

**ČVUT FS**

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTONOMNÍ JÍZDA ZMENŠENÉHO MODELU  
SMALL**

**DP 2017**

**Josef Škvor**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Škvor** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **393938**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Autonomní jízda zmenšeného modelu SMALL**

Název diplomové práce anglicky:

**Autonomous drive of a scaled model SMALL**

Pokyny pro vypracování:

Pro další instrumentaci a snadnější ovládání modelu SMALL je třeba rozšířit jeho výpočetní kapacity. Zhodnoťte možnost využít MyRIO od NI. V případě náhrady stávajícího ovladače, pečlivě zdokumentujte všechny provedené změny a popište současný stav vozidla SMALL. Zřetelný popis nového zapojení na modelu je samozřejmostí.

Pro další rozšíření funkcí autonomní jízdy se zaměřte na couvání modelu s připojeným jednonápravovým přívěsem. Algoritmus naprogramujte a odzkoušejte na zmenšeném modelu SMALL. Všechny výpočty, simulace a experimenty provádějte s ohledem na přepočítání hodnot mezi skutečným a zmenšeným modelem.

Seznam doporučené literatury:

Škopek M.: Sledování jízdních pruhů pomocí zmenšeného modelu SMALL. ČVUT v Praze. DP 2013-MV14

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


,

Datum zadání diplomové práce: **24.10.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_


  
Podpis vedoucí(ho) práce


  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

# SOUHRN

- Jméno:** Josef
- Příjmení:** Škvor
- Název DP:** AUTONOMNÍ JÍZDA ZMENŠENÉHO MODELU SMALL
- Rozsah:**
- Akademický rok:** 2016/2017
- Ústav:** Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
- Vedoucí DP:** doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová
- Zadavatel:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
- Klíčová slova:** SMALL, autonomní jízda, couvání, přívěs, myRIO, LabVIEW
- Anotace:** Tato práce se zabývá přestavbou modelu SMALL. Dále se tato práce zabývá autonomním couváním soupravy složené z tažného vozidla a jednonápravového přívěsu. V této souvislosti budou navrženy algoritmy a následně odzkoušeny na modelu SMALL s ohledem na přepočty hodnot mezi skutečným a zmenšeným modelem.

# PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doc. Dr. Ing. Gabriele Achtenové za vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům, že mě doposud podporovali v mém studování, které nyní mohu završit touto diplomovou prací. Chci poděkovat mechanikům ze školního objektu Juliska za vyhotovení některých mechanických součástí potřebných k přestavbě modelu a v neposlední řadě panu Jiřímu Dřízalovi za poskytnutí měřících přístrojů elektrických veličin.

Děkuji.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady (literaturu, projekty, software, atd.) uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne .....

Podpis:.....

## Obsah

Seznam použitých symbolů .....	3
Seznam použitých zkratk .....	5
1. Úvod .....	6
2. Úvod do úprav modelu .....	8
2.1. MyRIO .....	12
2.2. Regulátor motoru .....	13
2.3. Svorkovnice a DC/DC měniče .....	17
2.4. Lešikar .....	20
2.5. Snímač řízení .....	22
2.6. EW1 10/2015 .....	24
2.7. Výměna hřídele pohonu .....	28
2.8. Box .....	30
2.9. Stavba přívěsu .....	31
2.10. Závěr z přestavby modelu .....	33
3. Autonomní couvání soupravy .....	35
3.1. Jednostopý model soupravy .....	36
3.2. Generování trasy couvání .....	42
3.3. Kalibrace kamery .....	48
3.4. Globální souřadnicový systém .....	50
3.5. Main_RT.vi .....	55
3.6. Testování autonomní jízdy .....	56
4. Závěr .....	63
5. Použitá literatura .....	64

6.	Příloha.....	65
6.1.	Schéma regulátoru .....	65
6.2.	Schéma desky svorkovnice a DC/DC měniče.....	67
6.3.	Schéma EW1 10/2015 .....	69
6.4.	Výkres hřídele.....	71

# Seznam použitých symbolů

Pozn.: Seznam symbolů je platný od kapitoly „Autonomní couvání soupravy“. Tučně zvýrazněné symboly jsou povahy bodu a vektoru v Euklidově prostoru  $\mathbb{E}_2$ , nebo matice  $2 \times 2$ . Pokud není dáno indexem v pravém horním rohu symbolu jinak (např.  $\mathbf{A}^L$ ), jsou body a vektory vyjádřeny v globálním souřadnicovém systému ( $\mathbf{A} \Leftrightarrow \mathbf{A}^G$ ).

Symbol	Popis	Jednotka
$L_c$	Vzdálenost mezi nápravou a koncem přívěsu / návěsu	[mm]
$L_p$	Vzdálenost rotační vazby od zadní nápravy tažného vozidla	[mm]
$L_t$	Vzdálenost rotační vazby od nápravy přívěsu / návěsu	[mm]
$G_x$	Osa $x$ globálního souřadnicového systému	
$G_y$	Osa $y$ globálního souřadnicového systému	
$L_x$	Osa $x$ lokálního souřadnicového systému	
$L_y$	Osa $y$ lokálního souřadnicového systému	
$e_{max}$	Maximální chyba řízení během celého manévru	[mm]
$k_0$	Křivost na počátku trasy	$[\text{mm}]^{-1}$
$k_{mez}$	Maximální křivost trasy, kterou dokáže opsat střed nápravy přívěsu / návěsu	$[\text{mm}]^{-1}$
$\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0, \mathbf{D}_0, \mathbf{E}_0$	Pozice soupravy při generování trasy	
$\mathbf{S}_\xi$	Matice směrových kosinů pro argument $\xi$	
$\mathbf{T}_{(t)}$	Zobecněná trasa	[mm]
$\mathbf{T}'_{(t)}$		$\frac{d\mathbf{T}_{(t)}}{dt}$
$\mathbf{T}''_{(t)}$		$\frac{d^2\mathbf{T}_{(t)}}{dt^2}$
$\mathbf{T}_{M(w)}$	Hlavní trasa	[mm]
$\mathbf{T}_{R(t)}$	Návratová trasa	[mm]
$\mathbf{T}_{V(v)}$	Vodící čára	[mm]
$\alpha_c$	Požadované natočení kol tažného vozidla	$[\circ], [\text{rad}]$
$\alpha_{max}$	Pravotočivá krajní poloha předních kol tažného vozidla (maximum pravého rejdu)	$[\circ], [\text{rad}]$



$\alpha_{min}$	Levotočivá krajní poloha předních kol tažného vozidla (maximum levého rejdu)	[°], [rad]
$\beta_{mez}$	Mezní úhel natočení přívěsu / návěsu vůči tažnému vozidlu	[°], [rad]
$\lambda_0$	Parametr pro úpravu křivosti počátku trasy	
$\lambda_1$	Parametr pro minimalizaci délky trasy	
$L$	Rozvor tažného vozidla	[mm]
$ds$	Délka kroku ujeté vzdálenosti tažného vozidla	[mm]
$e$	Chyba (odchylka) řízení	[mm]
$k$	První křivost tras	[mm] <sup>-1</sup>
$px$	Pixel	
$A$	Souřadnice koncového bodu přívěsu / návěsu ležícího na jeho podélné ose	[mm]
$B$	Souřadnice středu nápravy přívěsu / návěsu	[mm]
$C$	Souřadnice rotační vazby soupravy	[mm]
$D$	Souřadnice středu zadní nápravy tažného vozidla	[mm]
$E$	Souřadnice středu přední nápravy tažného vozidla	[mm]
$X$	Nejbližší bod vodící čáry v záběru kamery	[mm]
$Y$	Nejvzdálenější bod vodící čáry v záběru kamery	[mm]
$\alpha$	Úhel natočení předních kol tažného vozidla	[°], [rad]
$\beta$	Úhel natočení přívěsu / návěsu vůči tažnému vozidlu	[°], [rad]
$\gamma$	Úhel natočení přívěsu / návěsu vůči $G_x$	[°], [rad]

# Seznam použitých zkratek

BEMF	Back-Elektromotive Force
ČVUT	České vysoké učení technické
DC	Direct Current
DMA	Direct Memory Access
ESR	Equivalent Series Resistance
FIFO	First In, First Out
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GND	Ground
GPS	Global Positioning System
HAN	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen
LED	Light-Emitting Diode
LUTs	Look-Up Tables
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MSP	Mini System Port
MPX	NI myRIO-1900 Expansion Port
NI	National Instruments
PC	Personal Computer
PLA	Polylactid Acid
PNG	Portable Network Graphics
PWM	Pulse Width Modulation
RC	Remote-Control
RIO	Reconfigurable Input/Output
ROI	Region of Interest
sbRIO	Single-Board RIO
SMALL	Scaled Mobility At Laboratory Level
SMD	Surface Mount Device
USB	Universal Serial Bus
Wifi	Wireless Fidelity

# 1. Úvod

Projekt SMALL (Scaled Mobility At Laboratory Level) byl na strojní fakultě Českého vysokého učení technického v Praze založen v mezinárodní spolupráci s univerzitou HAN sídlící v holandském Arnhemu. Cílem tohoto projektu je simulovat chování skutečného vozidla na zmenšeném modelu. Tento způsob simulace by mohl nabídnout snížení nákladů na testování skutečných vozidel, což mimo jiné spočívá v minimalizaci požadavků na zkušební prostory a plochy v porovnání s potřebami v reálu. Simulace by se mohly týkat kinematických a dynamických vlastností vozidla. Na strojní fakultě ČVUT nyní převládá simulace autonomních systémů (asistent jízdy v pruhu, adaptivní tempomat, atd.). Projekt je realizován pomocí zmenšeného modelu vozidla v měřítku 1:5 vzhledem ke konvenčním rozměrům osobního automobilu. Model lze řídit buď jako RC model, nebo autonomně algoritmy vyvinutými pro simulace. Za tímto účelem je model jízdní soupravy vybaven sadou senzorů, akčních členů a výpočetními jednotkami.

Hlavním tématem této práce je autonomní couvání soupravy skládající se z tažného vozidla a jednonápravového přívěsu. S tímto tématem je bezprostředně spojena přestavba modelu, které se věnuje první část diplomové práce. Druhá část se zabývá vývojem algoritmů pro autonomní couvání soupravy a jejich ověření následným testováním.

Autonomním couváním, ať už jen samostatného vozidla nebo celé soupravy, se zabývají automobilky (např. Volvo, atd.) a subdodavatelské firmy (Bosch, Valeo, atd.). Tuto problematiku zvládají na dosti pokročilé úrovni a jejich implementace do reálného života v ryze autonomní podobě brzdí jen zákony a případné smluvní vyrovnání za způsobitelné škody a určení viníka. Couvání je komplexní záležitost. Dokonce se pro další a další zdokonalování systémů zavádějí fúze jiných autonomních systémů a senzorů, které spolu kooperují. Z toho titulu tato práce nebude a ani nemůže konkurovat těmto pokročilým systémům. Pouze nabídne trochu jiný pohled na problematiku a ověří, zda předpoklady, na kterých byly algoritmy postaveny, byly správné, či ne.

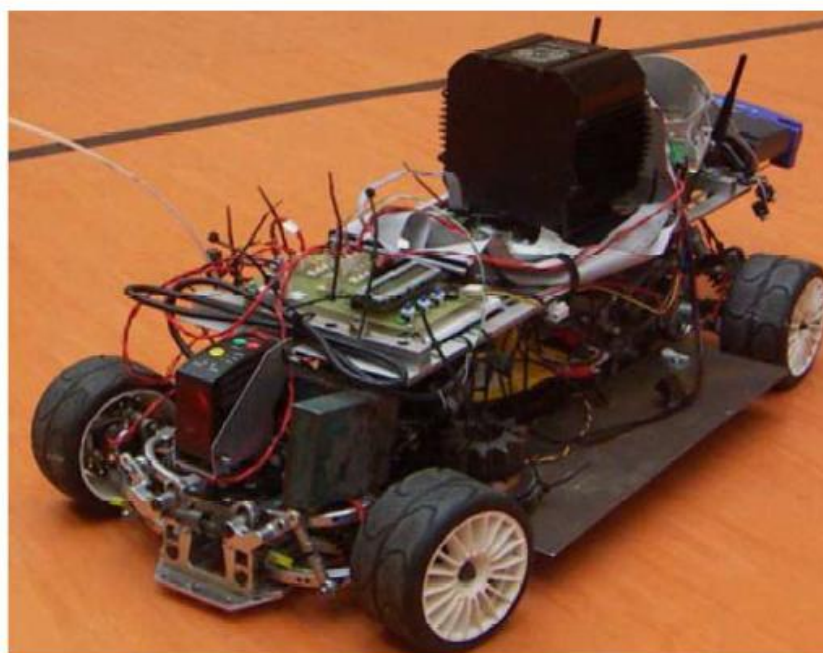
Význam autonomního couvání se soupravou se na první pohled zdá jako komfortní záležitost, či pomocník pro „sváteční“ řidiče mající problém couvat s autem, natož s přívěsem. Hlavní potenciál vidím v dopravní logistice nákladními vozidly. Jako příklad bych uvedl profesionálního řidiče nákladního vozu, který předá vozidlo s uzamčenou kabinou před areálem překladiště místnímu dispečinku, který bude dohlížet nad autonomním pohybem vozidla po areálu. Mezitím si řidič odpočine a vykoná přestávku, aby byl fyzicky a psychicky odpočatý a mohl se plně soustředit na další jízdu po navrácení vozu

---

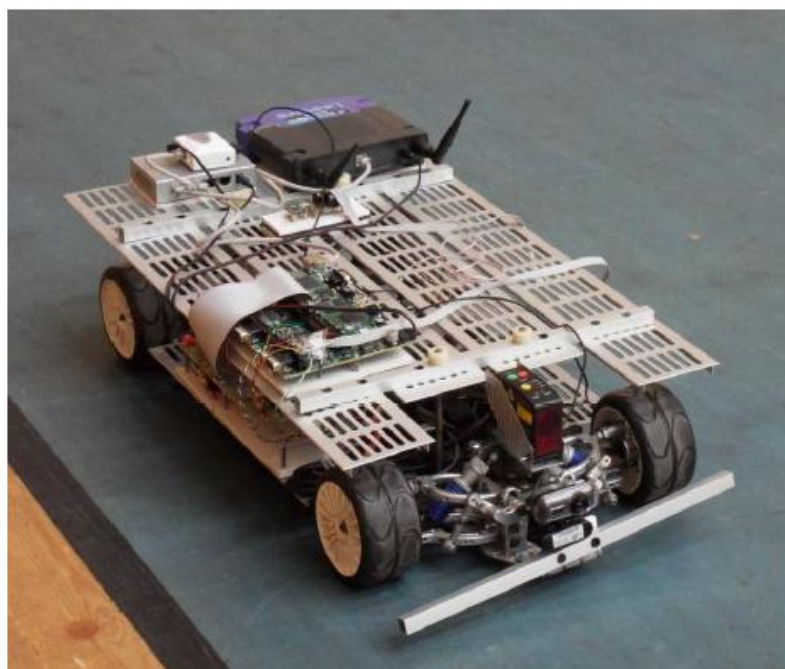
z areálu. Možná by se tím snížily časy přepravy a nehodovost. Dále by se zredukoval počet lidí pohybujících se po areálu překladiště ať z důvodu bezpečnosti nebo utajení. Celkově by se tím zlepšil pracovní režim profesionálních řidičů, kteří jsou mnohdy zaměstnavateli nuceni nedodržovat správný výkon přestávek. Pracovní režim profesionálního řidiče je upraven zákony č. 589/2006 Sb. a č. 561/2006 ES. V případě realizace jakéhokoliv déle trvajícího autonomního pohybu nákladního auta by měly být tyto zákony pozměněny.

## 2. Úvod do úprav modelu

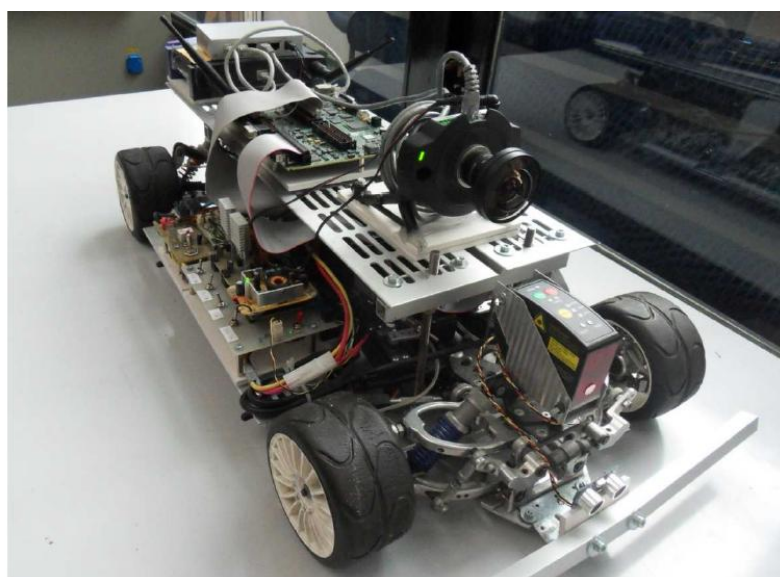
Po převzetí modelu v letním semestru roku 2015 nějakou chvíli trvalo zprovoznění původního modelu. Model byl zprovozněn, ale měl softwarové a hardwarové vady, ke kterým se v jednotlivých podkapitolách blíže vyjádřím. Nicméně se vědělo, že současná konfigurace nevyhovuje díky způsobu exekuce algoritmů. Algoritmy byly vyhodnocovány pomocí host PC. Vstupy a výstupy byly posílány skrze wifi. Velký datový tok, primárně z kamery, zpomaloval celý proces vyhodnocování. Navíc se ztrácela konektivita jednak některých periférií v rámci modelu, ale hlavně mezi modelem a host PC, a tudíž se model stával občas neovladatelný. Obecně navázání konektivity byl problém. Dále v průběhu spouštění výpočetní jednotky, kdy algoritmy ještě nedefinují hodnoty výstupů, se akční členy chovaly nežádoucím způsobem (např. spuštění regulátoru motoru, serva vytáčené do mezních poloh, atd.). Změna koncepce spočívala v použití procesoru výpočetní jednotky, který nebyl dosud využíván. Nově budou výpočty probíhat přímo na modelu. Host PC bude komunikovat přes wifi a bude využíván pouze jako interface pro ovládání a zobrazování dat. Algoritmy jsou výpočetně náročné a procesor tehdejší výpočetní jednotky nebyl dostatečně rychlý, a proto se pořídila novější jednotka. Tento přechod znamenal velký zásah do přestavby modelu. Model nebyl přizpůsoben k couvání a z toho vplynuly další úpravy na tažném vozidle a přívěsu. Na následujících obrázcích je vyobrazena evoluce modelu v průběhu let.



Obrázek 1: Model v roce 2010 [3]



Obrázek 2: Model v roce 2011 [3]



Obrázek 3: Model v roce 2013 [3]



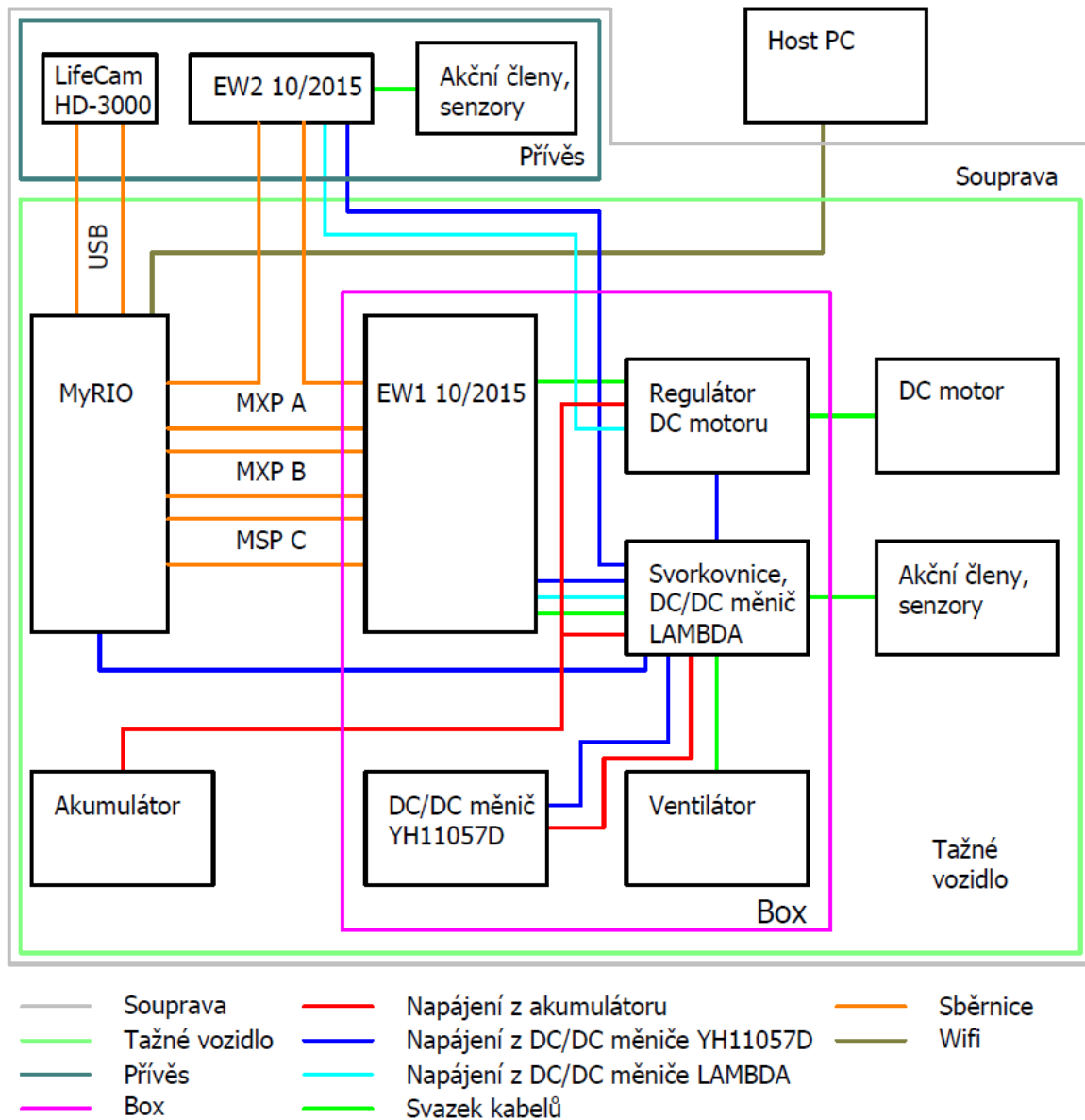
Obrázek 4: Model v roce 2015 [1]

Stavby auta a ostatního příslušenství byly provedeny s ohledem na modulárnost s širokou variabilitou, což se projevilo například vestavěním čtyř DC/DC měničů s množstvím vypínačů a přepínačů. Mnohdy se stávalo, že „nefunkčnost“ modelu byla zapříčiněna pouhým nesepnutím jednoho z několika vypínačů. Kromě tohoto se mi toto řešení zdá nekomfortní a často zavádějící. Dle mého názoru se během let na modelu projevila určitá nekonceptnost v důsledku nástaveb řídicích se podle aktuálních potřeb předešlých studentů. Výsledkem bylo, že model rostl jak do šířky, tak do výšky a postupně ztratil rysy RC modelu.

Aktuální přestavba modelu eliminovala vypínače a přepínače, stranové nástavby, horní nástavbu, wifi router, zredukovala množství DC/DC měničů a mnoho jiného.

Cílem této přestavby je co nejvíce integrovat jednotlivé součásti. Model by měl působit robustně. Přesto by se měla zachovat modulárnost v určitém rozsahu s možností rychlého připojení, či odpojení jakékoliv periférie. Výpočetní kapacita jednotky by měla být dostatečná. Tyto rysy modelu by měly následujícím studentům umožnit přímo se věnovat hlavnímu zadání své práce s minimálním zásahem do modelu. Tímto se vyvarujeme dalším sklonům k nekonceptnosti. Nicméně podotýkám, že ani tato přestavba není dokonalá a vždy jde něco zlepšit nebo dodělat.

Na obrázku 5 je naznačená elektrotechnická část přestavby. Je složená z několika součástí, kterým se budou blíže věnovat následující podkapitoly.



