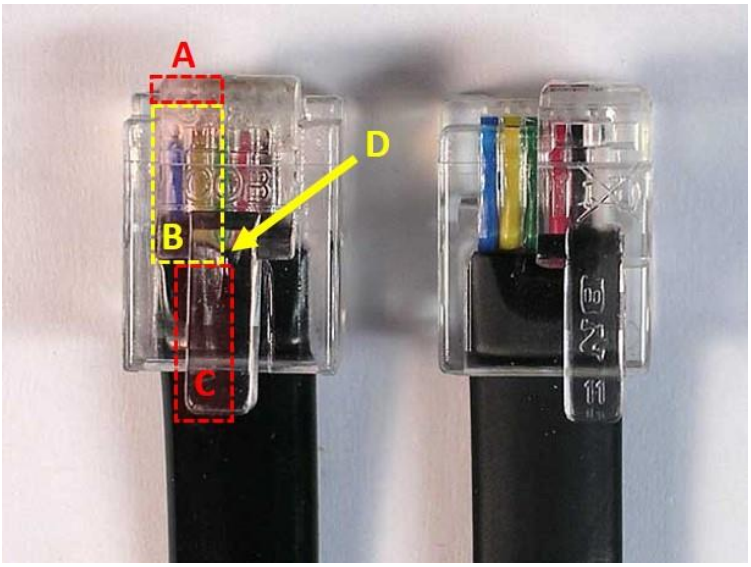
Oblast *B* je část jazýčku pevně spojená se zbytkem konektoru. Tu je nutné odříznutím odebrat a zarovnat do roviny těla konektoru.

Oblast *C* je na části jazýčku, který visí ve vzduchu. Je možné odebrat oblast *C* tak, jak je na obrázku a získat tak možnost pohodlného vysouvání konektoru ze zásuvky (pomocí zbytku jazýčku) nebo lze oblast rozšířit doprava a odebrat jazýček celý.

V druhém případě bude pro vysunutí konektoru ze zásuvky nutné použít nějaký úzký dlouhý předmět, např. párátko.

Konektor v zásuvce drží pomocí rohu *D*, který je mezi oblastmi *B* a *C*. Důležité je dát pozor, aby roh *D* byl dostatečně ostrý a pokud možno trochu vystouplý nahoru. Díky tomu konektor drží zasunutý v zásuvce.

Kabely nejsou stíněné, ale při jejich délce 2 metry se rušení ani jiné ztráty neprojevily.




Obr. 9 - Konektor RJ12 6p6c a konektor NXT/EV3 – upraveno po převzetí z [11]

# 6. Vhodná konstrukce modelu

Konstrukce modelu musí splňovat některá základní kritéria. Pro demonstrativnost modelu je vhodné, aby svou konstrukcí připomínal reálný osobní automobil a přívěs. Dále jsou tu prvky nutné pro správnou funkci parkovacího asistenta. Konktrétně se jedná o co nejpřesnější natáčení předních kol a využití vyrobeného rotačního čidla k měření úhlu natočení mezi vozidlem a přívěsem. V neposlední řadě se nesmí opomenout kritérium uvedené v kapitole 3.2.2, tedy že spojení mezi vozidlem a přívěsem nesmí být umístěno v ose zadní nápravy.

Vhodná konstrukce pro aplikaci parkovacího asistenta na Obr. 10 je nejlepším výsledkem několika různých vyzkoušených konstrukcí, protože splňuje výše uvedená kritéria. Detailní postup k jejímu kompletnímu sestavení je součástí této práce jako příloha na CD. V následujících kapitolách jsou popsány nejdůležitější prvky této konstrukce.

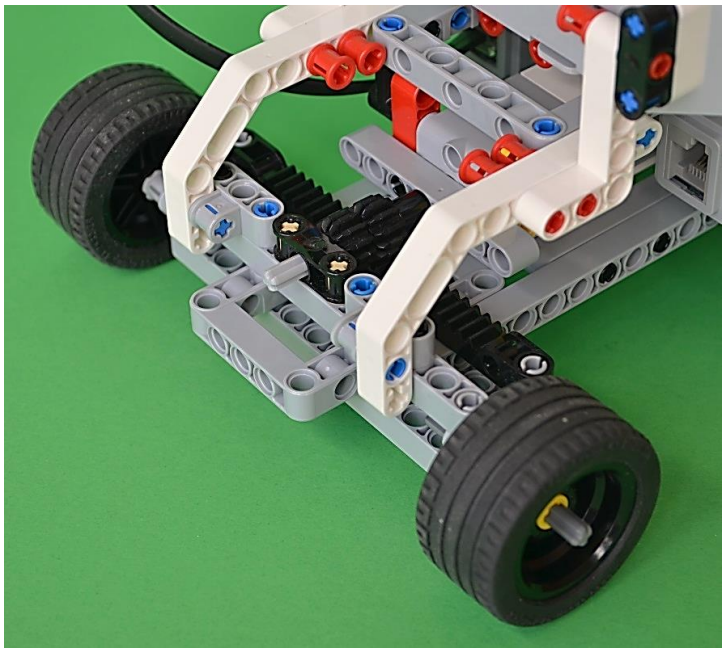
Konstrukce je zhotovena z dílků LEGO Mindstorms. Při jejím popisu jsou použité pojmy jako nosník, čep nebo kolík díly právě z této stavebnice.