Obrázek 5: Schéma elektrotechnické části přestavby



## 2.1. MyRIO

MyRIO patří k produktům firmy National Instruments (NI) stejně jako Single-Board RIO (sbRIO). Doposud bylo sbRIO výpočetní jednotkou umístěnou na modelu. Nyní myRIO nahradilo sbRIO. Do budoucna by stálo za zvážení kooperace obou produktů. Oba produkty disponují nejméně jedním procesorem a FPGA čipem. Bližší informace o principu FPGA jsou k nalezení v literárním zdroji [2]. Podrobná specifikace obou produktů je na přiloženém disku. S produkty NI je spojen grafický jazyk LabVIEW, kterým je celý model projektu SMALL programován.

V mnoha ohledech je sbRIO lepší, než myRIO. MyRIO je novější a slouží spíše pro studentské účely. SbRIO je starší profesionální průmyslovou deskou. Nicméně myRIO oproti sbRIO má integrovaný USB port, wifi, akcelerometr a hlavně dva procesory o rychlosti 667 MHz. Stojí za zmínku, že FPGA v myRIO nemá příliš velký zdroj programovatelných logických jednotek a to hlavně LUTs. Proto je zapotřebí FPGA programovat s rozmyslem a příliš těmito zdroji neplýtvat.



Obrázek 6: MyRIO - 1900



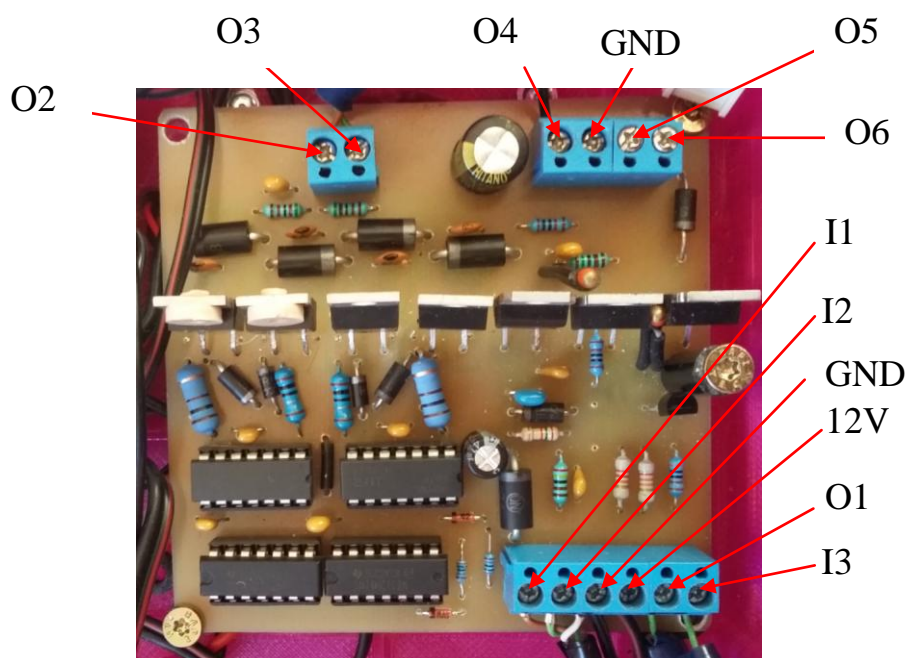
Obrázek 7: SbRIO 9642

## 2.2. Regulátor motoru

Model je vybaven DC motorem s komutátorem. Bližší informace a charakteristiky motoru lze najít v literárním zdroji [2]. Motor byl řízen regulátorem JETI model JES 045 DC. Další informace o regulátoru lze nalézt v literatuře [2]. Regulátor je určen pro RC modely letadel. Z toho vyplývá, že nereverzuje, neumožní dojezd výběhem a má necitlivou regulaci otáček. Navíc je stavěn pro znatelně menší elektrický proud. Při rozjezdu je ve vinutí motoru cca 70 ampér. Tento regulátor zvládne ve špičce jen 45 ampér. Regulátor se nedostatečně chladil. Regulátor, aktuálně nainstalovaný na modelu, byl pravděpodobně poškozený. Z výše uvedených důvodů se přešlo na jiný regulátor. Požadavky na nový regulátor: reverzace otáček, brzdění, dojezd výběhem, citlivá regulace, lepší chlazení.

Otáčky motoru jsou zpětnovazebně řízeny a snímány optickým inkrementálním snímačem z děrovaného kola, který je upevněn na hřídeli motoru. Na tomto kole je 40 otvorů, což je pro citlivou regulaci v nízkých otáčkách nedostatečné a nevhodné. Z toho důvodu bych zvolil ještě jiné, doplňkové snímání otáček.

Dle mého názoru by do budoucna bylo dobré pomocí regulátoru simulovat chování spalovacího motoru. Za tímto účelem by mohlo být výhodné, umět regulovat odpor vinutí motoru v kombinaci s PWM regulací. Regulátor, který by odpovídal výše uvedeným požadavkům, je složité na trhu sehnat. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zkonstruovat vlastní regulátor (obr. 8).



Obrázek 8: Regulátor motoru

Koncepcí je tento regulátor H-můstek složený z výkonových tranzistorů MOSFET typu N (IRF 8010) a P (IRF 4905). Tyto tranzistory jsou řízené obvodem IR2110. Obvod IR2110 je ovládán logickými obvody SN74HCT02N. Logické obvody jsou napájeny přes L7805CV. Nad můstkem jsou další dva MOSFET tranzistory typu P (IRF 4905). Slouží k omezování proudu. Jeden z těchto tranzistorů je také ovládán vstupem I3 (obr. 8). Konektory pro připojení zdroje (červený +, černý -) a motoru jsou vyvedeny mimo desku. Na desce regulátoru je integrováno měření okolní teploty, napětí baterie a BEMF. BEMF je právě doplňkové měření otáček motoru a je to analogový signál měřený ve voltech. Při použití PWM lze měřit BEMF naindukované na vinutí motoru, které je úměrné otáčkám, viz literatura [4]. Regulátor je řízen pomocí PWM, zpětnovazebné BEMF, změnou odporu vinutí a softwarového PID regulátoru. Specifikace jednotlivých obvodů jsou uloženy na disku.

Pro řízení regulátoru byl napsán podprogram „PWM\_BEMF\_MOTOR.vi“ běžící na FPGA. Tento podprogram nedoporučuji měnit. Regulátor je zapotřebí hned po spuštění výpočetní jednotky inicializovat definovanými kroky. Pokud se tak nestane, regulátor nebude fungovat. Následující tabulka (tab. 1) popisuje význam vstupů a výstupu regulátoru (obr. 8).

Tabulka 1: Konektory regulátoru

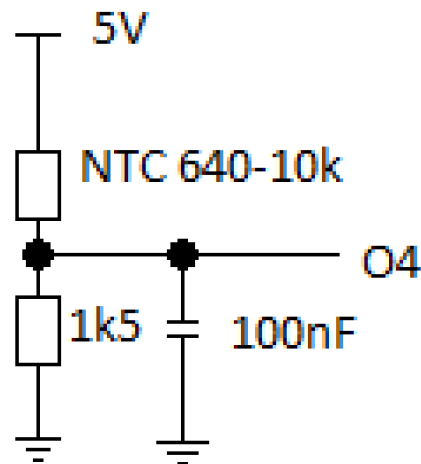
Konektor	Význam signálu	Rozsah
O1	Napětí baterie	0-5V
O2	+BEMF (diferenční kanál)	$\pm 10V$
O3	-BEMF (diferenční kanál)	$\pm 10V$
O4	Teplota okolí	0-5V
I1	PWM	logika
I2	PWM	logika
I3	Odpor vinutí	0-10V
12V	Napájení	
GND	Uzemnění	

Následující tabulka (tab. 2) popisuje ovládání regulátoru kombinací vstupů I1, I2, I3. Vstupy I1 a I2 jsou logické vstupy s pull-down rezistory 20 k $\Omega$ . Naopak I3 je analogový vstup.

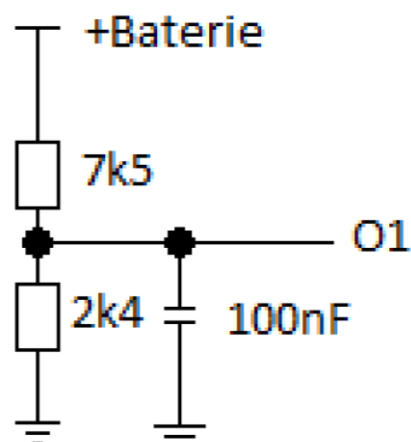
Tabulka 2: Ovládaní regulátoru

Mód\Vstupy	I1	I2	I3
1. směr	0	PWM	> 3V
2. směr	PWM	0	> 3V
Brzdění	1	1	> 3V
Výběh	0	0	

Pro měření teploty vzduchu v boxu, kde je regulátor umístěn, byl použit termistor NTC 640-10k dle schématu (obr. 9). Signál vyhodnocuje podprogram „TEMPERATURE.vi“ běžící na FPGA. Kalibrační data pro termistor jsou uložena v textovém souboru „data\_termistor.txt“. Na základě této naměřené teploty se spíná ventilátor pro chlazení součástí v boxu.

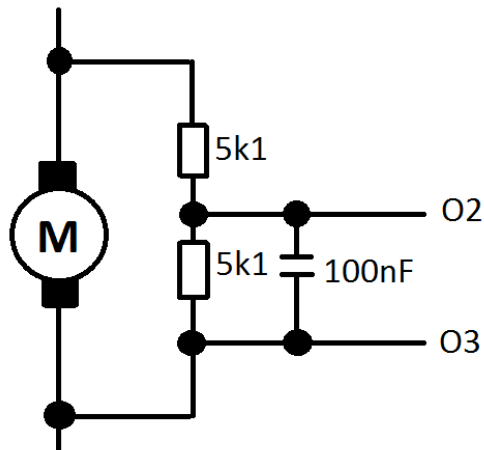


Obrázek 9: Schéma zapojení termistoru



Obrázek 10: Schéma pro měření napětí baterie

Pro měření napětí baterie byl použit odporový dělič dle schématu (obr. 10). Signál vyhodnocuje podprogram „BAT.vi“ běžící na FPGA. Měření BEMF je realizováno dle schématu (obr. 11) a je vyhodnocováno přímo v podprogramu „PWM\_BEMF\_MOTOR.vi“.

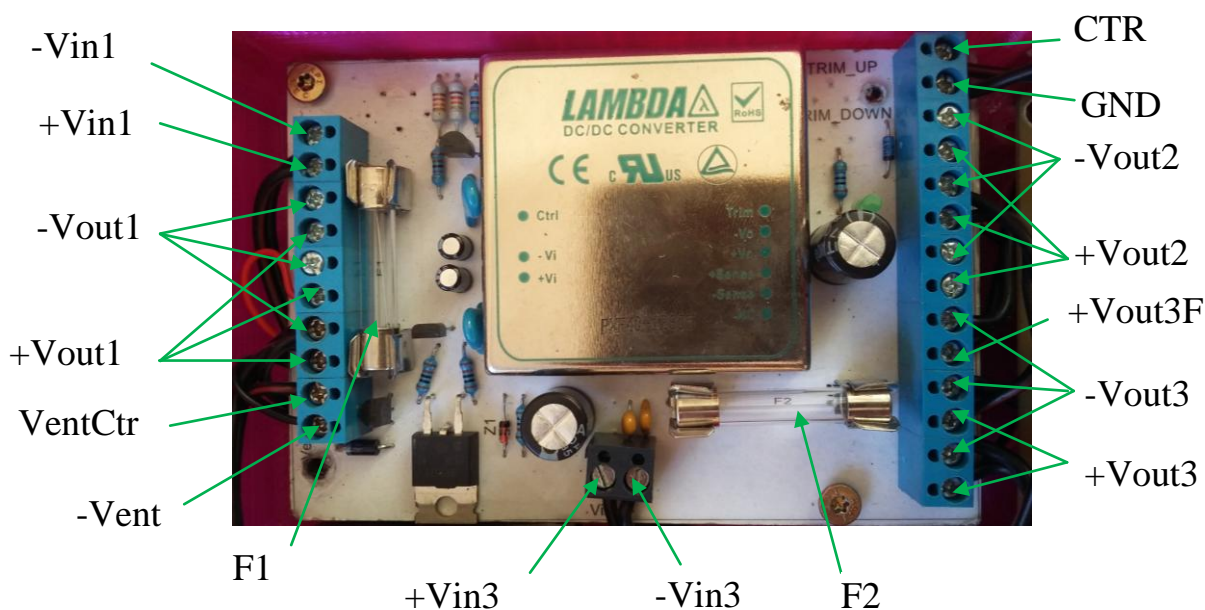


Obrázek 11: Schéma měření BEMF

Regulátor je jištěn proti nadproudu a tepelnému přetížení. V zátěži přenese až cca 70 ampér. Regulace pomocí PWM běží s frekvencí cca 180 Hz. Schéma zapojení regulátoru s rozpiskou součástek jsou v příloze.

## 2.3. Svorkovnice a DC/DC měniče

Na obr. 12 je deska s DC/DC měničem a svorkovnice rozvádějící napájení různého napětí. Dále jsou na desce integrovány obvody pro ovládání ventilátoru a měniče. Jsou zde vestavěny ochranné obvody a prvky.



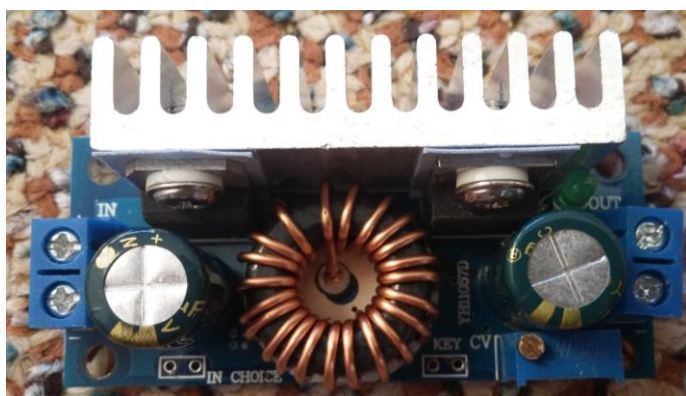
Obrázek 12: Deska se svorkovnicí a DC/DC měničem

DC/DC měnič umístěný na desce je LAMBDA PXF40-12S05. Jeho výstupní referenční napětí je 5V. DC/DC měnič umožňuje toto napětí v určitém rozsahu měnit pomocí přidaných trimrů, pro které je na desce vyhrazené místo (TRIM\_UP, TRIM\_DOWN). Primárně tento měnič napájí serva a je jistěn trubičkovou pojistkou F1 typu T4A (6.3 x 32 mm). Lze ho programovatelně vypnout a zapnout vstupem CTR (obr. 12). Při uzemnění vstupu CTR se měnič zapne. Zapnutí a vypnutí signalizuje zelená LED. Maximální zatížení je 40W. Bližší specifikace je uložena na disku. Upozorňuji, že tento měnič funguje od 9V vstupního napětí z akumulátoru. Pokud napětí na akumulátoru klesne pod tuto hodnotu, měnič se vypne a přestane napájet k němu připojené periferie. Toto omezení je do jisté míry nevýhodné, protože ostatní prvky modelu pracují až do 6V vstupního napájení a z toho důvodu je zapotřebí sledovat, aby napětí akumulátoru nekleslo pod úroveň 9V. Výstupní napětí z měniče je na svorkovnicích Vout2.

Napájení z baterie (obr. 12) se připojuje na vstup Vin1. Toto napájení je dále rozváděno výstupy Vout1. Na vstup Vin3 se připojuje DC/DC měnič YH11057D (obr. 13), který disponuje parametry shrnutými v tabulce 3 a slouží primárně k napájení výpočetní jednotky. Jeho výstupní napětí lze měnit trimrem

a je rozvedeno svorkovnicemi Vout3. Právě kvůli možnosti měnit toto napětí ručně, je na desce obvod, který při nastavení výstupního napětí většího než 15V, odpojí spotřebiče od měniče. Změna nastavení výstupního napětí by mohla být kromě jiného zapříčiněna lidskou vinou. Na svorku Vout3F je připojeno myRIO, které může být napájeno napětím v rozsahu 6 – 16 voltů. Výstup Vout3F je jištěn trubičkovou pojistkou F2 typu F1.5A (6.3 x 32 mm). Schéma zapojení desky svorkovnice s DC/DC měničem s rozpiskou součástek je v příloze.

Dále je na desce ovládání ventilátoru SUNON EB60251S1-999. Ventilátor je napájen 12V s příkonem 1.62 W a průtokem vzduchu 39.93 m<sup>3</sup>/h. Kladný vodič napájení ventilátoru je připojen na +Vout1 a záporný na -Vent. Ovládací vstup VentCtr je s pull-down rezistorem 20 kΩ a pro sepnutí je zapotřebí na něj přivést napětí > 3V. Ventilátor je připevněn k boxu, v kterém nucenou konvekci vzduchu chladí umístěné součásti.



Obrázek 13: DC/DC měnič YH11057D

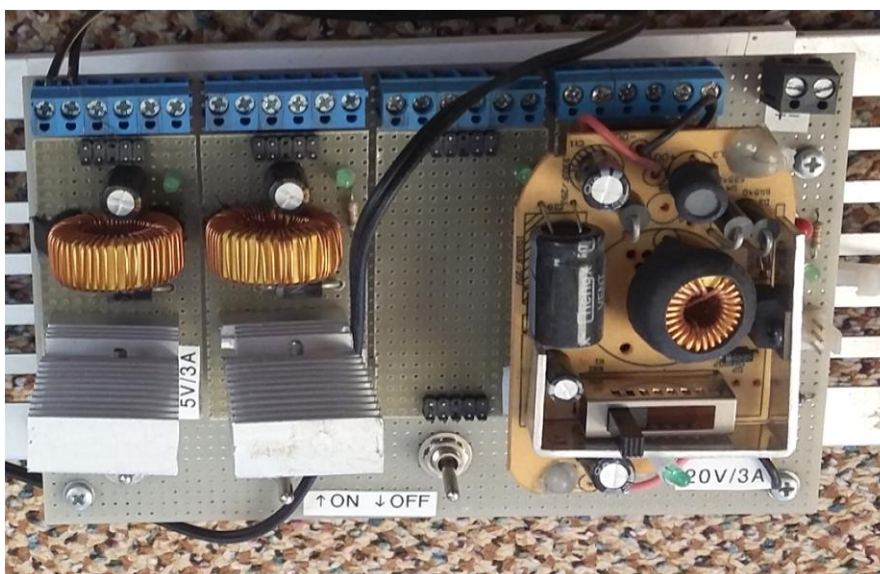
Tabulka 3: DC/DC měnič YH11057D

Parametr	Hodnota
Vstupní napětí	6 - 32 V
Výstupní napětí	6 - 42 V
Maximální vstupní proud	8 A
Maximální výstupní proud	5 A
Výkon	70W



Obrázek 14: Ventilátor SUNON EB60251S-999

DC/DC měniče na obrázku 15 nebyly nadále použity. DC/DC měnič 20V/3A napájel sbRIO. Jeden DC/DC měnič 5V/3A nebyl využíván a druhý napájel komponenty, které se nyní po přestavbě na modelu nevyskytují.



Obrázek 15: DC/DC měniče (zleva) - 20V/3A, 5V/3A, 5V/3A



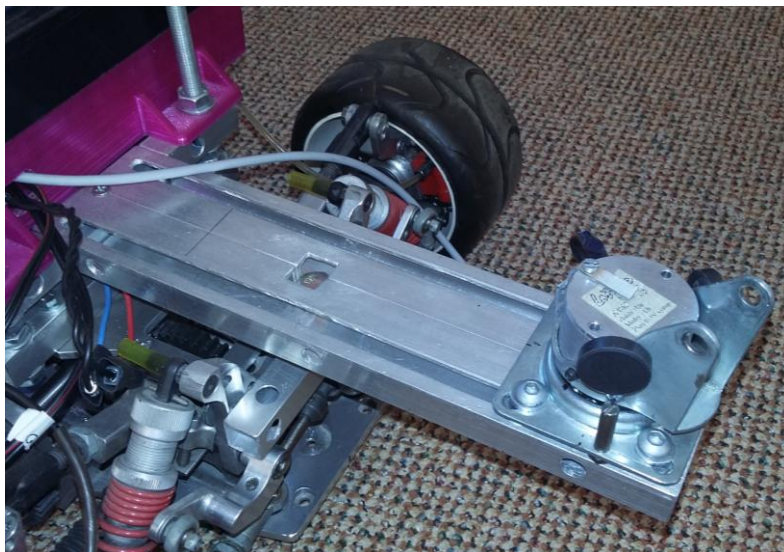
## 2.4. Lešikar

Lešikar je snímač měřící úhel natočení přívěsu (návěsu) vůči podélné ose tažného vozidla (obr. 16). V principu jde o Hallovy sondy pohybuující se v magnetickém poli dvou permanentních magnetů. Výstupní napětí sondy je přímo úměrné síle magnetického pole. Obrázek 17 zobrazuje závislost natočení a výstupního napětí Hallovy sondy při kalibraci Lešikaru. Tato závislost je nelineární, ryze monotónní. Obecně je problém s přesností Lešikaru a opětovným naměřením kalibračních bodů, které jsou při každé kalibraci jiné. Pro zesílení magnetického pole jsem na snímač nalepil další dva větší permanentní magnety, což se projevilo pozitivně. Citlivost Hallovy sondy je závislá na okolní teplotě (ukázka obr. 18). Typ Hallovy sondy použitý v Lešikaru je neznámý. Proto se upravuje signál ze snímače dle níže uvedené rovnice (2.4.1). Tento vztah předpokládá stálost magnetického pole se změnou teploty a dává do souvislosti změnu citlivosti v kalibračním bodě při aktuální teplotě okolí a teplotě okolí při kalibraci. Kalibrační bod je zapotřebí si vyznačit nejlépe přímo na snímači.

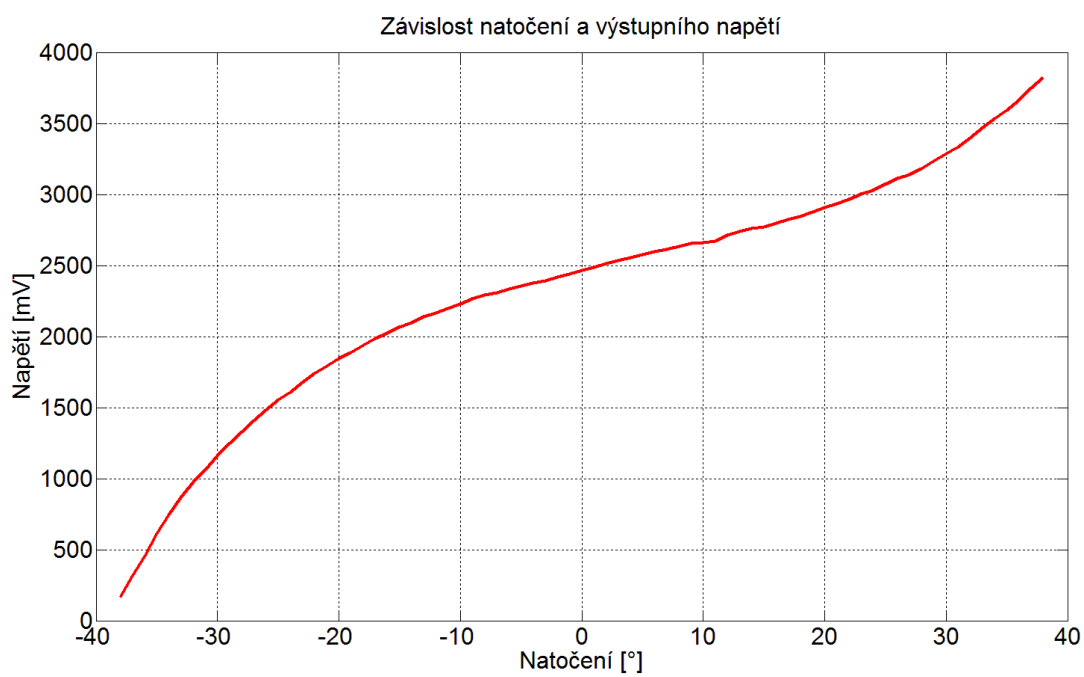
- $U_{k,T_k}$  výstupní signál změřený v kalibračním bodě  $k$  při okolní teplotě  $T_k$  v době kalibrace
- $U_{k,T}$  výstupní signál změřený v kalibračním bodě  $k$  při aktuální okolní teplotě
- $u$  aktuálně měřené napětí
- $u_k$  napětí odpovídající kalibraci

$$u = \frac{U_{k,T_k}}{U_{k,T}} * u_k \quad (2.4.1)$$

Byl zkonstruovaný držák za účelem variabilního nastavení polohy snímače (obr. 16) za a před zadní nápravu tažného vozidla. Výstupní signál z Lešikaru vyhodnocuje podprogram „senzor\_lesikar.vi“ běžící na FPGA. Kalibrační data jsou uložena v textovém souboru „data\_senzor\_lesikar.txt“.



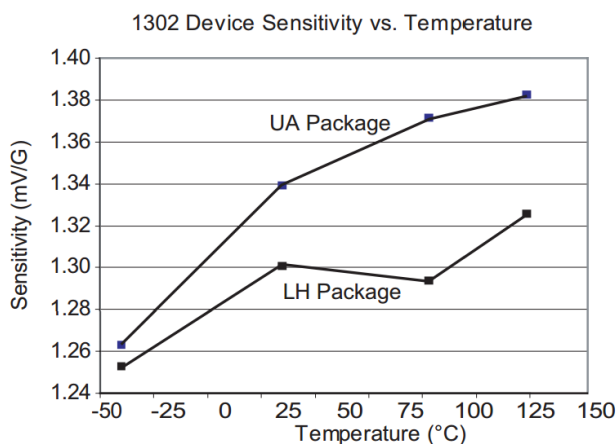
Obrázek 16: Lešikar a jeho uchycení



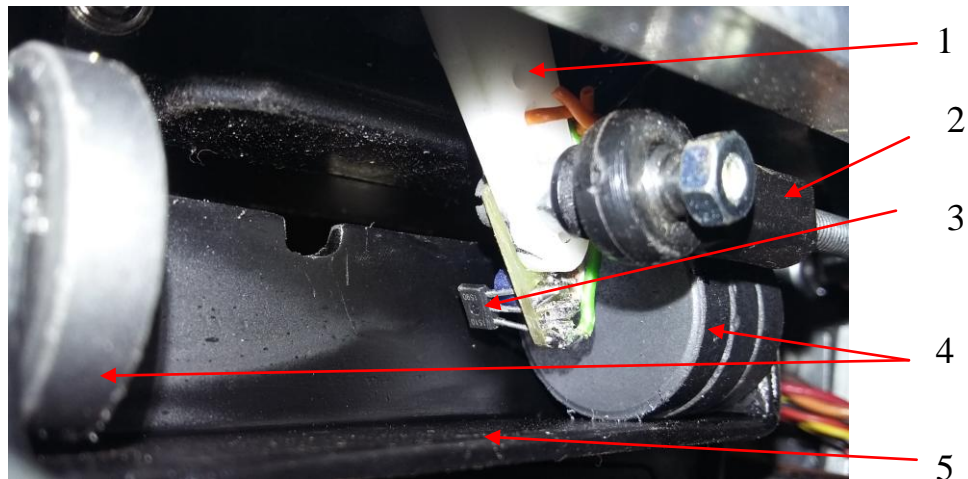
Obrázek 17: Závislost natočení a výstupního napětí

## 2.5. Snímač řízení

Doposud autonomní systémy vyvíjené na tomto modelu nepotřebovaly snímač natočení kol. Zpětnou vazbu pro jízdu správným směrem poskytovala kamera umístěná na přední části auta. V této diplomové práci, zabývající se autonomním couváním soupravy, takto umístěná kamera zatím postrádá uplatnění. Za účelem snímání úhlu natočení kol byl zkonstruován snímač na obrázku 19. Snímač funguje na stejném principu jako Lešikar. Ve snímači je zabudována Hallova sonda A1302KUA-T, jejíž závislost citlivosti na teplotě je vyjádřena na obrázku 18. Tato závislost je opět kompenzována dle rovnice (2.4.1). Zpětnovazebné řízení je realizováno softwarovým PID regulátorem. Závislost výstupního napětí na úhlu natočení je nelineární, ryze monotónní (obr. 20). Kalibrační body jsou proloženy polynomiální funkcí. Vyhodnocení vstupu z tohoto snímače a zpětnovazebné řízení zajišťuje podprogram „steering.vi“ běžící na FPGA. Koeficienty polynomiální funkce jsou uloženy v textovém souboru „rizeni\_poly.txt“. Kalibrační data jsou uložena v textovém souboru „rizeni\_kalib.txt“.

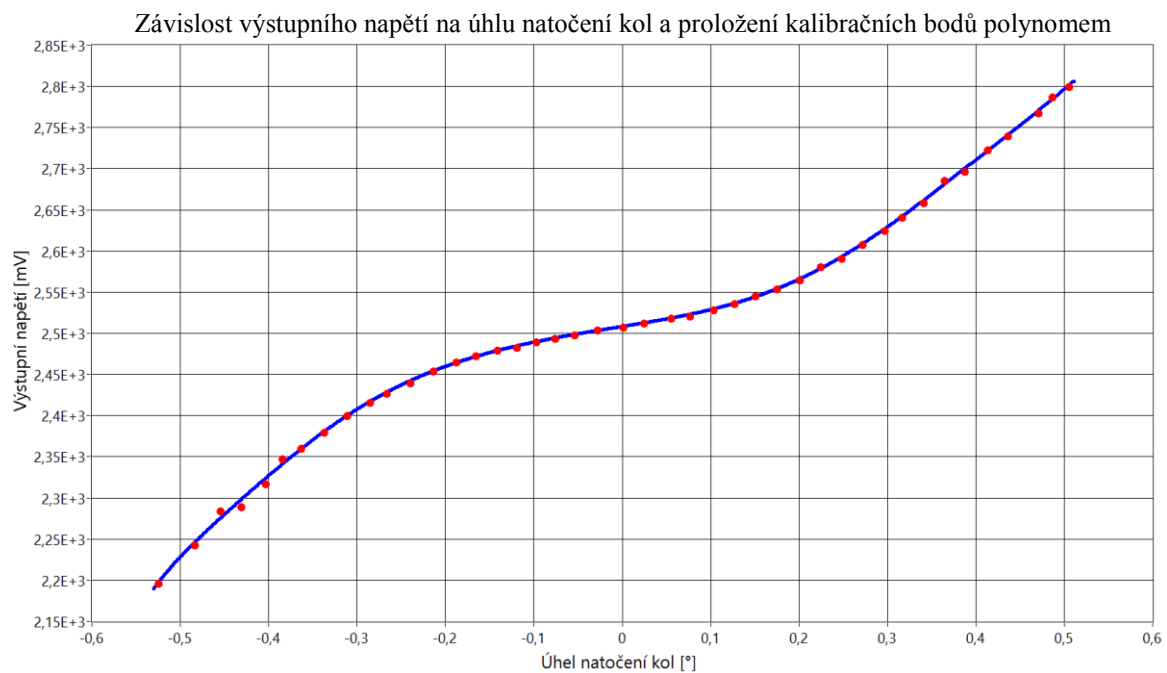


Obrázek 18: Závislost citlivosti Hallové sondy A1302KUA-T na teplotě (zdroj: specifikace od výrobce Allegro MicroSystems, Inc.)



Obrázek 19: Snímač úhlu natočení kol řízení

- 1...Rameno serva řízení tažného vozidla
- 2...Tyč řízení
- 3...Hallová sonda A1302KUA-T
- 4...Permanentní magnety
- 5...Ocelový držák



Obrázek 20: Závislost výstupního napětí na úhlu natočení kol a proložení kalibračních bodů polynodem (kalibrační body - červená, proložený polynom - modrá)

## 2.6. EW1 10/2015

EW1 10/2015 (dále jen EW1) je deska rozvádějící vstupy a výstupy ze sběrnic jednotky myRIO (obr. 21). EW1 nahrazuje předešle dvě desky, které byly použity pro sbRIO (obr. 22). Jedna deska sloužila jen pro analogové kanály a druhá pro digitální kanály. Jedna deska rozvede až 19 kanálů. Tyto desky jsou navrhovány ve spolupráci s elektrotechnickou fakultou a jsou vyrobeny precizně. Jsou dvouvrstvé s minimálním zásahem do GND vrstvy.

Důvod, proč jsem se rozhodl nahradit původní desky deskou EW1, je plné využití potenciálu myRIO. Na EW1 jsou rozvedeny veškeré kanály myRIO. Navíc kanály, tomu určené, jsou přizpůsobené diferenčnímu měření, kterými původní desky nedisponují. Původní desky mají zabudovaný CANON konektor, což nutilo rozebrat plochý sběrnicový kabel na jednotlivé kabely a každý z nich individuálně upevnit. V případě myRIO, které má dva MXP vývody pro sběrnicové konektory PFL34, by se sběrnice musely rozebrat a oddělit analogové kanály od digitálních a posléze sloučit zvlášť do CANON konektoru. Toto řešení je reálné, ale nepřehledné, matoucí a vizuálně neestetické. Navíc desky byly dělané na míru jednotlivým sensorům a akčním členům, které se nyní nepoužívají. Po nich zůstaly konektory a některé zavádějící popisky.

EW1 má u každého externího napájení digitálního PWM kanálu elektrolytický kondenzátor o kapacitě 68 uF s nízkým ESR kvůli nárazovému odběru digitálních serv. Dále u napájení zbytku konektorů je SMD kondenzátor s kapacitou 150 nF. Deska rozvádí stabilizované napájení o napětí 3.3V, 5V, -15V, +15V přivedené z myRIO a externí napájení maximálně do napětí 16V pomocí dvou souosých konektorů HS21 (5,5 x 2.1 mm). Tato napájení lze přivádět do různých větví konektorů pomocí přepínačů. Přepínání napájení jednotlivých větví by se mělo dělat s rozmyslem, protože hrozí poškození zařízení k nim připojených. Většina kanálů je vyvedená s napájením na konektor se zámkem PSH02-04PG s komfortním připojením stínění. Celkově je na EW1 šedesát kanálů. Dále obsahuje konektory pro vyvedení všech napájení z desky.

Kanály myRIO jsou přiřazeny ke konektorům EW1 pomocí popisků. Popisky jsou ve tvaru *kanál / napájení* (např. A2 / A1) nebo *kanál / přepínač větví napájení* (např. A25 / C2). Popisky přepínače větví napájení jsou ve tvaru *napájení1 / označení přepínače / napájení2* (např. A1 / C3 / E2). Význam písmen popisků je přiřazen dle tabulky 4. Význam čísel u písmen A a B je přiřazen dle obrázku 23. Význam čísel u písmena D je přiřazen dle obrázku 24. Například popisek A25 / C2 znamená, že na konektor je přiveden kanál z MXP A, což je konkrétně DIO7 / SPI. MOSI. Na tento konektor je přepínačem C2 přivedeno buď napájení E1 (externí), nebo A1 (interní z myRIO o napětí 5V).

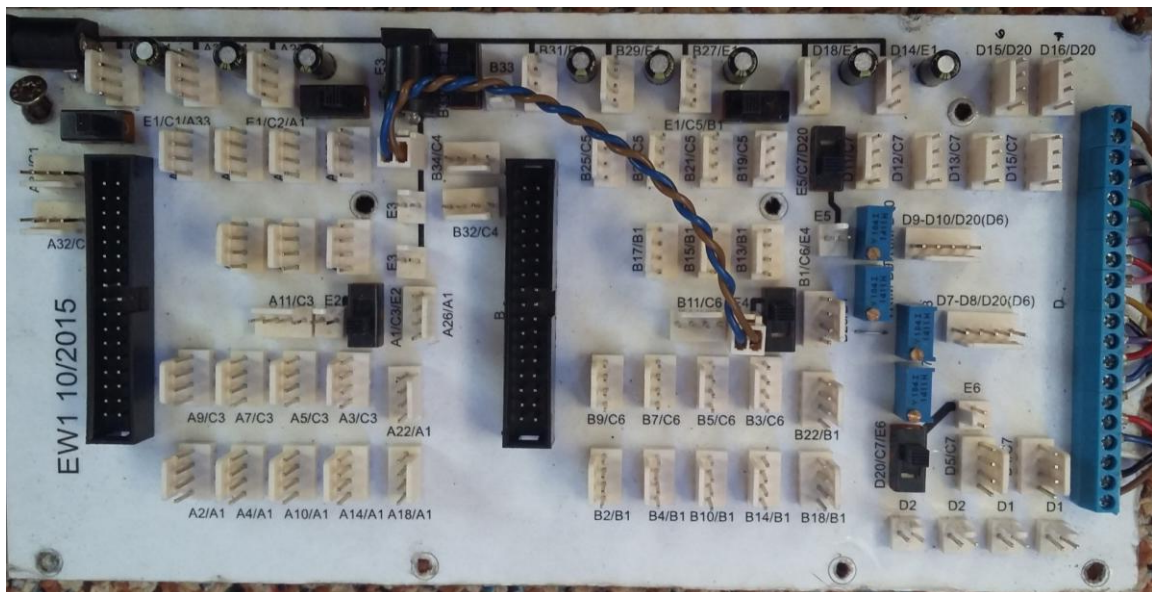
Na desce jsou čtyři trimry 100 kΩ pro diferenční měření dle schématu na obrázku 25. Značení trimrů je ve tvaru TRIM *kanál* (např. TRIM D7). Popisek

TRIM D7 znamená, že odpor nastavitelný trimrem je mezi kanálem D7 a uzemněním. Piny konektorů PSH02 jsou přiřazeny dle obrázku 33. Schéma zapojení EW1 10/2015 s rozpiskou součástek je v příloze.

Pro studijní účely o způsobu měření na jednotlivých kanálech doporučuji webové stránky NI ([www.ni.com](http://www.ni.com)).

Tabulka 4: Význam písmen

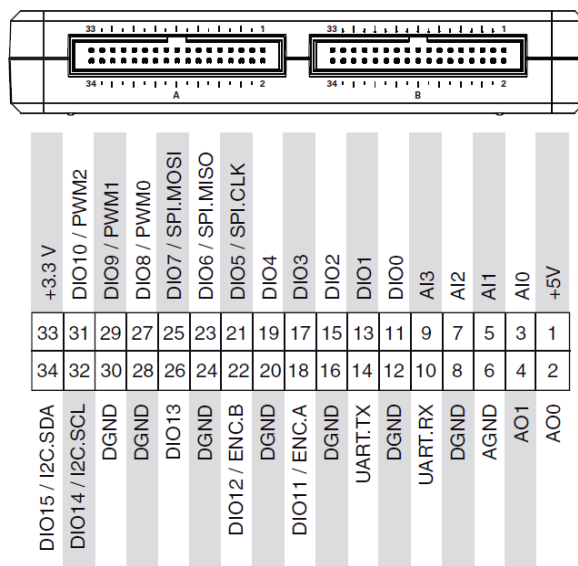
Písmeno	Význam
A	MXP A konektor myRIO
B	MXP B konektor myRIO
C	Přepínač větví napájení
D	MSP C konektor myRIO
E	Externí napájení



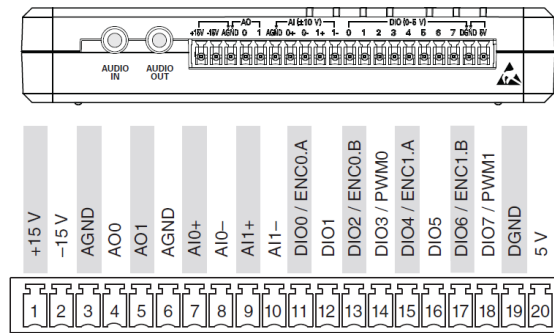
Obrázek 21: EW1 10/2015



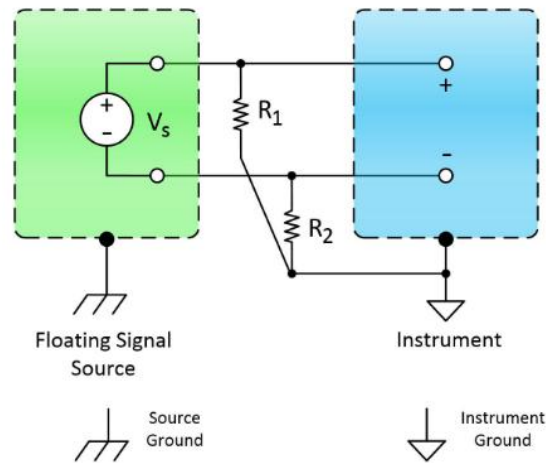
Obrázek 22: Desky používané s sbRIO



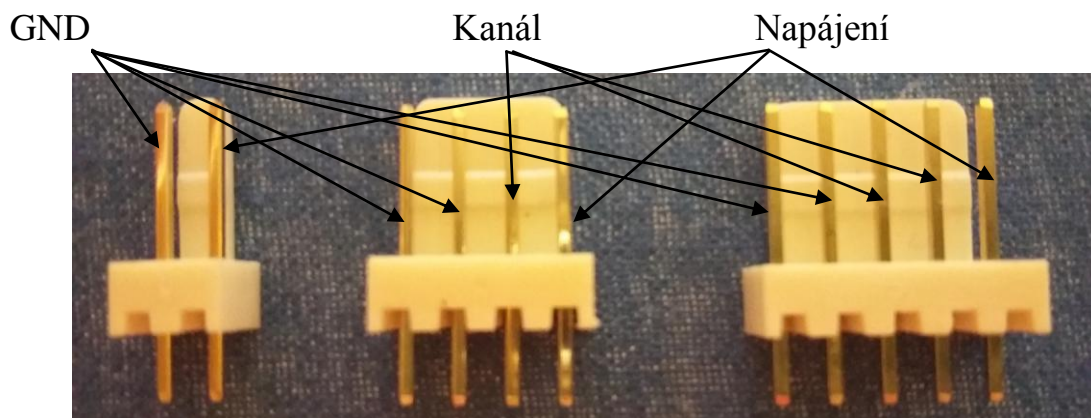
Obrázek 23: Význam čísel pro myRIO konektory MXP A a B



Obrázek 24: Význam čísel pro myRIO konektor MSP C



Obrázek 25: Schéma diferenčního měření (zdroj: [www.ni.com](http://www.ni.com))

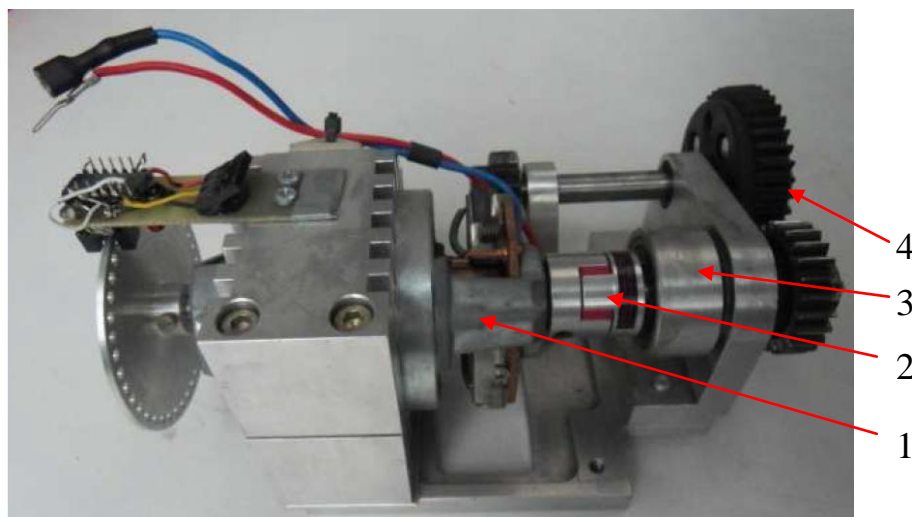


Obrázek 26: Význam pinů konektorů PSH02- (zleva) 02PG, 04PG, 05PG

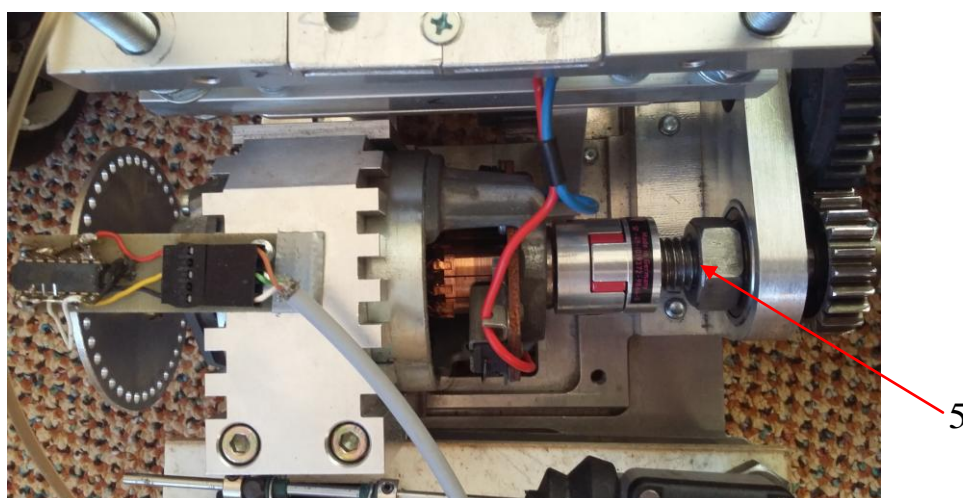


## 2.7. Výměna hřídele pohonu

Před přestavbou kvůli regulátoru nedokázal elektromotor jet výběhem a při snížení délky impulsu PWM v nějaké rychlosti, kterou se model pohyboval, elektromotor okamžitě brzdil. Toto brzdění bylo nežádoucí, protože model je vybaven kotoučovými brzdami, které jsou ovládány servy. Z toho důvodu se mezi spojku a stálý převod vřadila volnoběžka (obr. 20), která brzdný účinek motoru eliminovala. Bohužel volnoběžka neumožňuje couvání modelu, kterým se v této práci budu zabývat. Tudíž bylo nutné tuto volnoběžku opět demontovat. V konečném důsledku demontáž volnoběžky znamenala výrobu nové hřídele. Výrobní výkres nové hřídele je v příloze.

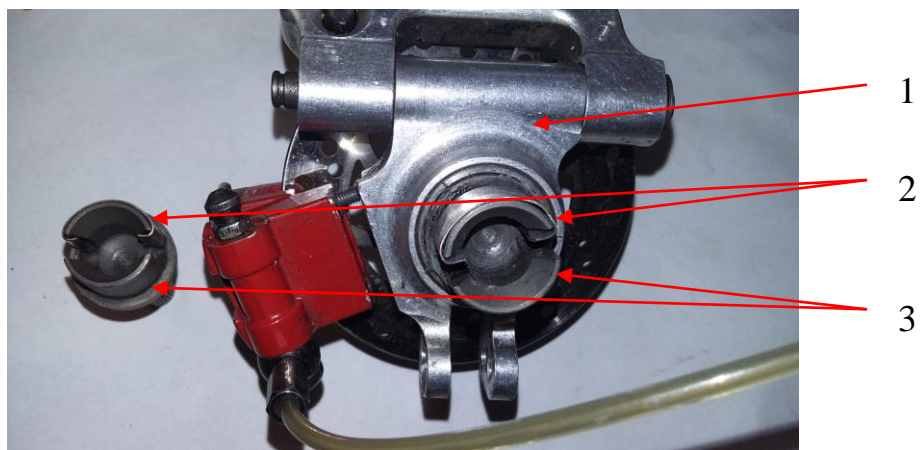


Obrázek 27: (Zleva) Motor (1), spojka (2), volnoběžka (3), stálý převod (4) [3]



Obrázek 28: Vestavěná nová hřídel (5)

Dále byly v pohonném řetězci vymezeny vřle na kloubech zadní nápravy pomocí ocelové pásky. Vřle jsou nežádoucí díky plánovanému způsobu řízení autonomního couvání soupravy. Způsob vymezení vřle je znázorněn na obrázku 29.



Obrázek 29: Způsob vymezení vřlí na zadní nápravě modelu

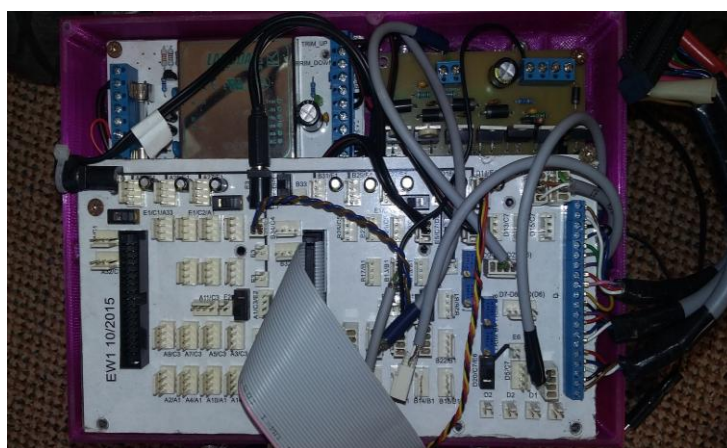
- 1...Těhlice zadní nápravy tažného vozidla
- 2...Ocelové pásky
- 3...Klouby zadní nápravy tažného vozidla

## 2.8. Box

Pro kompaktní a bezpečné upevnění desek, měničů a výpočetní jednotky byl zavržen box (obr. 30 a obr. 31). Umožňuje efektivnější chlazení komponent vestavěným ventilátorem. Box je vyroben metodou 3D tisku na Fakultě informačních technologií ČVUT z materiálu PLA. Soubory s modely boxu jsou uloženy na disku.