Obr. 10 – Vhodná kostrukce modelu vozidla s přívěsem

### 6.1. Zatáčení předních kol

Parkovací asistent přikazuje modelu vozidla, jak má natočit přední kola tak, aby přívěs jel požadovaným směrem. Je nutné tedy najít dostatečně přesný způsob natáčení předních kol.

Ukázalo se, že řízení pomocí převodů z ozubených kol obsažených ve stavebnici je nepřesné, protože kola mají mezi sebou příliš velké vůle. Při jejich použití, se odchylka natočení předních kol pohybuje v rozmezí $\pm 10°$. Uspokojivou alternativou je hřebenové řízení, které je na Obr. 11. To vykazuje odchylku asi 5x menší tedy ±2°. Tím minimalizuje vůli řízení.



Obr. 11 – Hřebenové řízení

Střední motor je umístěn v podvozku vozidla. Z přední části z něj vychází hřídel, která se otáčí. Na ní jsou nasunuty dvě černá ozubená kola s 12 zuby, která dosedají na hřeben pod nimi. Ozubená kola musí být dvě, aby při pohybu hřebenu bylo vždy alespoň jedno v záběru. Základem přední nápravy jsou dva nosníky velikosti 13. Ty jsou na krajích spojeny a mezi nimi je mezera jedné díry (jsou spojeny prvkem dlouhým jako nosník velikosti 3, přičemž prostřední díra je neobsazená). Přední nosník je pevně uchycen k podvozku automobilu. Na zadním nosníku je uchycen hřeben, který se spolu s ním může pohybovat do stran a dopředu (po kružnici), čímž vozidlo zatáčí.

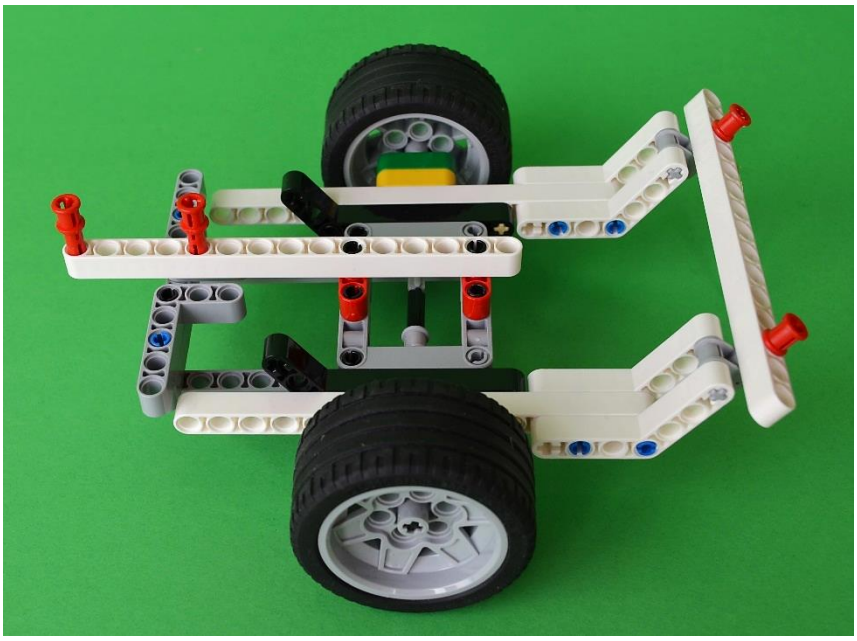
Rozteč zubů hřebenu je 3,2 mm, ozubená kola mají 12 zubů a díry LEGO nosníků mají rozteč 8 mm. Při otočení motoru o jednu čtvrtinu otáčky se tedy hřeben posune o $3 \cdot 3{,}2$ mm. Rameno mezi nosníky zůstane stejné, jeho velikost je $2 \cdot 8$ mm. Úhel natočení potom určíme podle vztahu (6.1).

$$\alpha_{\frac{1}{4}} = \sin^{-1}\frac{3 \cdot 3{,}2}{2 \cdot 8} = 36{,}87° \tag{6.1}$$

Z toho vyplývá, že pokud by se motor pootočil o celou otáčku, úhel natočení kol by se rovnal $\alpha = 148{,}48°$ . Prakticky takový úhel natočení předních kol konstrukce neumožňuje, nicméně se tato hodnota používá při výpočtu převodového poměru.

### 6.2. Konstrukce modelu přívěsu

Konstrukce modelu přívěsu může být téměř libovolná. Cílem zůstává jen to, aby pro demonstrativnost model co nejvíce připomínal skutečný přívěs a bylo ho snadno možné připojit či odpojit k modelu vozidla. Byl zvolen přívěs s jednou nápravou. Poměr rozměrů modelu přívěsu vůči modelu vozidla přibližně odpovídá poměru rozměrů mezi skutečným vozidlem a skutečným přívěsem. Model přívěsu je vidět na Obr. 12.



Obr. 12 – Model přívěsu

Jeho spojení s vozidlem je zajištěno pomocí bílého nosníku velikosti 15, který je umístěn ve středu přívěsu rovnoběžně se směrem pohybu. Pod jeho přední část se zasune z $\frac{5}{7}$ šedý nosník velikosti 7, vycházející od rotačního čidla (Obr. 14) a zajistí se dvěma červenými kolíky. Výsledné spojení modelu vozidla s přívěsem je dobře viditelné na Obr. 10.