Obrázek 30: Box (venkovní pohled)



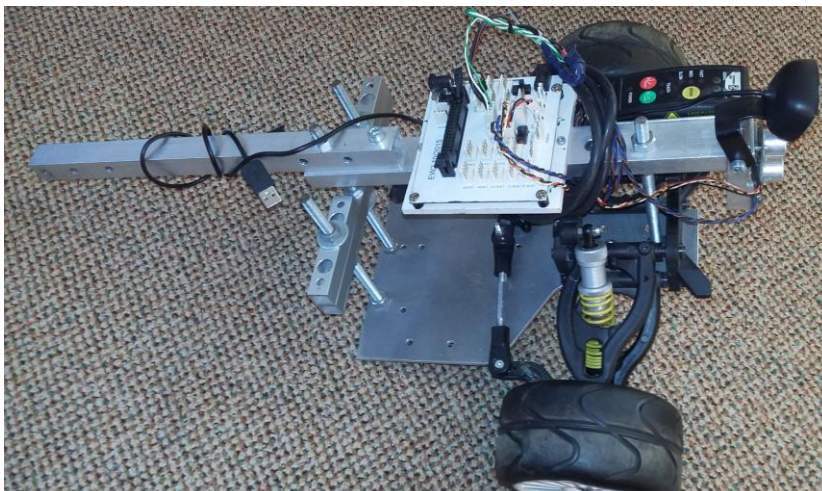
Obrázek 31: Box (pohled zevnitř)

## 2.9. Stavba přívěsu

Jako příslušenství k modelu byla tendence k vytvoření variabilní stavebnice, z které lze sestavit různě dlouhý návěs nebo přívěs s různým počtem říditelných, nebo neříditelných náprav s brzdami a inkrementálními snímači otáček. Aktuální stav stavebnice byl takový, že nešlo sestavit jednonápravový přívěs. Z tohoto důvodu byly použity některé komponenty ze stavebnice a byl vyroben prakticky nový přívěs (obr. 32). Na přívěsu je nainstalován nosič, na kterém jsou uchyceny tyto komponenty: kamera LifeCam HD-3000, optosenzor LT3PI, ultrazvukový snímač HC-SR04, osvětlení a deska EW2 10/2015. Tento nosič lze s malými úpravami upevnit i na přední část tažného vozidla.

Na přední části vozidla byla umístěná velmi kvalitní síťová kamera AXIS 212ptz (obr. 34). Informace o této kameře lze najít v literárním zdroji [3]. MyRIO nepodporuje síť Ethernet, tudíž se pořídil USB 2.0 to Fast Ethernet Adapter (obr. 34). Na počátku se ukázalo, že navázat stálou komunikaci mezi AXIS 212ptz a myRIO je celkem obtížné. Odborníci z NI doporučili přechod na USB kameru. Byla zakoupena nízkonákladová webová kamera LifeCam HD-3000. Tato kamera není tak kvalitní jako AXIS 212ptz, ale problémy s komunikací byly odstraněny. Navíc v průběhu bádání a hlubšího porozumění problematiky bylo zjištěno, že existuje naděje na zlepšení komunikace AXIS 212ptz s myRIO, a tudíž by se tato kamera minimálně mohla nainstalovat zpět na přední část auta. Pro USB kameru byl vyroben držák, který umožňuje její naklápění.

Bližší informace o ultrazvukovém snímači HC-SR04 lze najít v literárním zdroji [3], taktéž o optosenzoru LT3PI v literatuře [5]. Pro dosažení stabilní intenzity světla bylo vestavěno LED osvětlení. Osvětlení napájí 12V (hnědý kabel +, černý -) a je ovládáno digitálním kanálem (modrý kabel). Deska EW2 10/2015 je menší verzí EW1 10/2015 a umožňuje rozvedení jednoho portu MXP z myRIO.



Obrázek 32: Jednonápravový přívěs



Obrázek 33: Jednonápravový přívěs (pohled zezadu)



Obrázek 34: (Zleva) Axis 212ptz a USB 2.0 to Fast Ethernet Adapter

## 2.10. Závěr z přestavby modelu

Současný stav soupravy je na obrázku 35. Většina úprav popsanych v predešlych kapitolach byla provedena za účelem umožnit modelu couvání s přívěsem. Nicméně je zapotřebí přestavbu dokončit po hardwarové a softwarové stránce. Měly by se zprovoznit brzdy, inkrementální snímače otáček kol, nainstalovat kameru na přední část auta a dovybavit snímači vzdálenosti okolních objektů. Doporučuji koupit nové akumulátory, protože současné ztratily kapacitu a rychle se vybíjejí. Doporučuji uvažovat nad výměnou snímače úhlu natočení kol a Lešikaru za optické enkodéry. K projektu nebyl přidělen školní notebook (host PC), který by zobrazoval uživatelské prostředí (interface) vyvíjených programů. Jako levnější alternativu lze použít aplikaci Dashboard od NI v kombinaci například s tabletem. Dále je zapotřebí přizpůsobit dosud vyvíjené algoritmy vstupům a výstupům z myRIO FPGA. Celý projekt je uložen na disku pod názvem „SMALL.lvproj“. Data potřebná pro přístup k myRIO jsou shrnuta v tabulce 5. Připojení senzorů, akčních členů a zařízení k desce EW1 10/2015 je shrnuto v tabulce 6 a k desce EW2 10/2015 v tabulce 7.



Obrázek 35: Souprava v roce 2016

Tabulka 5: Přihlašovací údaje pro myRIO

User name	admin
Password	admin
IP Address	172.22.11.2
IP Address Wireless	172.16.0.1

Tabulka 6: Připojení senzorů / akčních členů a zařízení k EW1 10/2015

<b>Senzor / akční člen / zařízení</b>	<b>EW1 10/2015</b>
BEMF	D9-D10/D20 (D6)
Inkrementální snímání otáček motoru	B15/B1
LAMBDA PXF40-12S05	E1
Lešikar	B7/E4(C6)
Napětí baterie	B3/C6
Ovládání LAMBDA PXF40-12S05	D11/C7
Ovládání motoru	D16/D20 (I1) a D17/D20 (I2)
Ovládání ventilátoru	B19/C5
Řízení natočení kol	D14/E1
Řízení odporu vinutí motoru	D4/C7
Snímač uhlu natočení řízení	B9/C6 a B2/B1 (napájení-hnědý kabel)
Teplota	B5/C6
YH11057D	E3
MyRIO MXP B	B
MyRIO MSP C	D
Pozn.: Připojení konektorů E3 a E4	

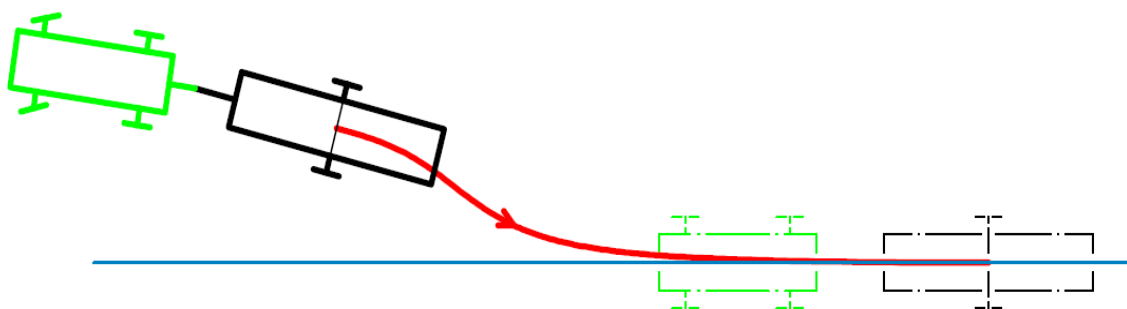
Tabulka 7: Připojení senzorů / akčních členů a zařízení k EW2 10/2015

<b>Senzor / akční člen / zařízení</b>	<b>EW2 10/2015</b>
LT3PI	A9/E2(C3)
YH11057D	E3
HC-SR04 (trig)	A13/A1
HC-SR04 (echo)	A15/A1
Ovládání osvětlení	A11/E2(C3)
MyRIO MXP A	A
Pozn.: Připojení konektorů E2 a E3	

### 3. Autonomní couvání soupravy

Tato kapitola se zabývá vývojem algoritmů pro autonomní couvání soupravy složené z tažného vozidla a jednonápravového přívěsu. Algoritmy jsou počítané jednotkou myRIO. Uživatelské vstupy a zobrazování dat je zprostředkováno pomocí host PC. Jedním z úkolů je ověřit správnost předpokladů, na nichž jsou algoritmy založené.

V rámci zjednodušení je cílem, aby souprava, nacházející se v dané poloze vůči rovné vodící čáře vyznačené na vozovce, srovnala couváním svou podélnou osu kolineárně právě s vyznačenou čárou bez lidského zásahu do řízení (obr. 36). Poloha soupravy vůči vodící čáře musí být taková, aby byl zřejmý směr couvání podél této čáry a kamera během manévru s ní neztratila vizuální kontakt. Dále musí existovat relevantní trasa (viz další podkapitoly), podél které se bude pohybovat střed nápravy přívěsu během couvání.



Obrázek 36: Tažné vozidlo (zelená), přívěs (černá), trasa couvání (červená), vodící čára (modrá), poloha soupravy výchozí (plná), koncová (čerchovaná)

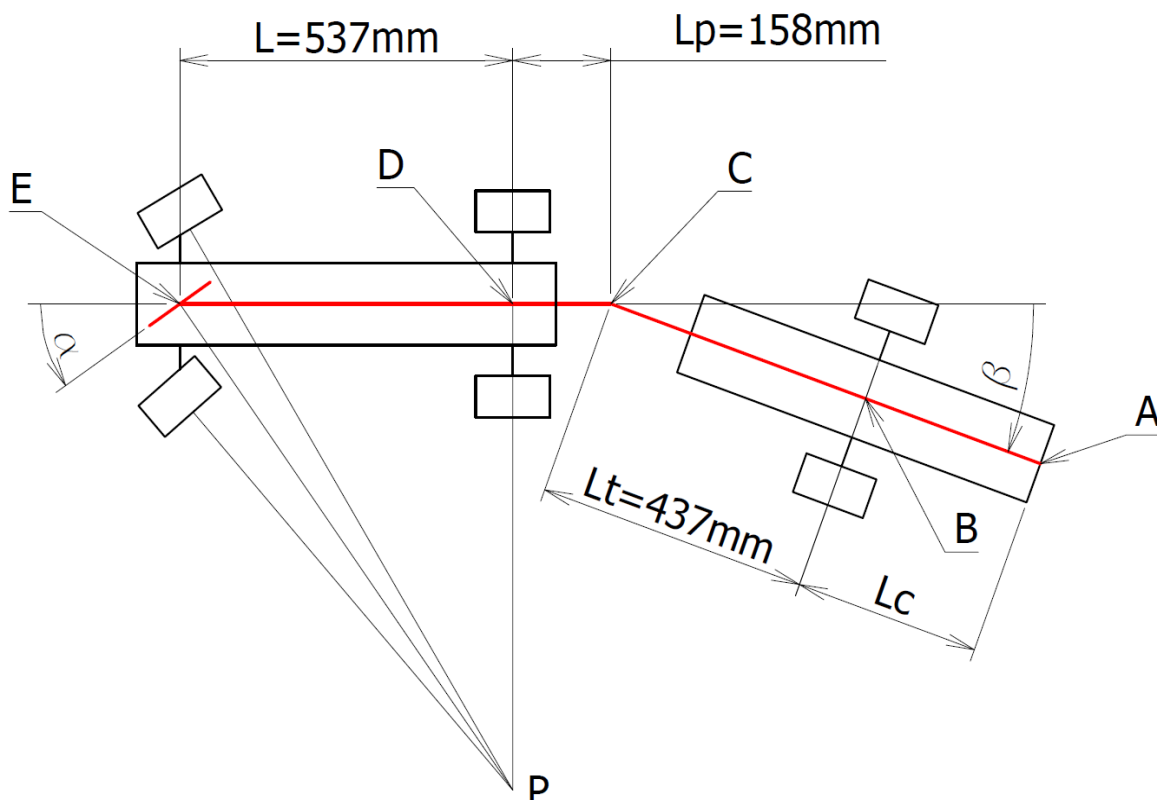
Vstupem do algoritmu je natočení a poloha středu nápravy přívěsu v globálním souřadnicovém systému vyhodnocené kamerou a natočení přívěsu vůči tažnému vozidlu odečtené ze snímače Lešikar. Výstup z algoritmu je pouze natočení kol řízení. Program po spuštění bude postupovat v následujících krocích:

1. Vyhodnotit polohu čáry vůči soupravě
2. Založit globální souřadnicový systém
3. Vygenerovat relevantní trasu pro couvání
4. Zahájit couvání
5. Ukončit couvání



## 3.1. Jednostopý model soupravy

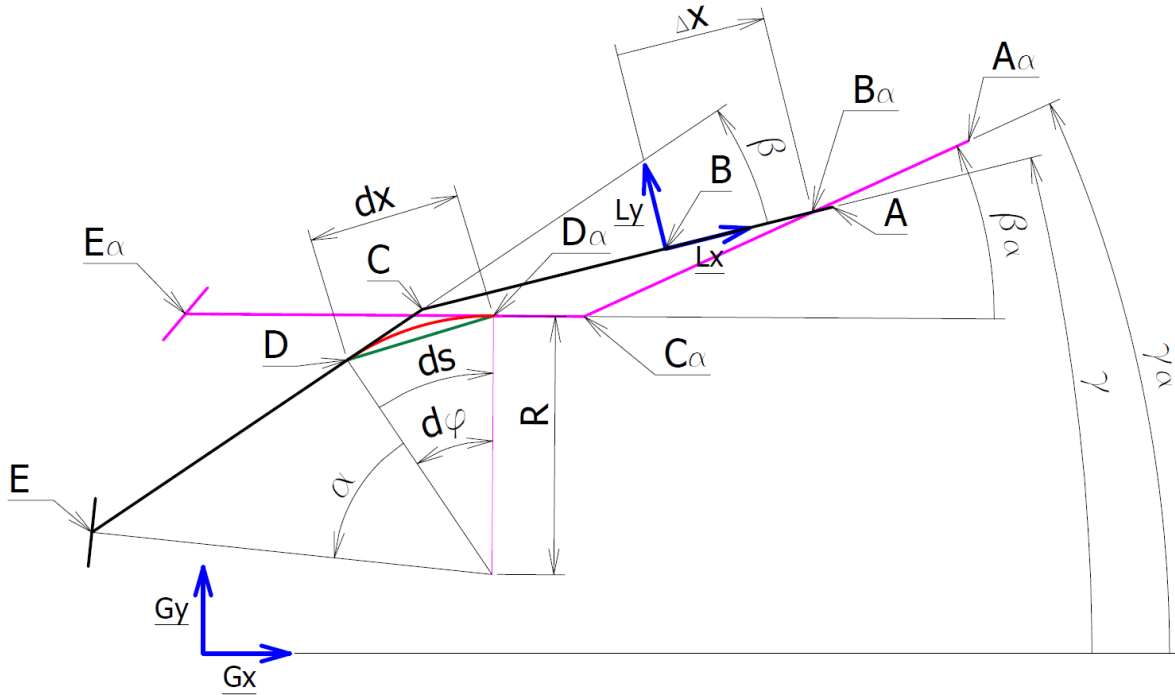
Tato podkapitola se zabývá odvozením způsobu řízení soupravy tak, aby couvala požadovaným směrem. Za tímto účelem byl sestaven jednostopý model soupravy. Tento model, na rozdíl od ostatních modelů zmíněných v literatuře [6], zanedbává dynamické vlivy. Dále z kinematického hlediska nepočítá s rychlostí couvání vozidla. Respektování veškeré dynamiky a kinematiky soupravy by vedlo k sestavení složitých diferenciálních rovnic a jejich integraci. Data do těchto rovnic by se musela zjišťovat aktuálním měřením (např. hmotnost soupravy, rychlost, zrychlení), experimentálním měřením (tření v rotační vazbě, směrová tuhost pneumatik, atd.). Další otázkou je způsob nebo přesnost měření a s tím spojené peněžní náklady. Níže popsáný model respektuje pouze geometrické rozměry soupravy a je sestaven pro iterační výpočty. Popis a důležité nominální rozměry soupravy s vyznačeným jednostopým model jsou na obrázku 37.



Obrázek 37: Popis a rozměry soupravy, jednostopý model (červená)

Chování jednostopého modelu je znázorněno na obrázku 38. Základním předpokladem je, že střed nápravy přívěsu (**B**) se při konstantním natočení kol ( $\alpha$ ) tažného vozidla a ujetí krátké vzdálenosti ( $ds$ ) bude pohybovat po výchozí

podélné ose přívěsu ( $L_x$ ) a přesune se do bodu  $B_\alpha$  o vzdálenost  $\Delta x$ . Pro vyjádření polohy jednotlivých bodů soupravy v globálním souřadnicovém systému před a po (index  $\alpha$ ) manévru slouží níže popsané rovnice. Pro přehlednost je v rovnici (3.1.1) vypsaná matice směrových kosinů s argumentem.



Obrázek 38: Kinematika jednostopého modelu

$$\mathbf{S}_\xi = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi \\ \sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

$$R = \frac{L}{\tan \alpha} \quad (3.1.2)$$

$$\varphi = \frac{ds}{R} \quad (3.1.3)$$

$$dx = 2 * R * \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad \alpha \neq 0; \quad dx = ds \quad \alpha = 0 \quad (3.1.4)$$

$$\mathbf{A}^G = \mathbf{S}_\gamma * \begin{bmatrix} L_c \\ 0 \end{bmatrix}^L + \mathbf{B}^G \quad (3.1.5)$$

$$\mathbf{C}^G = \mathbf{S}_\gamma * \begin{bmatrix} -L_t \\ 0 \end{bmatrix}^L + \mathbf{B}^G \quad (3.1.6)$$

$$\mathbf{D}^L = \mathbf{S}_\beta * \begin{bmatrix} -L_p \\ 0 \end{bmatrix}^L + \begin{bmatrix} -L_t \\ 0 \end{bmatrix}^L \quad (3.1.7)$$

$$\mathbf{D}^G = \mathbf{S}_\gamma * \mathbf{D}^L + \mathbf{B}^G \quad (3.1.8)$$

$$\mathbf{E}^L = \mathbf{S}_\beta * \begin{bmatrix} -L_p & -L \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^L + \begin{bmatrix} -L_t \\ 0 \end{bmatrix}^L \quad (3.1.9)$$

$$\mathbf{E}^G = \mathbf{S}_\gamma * \mathbf{E}^L + \mathbf{B}^G \quad (3.1.10)$$

$$\mathbf{D}_\alpha^L = dx * \begin{bmatrix} \cos(\beta - \frac{\varphi}{2}) \\ \sin(\beta - \frac{\varphi}{2}) \end{bmatrix} + \mathbf{D}^L \quad (3.1.11)$$

$$\mathbf{D}_\alpha^G = \mathbf{S}_\gamma * \mathbf{D}_\alpha^L + \mathbf{B}^G \quad (3.1.12)$$

$$\mathbf{E}_\alpha^G = \mathbf{S}_\gamma * \left( \mathbf{S}_{(\beta-\varphi)} * \begin{bmatrix} -L \\ 0 \end{bmatrix}^L + \mathbf{D}_\alpha^L \right) + \mathbf{B}^G \quad (3.1.13)$$

$$\mathbf{C}_\alpha^L = \begin{bmatrix} C_{\alpha x} \\ C_{\alpha y} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{(\beta-\varphi)} * \begin{bmatrix} L_p \\ 0 \end{bmatrix}^L + \mathbf{D}_\alpha^L \quad (3.1.14)$$

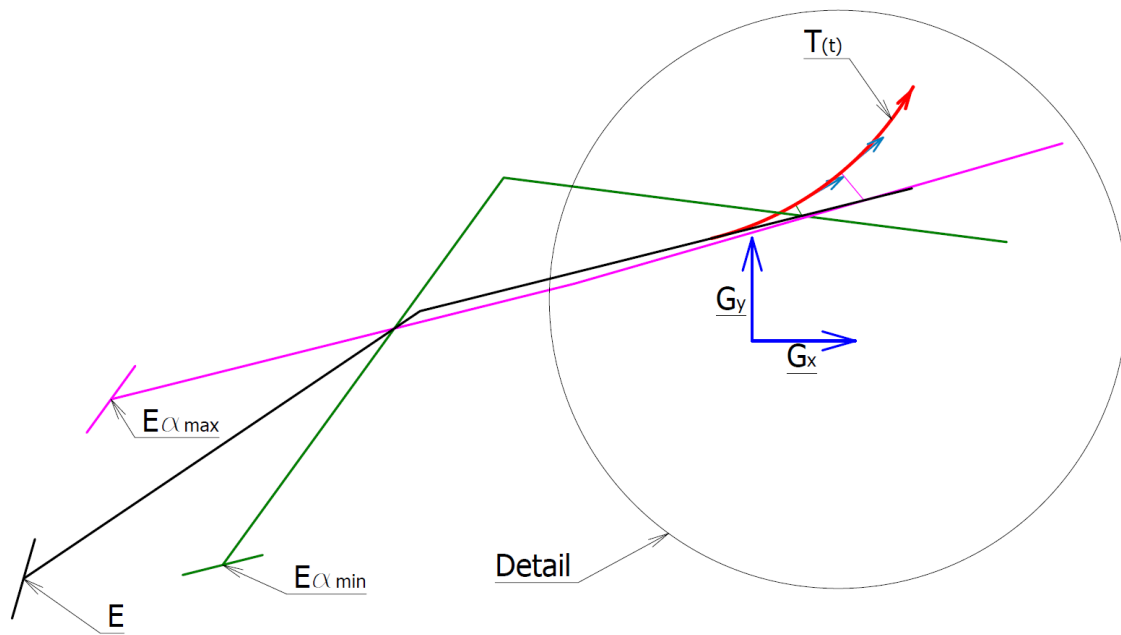
$$\mathbf{C}_\alpha^G = \mathbf{S}_\gamma * \left( \mathbf{S}_{(\beta-\varphi)} * \begin{bmatrix} -L_p \\ 0 \end{bmatrix}^L + \mathbf{D}_\alpha^L \right) + \mathbf{B}^G \quad (3.1.15)$$

$$\mathbf{B}_\alpha^L = \begin{bmatrix} C_{\alpha x} + \sqrt{(L_t^2 - C_{\alpha y}^2)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.16)$$

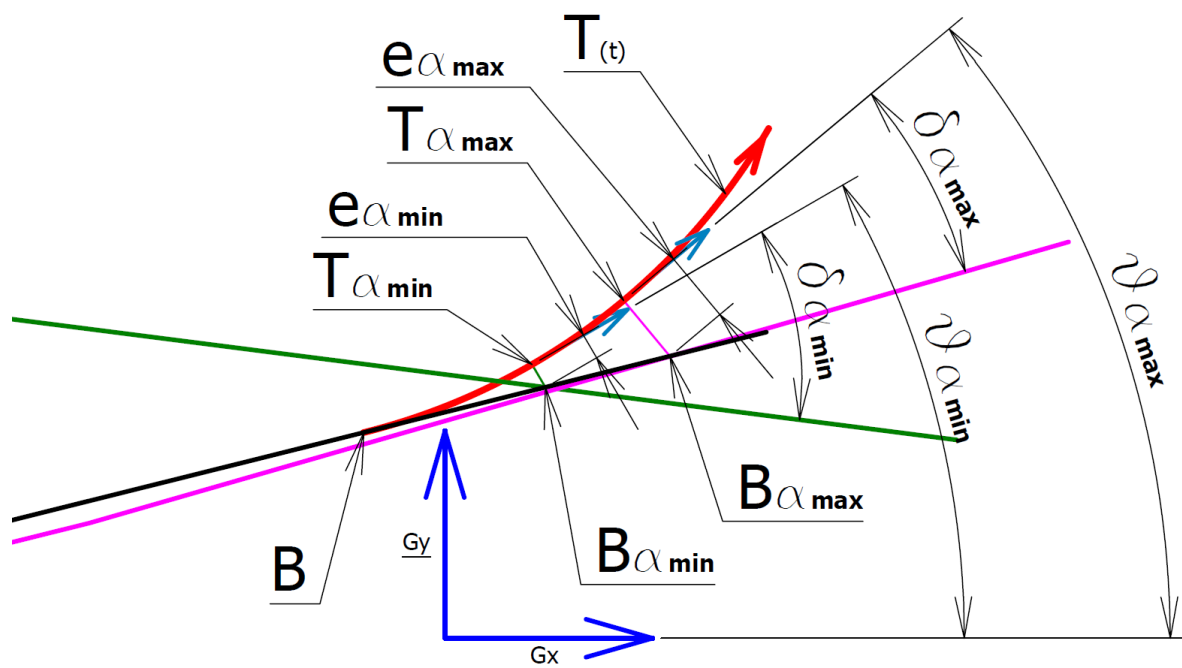
$$\mathbf{B}_\alpha^G = \mathbf{S}_\gamma * \mathbf{B}_\alpha^L + \mathbf{B}^G \quad (3.1.17)$$

$$\mathbf{A}_\alpha^G = \frac{\mathbf{B}_\alpha^G - \mathbf{C}_\alpha^G}{\|\mathbf{B}_\alpha^G - \mathbf{C}_\alpha^G\|} * L_c + \mathbf{B}_\alpha^G \quad (3.1.18)$$

Způsob řízení couvání soupravy podél trasy ( $\mathbf{T}_{(t)}$ , parametrická křivka) je naznačen na obrázku 39. Řízení vychází z rozsahu natočení kol tažného vozidla  $\alpha \in \langle \alpha_{min}, \alpha_{max} \rangle$ .



Obrázek 39: Řízení jednostopého modelu



Obrázek 40: Detail obrázku 40

Výsledné natočení kol  $\alpha_c$  tažného vozidla je dáno rovnicí (3.1.19). Bod  $T_\alpha = T_{(t_\alpha)}$  je dán vyhledáním minima funkce  $d_{(t)}$  dle rovnice (3.1.20). Úhel  $\vartheta_\alpha$  je návratovou hodnotou uživatelsky definované funkce „myatan\_RT(TT).m“, která je součástí „SMALL.lvproj“. Tato funkce vrací úhel natočení vektoru  $TT$

od vodorovné osy souřadnicového systému v rozsahu  $\langle 0, 2\pi \rangle$ . Chyba řízení ( $e_\alpha$ ) po manévru je vyjádřena jako vzdálenost středu nápravy přivěsu ( $\mathbf{B}_\alpha$ ) od trasy ( $\mathbf{T}_{(t)}$ ). Velikost této chyby závisí na ujeté vzdálenosti  $ds$ .

$$|\delta_{(\alpha_c)}| = \min_{\alpha \in \langle \alpha_{min}, \alpha_{max} \rangle} |\delta_{(\alpha)}| \quad (3.1.19)$$

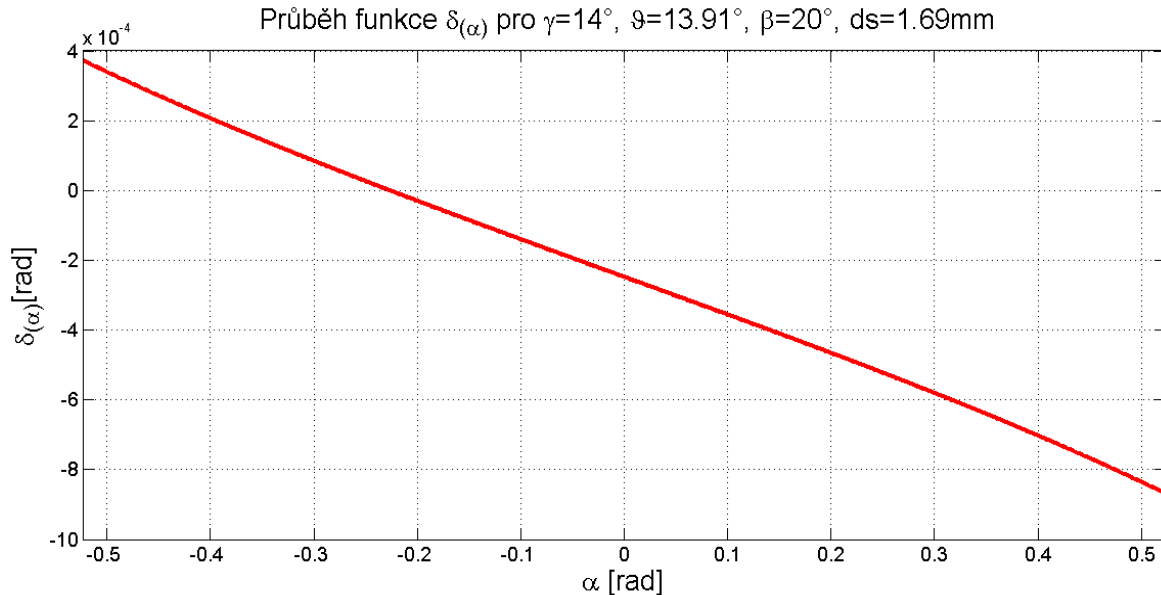
$$d_{(t_\alpha)} = \min_{t \in M} d_{(t)} = \min_{t \in M} \|\mathbf{T}_{(t)} - \mathbf{B}_\alpha\| \quad (3.1.20)$$

$$\vartheta_\alpha = myatan\_RT(\mathbf{T}'_{(t_\alpha)}) \quad (3.1.21)$$

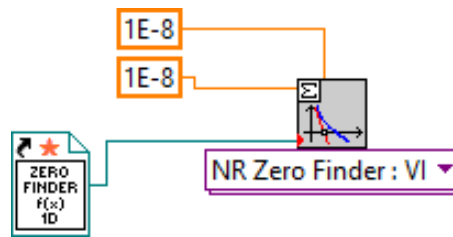
$$\delta_\alpha = \vartheta_\alpha - \gamma_\alpha \quad (3.1.22)$$

$$e_\alpha = \|\mathbf{T}_{(t_\alpha)} - \mathbf{B}_\alpha\| \quad (3.1.23)$$

Na obrázku 41 je znázorněn průběh funkce  $\delta_\alpha$  pro konkrétní hodnoty parametrů. Předpokladem pro výpočty je, že tato funkce je spojitá a ryze monotónní. Výpočet minima funkce  $|\delta_\alpha|$  je realizován iteračními metodami. Odzkoušená je metoda půlení intervalů, která k řešení konverguje velmi rychle. Nicméně pro jednoduchost a přehlednost byly využity vestavěné iterační funkce v LabVIEW. Při testování se ukázalo, že iterační výpočty dávají výsledky celkem rychle, a tudíž dávají předpoklad k vhodnému způsobu řízení.



Obrázek 41: Průběh funkce  $\delta_{(\alpha)}$  pro  $\gamma = 14^\circ$ ,  $\vartheta = 13.91^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$ ,  $ds = 1.69mm$



Obrázek 42: Mathematics/Scripts and Formulas/Zeros/Newton Raphson Zero Finder.vi

V rámci zkrácení výpočetního času jsou výpočty řešeny dle následujícího postupu. Pokud je tvrzení (3.1.24) pravdou, výpočet probíhá iterační metodou „Newton Raphson Zero Finder.vi“ (obr. 42). V opačném případě je minimalizace funkce  $|\delta_\alpha|$  počítaná jen v krajních bodech definičního oboru.

$$\delta_{\alpha_{min}} * \delta_{\alpha_{max}} < 0 \quad (3.1.24)$$

Předběžně byl tento způsob řízení jednostopého modelu simulován v programu MATLAB. Simulace poskytovaly pozitivní výsledky, proto jsem se rozhodl dál tuto myšlenku rozvíjet a otestovat na skutečném modelu soupravy. Dokonce lze touto simulací vypočítat chování soupravy  $n$  kroků dopředu pro ujetí vzdálenosti  $n * ds$  při skutečném řízení, čímž lze svým způsobem eliminovat šum ze snímačů (hlavně z USB kamery) tím, že se na začátku výpočtu průměrují výstupy ze snímačů dostatečným počtem vzorků a tyto hodnoty jsou vstupy do algoritmu řízení. Algoritmus vypočítá výstupy pro  $n$  kroků dopředu řazené chronologicky do zásobníku FIFO, který je typu *Host to Target - DMA* a v projektu „SMALL.lvproj“ je pod názvem „ARsteering“. Celý zásobník je exportován na čip FPGA a tam je vyprazdňován v závislosti na ujeté dráze vzhledem k délce kroku  $ds$ . Po vyprázdnění zásobníku se celý proces opakuje, dokud se souprava nepřemístí do cílového místa. Ujetá vzdálenost je měřená pomocí inkrementálního snímání otáček motoru. Tímto je určen nejmenší krok  $ds$ , který je při současném celkovém převodu cca 1.69mm. Výpočty algoritmu řízení probíhají na procesoru myRIO v podprogramu „Steering\_RT.vi“.

## 3.2. Generování trasy couvání

Generování trasy je jedním ze stěžejních úkolů autonomního couvání soupravy. V první řadě je nutné podotknout, že generování trasy, popsané v této podkapitole, nijak nerespektuje rozmístění objektů kolem soupravy tak, aby nedošlo ke kolizi. Předpokladem je, že prostor mezi soupravou a vodící čarou je bez překážek (obr. 36). Způsobů, jak zacouvat kolineárně k vodící čáře, je jistě mnoho. Z toho důvodu jsem stanovil následující vlastnosti a optimalizační kritéria, které by trasa měla splňovat. Trasa bude vyjádřena matematickou funkcí se spojitostí alespoň  $C^2$ . Její křivost bude taktéž se spojitostí alespoň  $C^2$ . Optimalizační kritérium pro danou funkci bude zvolení nejkratší trasy. Trasa by se měla co nejlépe přizpůsobit výchozí poloze soupravy a plynule navázat na vodící čáru. Hlavní vlastností je relevantnost trasy. Jistě mnozí z praxe víme, že pokud úhel natočení  $\beta$  přesáhne určitou mezní hodnotu  $\beta_{mez}$ , již není možné tento úhel pouhým couváním zmenšit a při pokračování v manévru dojde ke kolizi tažného vozidla a přívěsu. Proto je nutné generovat trasu s ohledem na tuto skutečnost. Algoritmem „maxbeta\_RT.m“ lze iteracemi zjistit hodnotu úhlu  $\beta_{mez}$  pro danou velikost kroku  $ds$  při natočení kol  $\alpha_{max}$ . Nicméně při krátkém kroku  $ds$  vychází  $\beta_{mez}$  prakticky stejně, jako když se sjednotí póly pohybu tažného vozidla a přívěsu do bodu **P** (obr. 43). Může se stát, že  $\beta_{mez}$  je ještě menší než výstup z „maxbeta\_RT.m“ vzhledem k rozsahu senzoru natočení a skutečným rozměrům soupravy (obr. 37). Výsledný úhel  $\beta_{mez}$  je výstupem z algoritmu „limitation\_RT.m“.

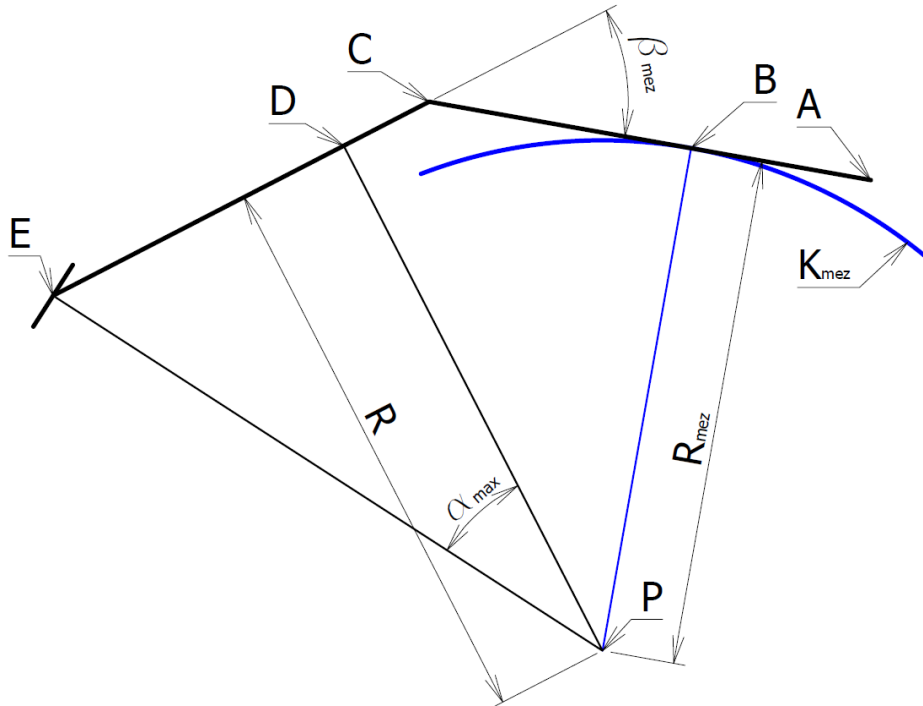
Plyne z toho, že bod **B** nedokáže opsat menší kružnici než  $K_{mez}$  o poloměru  $R_{mez}$ . Pro první přiblížení je relevantnost trasy určena podmínkou (3.2.1), která říká, že podél celé trasy se nesmí vyskytovat větší křivost  $k$ , než je  $k_{mez}$ . Ze simulací také vyplývá, že pro menší odchylky řízení by bylo vhodné generovat trasu s ohledem na průběh ještě alespoň její první derivace křivosti, což je výpočetně náročné. Z tohoto důvodu se relevantnost trasy omezila jen na podmínku (3.2.1). Pro dané rozměry soupravy (obr. 37) a její možnosti je  $\beta_{mez} \cong 37^\circ$  a  $k_{mez} \cong 0.001187 \text{ mm}^{-1}$ .

$$|k_{(t)}| \leq k_{mez} = \frac{1}{R_{mez}} \quad t \in \langle 0, 1 \rangle \quad (3.2.1)$$

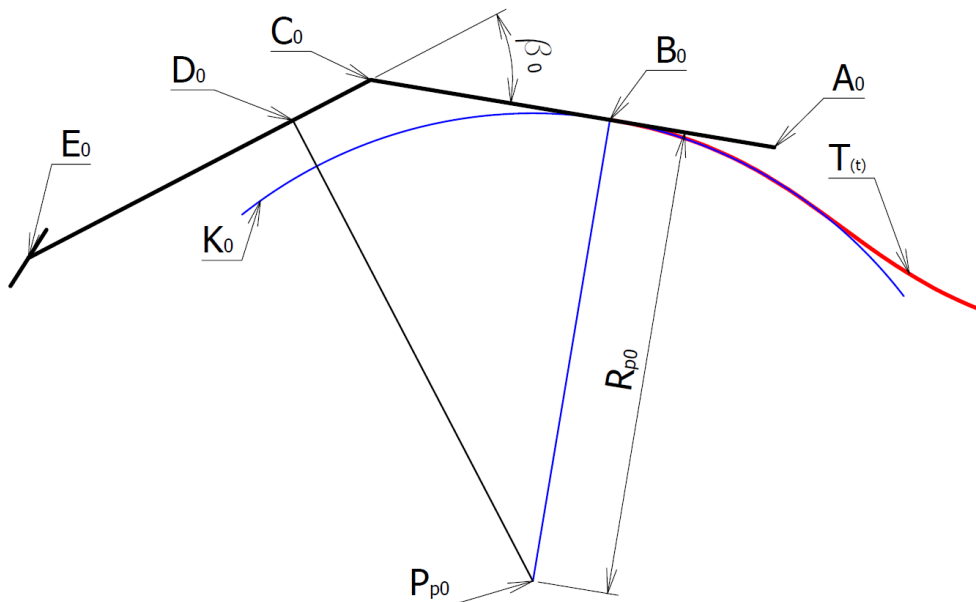
Pro lepší přizpůsobení ve výchozí poloze soupravy se křivost počátku trasy  $T_{(t)}$  shoduje s parametrem  $k_0$  (obr. 44) daný rovnicí (3.2.3). Výpočet toho parametru zajišťuje podprogram „K\_RT.m“.

$$R_{p0} = \frac{L_t}{\tan(|\beta|)} + \frac{L_p}{\sin(|\beta|)} \quad (3.2.2)$$

$$k_0 = -\frac{\text{sign}(\beta)}{R_{p0}} \quad (3.2.3)$$



Obrázek 43: Mezní úhel natočení  $\beta_{mez}$



Obrázek 44: Křivost počátku trasy přizpůsobená výchozí poloze soupravy



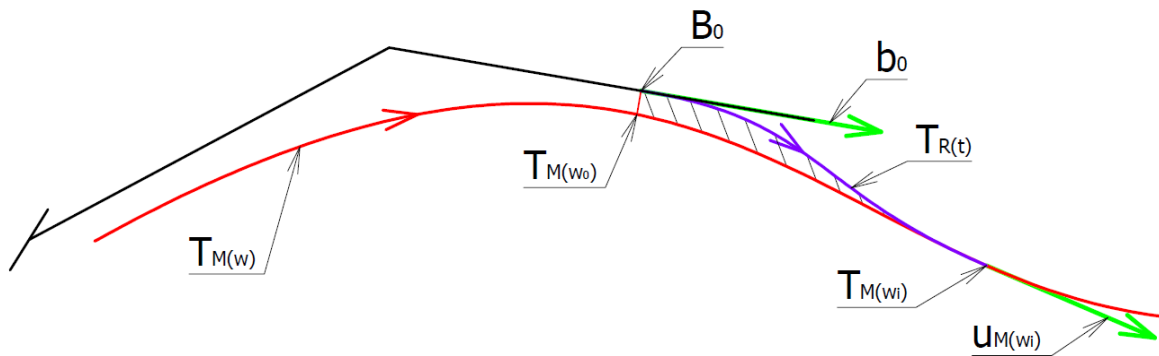
Trasa je reprezentována vektorovou polynomičnou funkcí (parametrickou křivkou) dle rovnice (3.2.4). Její první křivost je daná rovnicí (3.2.5). Tento vzorec z literatury [7] je upraven tak, aby respektoval změnu znaménka křivosti při přechodu přes inflexní bod.

$$\mathbf{T}_{(t)} = \mathbf{m} * t^4 + \mathbf{n} * t^3 + \mathbf{p} * t^2 + \mathbf{q} * t + \mathbf{r} \quad (3.2.4)$$

$$k_{(t)} = \frac{\mathbf{T}'_{(t)} \times \mathbf{T}''_{(t)}}{|\mathbf{T}'_{(t)}|^3} \quad (3.2.5)$$

Níže bude naznačen výpočet koeficientů pro funkci  $\mathbf{T}_{(t)}$ . Funkce respekтуje zadaný směr a křivost v počátku trasy. Dále funkce v koncovém bodu trasy umožňuje napojení na jinou obecnou křivku. V bodě napojení se s touto křivkou shoduje ve směru a křivosti. Tohoto zobecnění generování trasy je využito v následující myšlence.

Způsob řízení jednostopého modelu připouští ekvidistantní pohyb podél trasy, což generuje chybu řízení danou už při výpočtu. K této chybě se přičtou další odchylky dané jednak zjednodušením modelu (zanedbání dynamiky, atd.), ale i geometrickými a konstrukčními nepřesnostmi. Dále jsou to dlouhé časové konstanty ustálení akčních členů na požadovaných hodnotách a nepřesné senzory. Je snahou zmírnit celkovou chybu v řízení ( $\epsilon$ ) pomocí tzv. návratových tras  $\mathbf{T}_{R(t)}$  (obr. 45). Návratové trasy se generují s výše uvedenými vlastnostmi hlavní trasy  $\mathbf{T}_{M(w)}$  a obnovují se po  $n * ds$  ujeté vzdálenosti. Právě stejná křivost a směr ve společném bodě dávají předpoklad k větší přilehlosti obou křivek (šrafování) a plynulejšímu napojení. Snahou taktéž bylo tyto křivky napojovat se spojitostí  $C^2$ . To se ukázalo jako velmi silný požadavek, který omezoval existenci řešení.



Obrázek 45: Schéma hlavní a návratové trasy

$$\mathbf{T}_{R(0)} = \mathbf{B}_0 \quad (3.2.6)$$

$$\mathbf{T}'_{R(0)} = \lambda_0 * \mathbf{b}_0 = \lambda_0 * (\mathbf{B}_0 - \mathbf{C}_0) \quad (3.2.7)$$

$$\mathbf{T}_{R(1)} = \mathbf{U} = \mathbf{T}_{M(w_i)} \quad (3.2.8)$$

$$\mathbf{T}'_{R(1)} = \lambda_1 * \mathbf{u} = \lambda_1 * \mathbf{T}'_{M(w_i)} \quad (3.2.9)$$

$$\mathbf{T}''_{R(1)} = \lambda_1^2 * \mathbf{c} = \lambda_1^2 * \mathbf{T}''_{M(w_i)} \quad (3.2.10)$$

$$k_{R(0)} = k_0 \quad (3.2.11)$$

$$\mathbf{T}_{R(t)} = \mathbf{m}_R * t^4 + \mathbf{n}_R * t^3 + \mathbf{p}_R * t^2 + \mathbf{q}_R * t + \mathbf{r}_R \quad (3.2.12)$$

Dále následuje dosazení podmínek (3.2.6) až (3.2.10) do rovnice (3.2.12).

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{r}_R \quad (3.2.13)$$

$$\lambda_0 * \mathbf{b}_0 = \mathbf{q}_R \quad (3.2.14)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{m}_R + \mathbf{n}_R + \mathbf{p}_R + \mathbf{q}_R + \mathbf{r}_R \quad (3.2.15)$$

$$\lambda_1 * \mathbf{u} = 4 * \mathbf{m}_R + 3 * \mathbf{n}_R + 2 * \mathbf{p}_R + \mathbf{q}_R \quad (3.2.16)$$

$$\lambda_1^2 * \mathbf{c} = 12 * \mathbf{m}_R + 6 * \mathbf{n}_R + 2 * \mathbf{p}_R \quad (3.2.17)$$

Vyjádření koeficientů rovnice (3.2.12).

$$\mathbf{m}_R = \frac{\lambda_1^2}{2} * \mathbf{c} - 2 * \lambda_1 * \mathbf{u} - 3 * \mathbf{B}_0 + 3 * \mathbf{U} - \lambda_0 * \mathbf{b}_0 \quad (3.2.18)$$

$$\mathbf{n}_R = -\lambda_1^2 * \mathbf{c} + 5 * \lambda_1 * \mathbf{u} + 8 * \mathbf{B}_0 + 8 * \mathbf{U} + 3 * \lambda_0 * \mathbf{b}_0 \quad (3.2.19)$$

$$\mathbf{p}_R = \frac{\lambda_1^2}{2} * \mathbf{c} - 3 * \lambda_1 * \mathbf{u} - 6 * \mathbf{B}_0 + 6 * \mathbf{U} - 3 * \lambda_0 * \mathbf{b}_0 \quad (3.2.20)$$

$$\mathbf{q}_R = \lambda_0 * \mathbf{b}_0 \quad (3.2.21)$$

$$\mathbf{r}_R = \mathbf{B}_0 \quad (3.2.22)$$

V daném případě lze z rovnice (3.2.23) explicitně vyjádřit  $\lambda_0$ .

$$k_0 = \frac{2 * (\mathbf{q}_R \times \mathbf{p}_R)}{|\mathbf{q}_R|^3} \Rightarrow \lambda_0 \quad (3.2.23)$$

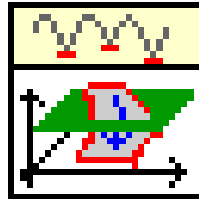
Přes parametr  $\lambda_1$  se bude minimalizovat délka trasy. Vyjádřit integrál (3.2.25) je obtížné, proto se bude hledat minimum funkce  $S_{(\lambda_1)}$  z rovnice (3.2.26) s předpokladem, že minima nabývají ve stejném bodě.

$$\mathbf{T}_{R(t)} = \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix} \quad (3.2.24)$$

$$s_{(\lambda_1)} = \int_0^1 \sqrt{\phi_{(t)}^2 + \psi_{(t)}^2} dt \quad (3.2.25)$$

$$S_{(\lambda_1)} = \int_0^1 \phi_{(t)}^2 + \psi_{(t)}^2 dt \quad (3.2.26)$$

Hledání minima funkce  $S_{(\lambda_1)}$  je realizováno numerickou metodou „Constrained Nonlinear Optimization.vi“ (obr. 46) řešící obecné nelineární optimalizační problémy s omezením ve tvaru nelineárních rovností a nerovností. Při minimalizaci je zapotřebí brát ohled na to, že  $\lambda_0$  a  $\lambda_1$  jsou kladná čísla.