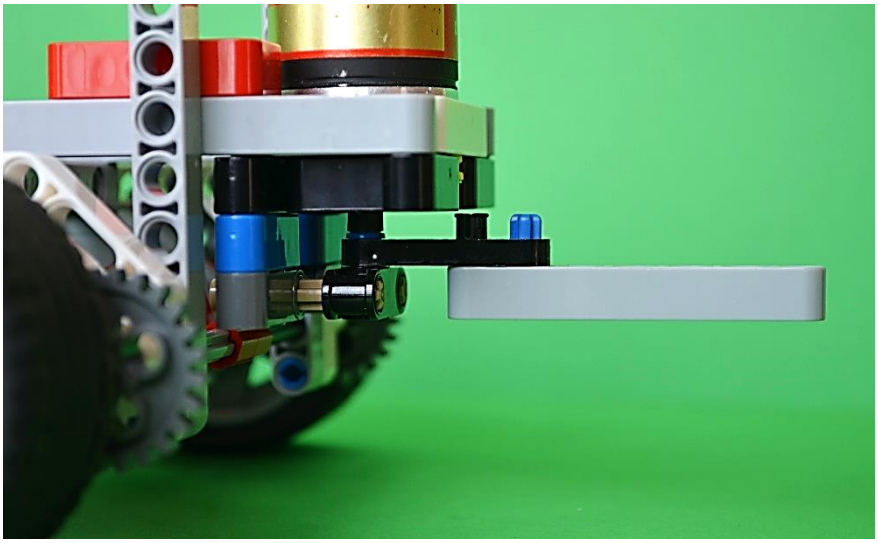
### 6.3. Umístění rotačního čidla

Vhodné je umístit rotační čidlo tak, aby jeho výstupní hřídel mířila směrem k zemi. Čidlo má ze strany výstupního hřídele, na ploše k němu kolmé vyvrtané dvě díry pro uchycení, se závitem M3. Výstupní hřídel čidla a díry pro uchycení jsou patrné na Obr. 8.

Čidlo je přichyceno k nosníkům tvaru L pomocí dvou šroubů ČSN 02 1130.20 - M3 x 15. Šrouby procházejí dírou nosníku a pod hlavou mají nejprve žlutou LEGO podložku, pod ní pak podložku ISO 7089 – 3 (Obr. 13). Nosníky tvaru L tvoří rám čidla, který je připevněn k modelu vozidla. Hřídel čidla je stažena spolu s polovinou modrého čepu izolační páskou, která se působením tepla smršťuje.

Díky tomu dojde k rozebíratelnému a zároveň dostatečně pevnému spojení. Na části druhé poloviny modrého čepu je nasunut poloviční černý nosník, zbytek čepu je uchycen v dalším LEGO dílku, čímž je zajištěna jeho osa ve vertikální poloze. Černý nosník je pak spojen s šedým nosíkem velikosti 7, kterým se model vozidla spojuje s modelem přívěsu. Rotační čidlo umístěné v zadní části vozidla je na Obr. 14.

Obr. 13 – Přichycení rotačního čidla



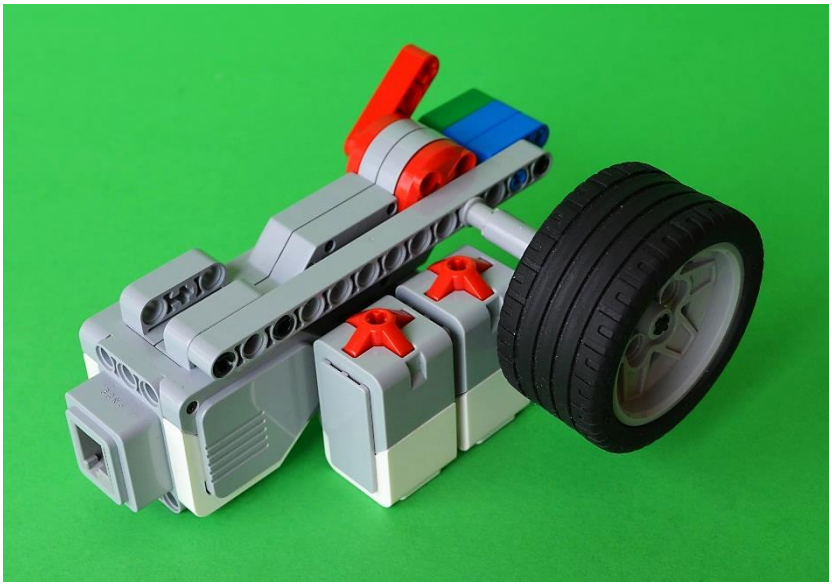
Obr. 14 – Úmístění rotačního čidla

### 6.4. Ovladač

Ovladač, kterým se řídí přívěs, je rovněž postaven z dílů stavebnice LEGO Mindstorms (viz Obr. 15). Jeho základem je velký motor. Osou motoru prochází hřídel. Na jejím levém konci je připevněn červený nosník, jehož poloha uživateli dává představu o natočení motoru. Na pravém konci je kolo, při jehož pootočení uživatelem dojde i k pootočení motoru. Natáčením motoru ovladače je po vynásobení konstantou couvacímu asistentovi udávána požadovaná úhlová rychlost přívěsu $\omega_1$ .

K motoru jsou po straně připevněny dva dotykové senzory. Při stisknutí předního z nich vozidlo s přívěsem couvá a je v provozu couvací asistent. Přívěs se tedy chová jakoby "táhnul" vozidlo. Vozidlo se podřizuje, aby vyhovělo danému směru přívěsu, který definuje uživatel. Při stisknutí zadního tlačítka vozidlo přejde do normálního režimu, tedy pohybuje se dopředu a uživatel řídí natočení předních kol.