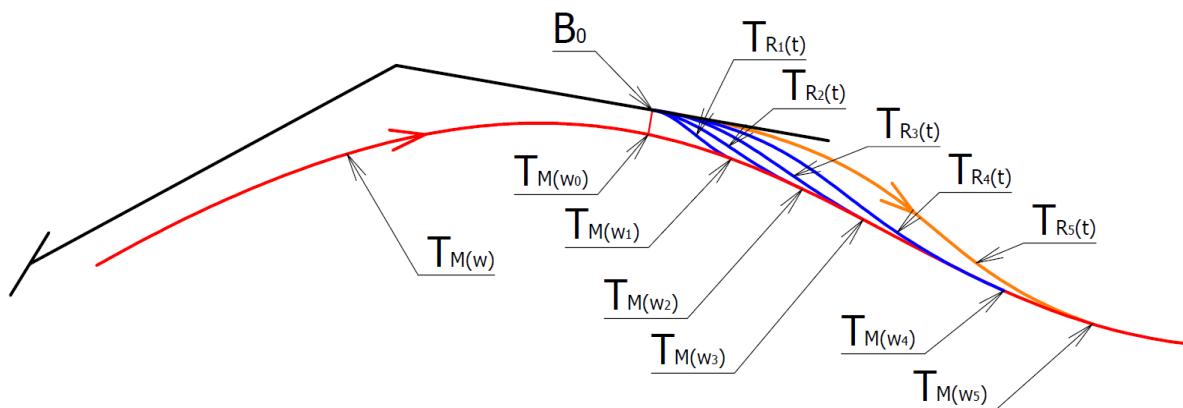


Obrázek 46: Mathematics / Optimization / Constr NLP

V této chvíli lze otestovat trasu  $T_{R(t)}$  na její relevantnost. Je zapotřebí najít extrémní křivosti  $k_{R(t)}$  trasy  $T_{R(t)}$  na intervalu  $t \in \langle 0, 1 \rangle$ . To lze realizovat tak, že se najdou všechny body podezřelé z extrému přes rovnici (3.2.27) pomocí funkce „Newton Raphson Zero Finder.vi“. Podezřelé body a hranice intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$  se dosadí zpět do  $k_{R(t)}$  a porovnají dle podmínky (3.2.1). Pokud alespoň jeden bod nespĺňuje tuto podmínku, trasa se nepovažuje za relevantní a nelze podle ní couvat. O optimalizaci a kontrolu relevantnosti trasy se stará podprogram „check\_track4\_RT.vi“.

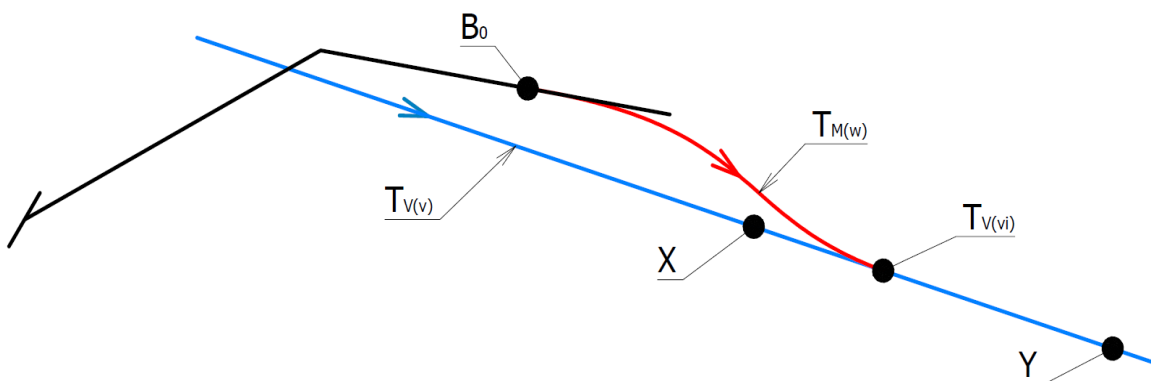
$$0 = k'_{R(t)} \quad t \in \langle 0, 1 \rangle \quad (3.2.27)$$

Dále je nutné vyhledat relevantní  $T_{R(t)}$  z intervalu  $w \in \langle w_0, 1 \rangle$  na  $T_{M(w)}$ . K tomu lze přistoupit různými metodami. Jednou z nich je rozmístit rovnoměrně testovací body  $w_i$  na daném intervalu a postupně ověřit každou trasu  $T_{R(t)}$  navazující na body  $T_{M(w_i)}$ , dokud jedna z nich nebude relevantní (obr. 47). Předpokladem je, že čím více se vzdaluje testovací bod  $w_i$  od  $w_0$ , tím více se snižují hodnoty křivosti  $k_{R(t)}$  v extrémech testované trasy. Dále lze použít metodu půlení intervalů, která dokáže nalézt relevantní trasu o něco rychleji. Nicméně při testování se ukázalo, že tato část výpočtu, bez ohledu na zvolenou metodu, je výpočetně velmi náročná a zdlouhavá. Výpočetní čas nalezení relevantní trasy je zhruba 15-20 vteřin s ohledem na jemnost dělení intervalu a požadované přesnosti numerických metod. Pokud se relevantní trasa nenajde, couvání pokračuje podle  $T_{M(w)}$ .



Obrázek 47: Ukázka vyhledání relevantní trasy  $T_{R_5}(t)$

Nyní zbývá vygenerovat hlavní trasu  $T_{M(w)}$ . Vzhledem k zobecnění výše uvedeného generování návratové trasy, lze tento postup aplikovat při vyhledávání hlavní trasy. V úvodu bylo zmíněno, že hlavní trasa bude sloužit ke kolineárnímu zarovnání podélné osy soupravy a vodící čáry  $T_{V(v)}$ . Poloha vodící čáry vůči soupravě je vyhodnocena kamerou. Kamera disponuje určitou velikostí úhlu záběru, tudíž lze nalézt nejbližší ( $\mathbf{X}$ ) a nejvzdálenější ( $\mathbf{Y}$ ) body vodící čáry od soupravy, které je kamera ještě schopná zobrazit (obr. 48). Po nalezení těchto bodů lze vodící čaru vyjádřit funkcí (3.2.28). Pro generování tras slouží podprogramy „R\_track4\_RT.vi“ a „M\_track4\_RT.vi“.

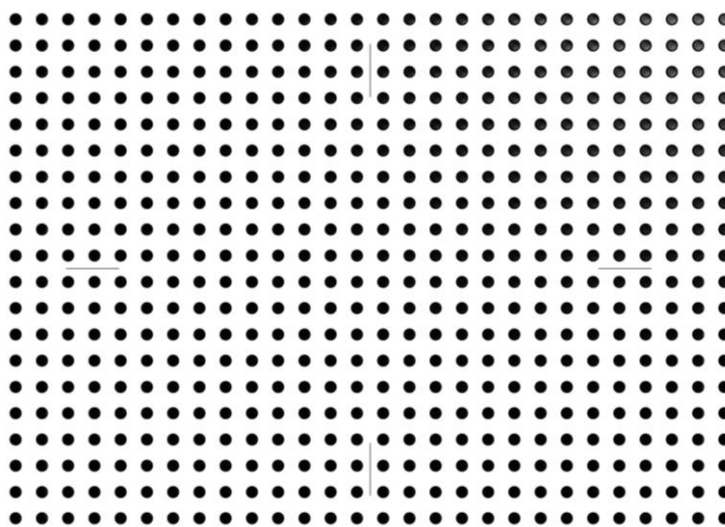


Obrázek 48: Generování hlavní trasy

$$T_{V(v)} = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}) * v + \mathbf{X} \quad v \in \langle 0,1 \rangle \quad (3.2.28)$$

## 3.3. Kalibrace kamery

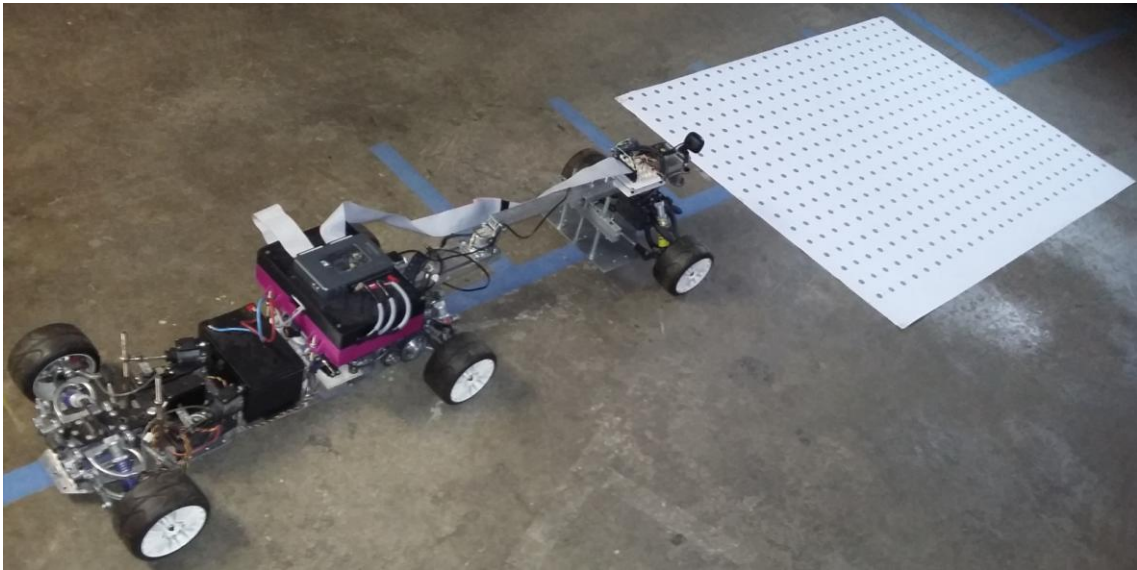
Kamera je kalibrována za účelem snímání polohy vodící čáry vůči soupravě, která leží v rovině vozovky. Dále se kamerou vyhodnocuje poloha středu nápravy přívěsu a její natočení v globálním souřadnicovém systému. Pro používání kamery v prostředí LabVIEW a její kalibraci je nutné mít doinstalovaný balíček „NI Vision Acquisition Software“. Kalibrace probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku jde o pokrytí deformace obrazu, která je daná typem kamery. Je zapotřebí kamerou udělat akvizici kalibrační sítě bodů (obr. 49). Rovina kalibrační sítě by měla být rovnoběžná s čipem kamery. Zpracovat kalibrační snímek lze nejnázve v pomocném podprogramu „Vision and Motion / Vision Express / Vision Assistant“. Podprogram vyexportuje kalibrační obrázek s příponou *.png*, na němž jsou uložena potřebná kalibrační data. Nyní je používán kalibrační obrázek „calib1\_camera.png“, který zkreslení obrazu vyjadřuje polynomickou funkcí se třemi koeficienty. Tento způsob vyjádření je přesnější, ale výpočetně náročnější.



Obrázek 49: Síť (mřížka) bodů pro zjištění deformace obrazu

V druhém kroku zjistíme zkreslení způsobené pohledem na rovinu vozovky z perspektivy. Opět využijeme funkce vestavěné v LabVIEW, protože je to jednoduchý a celkem efektivní způsob kalibrace. Kalibrační síť většího formátu položíme na vozovku k soupravě a vystředíme s její podélnou osou (obr. 50). Kamerou uděláme akvizici snímku, z něhož vybereme alespoň tři body kalibrační sítě, které určují rovinu vozovky v prostoru. Polohu každého bodu vůči soupravě dokážeme porovnat se souřadnicemi na snímku (v pixelech). Informace o těchto bodech jsou vstupem pro funkci „Vision and Motion / Vision Utilities / Calibration / IMAQ Learn Perspective Calibration“ a jsou uloženy

v textovém souboru „pixel\_real.txt“. Nyní lze použít funkci „Vision and Motion / Vision Utilities / Calibration / IMAQ Convert Pixel to Real World“ pro převod souřadnic jakéhokoliv pixelu ze snímku na skutečné souřadnice v lokálním souřadnicovém systému soupravy. Lokální souřadnicový systém je zaveden dle obrázku 38 (osy  $L_x$ ,  $L_y$ ). V praxi se ukázalo, že souřadnice, které jsou blíže k počátku lokálního souřadnicového systému, jsou převedeny s přesností cca  $\pm 1 \text{ mm}$  a s rostoucí vzdáleností se tato přesnost snižuje.

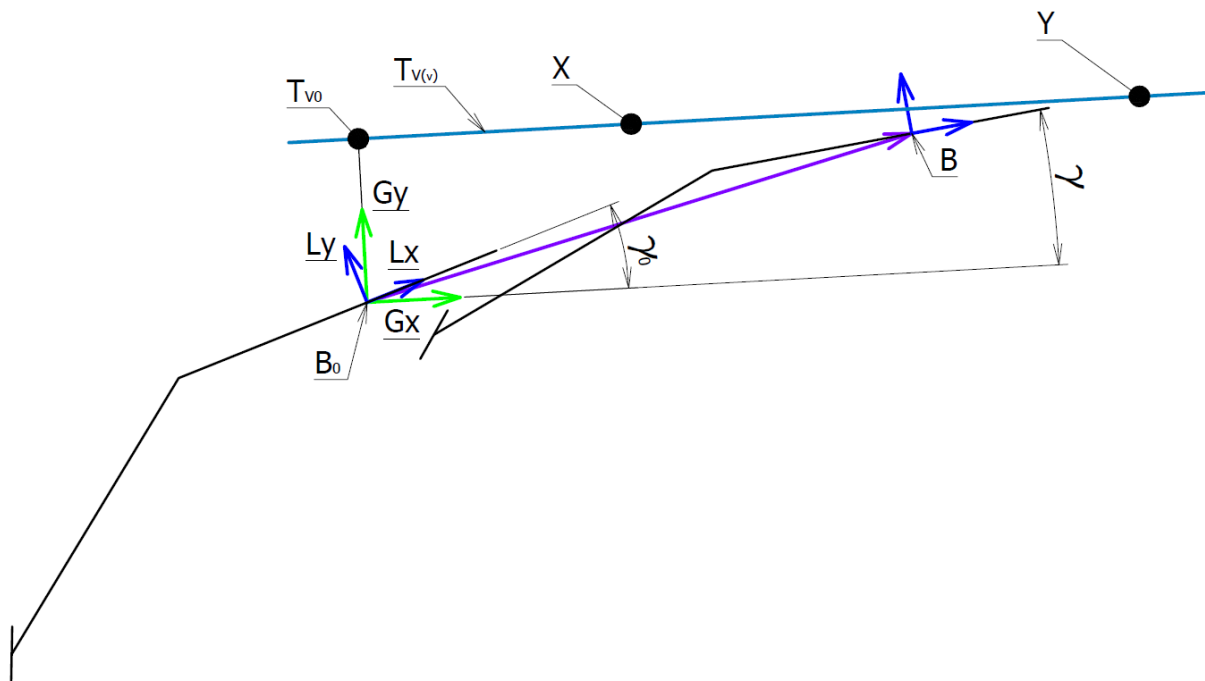


Obrázek 50: Kalibrace zkreslení perspektivou

## 3.4. Globální souřadnicový systém

Trasy couvání jsou vyjádřeny v globálním systému. Otázkou je, jakým způsobem založit globální systém a vyhodnotit v něm polohu středu nápravy přívěsu a natočení samotné nápravy. Lze zvážit využití GPS technologie, kterou ovšem současná souprava nedisponuje. Zajímavým řešením by byla korelace obrazu z dvou na sebe navazujících snímků, čímž by se zjistil posuv soupravy během jejich akvizice. Tento posuv by se přičítal k aktuální poloze soupravy a následovala by další korelace z následujícího snímku.

Ze samé postaty globálního systému, který je pevně vázán v prostoru, lze využít statické objekty v okolí snímané kamerou nebo jiným senzorem jako referenci k tomuto systému. V tomto případě se jako vhodný statický objekt v okolí jeví vodící čára. S ohledem na výpočty je vhodné, aby počátek systému ležel v rovině vozovky a byl natočen vůči vodící čáře dle obrázku 51. Z níže uvedených výpočtů je zřejmé, že jen pomocí vodící čáry nelze vyčíslit  $x$ -ovou souřadnici bodu **B**.



Obrázek 51: Založení globálního souřadnicového systému

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}) * q + \mathbf{X} \quad [px] \quad (3.4.1)$$

$$\mathbf{Q}, \mathbf{X} [px] \rightarrow \text{IMAQ Convert Pixel to Real World} \quad (3.4.2)$$

$$\rightarrow \mathbf{Q}^L, \mathbf{X}^L [mm]$$

$$\mathbf{T}_{V(v)}^L = (\mathbf{Q}^L - \mathbf{X}^L) * v + \mathbf{X}^L \quad (3.4.3)$$

$$f(v_0) = \min_{v \in \mathbb{R}} f(v) = \min_{v \in \mathbb{R}} \| \mathbf{T}_{V(v)}^L - \mathbf{B}_0^L \| \quad (3.4.4)$$

$$\gamma_0 = \text{myatan\_RT}(\mathbf{Q}^L - \mathbf{X}^L) \quad (3.4.5)$$

$$\mathbf{T}_{V(v_0)}^G = \mathbf{S}_{-\gamma_0} \mathbf{T}_{V(v_0)}^L \quad (3.4.6)$$

Parametrem  $q$  v rovnici (3.4.1) se zohledňuje větší přesnost konverze souřadnic bodů vyjádřených v pixelech v malé vzdálenosti od počátku lokálního systému. Hodnota tohoto parametru je volena dle kvality kalibrace kamery. Současná hodnota parametru je  $q = 0.17$ , pro nějž se přesnost kalibrace oblasti, v které se nejčastěji vodící čára nachází, pohybuje ještě v přijatelném rozsahu  $\pm 1$  mm. Nyní lze vyjádřit  $y$ -novou souřadnici  $B_y$  bodu  $\mathbf{B}$  a natočení  $\gamma$  v globálním systému dle následujících rovnic.

$$f(\bar{v}) = \min_{v \in \mathbb{R}} f(v) = \min_{v \in \mathbb{R}} \| \mathbf{T}_{V(v)}^L - \mathbf{B}^L \| \quad (3.4.7)$$

$$\gamma = \text{myatan\_RT}(\mathbf{Q}^L - \mathbf{X}^L) \quad (3.4.8)$$

$$\mathbf{T}_{V(v_0)}^G - \mathbf{T}_{V(\bar{v})}^G = \begin{bmatrix} 0 \\ B_y \end{bmatrix} \quad (3.4.9)$$

Pro vyhodnocení  $x$ -ové souřadnice  $B_x$  bodu  $\mathbf{B}$  by postačoval statický objekt ve větší vzdálenosti od kamery nacházející se neustále v jejím záběru. Problém je, že tato kamera není tak kvalitní, tudíž algoritmy vyhledávající daný objekt na snímku dávají negativní výsledky a převod souřadnic bodů v pixelech na skutečné souřadnice je ve větších vzdálenostech nepřesný. Proto byly kolmo a rovnoměrně cca po 50 cm podél celé vodící čáry umístěny tzv. referenční čáry (obr. 52). Jiným, ale podobným řešením by mohla být jen přerušovaná vodící čára.

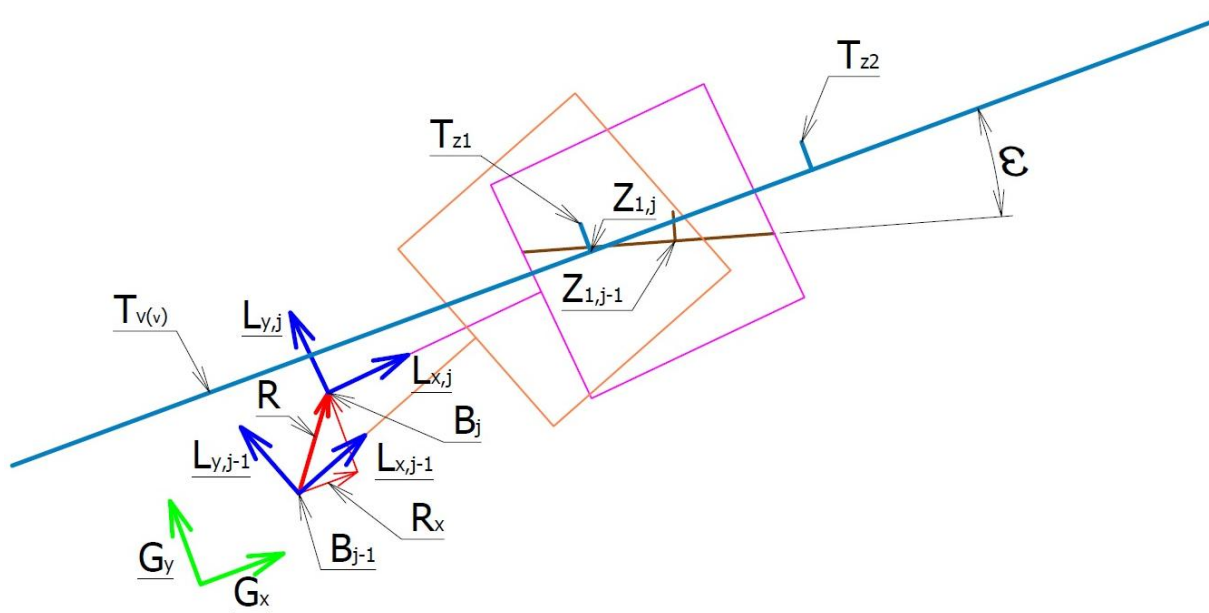
Posuv průsečíku vodící a ke kameře nejbližší referenční čáry je vyhodnocen z dvou posledních snímků. Tento posuv se přičte k poslední známé poloze soupravy v globálním systému. Po další akvizici snímku se opět celý proces opakuje. V momentě, kdy referenční čára, jejíž průsečík jsme sledovali, vyjde ze záběru, algoritmus najde další nejbližší referenční čáru a opět vyhodnocuje posuv jejího průsečíku.

Na obrázku 53 jsou vyznačeny dvě po sobě následující polohy lokálního systému s pořadovými čísly  $j$  a  $j-1$ , které se pohybují v globálním systému. Oranžové a fialové rámečky velmi schematicky naznačují snímky z kamery, které jsou přiřazeny k jednotlivým polohám lokálního systému. Hnědá tenká čára je zobrazením vodící čáry  $\mathbf{T}_{V(v),j-1}$ , nejbližší referenční čáry  $\mathbf{T}_{z1,j-1}$  a jejich průsečíku  $\mathbf{Z}_{1,j-1}$  z předchozího do následujícího snímku. Cílem následujících výpočtů je zjistit vektor posunutí  $\mathbf{R}^G$  a použít jeho  $x$ -ovou složku  $R_x$  k stanovení aktuální polohy bodu  $\mathbf{B}_j^G$ .