Uživatel drží ovladač v levé ruce. Palcem levé ruky mačká dotykové senzory, zatímco pravou rukou otáčí kolem. Ovladač je spojen s počítačem LEGO EV3 pomocí dlouhých kabelů (popsaných v kapitole 5.2 na straně 19)



Obr. 15 – Ovladač modelu

### 6.5. Tabulka významných rozměrů modelu vozidla a přívěsu

Některé z potřebných rozměrů již byly uvedeny v předchozích kapitolách. Hodnoty rozměrů, které musí program couvacího asistenta znát, byly naměřeny po sestavení modelu vozidla a modelu přívěsu. Tyto rozměry jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 4).

**Tabulka významných rozměrů modelu vozidla a přívěsu**

| | | |
|---|---|---|
| $L$ | Rozvor vozidla | 0,168 m |
| $d_1$ | Vzdálenost tažného zař. od nápravy přívěsu | 0,118 m |
| $d_0$ | Vzdálenost tažného zař. od zadní nápravy vozidla | 0,044 m |
| $p_k$ | Průměr kola zadní nápravy vozidla | 0,056 m |

Tab. 4 - Tabulka významných rozměrů modelu vozidla a přívěsu

# 7. Vytvoření programu couvacího asistenta

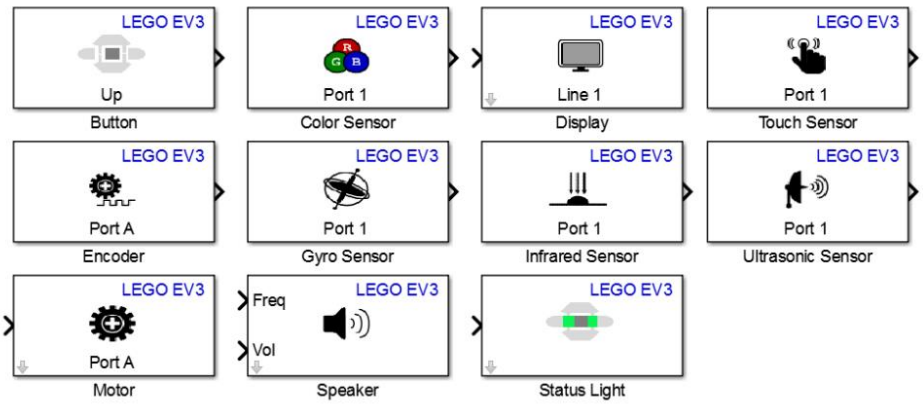
Funkce je vytvořena v prostředí Matlab Simulink pomocí blokových schémat. Jedná se o velmi přehlednou a efektivní metodu programování. Uživatel si z knihovny vybere bloky, které potřebuje, ty pak mezi sebou spojuje a vytváří z nich logické obvody. Mezi těmito bloky jsou například bloky vstupů a výstupů, matematických nebo logických funkcí a mnoho dalších. Soubory schémat vytvořených v programu Matlab Simulink se nazývají modely.

## 7.1. Doplněk LEGO EV3 pro Matlab Simulink

Doplněk LEGO EV3 je nezbytný pro komunikaci programu Matlab Simulink s počítačem LEGO EV3. Umožňuje kompilovat modely programu Matlab Simulink tak, aby je bylo možné spustit na kostce EV3. Obsahuje také bloky vstupů a výstupů LEGA EV3 pro Simulink, takže je v něm možné číst údaje z LEGO senzorů nebo ovládat motory. Doplněk je dostupný na oficiálních stránkách Matlabu http://www.mathworks.com/.

Bloky, které se po nainstalování doplňku LEGO EV3 objeví v knihovně Matlab Simulink, jsou na Obr. 16. Následuje přehled bloků pro kostku EV3, použitých v této práci, s jejich stručným popisem.

- **Display** – vypíše krátký text na obrazovku kostky EV3, na jeho vstup lze přidat hodnotu proměnné, která se zobrazí za textem
- **Touch Senzor** – dotykový senzor, vysílá hodnotu 1 nebo 0 (stisknuto nebo nestisknuto)
- **Button** – jedná se o 5 tlačítek na kostce EV3, mají stejný význam jako Touch Senzor
- **Encoder** – udává hodnotu natočení motoru A,B,C nebo D ve stupních
- **Motor** – ovládá výkon motoru, přijímá hodnoty <-100;100> (záporné hodnoty točí motorem v opačném směru)
- **Speaker** – reproduktor, vydává zvuky o různých frekvencích a s různou hlasitostí
- **Status Light** – ovládá světlo kostky EV3, které má tři různé barvy: červenou, oranžovou, zelenou



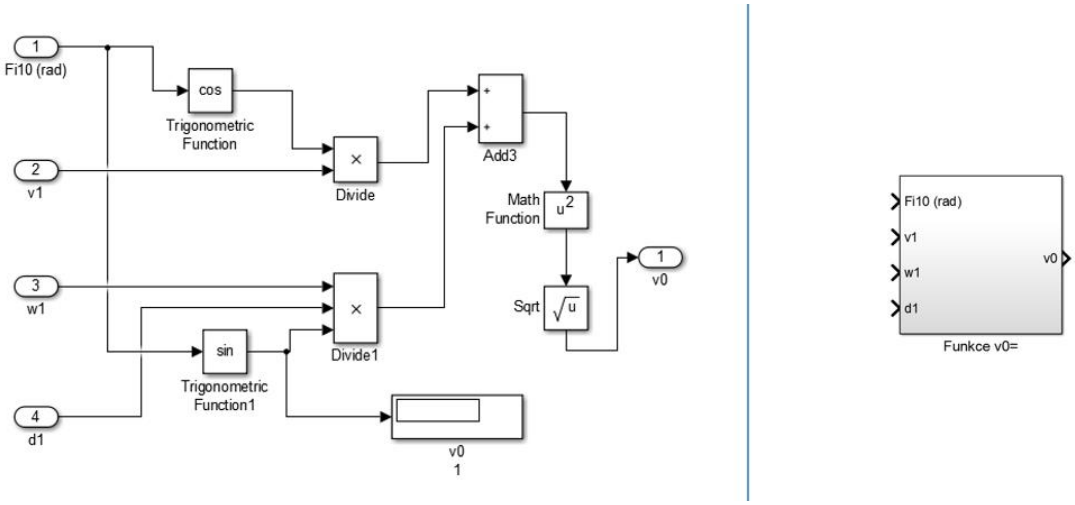

Obr. 16 – Bloky v programu Matlab Simulink pro LEGO EV3

### 7.2. Vytvoření bloků kinematických rovnic

Simulink umožňuje tvořit vlastní bloky zvané masky s vlastními vstupy, výstupy a vnitřní funkcí. Schémata složitějších modelů se tím zpřehlední. Jednotlivé části se schovají do vlastních bloků, které se pak mezi sebou propojí. Tato funkce programu je využita například pro vytvoření bloků základních rovnic couvacího asistenta. Jádrem couvacího asistenta jsou rovnice (3.6),(3.9) a (3.11). Každá má v modelu couvacího asistenta svůj blok, jejichž výstupy jsou $\omega_0, v_0$ a $\phi$. Vstupy jsou proměnné obsažené v těchto rovnicích.

Jako příklad je na Obr. 17 zobrazen blok rovnice (3.9). V levé části obrázku vidíme vnitřní schéma bloku složené z různých matematických bloků Matlab Simulink. Vpravo je levá část zabalená do výsledného bloku.

$$v_0 = v_1 \cos \varphi_{10} + \omega_1 d_1 \sin \varphi_{10} \tag{3.9}$$




Obr. 17 - Blok rovnice (3.9), vlevo vnitřní schéma bloku, vpravo výsledný blok

Stejně jako rovnice (3.9) jsou v modelu couvacího asistenta vytvořeny bloky i pro rovnice (3.6) a (3.11).

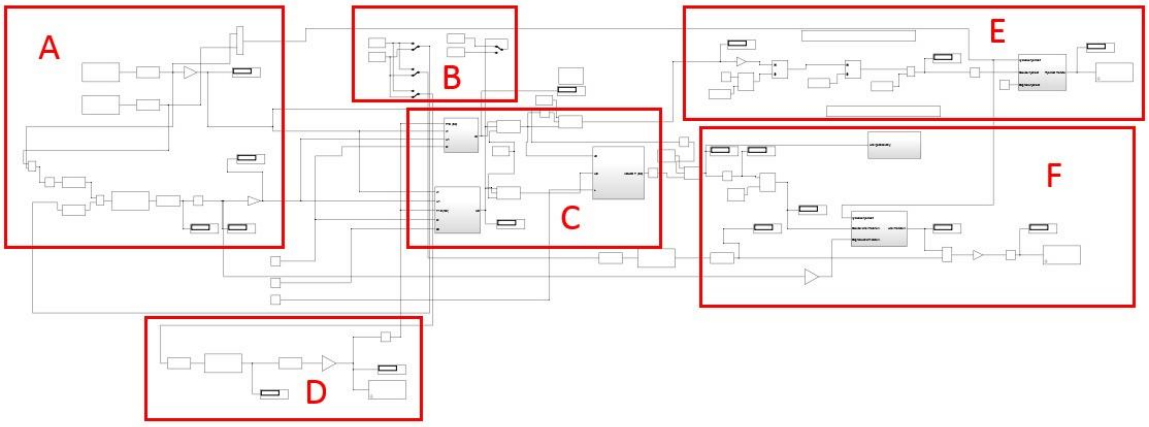
### 7.3. Rychlost modelu vozidla

Blok motoru neumí řídit otáčky. Do motoru vstupují hodnoty, které blok motor uvažuje jako % výkonu, který pustí do motoru. Například při vstupu 0 se motor netočí a při vstupu 100 se točí maximální rychlostí. Nicméně z funkcí couvacího asistenta vychází hodnota požadované rychlosti vozidla $v_0$ v jednotkách m/s. Tento problém byl vyřešen pomocí experimentu, kdy byly postupně zjištěny otáčky motoru po desítkách % výkonu. Údaje byly uvedeny do tabulky, vytvořen graf závislosti otáček na procentech výkonu a body grafu aproximovány lineární funkcí. Ta je pak užita k určení potřebných procent energie, aby vozidlo jelo požadovanou rychlostí.

### 7.4. Výsledný model couvacího asistenta

Pro vysvětlení výsledného modelu couvacího asistenta v programu Simulink vytvořeného v této práci je na Obr. 18 schéma modelu rozděleno na několik oblastí A-F.

- **Oblast A** obsahuje v horní části vstupy tlačítek ovladače. Určuje, zda je aktivní couvací asistent nebo normální ovládání vozidla. Vstupy z tlačítek jsou vynásobeny konstantou a určují konstantní rychlost vozidla nebo přívěsu. V dolní části oblasti je blok encoder motoru ovladače. Jeho výstup je rovněž násoben konstantou a podle aktivního režimu určuje úhlovou rychlost přívěsu $\omega_1$ nebo úhel natočení předních kol.
- **Oblast B** zahrnuje pojistky modelu, které umožnují vypínání některých částí modelu, či nulování některých čidel. Je vhodná k využití pro další vývoj modelu nebo při spuštění modelu v tzv. External mode (External mode je vysvětlen v následující kapitole)
- **Oblast C** obsahuje bloky kinematických rovnic, popsaných v kapitole 7.2
- **Oblast D** obsahuje blok ekondér rotačního čidla. Vzhledem k tomu, že kostka EV3 považuje rotační čidlo za motor, lze pomocí bloku enkodéru číst úhel natočení čidla, tedy úhel $\varphi_{10}$.
- **Oblast** E obsahuje bloky pro řízení rychlosti vozidla. Převádí se v ní výstupy z oblasti C na hodnoty pro blok motoru, tedy procenta výkonu.
- **Oblast F** porovnává úhel natočení předních kol (přepočítaný z enkodéru středního motoru vozidla) s požadovaným úhlem natočení předních kol udaným bloky z oblasti C. Na základě tohoto rozdílu pak reguluje natočení předních kol pomocí P-regulátoru. Oblast obsahuje také omezovač maximálního natočení předních kol a varovný signál, který se aktivuje, když požadovaný úhel natočení předních kol překročí maximální dovolený úhel natočení předních kol vozidla.




Obr. 18 – Blokové schéma modelu Couvacího asistenta

Elektronická verze tohoto Simulink modelu couvacího asistenta je přiložena k bakalářské práci na CD.

# 8. Navázání komunikace hardwaru se softwarem a implementování modelu couvacího asistenta

Po vytvoření nového modelu jej lze aplikovat do hardwaru. Simulink jej zkompiluje do jazyka, který je hardwaru srozumitelný. K tomu je tomto případě nutný v oficiální doplněk LEGO EV3 pro Simulink.

## 8.1. Navázání komunikace

LEGO kostka EV3 se připojuje k počítači prostřednictvím sítě wifi, a to přes wifi adaptér zasunutý v jejím vstupu USB. Pro vytvoření wifi sítě je vhodné použít vlastní router. V něm pak vytvořit novou síť. Pokud zabezpečení není nezbytné, je dobré síť ponechat nezabezpečenou, bez šifrování a hesla. Kostka LEGO se rychleji vybíjí, pokud je připojena k sítí se zabezpečením. Postup připojení je následující:

**I.** Vytvořit síť wifi.

**II.** Připojit kostku EV3 k síti wifi.

**III.** Připojit počítač k sítí wifi prostřednictvím ethernetového kabelu.

**IV.** V Simulinku vybrat položku Options v záložce Tools / Run on Target Hardware / Options. Ve specifikaci Hardwaru pak nastavit IP adresu kostky EV3, kterou jí přidělil router. Tuto adresu si lze přečíst na displeji kostky EV3 po vybrání možnosti Brick Info v menu kostky.

Při splnění kroků v tomto pořadí, je navázána komunikace kostky EV3 s počítačem a programem Matlab Simulink.

### 8.2. Implementování a spuštění modelu

Jakmile je Simulink spojený prostřednictvím wifi s kostkou EV3, nabízí spuštění modelu několika způsoby.

Při zvolení módu Normal se model spustí pouze v okně Matlab Simulink, což slouží například pro kontrolu některých jeho částí, které nejsou závislé na hardwaru.

Pro spuštění v kostce LEGO lze využít takzvaný External mód, při kterém se model spustí v kostce EV3 a zároveň v programu Simulink. Kostka EV3 a Simulink přitom spolu komunikují. Tento mód je vhodný například pro vyvíjení modelu, je při něm totiž možné v počítači sledovat a kontrolovat průběh spuštěného modelu v reálnem čase.

Simulink nabízí také tlačítko Deploy to Hardware, po jehož stisknutí se model nahraje do kostky EV3 a spustí se v ní.

## 9. Testování funkcí couvacího asistenta

V následující kapitole jsou uvedeny a analyzovány dva experimenty vypovídající o funkci couvacího asistenta. Pořízený videozáznam těchto experimentů je přiložen k bakalářské práci na CD.

Cílem prvního experimentu bylo ověřit funkčnost couvacího asistenta. Uživatel měl za úkol projet krátký slalom, poté zatočit o 90° a zaparkovat s přívěsem na vyznačené místo.

Druhý experiment zjišťoval s jakou přesností je uživatel couvacího asistenta schopný projet s modelem vozidla a přívěsu předem přesně danou dráhu. Trajektorie přívěsu při tomto pokusu byla později analyzována programem Tracker. Dráha byla na zemi vyznačena modrou páskou. Zahrnovala krátký slalom, pravotočivou zatáčku o 180° a rovinu zakončenou parkovacím místem. Do průsečíku osy přívěsu a osy kol přívěsu byl umístěn reflexní prvek, jehož trajektorie byla později analyzována. Cílem tedy bylo, aby tento střed přívěsu co nejpřesněji kopíroval dráhu vyznačenou modrou páskou na zemi.

### 9.1. Analýza videa pomocí programu Tracker

Program Tracker je volně dostupný program pro analyzování videí laboratorních pokusů a nejen jich. Program umožňuje sledovat bod nebo celý objekt pohybující se na videu, zaznamenat jeho souřadnice ve zvoleném souřadnicovém systému, vykreslit jeho trajektorii a přidat tělesu nebo bodu hmotnost. Z těchto údajů pak program umí určit a do tabulky zaznamenat měnící se rychlost, zrychlení a hybnost sledovaného bodu nebo tělesa. Naměřená data je možné stáhnout a pracovat s nimi v jiném programu. Například u videa kmitavého tělesa díky programu lze určit periodu kmitu, tuhost pružiny atd.

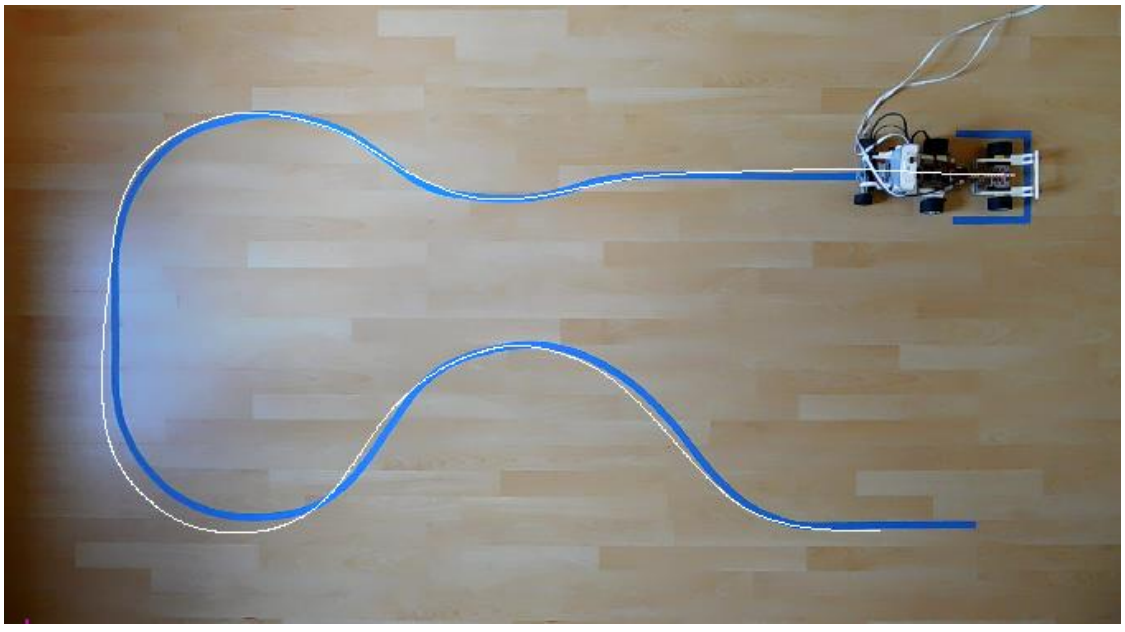
Při vyhodnocování videa druhého experimentu byla použita funkce Autotracker, která automaticky zaznamenala a zobrazila trajektorii reflexního prvku umístěného na modelu přívěsu. Software vyvinul pan Douglas Brown a poskytuje jej zdarma široké veřejnosti na webových stránkách http://physlets.org/tracker/.

### 9.2. Vyhodnocení experimentů

V prvním experimentu uživatel potvrdil praktickou funkčnost couvacího asistenta, když bez obtíží dráhu projel a zaparkoval na vyznačeném místě. Byl potvrzen předpoklad, že couvací asistent má své limity a existuje maximální úhel natočení mezi vozidlem a přívěsem $\varphi_{10max}$ , při jehož překročení ztratí couvací asistent schopnost řídit dále směr přívěsu.

Po překročení tohoto úhlu je nutné popojet vozidlem dopředu, dokud nebude platit $|\varphi_{10}| < |\varphi_{10max}|$. Tuto nerovnost pro správnou funkci couvacího asistenta by měl uživatel znát a dodržovat. Z experimentů bylo stanoveno, že $\varphi_{10max}$ se přibližně rovná 56°.

Fotografie druhého experimentu je na Obr. 19. Trajektorie přívěsu (reflexního bodu), analyzovaná v programu Tracker, je zobrazena bílou barvou. Pod ní leží přívěsu předem předepsaná trajektorie, která má modrou barvu. Obě čáry se téměř po celé dráze překrývají. Výjimku tvoří druhá pravotočivá zatáčka, kde se sice poloměry této zatáčky jednotlivých trajektorií téměř neliší, nicméně střed kružnice opsané bílé trajektorie v této zatáčce leží o něco níže než střed kružnice opsané modré trajektorii. Jinými slovy, kdyby přívěs zahájil pravotočivou zatáčku dříve, dokázal by ji projet přesněji. Uživatel zřejmě nestihl reagovat včas, protože při současném ovládání přívěsu je nastavena konstantní rychlost přívěsu. Pokud by uživatel měl možnost regulovat rychlost přívěsu, získal by více času a úkon by zahájil včas.



Obr. 19 – Experiment s předem určenou dráhou přívěsu

Lze konstatovat, že couvací asistent zvládl přesvědčivě testy v obou experimentech. Přesnost projetí dráhy by se dala zvýšit upravením ovladače a jeho citlivosti nebo většími zkušenostmi řidiče s couvacím asistentem.

# 10. Závěr

Úkolem práce bylo seznámit se s principy couvání vozidla s přívěsem, navrhnout a sestavit model vozidla s přívěsem, na základě získaných teoretických znalostí sestavit systém couvacího asistenta v prostředí Matlab Simulink, který poté implementovat do modelu a pomocí experimentů vyzkoušet jeho funkčnost.

Nejdůležitější poznatky o problematice couvání s přívěsem byly shrnuty v kapitole 3, kde jsou spolu s nimi uvedeny i zástupci komerčních couvacích asistentů.

Pro konstrukci modelu byla zvolena stavebnice LEGO Mindstorms. Svou variabilitou umožnila hledat vhodnou konstrukci modelu a její části v průběhu práce modifikovat. Vyhovující konstrukce vozidla s přívěsem byla úspěšně sestavena a je popsána v kapitole 6. Postup sestavení modelu je na přiloženém CD. LEGO Mindstorms ukázalo, že není pouze zábavným výukovým prostředkem, jak uvádí jeho výrobce, ale dokáže být i vhodným nástrojem pro akademickou činnost a je možné ho použít pro nejrůznější experimenty.

Sestavený systém couvacího asistenta v programu Matlab Simulink popisuje kapitola 7. Práce v něm je přehledná, ovládání programu je intuitivní, má dostatečnou nabídku bloků a schémata modelů (programů) lze snadno měnit. Pro vývoj modelu byl také velmi užitečný takzvaný External mode, při němž je program spuštěn současně v kostce EV3 a v Matlab Simulink. Při tomto módu je možné měnit některé jeho parametry.

Vytvořený program byl implementován do modelu a byly s ním provedeny experimenty, jejichž analýza potvrdila funkčnost couvacího asistenta.

Že je myšlenka couvacího asistenta realizovatelná dokazují jeho dvě komerční verze uvedené v kapitole 3.1 i výsledky této bakalářské práce, které jednoznačně potvrzují správnost předpokládaných principů na jejím začátku.

Práce tedy splnila všechny stanovené cíle.

Při implementování couvacího asistenta do reálného automobilu, například podle principů zde popsaných, bylo by vhodné, aby ovládání nabízelo volbu rychlosti přívěsu. Dále aby systém couvacího asistenta upozornil řidiče, když se úhel mezi vozidlem a přívěsem blíží maximálnímu možnému úhlu. Při této aplikaci by také mohlo být zajímavé využít některých funkcí chytrého telefonu, jako je možnost přenášet na něj obraz kamery umístěné v zadní části vozu nebo s jeho pomocí přívěs ovládat.

# 11. Použitá literatura


[1] „Pro-Trailer Backup Assist," [Online]. Available: http://www.ford.com/trucks/f150/gallery/videos-and-demos/wow/pro-trailer-backup-assistwork/FMFT1212000H/.

[2] **J. GOLSON**, „Ford Makes Backing Up a Trailer as Easy as Turning a Knob," 2015. [Online]. Available: http://www.wired.com/2015/05/ford-makes-backing-trailer-easy-turning-knob/.

[3] **R. HAMMOND**, „Daily Record," 23 1 2015. [Online]. Available: http://www.dailyrecord.co.uk/lifestyle/motoring/richard-hammond-new-volkswagen-passat-5029760#4XoMtrALx5yk3Flj.97.

[4] „Asistenční systémy," [Online]. Available: http://www.volkswagen.cz/modely/passat_variant/vlastnosti.

[5] „TRI STATE AUTO BLOG," [Online]. Available: https://tristateautoblog.com/articles/2016-ford-f-150-adds-trailer-backup-assist-feature/.

[6] „TowGO," [Online]. Available: http://www.towgo.com/projects-contained/.

[7] **L. BAZJUK**, Couvání vozidla s přívěsem, Praha: České vysoké učení technické, 2014.

[8] **M. D. A. Z. WINKLER,** „Robotika.cz," 3 10 2003. [Online]. Available: https://robotika.cz/guide/encoders/cs.

[9] **S. B. QUANG**, „Slide share," 14 11 2013. [Online]. Available: http://www.slideshare.net/sangbuiquang3/rotary-encoder-training-material.

[10] **M. LOCKER**, „Inkrementální enkodér," 17 7 2009. [Online]. Available: http://robotika.vosrk.cz/guide/sensors/decode/cs.

[11] „Synthesize-your-own NXT® connector plug," 12 2006. [Online]. Available: http://www.philohome.com/nxtplug/nxtplug.htm.

[12] „Wayne and Layne," [Online]. Available: https://www.wayneandlayne.com/bricktronics/design-and-theory/.

[13] **O. SØRDALEN**, „Conversion of the Kinematics of a Car with n Trailers into a Chained Form," IEEE Computer Society Press,ICRA 1, 1993, pp. 382-387.

[14] **A. a. J. W. DIVELBISS**, „Trajektory Tracking Control of a Car-Trailer System," *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY,* pp. 269-278, May 1997.

[15] **S. M. LAVALLE**, PLANNING ALGORITHMS, Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

# 12. Seznam příloh

K bakalářské práci je přiloženo CD, které obsahuje následující přílohy.

1. **Video č. 1** – Jízda po vyznačené trajektorii
2. **Video č. 2** – Slalom
3. **Fotodokumentace** konstrukce modelu vozidla a přívěsu
4. **Systém couvacího asistenta**
5. **Tato bakalářská práce** ve formátu pdf