Obrázek 52: Ukázka vodící a referenční čáry



Obrázek 53: Schéma pro vyhodnocení  $x$ -ové souřadnice  $B_{x,j}$

$$\mathbf{X}_j, \mathbf{Y}_j \in \mathbf{T}_{V(v),j}^{Lj}; v \in \mathbb{R}; \bar{\mathbf{X}}_j, \bar{\mathbf{Y}}_j \in \mathbf{T}_{Z1(t),j}^{Lj}; t \in \mathbb{R}; j \in \mathbb{N} \quad (3.4.10)$$

$$(\mathbf{Y}_j - \mathbf{X}_j) * v + \mathbf{X}_j = \mathbf{T}_{V(v),j}^{Lj} \quad (3.4.11)$$

$$(\bar{\mathbf{Y}}_j - \bar{\mathbf{X}}_j) * t + \bar{\mathbf{X}}_j = \mathbf{T}_{Z1(t),j}^{Lj} \quad (3.4.12)$$

$$\mathbf{Z}_{1,j} = \mathbf{T}_{V(v),j}^{Lj} = \mathbf{T}_{Z1(t),j}^{Lj} \quad (3.4.13)$$

$$\begin{bmatrix} v_j \\ t_j \end{bmatrix} = [\mathbf{Y}_j - \mathbf{X}_j \quad \bar{\mathbf{X}}_j - \bar{\mathbf{Y}}_j]^{-1} * [\bar{\mathbf{X}}_j - \mathbf{X}_j] \quad (3.4.14)$$

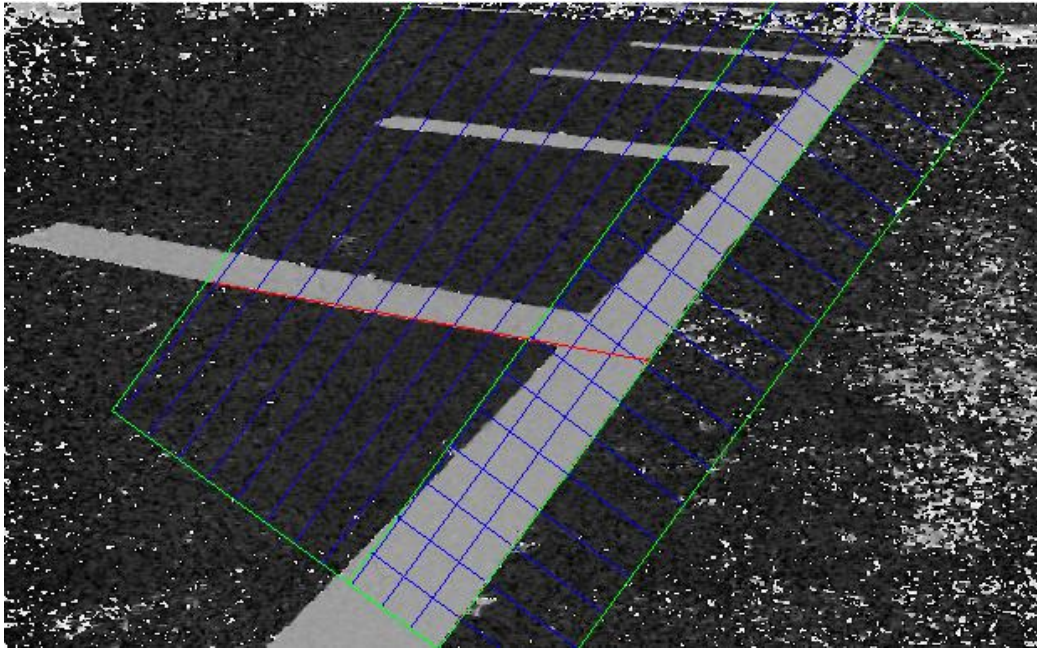
$$\gamma_j = -myatan\_RT(\mathbf{Y}_j - \mathbf{X}_j) \quad (3.4.15)$$

$$\omega_j = \gamma_{j-1} - \gamma_j \quad (3.4.16)$$

$$\mathbf{R}_j^G = \begin{bmatrix} R_{x,j} \\ R_{y,j} \end{bmatrix} = -\mathbf{S}_{\gamma_j} * (\mathbf{Z}_{1,j} - \mathbf{S}_{\omega_j} * \mathbf{Z}_{1,j-1}) \quad (3.4.17)$$

$$\mathbf{B}_j^G = \begin{bmatrix} B_{x,j} \\ B_{y,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{x,j-1} + R_{x,j} \\ B_y \end{bmatrix} \quad (3.4.18)$$

Níže je popsána metoda pro vyhledávání vodící a referenční čáry na snímku. Existují algoritmy, které dokáží vyhledat hrany a kontury určitých objektů ze snímku (např. pomocí změny gradientu intenzity světla). Zde jsou použity funkce na vyhledávání rovných hran pomocí „NI Vision Assistant“. Na obrázku 54 jsou zelenou barvou vyznačeny tzv. ROI, které zužují oblast hledání hran. Tímto způsobem lze sledovat konkrétní hranu se snížením rušivého vlivu ostatních hran vyskytujících se na snímku. Body přechodů první hrany se vyhledávají podél modrých čar. Tyto body se proloží červenou úsečkou (např. metodou nejmenších čtverců). Pro vyhledávání těchto bodů je důležité, jaký úhel svírá první hrana a modré čáry. Z toho důvodu jsou modré čáry kolmé na oblast ROI. První oblast ROI je centrována na první hranu vodící čáry z předešlého snímku. Druhá oblast ROI, jejíž kraj je sjednocen se středem první ROI, slouží k vyhledání první hrany nejbližší referenční čáry. Vyhledané body přechodů jsou opět proloženy červenou úsečkou. Jednotlivé volby a parametry pro vyhledávání hran zatím nejsou automaticky generovány, tudíž je zapotřebí tyto vstupy zadávat ručně v závislosti na světelných podmínkách, což je blíže popsáno v následující podkapitole. Algoritmy pro vyhledávání hran pracují s 8-bitovou reprezentací obrázku. Dále je zapotřebí použít funkci „Vision and Motion / Vision Utilities / Color Utilities / IMAQ ExtractSingleColorPlane“ pro extrahování barevné roviny v závislosti na barvě vodící a referenční čáry nebo světelných podmínkách.



Obrázek 54: Ukázka vyhledávání hran ze snímku

## 3.5. Main\_RT.vi

Hlavní program pro řízení autonomního couvání soupravy je „Main\_RT.vi“. Tento program je počítán zcela na procesoru myRIO. Uživateli zprostředkuje zobrazování dat a zadávání vstupů přes host PC. Ukládá většinu změn v nastavení, tudíž není zapotřebí při každém spuštění programu znovu nastavovat jednotlivé parametry. Při spuštění provede uživatele možnostmi kalibrace. Zobrazuje instrukce, průběh jednotlivých kroků a aktuální zpracování obrazu z kamery. Dále zobrazuje graf, na němž je znázorněna aktuální poloha středu nápravy přívěsu v globálním souřadnicovém systému a natočení podélných os tažného vozidla a přívěsu. Je zapotřebí na snímku ručně vybrat oblast aktuálního výskytu vodící a referenční čáry pomocí předběžné ROI. Nastavit parametry algoritmů pro vyhledání hran na snímku s ohledem na barvu čar, jejich pozadí a aktuálnímu osvětlení. Tyto parametry se zadávají na panelech „Options Vodící“, „Fit Option Vodící“, „Options Referenční“, „Fit Option Referenční“, „Color Plane“. Pro vyhledání hran jsou důležité zejména tyto parametry: „Edge Polarity“, „Kernel Size“, „Width“, „Minimum Edge Strength“, „Type“, „Step Size“. Po úspěšném nastavení lze zahájit autonomní jízdu. Po zadání požadavku autonomního couvání je zahájen proces generování hlavní trasy. Pokud je výsledek generování negativní, znamená to, že nelze najít hlavní trasu, která je reprezentována danou matematickou funkcí a která splňuje definované vlastnosti. V případě, že i přes negativní výsledek je stálý požadavek na autonomní couvání, je nutné lidským zásahem vhodně změnit výchozí polohu soupravy a generování opakovat. Jestliže výsledek je pozitivní, souprava začne vykonávat manévry. Manévr je následně automaticky ukončen po dosažení konce hlavní trasy a to vše bez lidského zásahu.

## 3.6. Testování autonomní jízdy

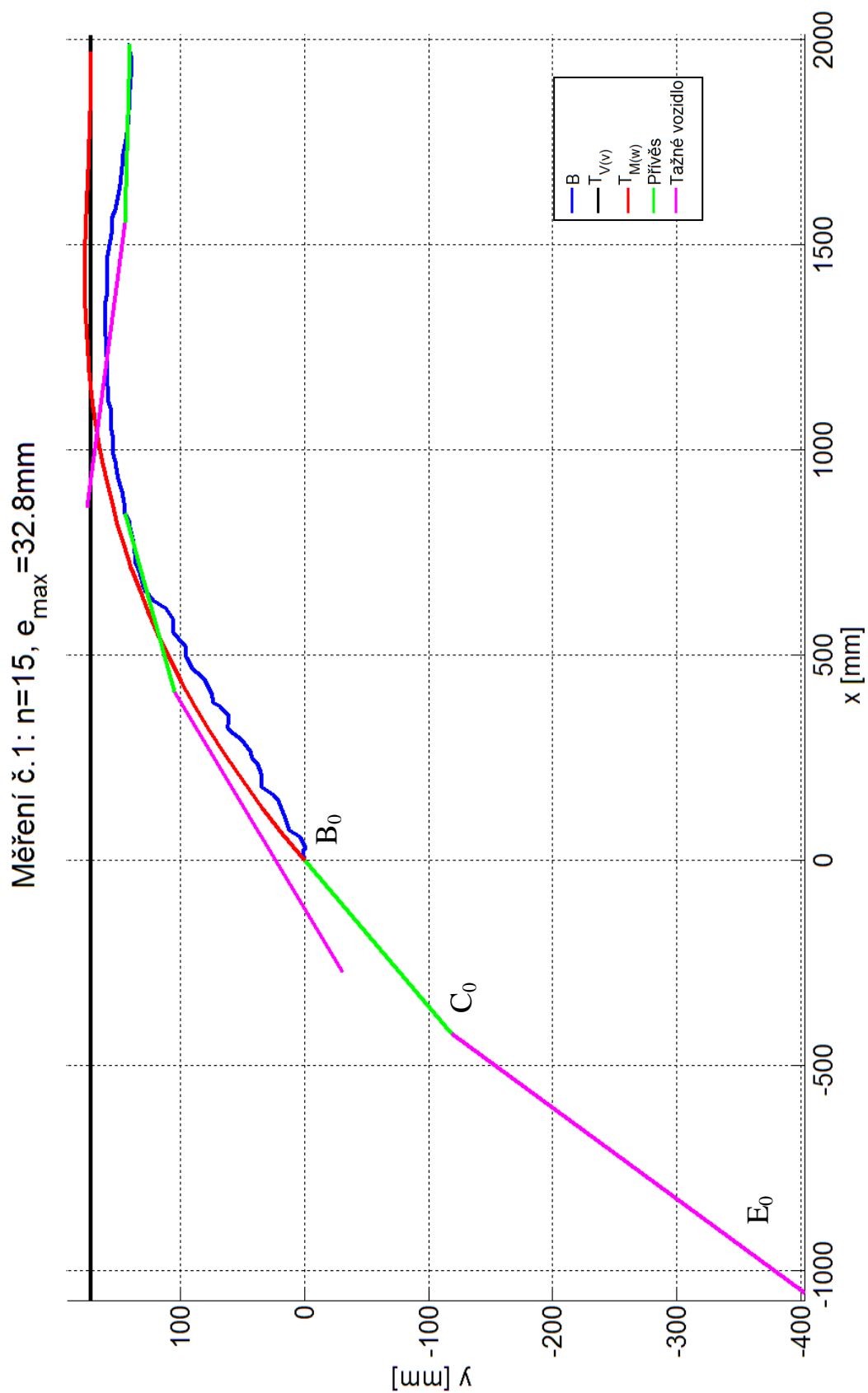
Hlavním cílem testování je ověřit předpoklady, na kterých byl vytvořen jednostopý model soupravy a způsob jeho řízení. Dalším cílem je vyzkoušet chování soupravy při různých délkách předem nasimulovaného řízení pro ujetí vzdálenosti  $n \cdot ds$ . Nutno podotknout, že za účelem lepšího znázornění chování soupravy, probíhalo testování bez generování návratových tras. Tudiž je bráno v úvahu, že s rostoucí ujetou vzdáleností se bude souprava vzdalovat od hlavní trasy, což navržený způsob řízení dovoluje. Jednostopý model a jeho řízení prohlásíme za správné, pokud souprava bude viditelně kopírovat tvar hlavní trasy. Jako vedlejší kvalitativní parametr řízení zvolíme maximální odchylku středu nápravy přívěsu od hlavní trasy v průběhu celého manévru dle rovnice (3.6.1).

$$e_{max} = \max_{j \in \{1, 2, \dots, J\}} \left\| \mathbf{B}_j - \min_{w \in \langle 0, 1 \rangle} \left\| \mathbf{B}_j - \mathbf{T}_{M(w)} \right\| \right\| \quad (3.6.1)$$

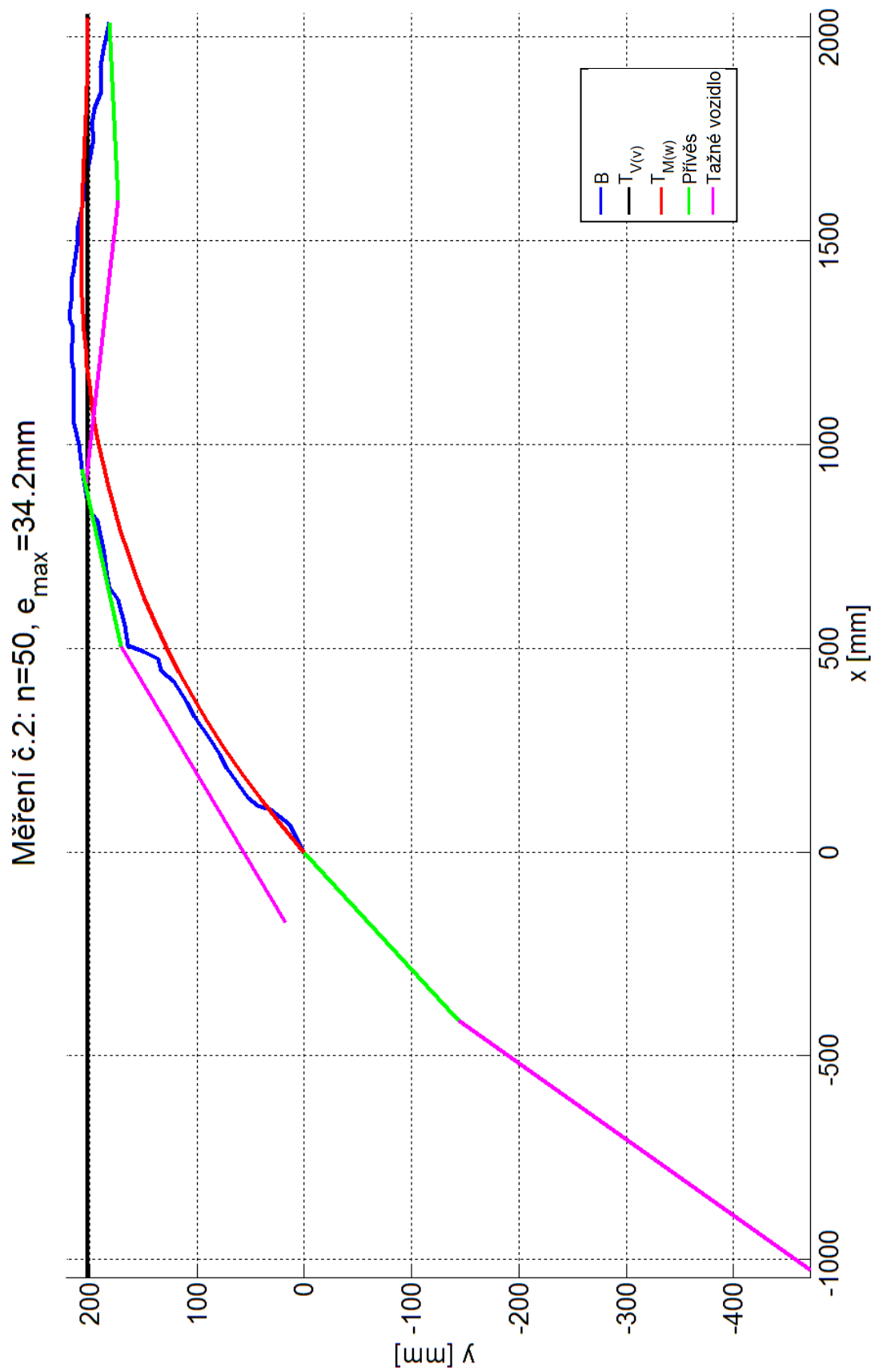
$J \dots$  počet měřených bodů

Dále se bezprostředně nepředpokládá, že poloha podélné osy soupravy bude kolineárně zarovnána s vodící čarou jednou hlavní trasou. Pokud přesnost kolineárního zarovnání nevyhovuje našim požadavkům, bude vygenerována další hlavní trasa s tím, že se souprava nachází ve výhodnější poloze a prakticky bude couvat v bližší vzdálenosti podél vodící čáry.

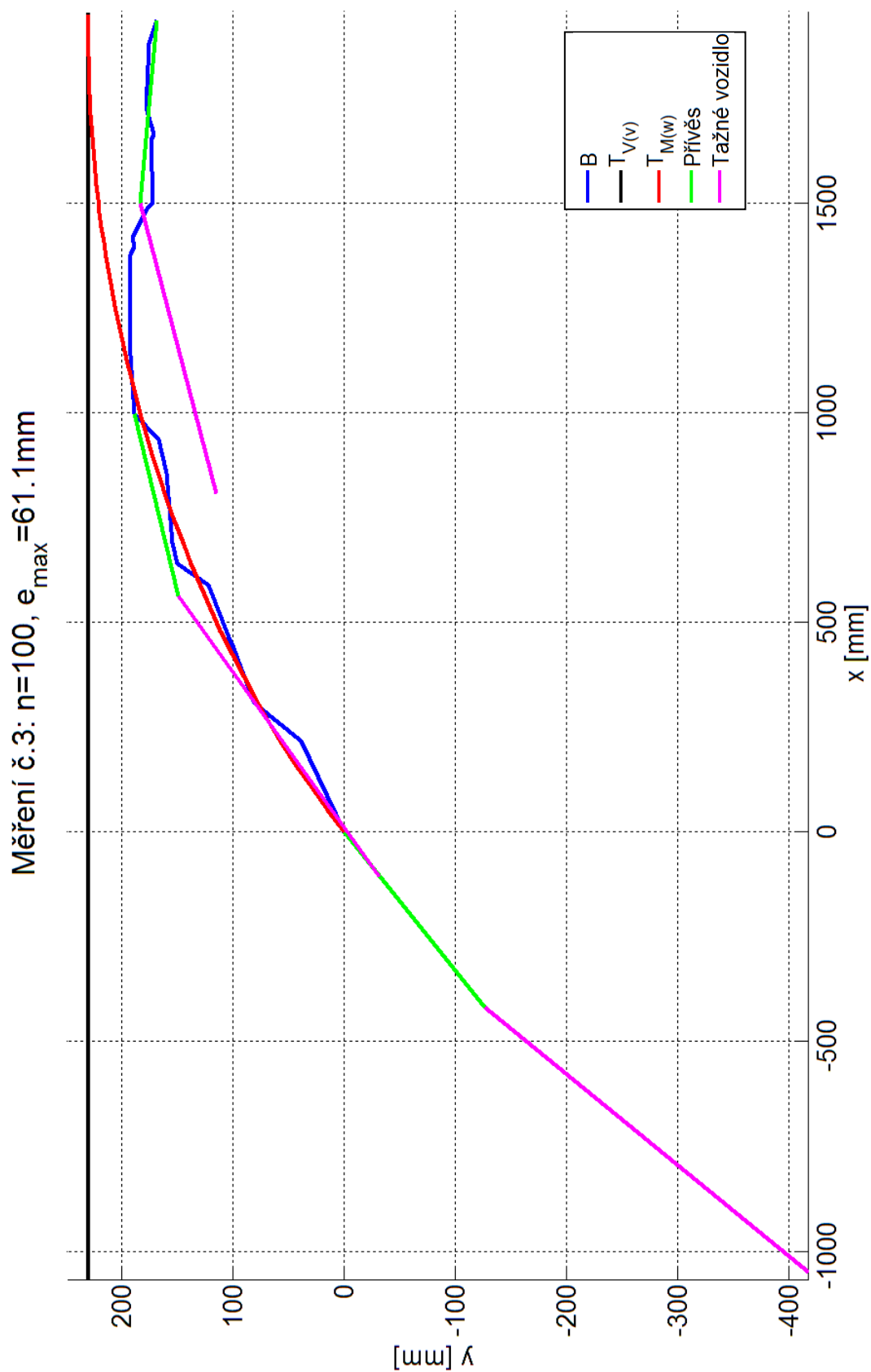
Testování probíhalo v dobře osvětlené místnosti. Z testování bylo vybráno následujících pět měření. V grafech je v globálním souřadnicovém systému vyobrazena vodící čára  $\mathbf{T}_{V(v)}$  (černá úsečka), hlavní trasa  $\mathbf{T}_{M(w)}$  (červená křivka), výchozí, průběžná a koncová poloha soupravy (přívěs - zelené úsečky, tažné vozidlo - fialové úsečky, bližší popis v obrázku 56). Poloha bodu středu nápravy přívěsu  $\mathbf{B}$  v jednotlivých měřených bodech  $\mathbf{B}_j$  je vyznačena modře. Pro vyhodnocení polohy soupravy v globálním souřadnicovém systému by byla vhodná jiná, na soupravě a řídicích algoritmech nezávislá měřicí aparatura, což nebylo v aktuálních možnostech testování. Proto poloha soupravy byla opět vyhodnocována stejnou kamerou a algoritmy používanými pro autonomní couvání, tudíž je měření zatíženo většími chybami a při interpretaci výsledků je zapotřebí na tuto skutečnost brát ohled.



Obrázek 55: Měření č. 1

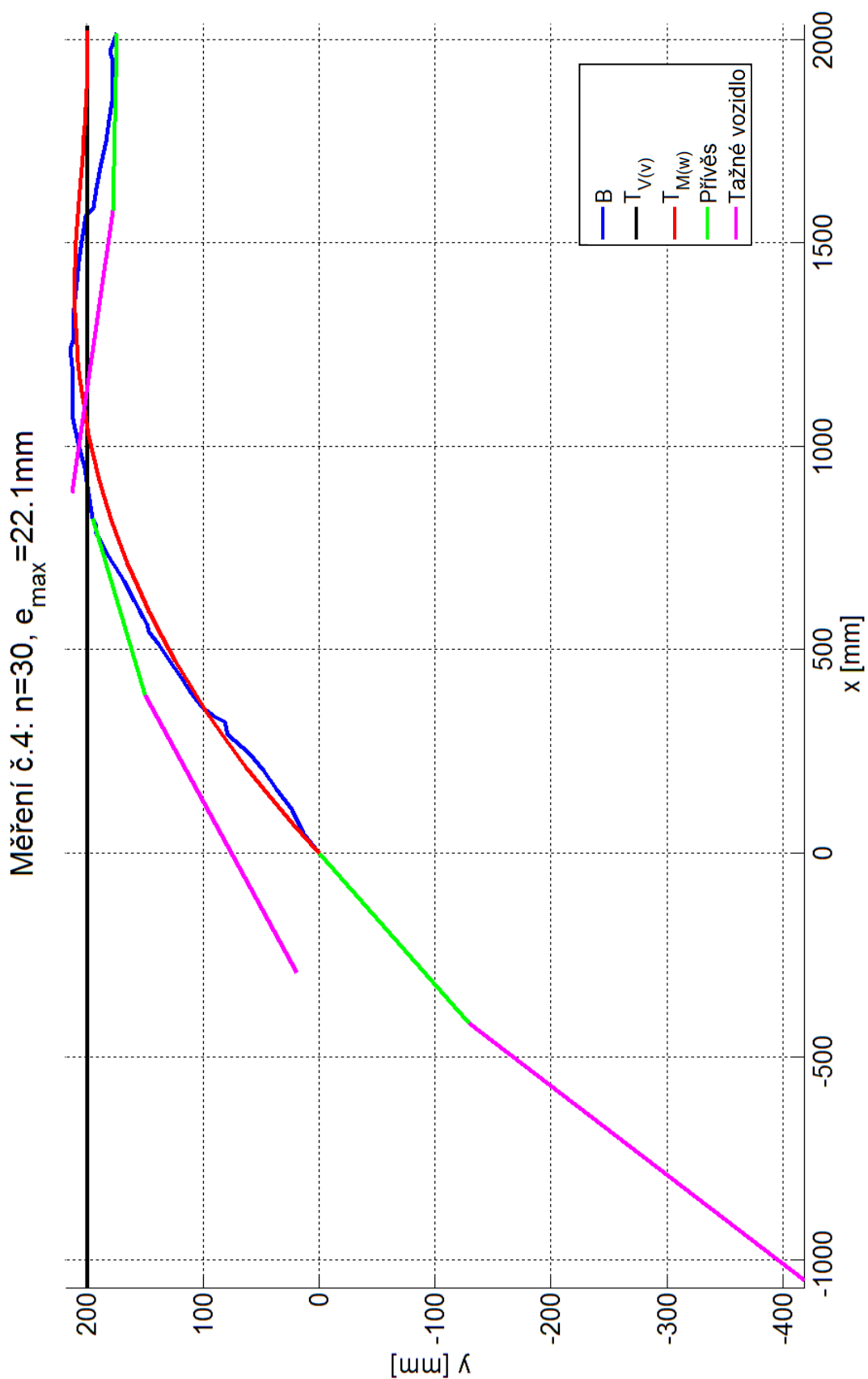


Obrázek 56: Měření č. 2

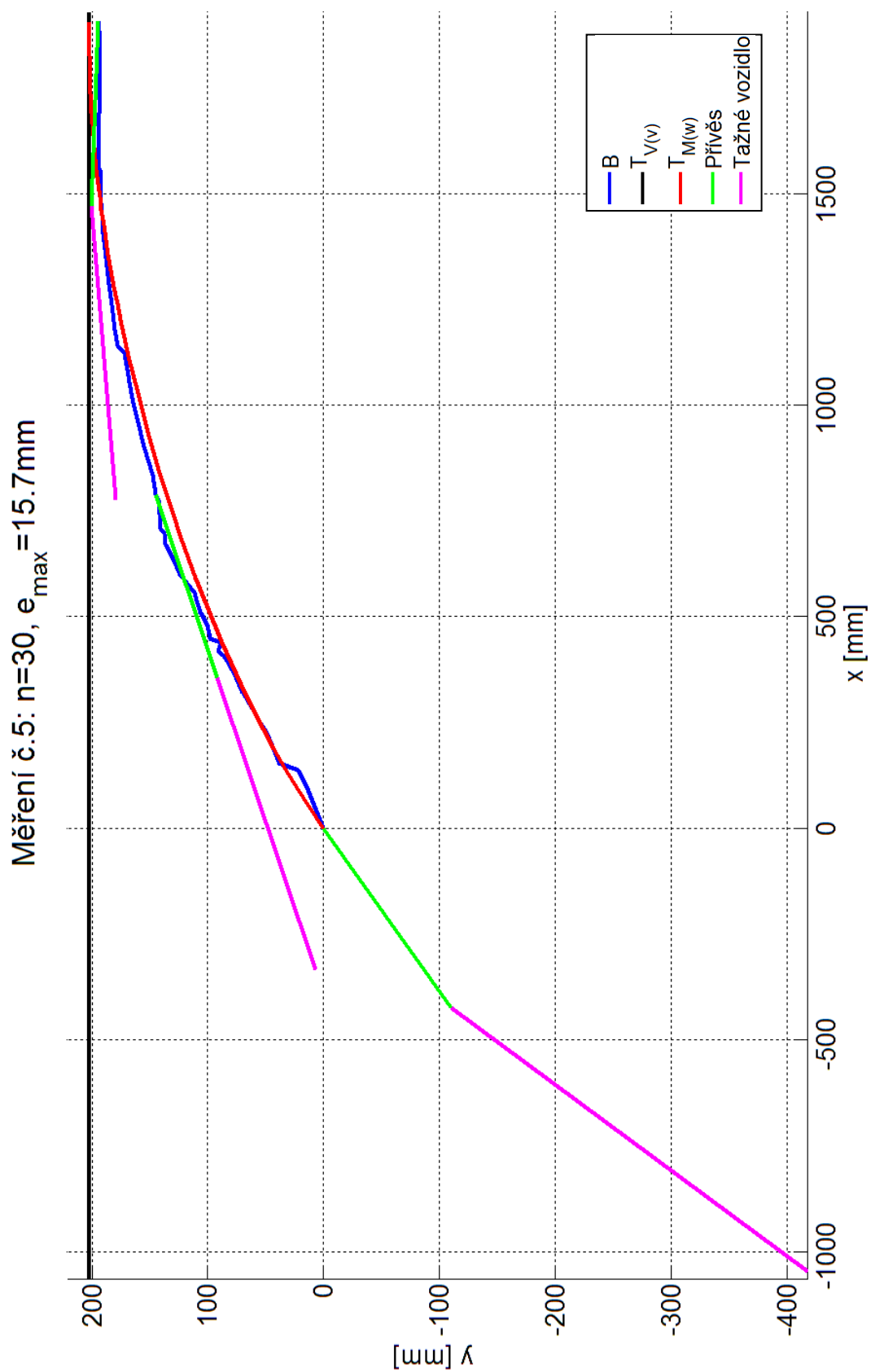


Obrázek 57: Měření č. 3





Obrázek 58: Měření č. 4



Obrázek 59: Měření č. 5

Z grafů měření je patrné, že průběh polohy bodu **B** není příliš hladký. Na měření a řízení soupravy má velký vliv kvalita kamery, přesnost její kalibrace a algoritmy, které vyhodnocují snímky. Tyto algoritmy připouštějí pouze jízdu couváním, ovšem ve skutečnosti současná souprava má tendenci po zastavení se vrátit do stabilnější polohy, což v praxi znamená, že popojede dopředu. Toto chování je dle mého názoru značně zapříčiněno velkou vůlí v pohonném řetězci tažného vozidla, hlavně v diferenciálu zadní nápravy. Vůle neprospívají také při rozjezdu, kdy je nasimulováno řízení na vzdálenost  $n \cdot ds$ . Aktuální ujetá vzdálenost je vypočítána z natočení děrovaného kotouče umístěného na motoru. Motor se protáčí, tudíž algoritmus vyprazdňuje FIFO zásobník s nasimulovanými výstupními hodnotami a tím řídí přední nápravu tažného vozidla, ale souprava stojí, dokud se vůle v pohonném řetězci nevymezí. Bylo odzkoušeno, že minimální nasimulovaná vzdálenost je  $15 \cdot ds$ . Tato vzdálenost dává předpoklad k přemístění soupravy do jiné stabilní polohy. Při menší vzdálenosti algoritmy nestíhají nasimulovat další kroky, tudíž souprava kmitá kolem rovnovážné polohy. Velký vliv na řízení soupravy má správné nastavení geometrie řídicí nápravy tažného vozidla, přesnost a kalibrace snímače natočení kol, rychlost ustálení její PID regulace, dále přesnost snímače natočení podélných os tažného vozidla a přívěsu, stanovení skutečných rozměrů soupravy. Eliminací, či zmírněním výše uvedených rušivých vlivů lze zpřesnit řízení soupravy.

Z prvních třech měření je zřejmé, že s rostoucí nasimulovanou vzdáleností  $n \cdot ds$  se bod **B** bude více odchylovat od hlavní trasy. Jako optimální pro danou soupravu se zdá simulovat řízení na vzdálenost  $30 \cdot ds$ . V pátém měření se během cca dvoumetrové vzdálenosti ujeté couváním nevyskytla odchylka řízení (dle rovnice (3.6.1)) větší než  $e_{max} = 15.7$  mm. Výsledná maximální odchylka je závislá na výchozí poloze soupravy a průběhu vygenerované hlavní trasy. Hlavním závěrem je, že dle mého názoru souprava kopíruje tvar hlavní trasy, tudíž předpoklady, na kterých byly model a jeho řízení postaveny, jsou opodstatněné a má smysl dál tuto myšlenku rozvíjet.

## 4. Závěr

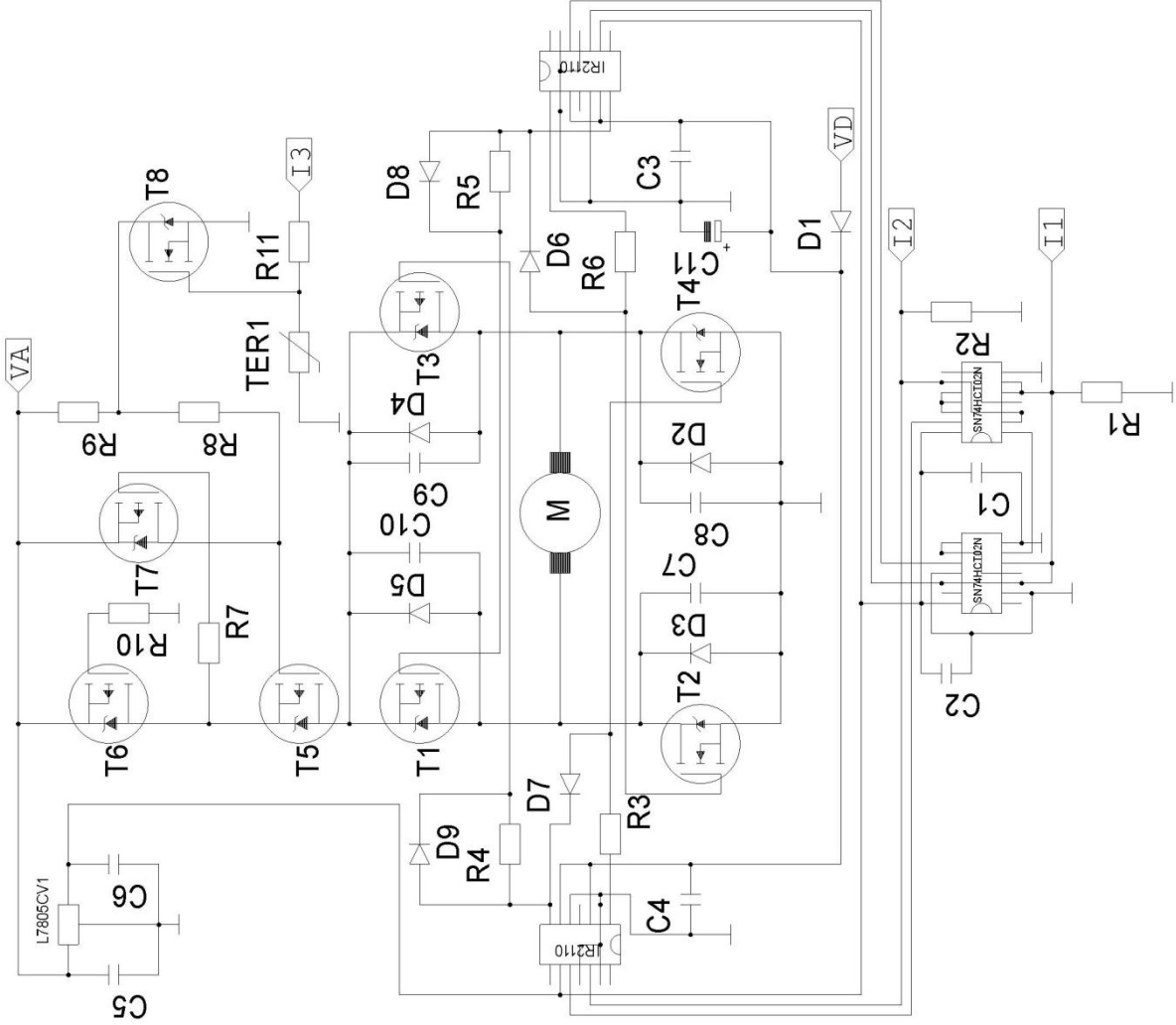
Tato práce si kromě jiného dávala za cíl položit základy pro autonomní couvání soupravy nebo jen tažného vozidla v projektu SMALL. Za tímto účelem proběhla přestavba celé soupravy nejen po hardwarové, ale i softwarové stránce. Zlepšilo se celkové chování modelu a navýšila se výpočetní kapacita. Ukázalo se, že výpočetní jednotka myRIO od NI je správnou volbou. Byly vyvinuty algoritmy pro řízení soupravy při couvání a následně otestovány. Testování ukázalo, že předpoklady, na nichž je řízení soupravy založeno, jsou opodstatněné a má smysl se jimi dále zabývat. Pro budoucí pokračování a zdokonalování autonomního couvání soupravy jako zajímavou myšlenku pokládám způsob řízení přívěsu / návěsu pomocí přibrzdňování kol. Neméně zajímavé je generování tras couvání například v závislosti na výskytu okolních objektů. S tím souvisí vytvoření postupů vyhodnocování výstupů z jednotlivých senzorů (např. ultrazvuk, laser, kamera, atd.) a pomocí fúze těchto algoritmů vytvořit skutečný a bezpečný autonomní pohyb soupravy. Dle mého názoru má projekt SMALL na FS ČVUT stejný potenciál jako například CTU CarTech, tudíž by bylo vhodné vytvořit tým studentů a začít spolupracovat s firmami zabývajícími se danou problematikou.

## 5. Použitá literatura

- [1] FORMÁNEK, V.: PROJEKT II (prezentace), ČVUT FS, 2014.
- [2] KOREC, O.: SMALL – Control unit + ACC with Stop and Go, DP, ČVUT FS, 2011.
- [3] ŠKOPEK, M.: Sledování jízdních pruhů pomocí zmenšeného modelu SMALL, DP, ČVUT FS, 2013.
- [4] CONDIT, R.: Brush DC Motor Fundamentals, Microchip Technology, 2010.
- [5] BRDA, M.: ACC testování prostředků na SMALL vozidle, DP, ČVUT FS, 2006.
- [6] BAZJUK, L.: Couvání vozidla s přívěsem, BP, ČVUT FS, 2014
- [7] LINKEOVÁ, I.: Základy počítačového modelování křivek a ploch, ČVUT, 2008, ISBN 978-80-01-04011-9.
- [8] VONKU, J.: Vehicle dynamics with help of scaled model, DP, ČVUT FS, 2008.
- [9] KADOCH, M.: Sledování vpředu jedoucího vozidla, BP, ČVUT FS, 2010.
- [10] ŠKOPEK, M.: Autonomní jízda zmenšeného modelu SMALL, BP, ČVUT FS, 2011.
- [11] VOLEK, V.: Technické vybavení pro dálkově řízený model vozidla, BP, ČVUT FEL, 2009.

# 6. Příloha

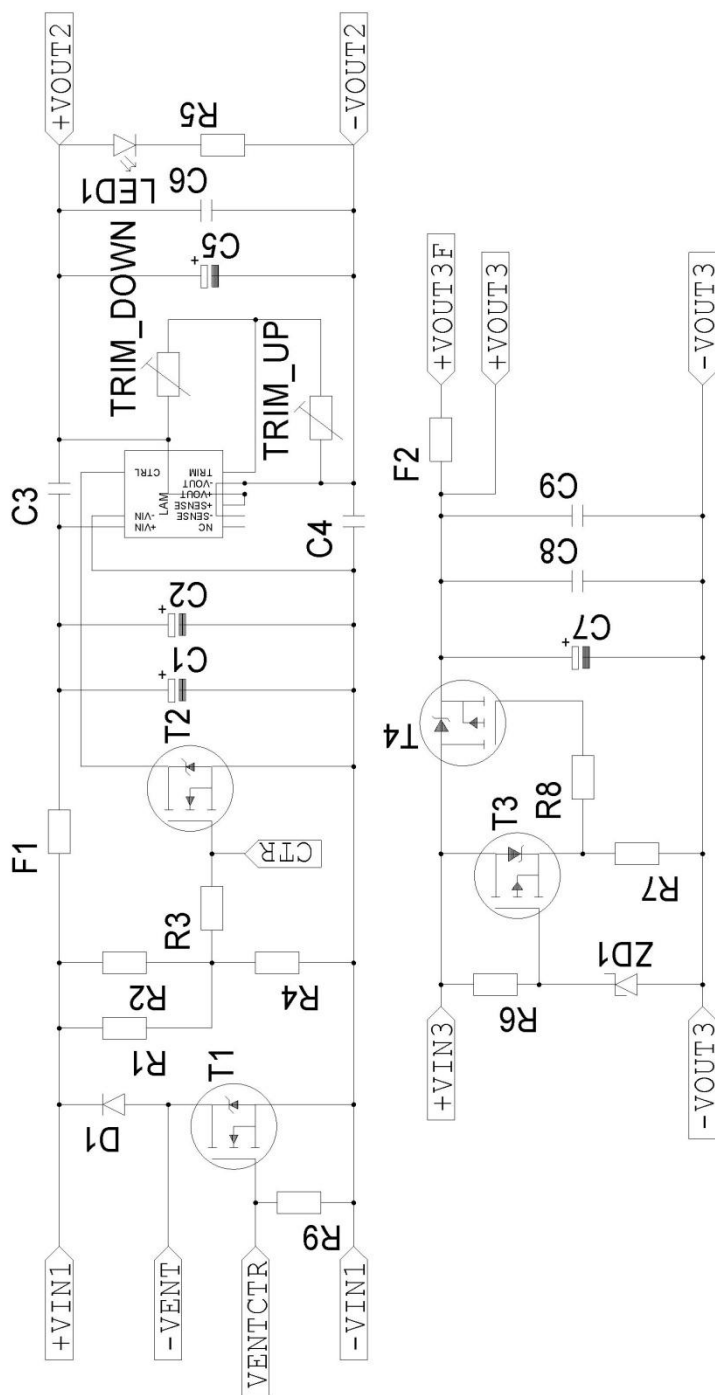
## 6.1. Schéma regulátoru



Tabulka 1: Popis a rozpiska součástek regulátoru

R1, R2	20k $\Omega$
R3, R6	100 $\Omega$
R4, R5	10 $\Omega$
R7	10k $\Omega$
R8, R9	22k $\Omega$
R10	7,4k $\Omega$
R11	3k $\Omega$
C1, C2, C3, C4, C6	100nF/50
C5	330nF
C7, C8, C9, C10	10pF
C11	47 $\mu$ F
D1	MUR420
D2, D3, D4, D5	SF38
D6, D7	SF26
D8, D9	UF4007
T1, T3, T5, T6	IRF 4905
T2, T4	IRF 8010
T7	MMFTP84
T8	BS107A
TER1	NTC 640-10k
VA	Napájení z akumulátoru
VD	Napájení z DC/DC měniče YH11057D

## 6.2. Schéma desky svorkovnice a DC/DC měniče





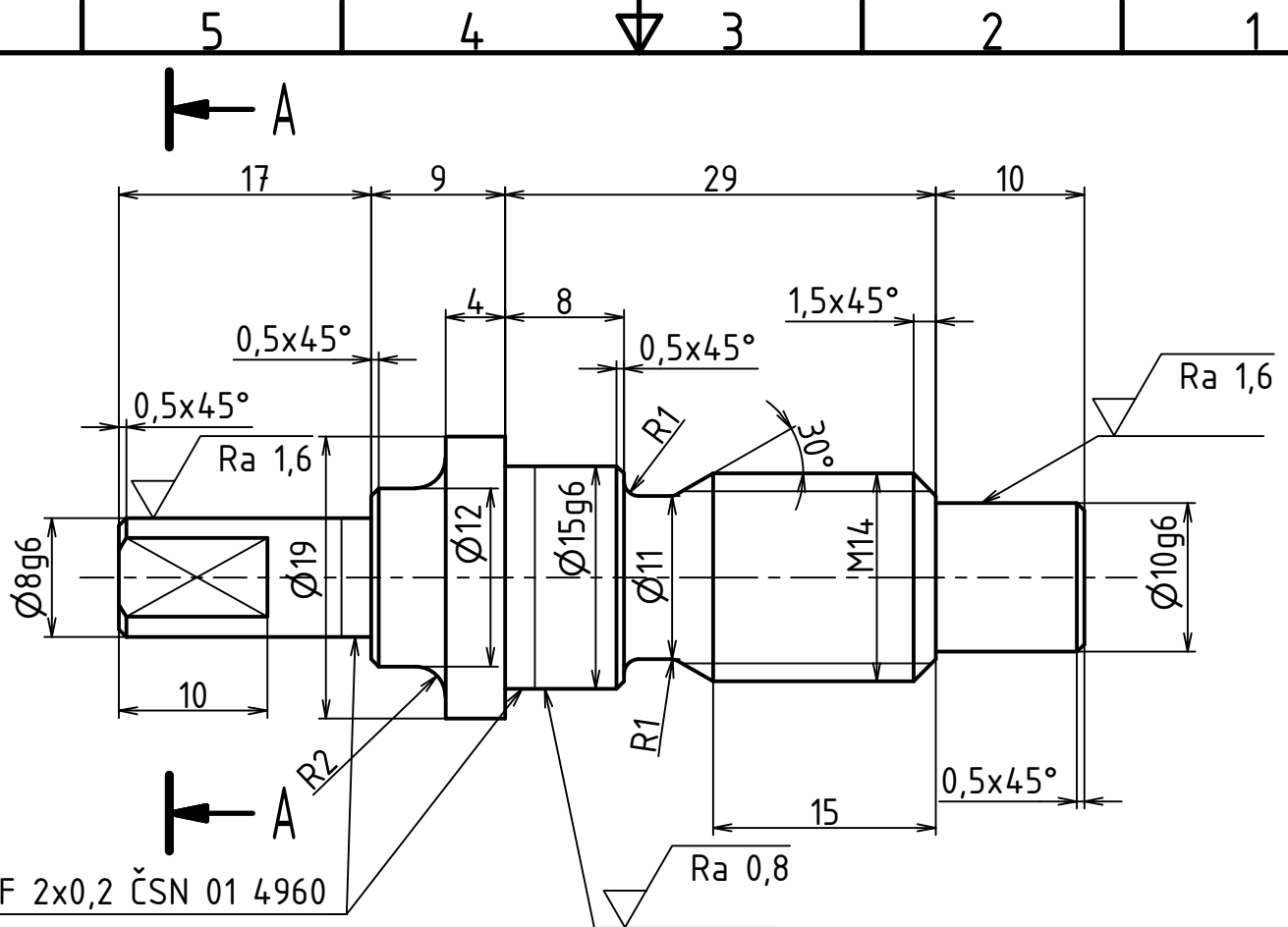
Tabulka 2: Popis a rozpiska součástek desky svorkovnice a DC/DC měniče

R1, R2	12k $\Omega$
R3, R4	4,7k $\Omega$
R5	470 $\Omega$
R6, R8	1k $\Omega$
R7	10k $\Omega$
R9	20k $\Omega$
Trim_down, Trim_up	50k $\Omega$
D1	UF4007
ZD1	12V
LED1	LED zelená
C1, C2	3,3 $\mu$ F/50V
C3, C4	1nF/3000V
C5	470 $\mu$ F/16V
C6, C8	100nF
C7	470 $\mu$ F/35V
C9	10nF
T1, T2	BS107A
T3	BS250
T4	IRF9520
F1	T4A
F2	F1,5A
LAM	Lambda DC/DC converter PXF 40-12S05



Tabulka 3: Popis a rozpiska součástek EW1 10/2015

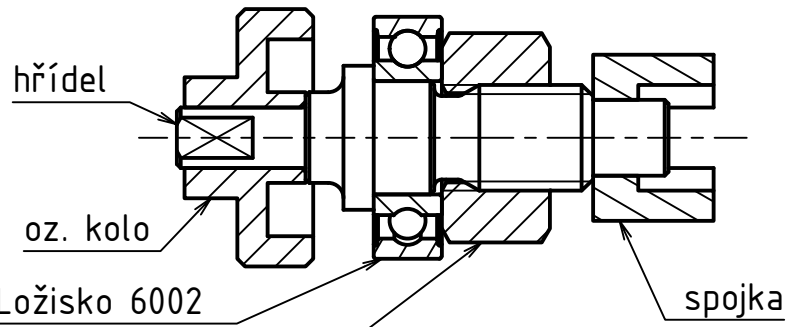
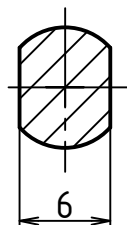
C1	68 $\mu$ F/16V
C2	150nF/25V SMD 0805
SS	Přepínač SS-12F51-G
TR1,2,3,4	100k $\Omega$
E1,2,3,4,5,6	Externí napájení



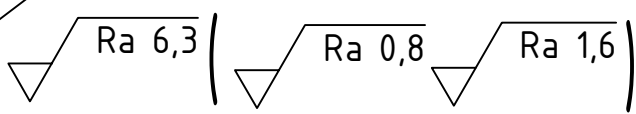
F 2x0,2 ČSN 01 4960

A-A (2:1)

Sestava (1:1)



ŠESTIHRANNÁ MATICE ISO 4032-M14-8



MATERIÁL: 11 600							
POLOTOVAR: KR 20-67 ČSN 42 6510.12							
PROMÍTÁNÍ:  (ISO E)							
TOLEROVÁNÍ PODLE ISO 8015: NE							
PŘESNOST ISO 2768 - mK							
						INDEX	ZMĚNA
						DATUM	PODPIS
Podpis	Datum	Podpis	Datum	HMOTNOST		MĚŘITKO	
NAVRHL		STATIK		kg		2:1	
KRESLIL	ŠKVOR	NORM. REF	7.6.2016	MIKROFILM		Č. SVITKU	
SKUPINÁŘ		PREZK.		SESTAVA		KUSOVNIK	
TECHNOL.		SCHVÁLIL		STARÝ V.			

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
**FAKULTA STROJNÍ**

NÁZEV: **Hřídel SMALL**  
 TYP:  
 ČÍSLO VYKRESU: **01-01-2016**

LST: