



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# KONSTRUKCE JEDNOKOLOVÉHO MOBILNÍHO ROBOTU SE SCHOPNOSTÍ STÁNÍ NA MÍSTĚ

DESIGN OF SINGLE-WHEEL MOBILE ROBOT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Šustek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kočíš

BRNO 2020



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. David Šustek</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Kočiš</b>
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Konstrukce jednokolového mobilního robotu se schopností stání na místě**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Úkolem studenta je navrhnout jednokolový mobilní robot pro průjezd složitějším terénem s možností sběru vzorků o maximální hmotnosti 0,5 kg a schopností stání na místě bez použití podpěr.

### **Cíle diplomové práce:**

Rešerše v oblasti mobilních robotů.

Nejméně 3 návrhové varianty, jejich zhodnocení a výběr vhodné varianty pomocí multikriteriální analýzy.

Konstrukční návrh vybrané varianty.

Potřebné strojírenské výpočty.

Kompletní výkresová dokumentace.

Ekonomické zhodnocení.

Závěr a doporučení pro praxi.

### **Seznam doporučené literatury:**

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : il. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá problematikou jednokolového robotu. Zabývá se především jeho konstrukcí a pohybem v obtížnějším terénu s možností sběru vzorků. Jako nejvhodnější konstrukce byla zvolena varianta robotu vyvažovaného dvojicí gyroskopů. Robot je schopen pohybu v prostoru se sklonem až  $24^\circ$  a je opatřen vlastní konstrukcí manipulátoru.

## **ABSTRACT**

The master thesis deals with the issue of a single-wheeled robot, especially its construction and movement in more difficult terrain with the possibility of collecting samples. A variant of the robot balanced by a pair of gyroscopes was chosen as the most suitable construction. The robot is able to move in a space with an inclination of up to  $24^\circ$  and is equipped with its own manipulator design.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

mobilní servisní robot, jednokolový robot, gyroskopické vyvažování, simulace stabilní polohy, LQR řízení

## **KEYWORDS**

mobile service robot, unicycle robot, manipulator, gyroscopic balancing, balancing simulation, LQR control



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠUSTEK, David. *Konstrukce jednokolového mobilního robotu se schopností stání na místě*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121738>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Petr Kočíš.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat především rodině za neustálou podporu po celou dobu studia a svému vedoucímu Ing. Petru Kočíšovi za ochotu a věcné rady při zpracování této diplomové práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem. Zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Kočiše a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 30.5.2020

.....

Bc. David Šustek



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>SERVISNÍ ROBOT</b> .....	<b>17</b>
2.1	Jednokolový servisní robot .....	20
<b>3</b>	<b>DRUHY PODVOZKŮ JEDNOKOLOVÉHO ROBOTU</b> .....	<b>21</b>
3.1	Gyrover I a II .....	21
3.2	Ballbot .....	21
3.3	Unicycle balancer .....	22
3.4	Alternativní podvozky .....	23
3.4.1	The Cubli .....	23
3.4.2	Dron .....	24
3.4.3	Filmové a herní adaptace .....	24
<b>4</b>	<b>MANIPULAČNÍ RAMENO</b> .....	<b>25</b>
4.1	PRBT .....	25
4.2	LWA 4P .....	26
4.3	ROT3U 6DOF .....	26
<b>5</b>	<b>SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP</b> .....	<b>27</b>
5.1	Cíle a řešení .....	27
5.2	Definice problému .....	28
5.3	Popis řešené soustavy .....	28
5.4	Systém podstatných veličin .....	28
<b>6</b>	<b>NÁVRHOVÉ VARIANTY</b> .....	<b>31</b>
6.1	Varianta č. 1 Gyrover .....	31
6.2	Varianta č. 2 Ballbot .....	31
6.3	Varianta č. 3 Unicycle .....	32
<b>7</b>	<b>MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA</b> .....	<b>33</b>
7.1	Volba kritérií pro analýzu: .....	33
7.2	Stupně klasifikace .....	34
7.3	Hodnocení jednotlivých variant .....	34
7.3.1	Varianta č.1 Gyrover .....	35
7.3.2	Varianta č.2 Ballbot .....	35
7.3.3	Varianta č.3 Unicycle .....	36
7.3.4	Výsledné známky analýzy .....	36
<b>8</b>	<b>VLASTNÍ KONSTRUKCE</b> .....	<b>37</b>
8.1	Konstrukční rozložení a způsob stabilizace .....	37
8.2	Pohony .....	39
8.2.1	Pohon pro pojezdové kolo a natočení gyroskopu .....	40
8.2.2	Pohon pro manipulátor .....	40
8.2.3	Pohon gyroskopu .....	40
8.2.4	Pohon přestavení výšky kola .....	40
8.3	Konstrukce .....	40
8.3.1	Konstrukce podvozku .....	40
8.3.2	Manipulátor RRR .....	44
<b>9</b>	<b>SIMULACE A VÝPOČTY</b> .....	<b>47</b>
9.1	Simulace .....	47

9.1.1	Simulace výchozího náklonu .....	48
9.1.2	Blok řízení skokové změny natočení .....	48
9.1.3	Simulace pohybu terénem .....	49
9.2	Pohyb kola po nakloněné rovině .....	50
9.3	Optimalizace.....	53
9.4	Senzory .....	55
9.5	Napájení a energetická bilance .....	56
<b>10</b>	<b>VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE.....</b>	<b>57</b>
<b>11</b>	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>59</b>
<b>12</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUSE .....</b>	<b>61</b>
<b>13</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>63</b>
<b>14</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>65</b>
<b>15</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>67</b>
15.1	Seznam použitých zkratk .....	67
15.2	Seznam použitých symbolů .....	67
15.3	Seznam tabulek.....	68
15.4	Seznam obrázků.....	69
<b>16</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>71</b>

# 1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá problematikou jednokolového robotu. Práce se věnuje jeho konstrukci, možnosti pohybu v obtížnějším terénu a také sběru vzorků. Celá práce se dá rozdělit do několika částí.

První rešeršní část zobrazuje technologické možnosti jednokolových robotů s náhledem do technologie zachování stabilní polohy. Jelikož se jedná o robot v pravém slova smyslu, je zde uvedeno pár příkladů možností řešení implementace vhodného manipulačního zařízení.

Druhá část se zabývá stanovením tří hlavních konstrukčních variant. Na základě těchto předběžných variant byla sestavena multikriteriální analýza, která dle stanovených kritérií a přiřazených známek, určila variantu nejvhodnější k dalšímu zpracování.

Závěrečná část se zabývá konstrukcí a její optimalizací pomocí navrhnutého simulačního skriptu v programu MATLAB. Robot je opatřen vlastní konstrukcí manipulátoru. Mimo to je v této části nastíněna možnost jeho řízení. Celá konstrukce je zpracována ve formě 3D modelu s odpovídající výkresovou dokumentací a doplněna nutnými výpočty. Tato konstrukce je následně zhodnocena jak po stránce ekonomické, tak po stránce obecného přínosu.



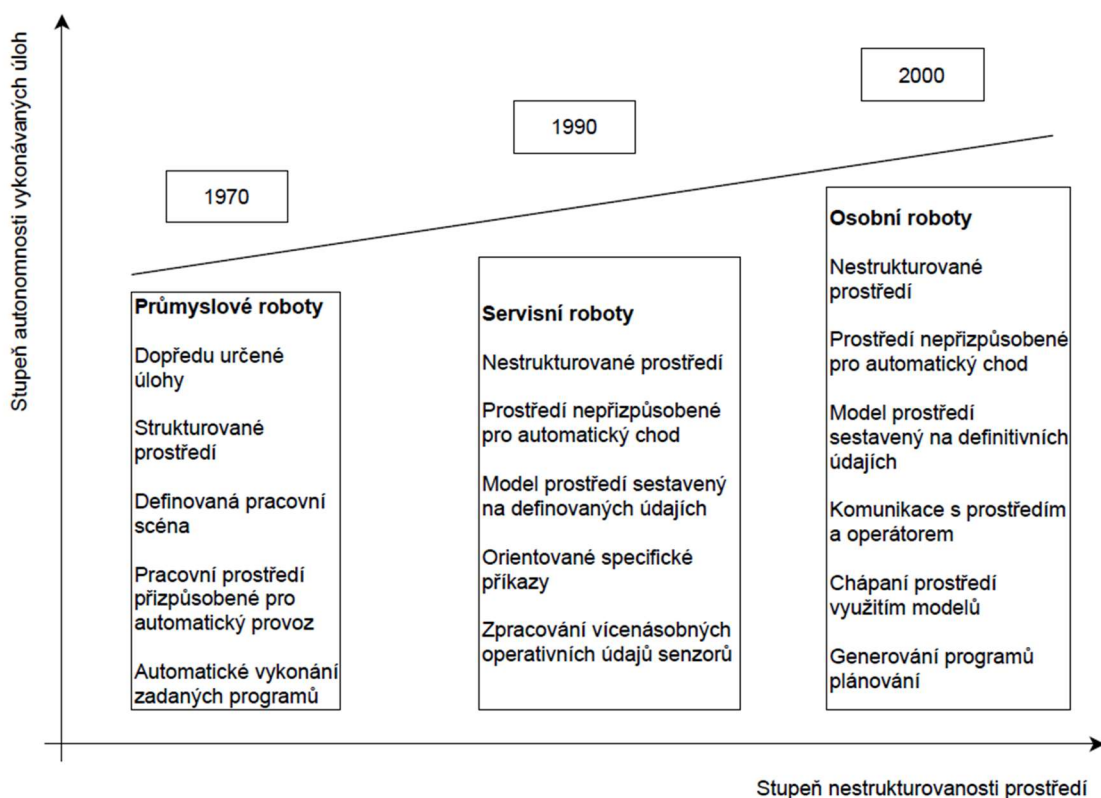


## 2 SERVISNÍ ROBOT

Robotika je vědecký obor, který zažívá obrovský rozmach. Dochází ke stavbě různých druhů robotů, kteří v mnohých ohledech člověka plně zastupují, usnadňují mu práci nebo je využívá pouze pro pobavení. Jedním z odvětví robotiky jsou právě jednokolové roboty.

Robotika je vysoce dynamický obor, kde dochází ke každoročnímu nárůstu obrátu z prodeje robotů a jejich servisu. Nejvyšší zastoupení robotů na 10 000 pracovníků je možné pozorovat ve východoasijských zemích jako například v Japonsku, Singapuru a Jižní Koreji. Následují vybrané Evropské země, kde dominuje např. Německo, Švédsko, Itálie a z amerického kontinentu např. USA. Obsah prodeje robotů není již zaměřen pouze na průmyslné roboty. Neustále se vyskytují nové dynamicky se rozvíjející odvětví, mezi které se řadí i roboty servisní a osobní, které vznikly jako reakce na výskyt robotiky a automatizace v průmyslové sféře. [1]

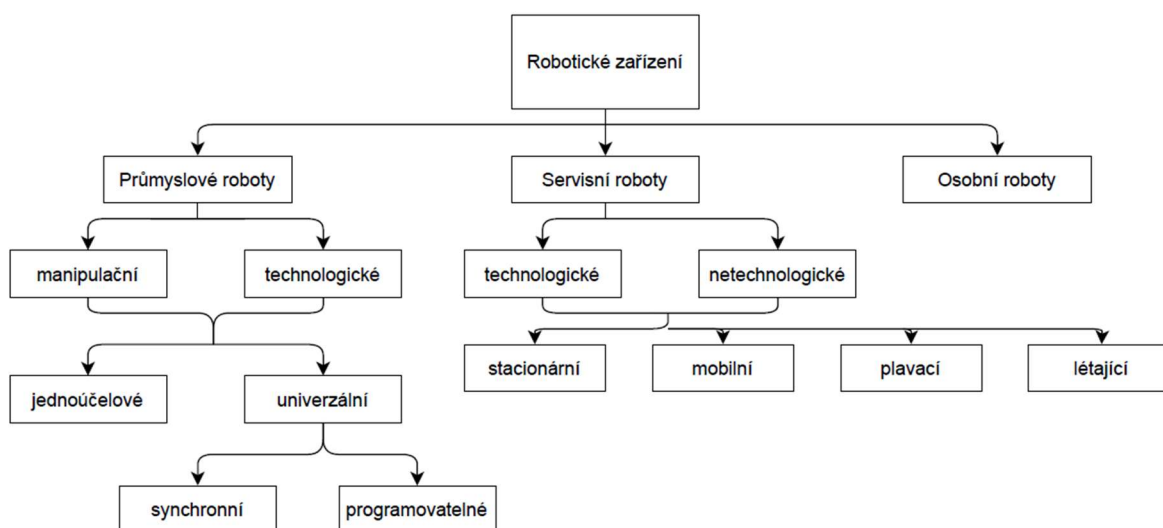
Typické znaky servisních robotů jsou definovány prostředím a cílem činnosti. Vývoj robotických systémů lze pozorovat na obr.1. [1]



Obr. 1) Vývoj robotických systémů [1]

Robotická konstrukce se dělí do pěti generací, kde je každá generace rozlišena podle znaků funkčnosti a která je specifická určitým časovým obdobím. Jednotlivé porovnávací znaky jsou konstrukce, řízení, aplikace a možnosti mobility v prostoru. Robotická konstrukce, které je věnována tato práce, spadá do páté generační skupiny, tzn. s možností mobility v prostoru. [1]

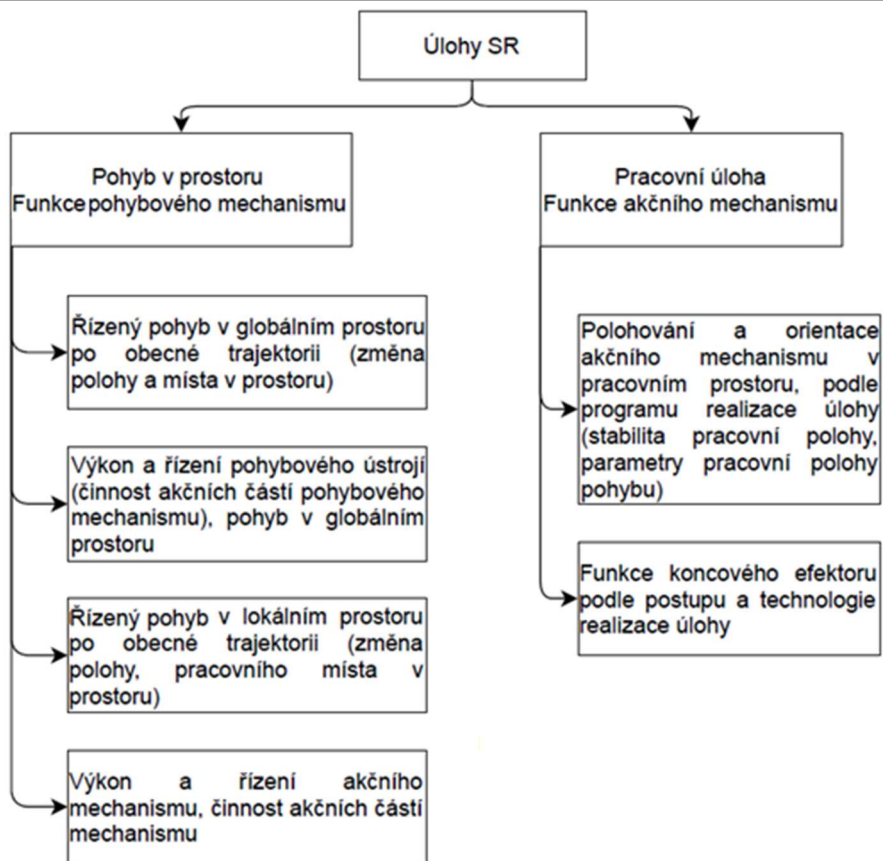
Dělení robotického zařízení je zobrazeno na obr. 2. Vyhotovené robotické zařízení, jehož konstrukce vychází ze zadání této práce, je možné podle uvedeného schématu charakterizovat jako netechnologický servisní robot s mobilním robotickým podvozkem.



Obr. 2) Kategorizace robotických systémů [1]

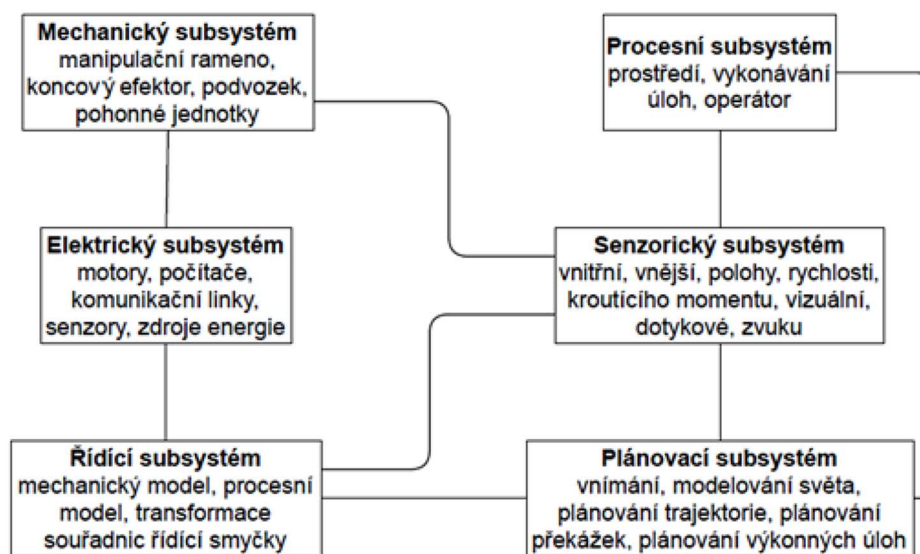
Servisní robot (dále jen SR) je automaticky řízené zařízení, jehož stupeň autonomie je dán cílem činnosti daného zařízení. Servisní robot nepřispívá k průmyslové výrobě a jeho cíle jsou tedy především asistenční. Asistenční služba se může skládat například z pomoci lidem v dané činnosti, kde může člověku s danou operací pomoci nebo ho plně zastoupit. Jasně výhody SR získává například při činnostech, kde by osobní přítomnost pracovníka způsobila ohrožení jeho zdraví nebo života. Užití robotu pro dané operace jasně definují cíle servisního robotu, a tedy i jeho konstrukci.

Při činnosti SR řadíme jeho aktuální úkony do skupin podle související akční skupiny. Jedná se o činnosti spojené s pracovním výkonem a činnosti spojené s pohybem v operačním prostoru, mluvíme tedy o dopravních a pracovních úlohách. Přesnější rozpis úloh, které spadají do určité kategorie, je obsahem obr. 3. [1]



Obr. 3) Schéma znaků mobilního SR [1]

Jelikož je nutná soustava různých prvků robotu pro plnění zadaných operací, řadí se tyto prvky z důvodu přehlednosti do tzn. funkčních subsystémů, které se liší formulací a rozdělením dle přístupu k dané problematice. Jedním z přístupů je tzv. mechatronický přístup, který dělí subsystémy do šesti kategorií. Jejich výčet, detailnější popis obsahu každého subsystému a vzájemná interakce mezi nimi je zobrazena na obr. 4. [1]

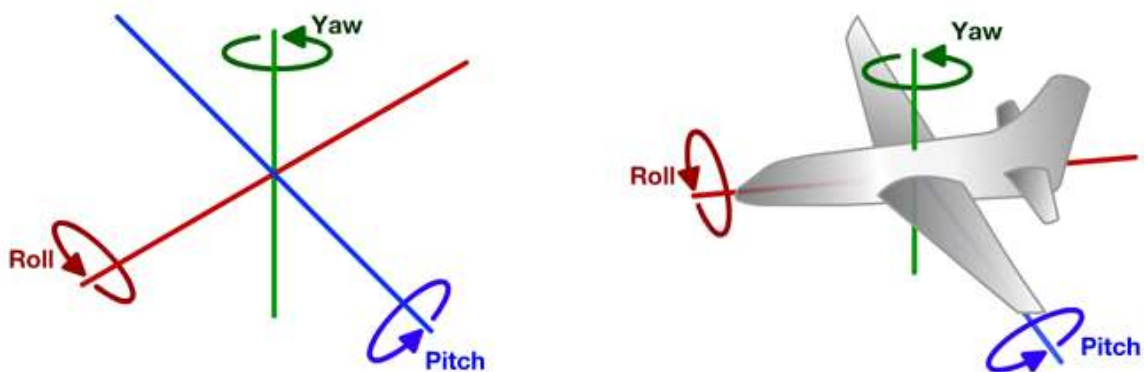


Obr. 4) Systémový model mobilního SR, Elektronický přístup [1]

## 2.1 Jednokolový servisní robot

Jednokolový SR patří do skupiny mobilních servisních robotů s jednokolovým podvozkem. Tento druh robotu se spolu s konstrukcí dvoukolového robotu liší od jiných více kolových mobilních SR potřebou nahradit stabilní polohu, které je normálně dosaženo přítomností minimálně tří styčných bodů, balancováním. Docílit rovnovážné polohy nebo kolem ní oscilovat napomáhají gyroskopy nebo jiné technologické řešení pro zajištění boční stability. Pohon kola následně zajišťuje stabilitu v ose přímé (inverzní kyvadlo). Roboty s podvozkovým typem Ballbot naopak využívají konstrukce tzn. sférického kola, které umožňuje využití pohybu všemi směry a vyvažování probíhá na principu inverzního kyvadla v rovině.

Jednokolový robot se pohybuje v prostoru na základě pohybu v osách a natáčením se kolem nich. Pohyb je definován pomocí pohybu ve třech osách X, Y a Z. K detailnímu popisu pohybu robotu v prostoru je zapotřebí znát hodnotu natočení v těchto osách. Toto natočení je definováno jako roll, pitch a yaw natočení rotační osy, dále jen roll, pitch a yaw. Pohyb v osách definuje působící síla a rotace v těchto osách je způsobena příslušným působícím momentem. Zobrazení jednotlivých os při pohybu lze pozorovat na obr. 5.



Obr. 5) Zobrazení pohybových os [24]

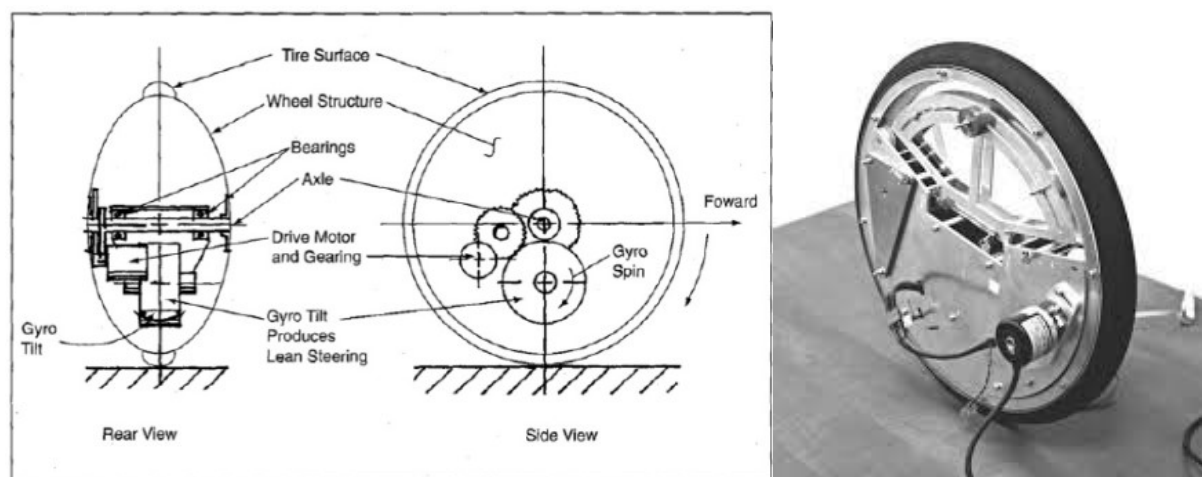
## 3 DRUHY PODVOZKŮ JEDNOKOLOVÉHO ROBOTU

Jednokolové roboty mají velké spektrum technických řešení. Hlavním prvkem určujícím konstrukci a způsob dosažení rovnovážné polohy tkví především ve volbě podvozku. Pro každé zadání může být ideální řešení rozdílné, je tedy nutné přesně definovat cíle konstrukce, a s tím spojené očekávání od daného technického řešení. Vhodnou inspirací může být cílený průzkum trhu obdobných zařízení, na jehož základě lze zvolit ideální výchozí návrh pro další konstrukční zpracování.

### 3.1 Gyrover I a II

Gyrover I je spolu s inovovaným Gyrover II jedním z prvních konceptů jednokolového podvozku robotu. Jedná se o podvozek využívající gyroskop k boční stabilizaci při nulové nebo malé rychlosti. Setrvačnickou svou funkcí zamezuje výkyvu osy mimo stabilní polohu. Gyrover byl postaven na základě RC modelů. Mezi jeho hlavní výhody patří stabilita při vyšší rychlosti, odolnost vůči obtížnějšímu povrchu a schopnost odolat náklonu podstavce až o 45°. Díky výšce kola 29 cm a své vnitřní konstrukci je schopen překonat překážku až o výšce 20 cm. Konstrukce tohoto robotu je koncipována uvnitř obvodového kola s bočním krytím. Ilustrativní zobrazení daného konceptu je zobrazeno na obr. 6. [12,14]

Mezi hlavní nevýhody této koncepce patří především problém se zástavbovým prostorem a kapacitou napájení. Model se příliš nehodí pro aplikace s vyžadovanou velkou dobou provozu a pro konstrukční úpravy. Není tak vhodný pro případ montáže manipulačního ramene pro sběr vzorků a jejich uložení. Dalším problémem může být jeho relativní křehkost, a tedy možnost poškození při kontaktu s kolizní překážkou.



Obr. 6) Zobrazení Gyroveru a) schématické rozložení stavebních prvků [14], b) zobrazení v provozu [13]

### 3.2 Ballbot

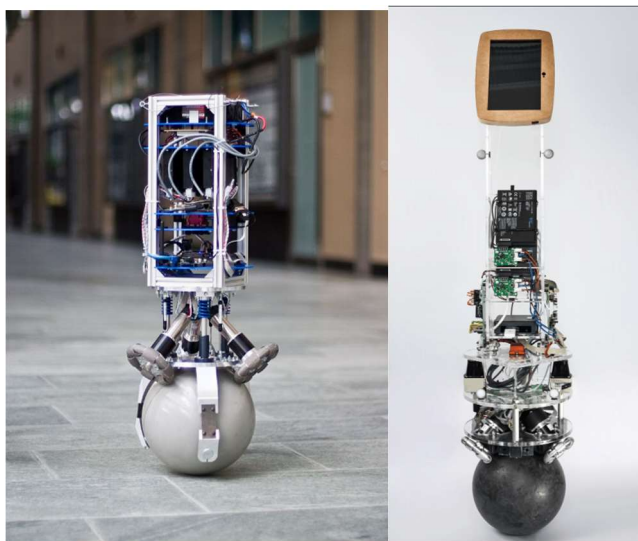
Ballbot je robotický podvozek pracující na principu balancování na sférickém kole. První model byl navržen v roce 2005 prof. Ralphem Hollinsem (Robotický institut, Pittsburg). Tento robot připomíná člověka, ať již vahou nebo výškou. Ballbot je možné považovat za průlomový koncept, kterého využívá mnoho dalších odborníků. Z hlediska úpravy

konstrukce Ballbotu stojí za zmínku například konstrukce BallIP a Rezero, a to především kvůli využití všesměrových kol k přenosu momentu na kolo sférické. Příklady těchto návrhů jsou na obr. 7. [15]

V Roce 2006 Eric M. Schearer pod vedením původního autora Ballbotu představil řešení s dvojicí rukou k demonstraci usnadnění balancování. Zároveň se jednalo o krok k sestrojení robotického asistenta s rozšířenými schopnostmi. Výsledek práce nebyl jednoznačný, neboť ruce Ballbotu způsobovaly rozkmitávání soustavy a výsledný efekt byl do jisté míry negativní. [15]

Jasnou výhodou této konstrukce je především jednoduchost konstrukčního řešení. Jedná se o patrovou konstrukci s velkou variabilitou zástavbového prostoru, která rozšiřuje možnosti doplnění této konstrukce o různé doplňkové moduly. Další významná výhoda vychází z pohonu sférického kola všesměrovými koly, díky kterým je zajištěna vynikající polohovatelnost a natočení robotu určitým směrem. Jelikož je zástavbový prostor orientován svisle vzhůru, polohovatelnost kol umožňuje výbornou schopnost pohybu v prostoru s překážkami.

Mezi nevýhody lze zařadit například závislost na povrchu, kde je nutné zajistit dokonalý styk sférického kola s podstavou a mezi poháněnými všesměrovými koly s kolem sférickým. Jako další nevýhodu lze zmínit omezenou rychlost a možnost akcelerace, která je přímo závislá na kompletní konstrukci. Sférické kolo musí udržet neustálý styk s pohonem, tedy všesměrovými koly. Z toho vyplývá jeho náchylnost k omezení pracovní činnosti při znečištění sférického kola např. prachem, blátem nebo vodou. Toto znečištění může způsobit prokluz prvku pohonu a pád Ballbotu.

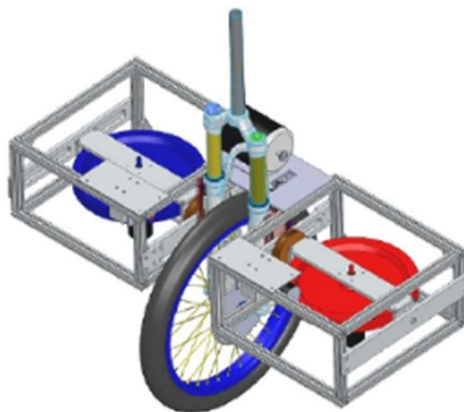


Obr. 7) Ballbot a) Razero 2010 [17], b) Kugle V1 [16]

### 3.3 Unicycle balancer

Unicycle balancer zobrazený na obr. 8 je robotický podvozek kombinující prvky Ballbotu a Gyroveru. Jedná se o koncepci, kde je robot postaven na klasickém kole a jeho funkční prvky jsou vyvedeny mimo kolo ať už svisle vzhůru nebo do stran. Boční vyvažování má na starosti gyroskop a o vyvažování v přímé ose směru se stará pohon kola, které využívá principu inverzního kyvadla. Tento koncept je využit například u robotické hračky Murata Girl. Výhodou je jednoduchost konstrukce a možnost neomezeného doplňování o přídavné moduly.

Nevýhodou je především plocha zástavbového prostoru, která zvyšuje riziko kolize s překážkou. Tento problém je možné do jisté míry kompenzovat konstrukcí se svisle orientovaným zástavbovým prostorem. Z důvodu pohánění jednoho kola není polohování robotu vzhledem k poloze vzorku ideální. Tento nedostatek do jisté míry kompenzuje využití dvou gyroskopů, které umožňují zároveň ovládat rotaci robotu v yaw a roll. [18]



Obr. 8) Unicycle robotický podvozek [18]

### 3.4 Alternativní podvozky

Alternativní podvozky jsou zmíněny jako teoreticky využitelné koncepty. Slouží tedy spíše jako inspirace a demonstrace možností technologického řešení.

#### 3.4.1 The Cubli

The Cubli je prototypové označení pro kostku o velikosti 15 x 15 x 15 cm, která pomocí tří na sebe kolmo uložených reakčních kol získává schopnost pohybovat se, skákat a balancovat na stěně případně vrcholu kostky, viz obr. 9. Nepatří tedy do skupiny kolových robotických podvozků, ale možným spojením s modelem Ballbot by mohlo dojít k odstranění přímého pohonu kola Ballbotu. K pohybu by docházelo náklonem tělesa na sférickém kole pomocí principu The Cubli. Tato kostka dokonale demonstruje možnosti vyvažování. [19]



Obr. 9) The Cubli [19]

### 3.4.2 Dron

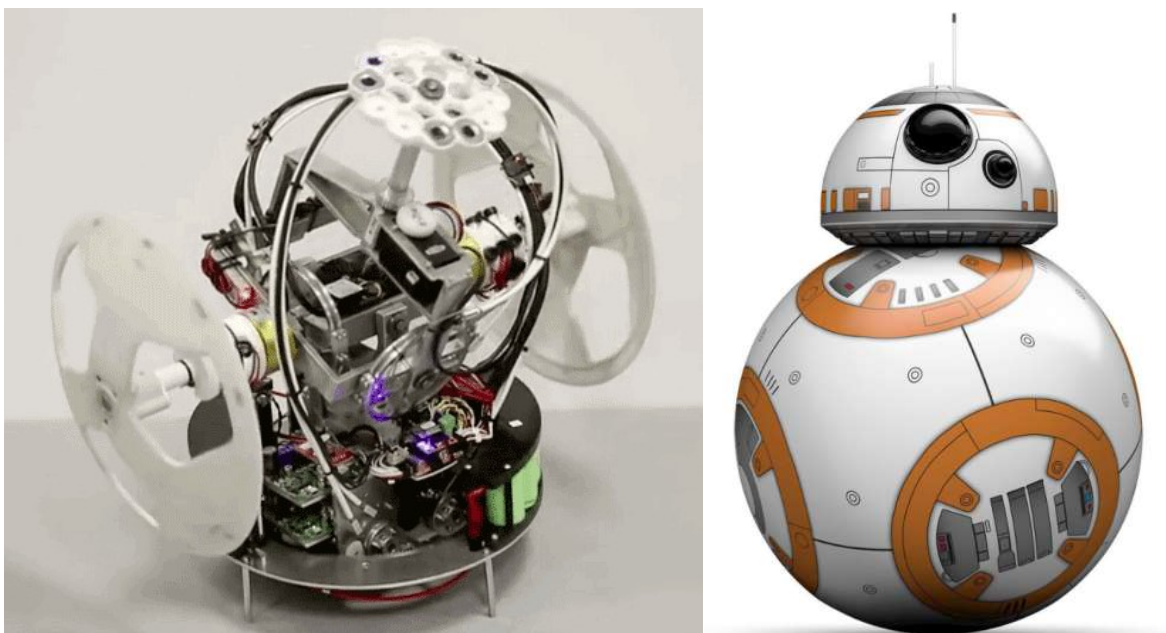
Zajímavou možností pro udržení rovnovážné polohy může dojít spojením kola a dronu, kde by se na vyvažování primárně podíleli vrtule, tedy jejich tahové síly. Koncept aplikování dronu na sférické kolo nebo na kolo klasické by umožnilo zdolat překážku vzletem na krátkou vzdálenost. Zároveň by se ale navýšil zástavbový prostor a omezila se i jeho využitelnost. Robot by nejspíš také trpěl zvýšenou energetickou náročností.

### 3.4.3 Filmové a herní adaptace

Jelikož není konstrukce jednokolového robotu zcela běžná, je možné se inspirovat ze sci-fi filmů nebo počítačových her. Mezi možnou inspiraci může patřit Claptrap z herní série Borderlands od společnosti 2K nebo například Sphero BB-8 z filmové ságy Star Wars.

Claptrap je koncepce Unicycle robotu, jehož balancování je umožněno díky vnitřnímu setrvačníku, širokému poháněnému kolu a dvojici rukou, které jsou zároveň užity k manipulaci s předmětem.

Robotický podvozek Sphero BB-8 se původně objevil ve filmu Star Wars, kde byl vytvořen za účelem tvorby “živé” rekvizity. Poté se začal běžně prodávat jako hračka. BB-8 je konstruován ze sférického kola a hlavy, která se při pohybu neustále nachází v blízkosti původní osy. BB-8 využívá gyroskop k určení polohy a dvě kola slouží k rotaci koule. Vnitřní komponenty sférického kola jsou použity jako protizávaží a pro udržení styku poháněcích kol se spodní polovinou poháněné koule, viz obr. 10. [20]



Obr. 10) Sphero-BB-8 a) bez krytování [20], b) s krytovaním [20]



## 4 MANIPULAČNÍ RAMENO

Manipulační rameno neboli manipulátor, je označení pro robotické rameno spadající do skupiny stacionárních robotů. Slouží k manipulaci s cílovým předmětem, popřípadě k práci s nástrojem. Manipulátor definují vazby a jejich kombinace užití v jeho konstrukci. Jedná se především o rotační a translační vazby. Běžně se u manipulátoru využívá šest rotačních os, případně osa sedmá pro translační pohyb manipulátoru v kolejnicích.

Na konci manipulačního ramene je umístěn koncový efektor, který slouží k sevření a odebrání vzorku. Svírací síla prstů koncového efektoru je vybuzena mechanicky, tedy motorem nebo pneumaticky. Pro ideální uchopovací sílu je využíván vhodný počet prstů a jejich tvarování s odpovídající povrchovou nebo materiálovou úpravou stykových ploch.

Součástí konstrukce robotu je řešení sběru vzorku a je-li to konstrukcí požadováno, tak i jeho uložení. Nejjednodušší variantou je nákup vhodného manipulátoru. Tuto variantu ovšem není možné využít u všech druhů konstrukce, potom je nutno manipulátor navrhnout. Při výběru manipulátoru je nutné brát ohled na jeho rozměry a rozsah pracovního prostoru z důvodu sběru a uložení vzorku do prostoru pro vzorek určený. Následující příklady manipulátorů slouží k zobrazení druhů manipulátorů a jejich možnému uchycení k robotickému podvozku.

Jelikož se tato práce zabývá především stavbou prototypového modelu, je možné využití hobby manipulátoru jako manipulačního ramene. Hmotnost odebíraného vzorku je relativně nízká, hobby manipulační zařízení se tedy jeví jako ideální volba. Mezi výhody hobby manipulátorů patří především nízká hmotnost, energetická nenáročnost a cena. Zároveň se jedná o jednoduchou konstrukci s možností snadného řízení. Dimenzování pohonů může být vztaženo ke konkrétní operaci, nedocházelo by tak ke zbytečnému naddimenzování manipulátoru jako celku.

### 4.1 PRBT

PRBT je manipulátor se šesti osami. Jedná se o malý a kompaktní manipulátor s hmotností 19 kg. Díky takto nízké hmotnosti je možné manipulátor montovat pod různými úhly. Napájení pohonů je 24 V DC a provedení odpovídá normě IEC 61800-5-2. Rozsah pracovního prostoru je až 741 mm. Mezi výhody PRBT manipulátoru patří například bezpečnostní funkce Safe torque off (zabraňuje střídači generovat točivý moment motoru) a Safe brake control (bezpečnostní mechanická brzda) a nabízí taktéž krytí IP40. Manipulátor je zobrazen na obr. 11. [21]



Obr. 11) PRBT manipulátor [21]

## 4.2 LWA 4P

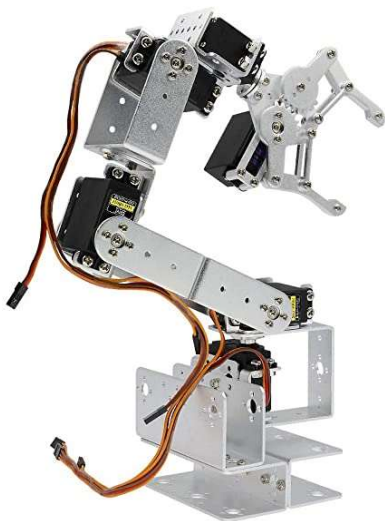
Další komerčně vyráběným manipulátorem je LWA 4P. Toto rameno se skládá ze tří powerball modulů a nabízí šest stupňů volnosti, jak lze vidět na obr. 12. Rameno je napájeno z baterií o napětí 24 V DC. Díky své energetické nenáročnosti je jeho provoz omezen na 8 hodin s 12 Ah baterií s dosahem až 610 mm. Velkou výhodou tohoto manipulátoru je jeho poměr mezi hmotností a nosností 2:1. [22]



Obr. 12) LWA 4P manipulátor [22]

## 4.3 ROT3U 6DOF

Mezi přední zástupce hobby manipulátorů patří ROT3U 6DOF. Tento manipulátor je určen pro jednoduché operace. Vhodným dimenzováním servo-pohonů je možné optimalizovat sestavu na míru určenému zadání. Konstrukce je jednoduchá a z běžně dostupných komponentů. Koncepce tohoto řešení je tedy otevřena dalším modifikacím. Další výhodou je snadné řízení servo-pohonů a variabilní možnost upevnění k robotickému podvozku. Manipulátor ROT3U 6DOF je zobrazen na obr. 13. [23]



Obr. 13) ROT3U 6DOF [23]

## 5 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP

Cílem diplomové práce bylo sestavení jednokolového robotu pro sběr vzorku o hmotnosti 500 g. Zároveň by tento robot měl být schopen pohybu v obtížnějším terénu se schopností stání na místě, tedy balancování bez podpěr.

Jelikož se jednalo o problematiku jednokolového robotu, bylo nutné provést studium dané problematiky s možností řízení a balancování pro jednotlivé konstrukční varianty, které přímo určují směr, jakým se konstrukce bude ubírat. Jednotlivé varianty byly porovnány multikriteriální analýzou a následně byla stanovena výsledná varianta pro zpracování.

Dalším bodem zadání byl pohyb robotu obtížnějším terénem. Bylo tedy nutné definovat prostředí, ve kterém se bude onen robot pohybovat a s jakými okrajovými podmínkami je nutné počítat. Jako terén byl zvolen teoretický prostor definovaný v programu MATLAB. Jedná se o prostor, jehož reliéf byl narovnan. Pohyb byl definován trajektorií stykového bodu kola a podložky mezi překážkami. Výsledné možné převýšení bylo záležitostí zbytkového momentu na pohonu. Konstrukce by měla být dostatečně robustní a stabilní pro možnost průchodu tímto terénem.

Posledním bodem byla možnost sběru vzorku. Konstrukční možnosti sběru vzorku se liší v závislosti na zvolené konstrukční variantě podvozkové části. Bylo ovšem nutné s těmito možnostmi počítat a zohlednit je při multikriteriální analýze. Přesná návrhová varianta pro manipulační zařízení je obsahem vlastní konstrukce manipulátoru.

### 5.1 Cíle a řešení

Konstrukce jednokolového robotu byla komplexním problémem, neboť každý konstrukční prvek přímo ovlivňoval jeho funkci, tedy stabilitu a možnosti, jak této stability dosáhnout. Bylo nutné pokusit se o docílení co nejvhodnější konstrukce a následně jí osadit vhodnými pohony. Pro získání těchto ideálních parametrů bylo nutné sestavit simulaci s jejíž pomocí bylo možné považovat dané konstrukční řešení za optimální.

Cíle pro zhotovení práce:

- Zpracování rešeršní části
- Výběr vhodných konstrukčních řešení na základě rešerše
- Výběr vhodné varianty pro zhotovení
- 3D konstrukce modelu zvolené varianty
- Výpočtová dokumentace potřebná pro konstrukci a iterační úprava modelu
- Vhodná simulace
- Výkresová dokumentace
- Ekonomické zhodnocení

## 5.2 Definice problému

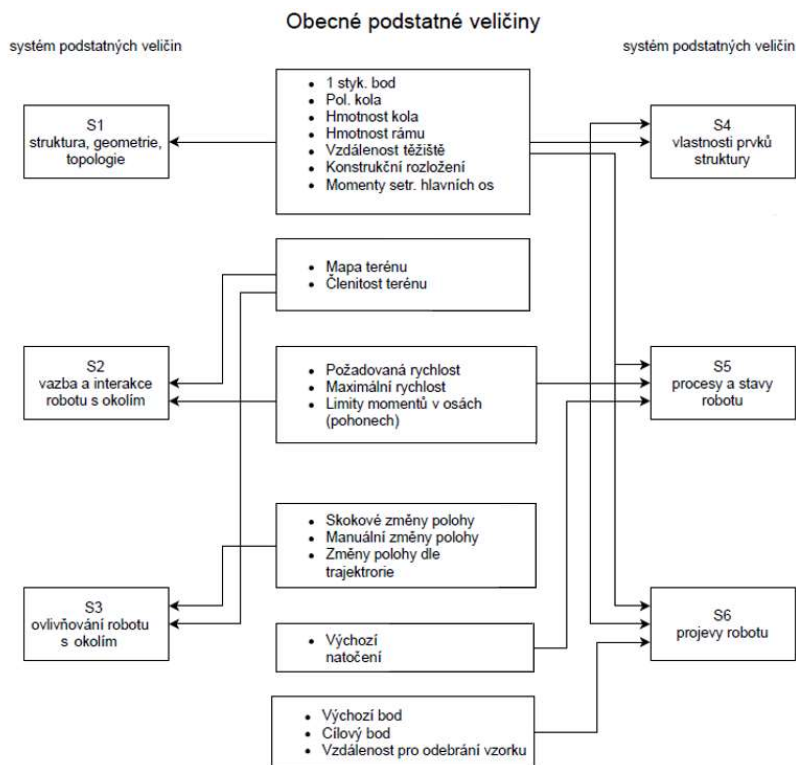
Na trhu se vyskytuje plno jednokolových robotů, jedná se ale spíše o jednokolové robotické podvozky. Pro servisní účely se tyto robotické podvozky nevyskytují. V diplomové práci byla zpracována prototypová konstrukční úloha jednokolového robotu z důvodu ověření možností využití zpracovaného konceptu pro servisní účely.

## 5.3 Popis řešené soustavy

Jednokolový robot se skládá z podvozkové části a z manipulační části. Přesnější popis a rozložení jednotlivých konstrukčních prvků byl závislý na volbě konstrukční varianty a byl obsahem kapitoly 6. Tyto varianty se lišily především v principu dosažení stabilní polohy. Jednotlivé konstrukce však disponují některými společnými znaky. Můžeme mezi ně řadit např. závislost na momentech setrvačnosti hlavních os, hmotnost, výška těžiště, kapacita napájecího zdroje, hmotnostní únosnost manipulátoru, rychlost a zrychlení soustavy.

## 5.4 Systém podstatných veličin

Při řešení jakéhokoliv technického problému je třeba uvažovat tzv. systém podstatných veličin (SPV). Je to metoda, při které se názorně zobrazují veškeré prvky ovlivňující řešenou úlohu. Jedná se o subjektivní porovnávání skutečného systému se systémem abstraktním. Na základě poznatků SPV a kompletaci veličin a parametrů v jednotlivých charakteristických skupinách bylo možné sestavit simulaci pro danou problematiku. Veškeré veličiny nacházející se v popisu jednotlivých charakteristik ovlivňují chování celé soustavy. Bylo tedy třeba k SPV přistupovat s dostatečnou rozvahou a kritičností k získání co možná nejobjektivnějšího systému. Přehled veličin ovlivňujících jednotlivé systémy byl uveden na obr. 14. [6,25]



Obr. 14) Spojitost SPV se vstupními veličinami

- **S1 – Struktura, geometrie, topologie**

Jednokolový robot byl definován jedním stykovým bodem. Mezi hlavní prvky, které se podílely na výsledném chování celého robotu, patří především hmotnost, poloha těžiště a momenty setrvačnosti hlavních os ve stykovém bodě. Bylo tedy potřeba tyto parametry vhodně optimalizovat.

- **S2 – Vazby a interakce robotu s okolím**

Robot byl s podložím spojen obecnou neholonomní vazbou, která robotu umožňovala pohyb v prostoru. Stálý styk s podložkou byl zajištěn především pomocí působící normálové síly a tečné síly, které byly ovlivněny hmotností robotu, druhem podkladu (součinitel tření, soudržnost materiálu) a dynamikou pohybu. Řízení robotu bylo umožněno pomocí tzn. klopných momentů, které jsou generovány na základě zvoleného konstrukčního řešení.

- **S3 – Ovlivňování robotu okolím**

Robot může být ovlivněn různými vnějšími vlivy. Bylo zde tedy možné počítat například s působením větru. Působící síla může také vzniknout při pouhém kolizním kontaktu s nahodilým předmětem, reliéfem terénu, popřípadě osobou nebo zvířetem.

- **S4 – Vlastnosti prvků struktury**

Tato skupina parametrů obsahuje především soupis vlastností celé sestavy. Tyto prvky byly přesněji definovány na základě zvolené varianty. Mezi hlavní parametry důležitými pro simulaci se ovšem řadily např. hmotnost, maximální rozměry, momenty setrvačnosti hlavních os robotu a jeho redukované momenty setrvačnosti mechanických podsestav, elektrické napětí pohonné soustavy a rozmístění jednotlivých funkčních skupin v robotu.

- **S5 – Procesy a stavy robotu**

Z hlediska procesů a stavů robotu bylo možné vycházet z výchozího naklopení robotu, které bylo třeba stabilizovat. Téměř nikdy není možné ustavit výchozí polohu robotu do stavu rovnováhy, bylo tedy vhodné definovat krajní možnosti výchozí stability.

- **S6 – Projevy robotu**

Projevy robotu definovaly cíle simulace. Mezi obecné projevy, které nebyly závislé na výběru varianty, se řadí např. maximální rychlost, maximální zrychlení, maximální počáteční vychýlení soustavy, operační čas a poloměr zatáčení. Mnohé z těchto parametrů nebylo možné jasně stanovit, např. z důvodu přesněji nespécifického terénu, který jasně ovlivňuje maximální zrychlení a rychlost robotu. Ze zjednodušené simulace se mohly tyto veličiny odhadnout.

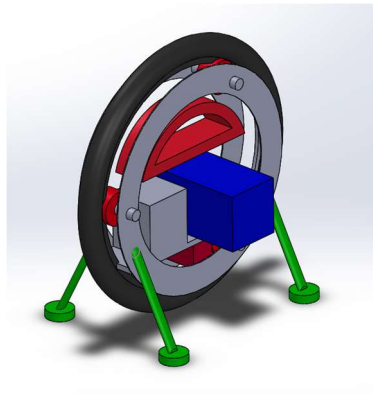


## 6 NÁVRHOVÉ VARIANTY

Na základě poznatků z rešeršní části byly dále brány v úvahu první tři koncepty jednokolových podvozků robotů, tzn. Gyrover, Ballbot a Unicycle. Každý koncept obsahoval mnoho možností konstrukčních úprav a již v návrhových variantách bylo třeba počítat s manipulátorem pro sběr vzorků. Tyto návrhové varianty byly nadále použity pro multikriteriální analýzu, která vedla k výběru ideálního konceptu jednokolového robotu pro tuto práci.

### 6.1 Varianta č. 1 Gyrover

Jako první byl zvolen návrh konstrukčního řešení na základě Gyroveru, který byl ovšem omezen velikostí vnitřního prostoru pro nutnou zástavbu manipulátorem. Jediným řešením bylo oprostít se od přibližného rozměru původního Gyroveru a navrhnout konstrukci větších rozměrů a to tak, aby vyhovovala potřebám sběrného robotu. V rámci udržení co nejnižšího těžiště došlo k reorganizaci vnitřní struktury. Manipulátor by musel být navržen speciálně pro tento robot s omezeným počtem stupňů volnosti a s co možná nejjednodušší a nejlehčí konstrukcí. Rameno manipulátoru by bylo se vzorkem umístěno co nejbližší k těžišti. Gyrover by musel být opatřen čtyřmi podpěrami k zajištění rovnovážné polohy při sběru vzorků. Došlo by však k narušení integrity ochranného krytování robotu. Nároky na balanční páku by byly rapidně zvýšeny z důvodu nárustu hmotnosti. Návrh řešení lze pozorovat na obr. 15.

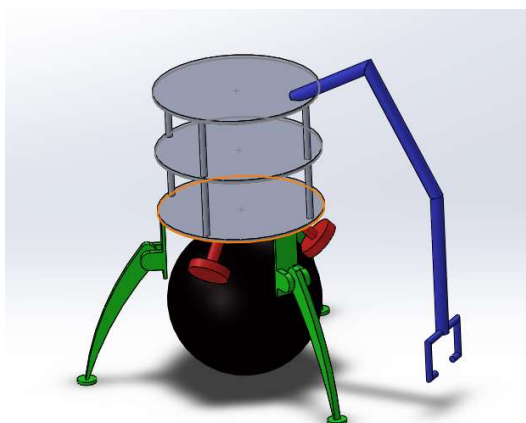


Obr. 15) Obecný návrh Gyrover robotu

### 6.2 Varianta č. 2 Ballbot

Toto řešení nabízelo daleko více konstrukční volnosti a variability návrhů. Manipulátor může být zvolen průmyslový nebo sestaven na základě konstrukce hobby manipulátoru. U tohoto konceptu mohlo být plně využito patrové konstrukce pro ideální oddělení jednotlivých bloků od ostatních částí robotu a pomocí rozložení jednotlivých komponentů ho tak ideálně vyvážit. Původní řešení pohonu Ballbotu se pro tuto aplikaci úplně nehodilo. Daleko vhodněji se jevila varianta BallIP s poháněným sférickým kolem všesměrovými koly. Hlavním důvodem byla možnost dokonalého řízení natočení manipulátoru ku vzorku. Teoreticky by tato varianta nepotřebovala blok pro ustálení polohy při procesu sběru vzorku. Do návrhového řešení byla

zahrnuta z důvodu úspory energie a hladkosti chodu při sběru vzorku. Blok byl řešen ve formě trojice nohou mezi koly pohonů, viz. obr. 16.

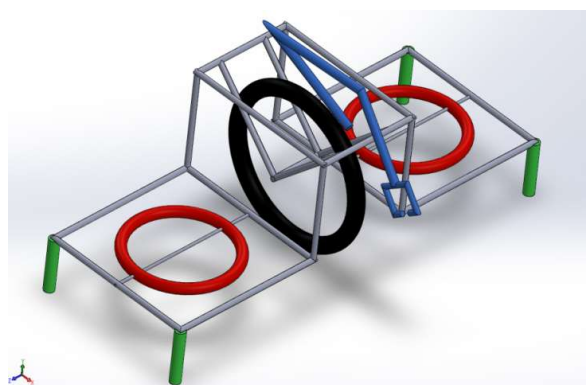


Obr. 16) Návrh Ballbot robotu

### 6.3 Varianta č. 3 Unicycle

Řešení, které do jisté míry kombinovalo konstrukci Ballbotu a Gyroveru, bylo konstrukční řešení na robotickém podvozku Unicycle. Zde byla možnost využít návrh umístění manipulátoru nad kolo robotu, čímž se zajistila symetrie důležitá pro stabilitu robotu. Dosažení stabilní polohy bylo získáno pomocí dvou gyroskopů umístěných v ramenech robotu. Pro udržení stabilní polohy v momentu odebrání vzorku slouží čtyři nohy a jejich pozice byla v rozích tohoto robotu.

Značnou výhodou byla již zmíněná symetrie tohoto řešení, která ulehčovala stabilitu. Zároveň se teoreticky jednalo o nejlevnější variantu s velkou variabilitou technických možností zpracování. Mezi významné nevýhody bylo možné řadit omezení provozním prostorem, neboť gyroskopy robotu zasahovaly ve velké míře do pracovního prostoru, jak je patrné z obr. 17.



Obr. 17) Návrh Unicycle robotu



## 7 MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA

Pro objektivní zvolení ideální varianty konstrukce jednokolového robotu, bylo nutné vypracovat na základě rešeršního šetření multikriteriální analýzu. Metoda multikriteriální analýzy pracuje s principem volby kritérií pro všechny návrhové varianty a následnému přiřazení hodnotící váhy významnosti daného parametru. Toto se provádí sestavením příslušné tabulky kritérií, kdy ke každému kritériu s přiřazenou váhou se zapíše známka, která definuje tuto variantu. Výsledná hodnota vznikla následným výpočtem ze známek a vah posuzovaných parametrů daného konstrukčního návrhu. Ideální varianta byla zvolena pomocí porovnání jednotlivých výsledných hodnot. Návrhové řešení s nejvyšší známkou bylo touto analýzou zvoleno a dále zpracováno.

### 7.1 Volba kritérií pro analýzu:

Tab 1) Tabulka kritérií

K <sub>1</sub>	Stabilita	Nejdůležitější prvek jednokolového robotu. Hodnota bude odhadnuta z hlediska popisu obdobných řešení a videozáznamů reálných konstrukcí.
K <sub>2</sub>	Cena	Cena je nedílným kritériem každé konstrukce je tedy nutné počítat u jednotlivých variant i s teoretickou finanční náročností, která bude porovnávat jednotlivé varianty.
K <sub>3</sub>	Složitost konstrukce a její využití	Toto kritérium porovná složitost a možnost využití konstrukce pro další úpravy.
K <sub>4</sub>	Možnost překonávání terénu	Robot by měl umět překonávat složitý terén. Je tedy porovnána jeho schopnost vybraný terén zvládat.
K <sub>5</sub>	Ovladatelnost	Hodnotí se snadná změna směru.
K <sub>6</sub>	Rychlost	Hodnotí se maximální možná rychlost dané varianty.
K <sub>7</sub>	Výdrž	Jedná se o varianty s interním zdrojem napájení. Je tedy nutné porovnat toto kritérium.
K <sub>8</sub>	Objem vzorku	Robot má mít schopnost odebrat vzorek o hmotnosti 500 g. Tento parametr má porovnat možnost diverzity tvaru tohoto vzorku, případně počítat s vyšší hmotností.
K <sub>9</sub>	Plynulost balancování	U návrhů je porovnána schopnost plynulého chodu, a s tím i požadavek na plynulost stání na místě.
K <sub>10</sub>	Výška robotu (výška těžiště)	Velikost robotu může být překážkou z hlediska přístupu do míst s omezeným prostorem, popřípadě zvyšuje riziko kontaktu s cizím předmětem.
K <sub>11</sub>	Akcelerace	Časová závislost robotu k dosažení stabilní rychlosti.

## 7.2 Stupně klasifikace

Je důležité doplnit pravidla hodnocení, jak se daná kritéria hodnotila a v jakém rozsahu byly váhy určeny. Váha nabývala hodnot od 1 do 10 s tím, že hodnota 10 měla nejvyšší váhu ať již z hlediska funkce nebo konstrukce. Stejně tak probíhalo samotné hodnocení, které mělo hodnoty také od 1 do 10, kde 10 bylo nejlepší ohodnocení.

Následující tab. 2 obsahuje přiřazené váhy k jednotlivým kritériím.

Tab 2) Zdůvodnění váhy kritéria

Kritérium	Váha kritéria	Zdůvodnění přiřazení váhy
K <sub>1</sub>	V <sub>k1</sub> = 10	Cíl jednokolových robotů
K <sub>2</sub>	V <sub>k2</sub> = 7	Docílení nízkých nákladů
K <sub>3</sub>	V <sub>k3</sub> = 8	Ovlivnění funkčního a ekonomického charakteru
K <sub>4</sub>	V <sub>k4</sub> = 9	Požadavek zadání
K <sub>5</sub>	V <sub>k5</sub> = 4	Lepší práce v terénu
K <sub>6</sub>	V <sub>k6</sub> = 2	Není přímým cílem práce
K <sub>7</sub>	V <sub>k7</sub> = 8	Velikost baterie musí odpovídat s aplikací robotu
K <sub>8</sub>	V <sub>k8</sub> = 2	Možnost naddimenzování zadání
K <sub>9</sub>	V <sub>k9</sub> = 6	Požadavek zadání
K <sub>10</sub>	V <sub>k10</sub> = 4	Vliv na cenu a výdrž
K <sub>11</sub>	V <sub>k11</sub> = 2	Není přímým cílem práce

## 7.3 Hodnocení jednotlivých variant

Ke každé variantě bylo přiřazeno hodnocení daného kritéria, které vychází z prostudování literatury a příslušných dokumentů zpracovávající obdobné problematiku [2,3,13,15,18]. Následně byla vypočítána výsledná známka, která byla směrodatná pro výběr ideální varianty. Toto hodnocení bylo provedeno na základě dosud známých skutečností. Reálná konstrukce se může lišit a nemusí tedy odpovídat známkám přiřazeným v multikritériální analýze.

### 7.3.1 Varianta č.1 Gyrover

Známky pro variantu 1 jsou obsaženy tab. 3.

Tab 3) Známky Gyroveru

Kritérium	Váha kritéria	Známka kritéria	Důvod známky
K <sub>1</sub>	V <sub>k1</sub> = 10	ZK <sub>g1</sub> = 6	Lehká konstrukce, náchylnost na vnější vlivy
K <sub>2</sub>	V <sub>k2</sub> = 7	ZK <sub>g2</sub> = 6	Prvky konstrukce na zakázkovou výrobu
K <sub>3</sub>	V <sub>k3</sub> = 8	ZK <sub>g3</sub> = 2	Omezený zástavbový prostor, originální obráběné díly
K <sub>4</sub>	V <sub>k4</sub> = 9	ZK <sub>g14</sub> = 9	Vysoká stabilita při stoupání a na sytkém povrchu
K <sub>5</sub>	V <sub>k5</sub> = 4	ZK <sub>g5</sub> = 5	Velký poloměr otáčení
K <sub>6</sub>	V <sub>k6</sub> = 2	ZK <sub>g6</sub> = 7	Lehká konstrukce, schopnost vyvinutí velké rychlosti
K <sub>7</sub>	V <sub>k7</sub> = 8	ZK <sub>g7</sub> = 2	Malý prostor pro baterie
K <sub>8</sub>	V <sub>k8</sub> = 2	ZK <sub>g8</sub> = 2	Malý prostor pro uložení vzorku
K <sub>9</sub>	V <sub>k9</sub> = 6	Zk <sub>g9</sub> = 4	Trhavé řízení způsobené nízkou hmotností
K <sub>10</sub>	V <sub>k10</sub> = 4	ZK <sub>g10</sub> = 9	Konstrukce robotu s co nejnižším těžištěm
K <sub>11</sub>	V <sub>k11</sub> = 2	ZK <sub>g11</sub> = 7	Lehká konstrukce

### 7.3.2 Varianta č.2 Ballbot

Známky pro variantu č. 2 Ballbot jsou uvedeny v tab. 4.

Tab 4) Známky hodnocení Ballbot varianty

Kritérium	Váha kritéria	Známka kritéria	Důvod známky
K <sub>1</sub>	V <sub>k1</sub> = 10	ZK <sub>b1</sub> = 8	Vysoká stabilita díky hmotnosti a řešení balancování
K <sub>2</sub>	V <sub>k2</sub> = 7	ZK <sub>b2</sub> = 5	Levná patrová konstrukce, složitější řešení pohonů
K <sub>3</sub>	V <sub>k3</sub> = 8	ZK <sub>b3</sub> = 6	Složitější řešení pohonu, velký zástavbový prostor
K <sub>4</sub>	V <sub>k4</sub> = 9	ZK <sub>b4</sub> = 3	Nutný dokonalý styk s plochou, omezené stoupání
K <sub>5</sub>	V <sub>k5</sub> = 4	ZK <sub>b5</sub> = 9	Všestranný pohyb pomocí všesměrových kol
K <sub>6</sub>	V <sub>k6</sub> = 2	ZK <sub>b6</sub> = 3	Omezení rychlosti hmotností robotu
K <sub>7</sub>	V <sub>k7</sub> = 8	ZK <sub>b7</sub> = 10	Velký zástavbový prostor, možnost větší baterie
K <sub>8</sub>	V <sub>k8</sub> = 2	ZK <sub>b8</sub> = 6	Omezení průměrem patra a dosahem manipulátoru
K <sub>9</sub>	V <sub>k9</sub> = 6	Zk <sub>b9</sub> = 8	Vysoká hmotnost a držení těžiště ve stabilní poloze
K <sub>10</sub>	V <sub>k10</sub> = 4	ZK <sub>b10</sub> = 6	Výhoda vysokého těžiště
K <sub>11</sub>	V <sub>k11</sub> = 2	ZK <sub>b11</sub> = 3	Pomalá akcelerace způsobená technologií robotu

### 7.3.3 Varianta č.3 Unicycle

Známky pro variantu č. 3 Unicycle jsou uvedeny v tab. 4.

Tab 5) Tabulka hodnocení kritérií Unicyclu

Kritérium	Váha kritéria	Známka kritéria	Důvod známky
K <sub>1</sub>	V <sub>k1</sub> = 10	ZK <sub>u1</sub> = 6	Velký klopný moment způsobený působící silou na rameni
K <sub>2</sub>	V <sub>k2</sub> = 7	ZK <sub>u2</sub> = 8	Využití hliníkových profilů a běžných komponentů (výpalků)
K <sub>3</sub>	V <sub>k3</sub> = 8	ZK <sub>u3</sub> = 9	Využití hliníkových profilů a běžných komponentů
K <sub>4</sub>	V <sub>k4</sub> = 9	ZK <sub>u4</sub> = 7	Dobrá v ose pohybu, závislá na bočním stoupání
K <sub>5</sub>	V <sub>k5</sub> = 4	ZK <sub>u5</sub> = 3	Závislá na dimenzování gyroskopů
K <sub>6</sub>	V <sub>k6</sub> = 2	ZK <sub>u6</sub> = 6	Závislá na konstrukci
K <sub>7</sub>	V <sub>k7</sub> = 8	ZK <sub>u7</sub> = 8	Velký prostor pro uložení baterie/í
K <sub>8</sub>	V <sub>k8</sub> = 2	ZK <sub>u8</sub> = 10	Velký prostor pro uložení vzorku
K <sub>9</sub>	V <sub>k9</sub> = 6	ZK <sub>u9</sub> = 6	Hrozba kolize ramen
K <sub>10</sub>	V <sub>k10</sub> = 4	ZK <sub>u10</sub> = 6	Závislá na konstrukci
K <sub>11</sub>	V <sub>k11</sub> = 2	ZK <sub>u11</sub> = 6	Závislá na konstrukci

### 7.3.4 Výsledné známky analýzy

Na základě určených kritérií a přiřazených známek, bylo možné vypočítat výsledné známky, které určovaly volbu ideálního konstrukčního řešení. Výsledky analýzy byly shrnuty v tab. 6). Kompletní výpočet je obsahem Přílohy 1.

Tab 6) Výsledky analýzy pro volbu ideálního koncepčního řešení

Typ robotu	Značení	Výsledná známka
Gyrover	Zg	5,274
Ballbot	Zb	6,484
Unicycle	Zu	6,952

Volba ideální varianty proběhla na základě multikriteriální analýzy, která jednotlivé varianty zhodnotila dle zvolených kritérií. Volba kritérií a přiřazení jejich váhy byla ovšem relativně subjektivní záležitost, jejíž vyšší objektivitu bylo možné dosáhnout konzultací s pracovníky s dostatečnou znalostí dané problematiky a zvýšeným počtem hodnotících kritérií. V tomto případě bylo zvýšení objektivitu docíleno konzultací s vedoucím diplomové práce a opakováním této analýzy s dostatečným časovým odstupem.

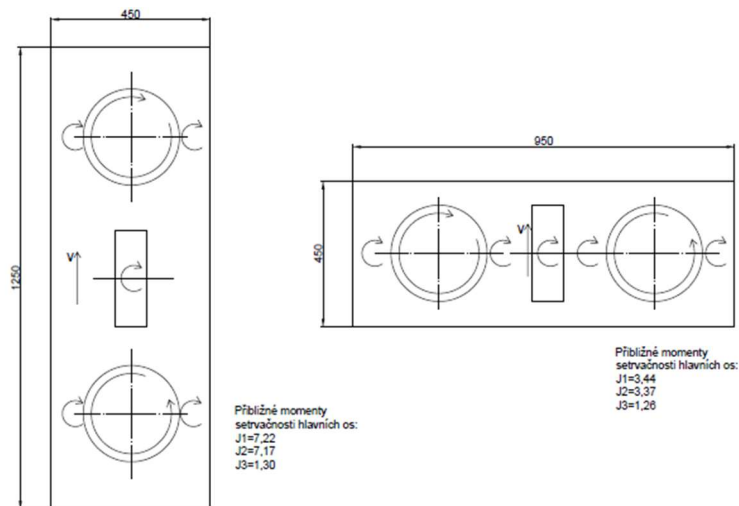
## 8 VLASTNÍ KONSTRUKCE

Jako výsledná varianta byla zvolena varianta robotického podvozku založeného na konstrukci Unicycle se známkou  $Z_n = 6.952$ . Tento podvozek se zdál být nejvhodnější variantou díky své jednoduché a univerzální konstrukci, která využívá běžně dostupné materiály a polotovary, zároveň disponuje rozsáhlou možností využití zástavbového prostoru. Při této variantě bylo vhodné zhodnotit rozložení gyroskopů v sestavě pro optimalizaci výsledného řešení.

### 8.1 Konstrukční rozložení a způsob stabilizace

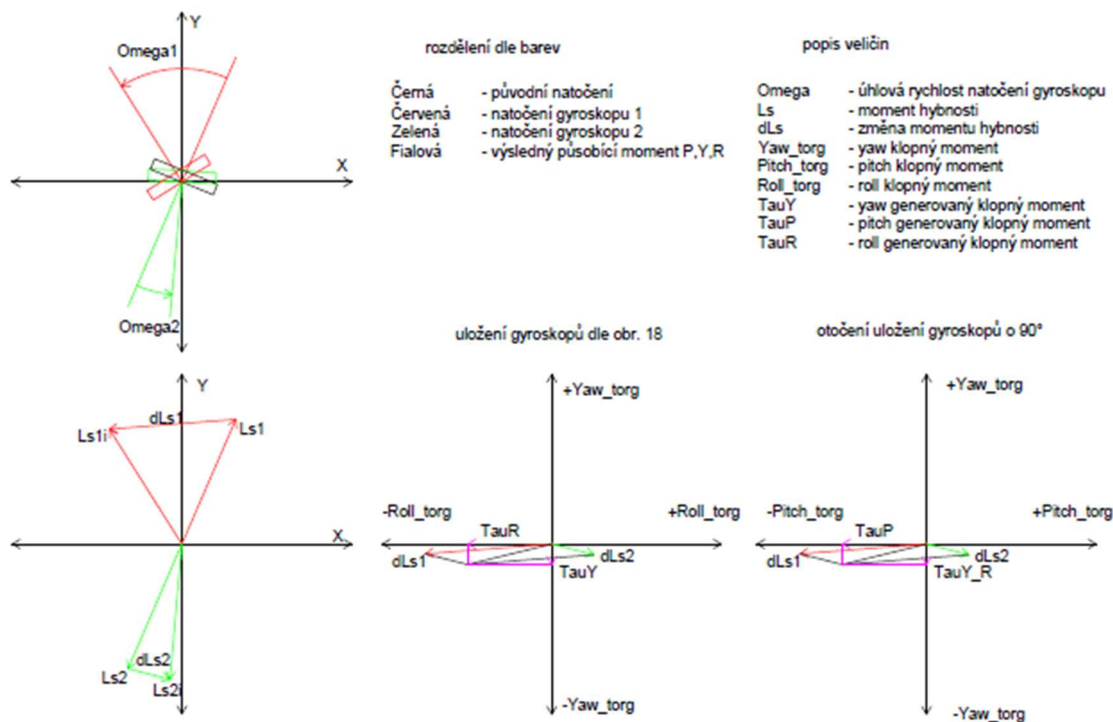
Unicycle robotický podvozek pracuje s rozdělením stabilizace ve třech rotačních osách, a to na stabilizaci v pitch a na současnou stabilizaci roll a yaw pomocí dvojice gyroskopů. Balancování v jednotlivých osách se navzájem ovlivňuje a je obsahem převzatého matematického modelu viz. Příloha 2. Pitch náklon je z hlediska řízení nejjednodušší, neboť se v základu jedná o úlohu inverzního kyvadla. Řízení pomocí dvojice gyroskopů je ovšem složitější. Jedná se o řízení roll a yaw rotace pomocí skládání generovaných klopných momentů při natočení rotujících gyroskopů, viz obr. 19. Generovaný moment je roven změně momentu hybnosti a výchozího natočení. Tento moment je následně rozložen do příslušných os. [18,26]

S volbou robotického podvozku na základě multikriteriální analýzy souviselo určení polohy uložení gyroskopů vůči kolu. Unicycle robotický podvozek pracuje s dvojicí gyroskopů na stranách, což umožňovalo dvě varianty koncepčního uložení a to: a) podélné uložení a b) příčné uložení. Tato uložení byla zobrazena na obr. 18. Rozložení bylo určeno minimálním možným zástavbovým prostorem, rozměry a velikostmi momentů setrvačnosti, které byly odměřeny z předběžného modelu. Varianta a) obsahuje podélné rozložení, kde by zařízení disponovalo odebíráním vzorku z boku konstrukce. Mezi její nevýhody patřil především větší zástavbový prostor a tím i větší momenty setrvačnosti hlavních os. Její výhodou bylo podélné uložení setrvačnicku, které způsobovalo snížení možných kolizí díky redukci šířky robotu. Aby došlo ke správné činnosti robotu, bylo třeba umožnit precesi setrvačnicku dle obr. 18, v opačném případě by došlo k řízení pitch a yaw rotace. Řízení náklonu roll potřebného pro správnou činnost robotu by zaniklo. Příčné rozložení b) viz. obr. 18, je řešení, které počítalo s lepším využitím zástavbového prostoru, dosahovalo tedy nižších hodnot momentů setrvačnosti, čímž byla získána větší dynamika systému a snížení potřebného momentu pro vyrovnání robotu.



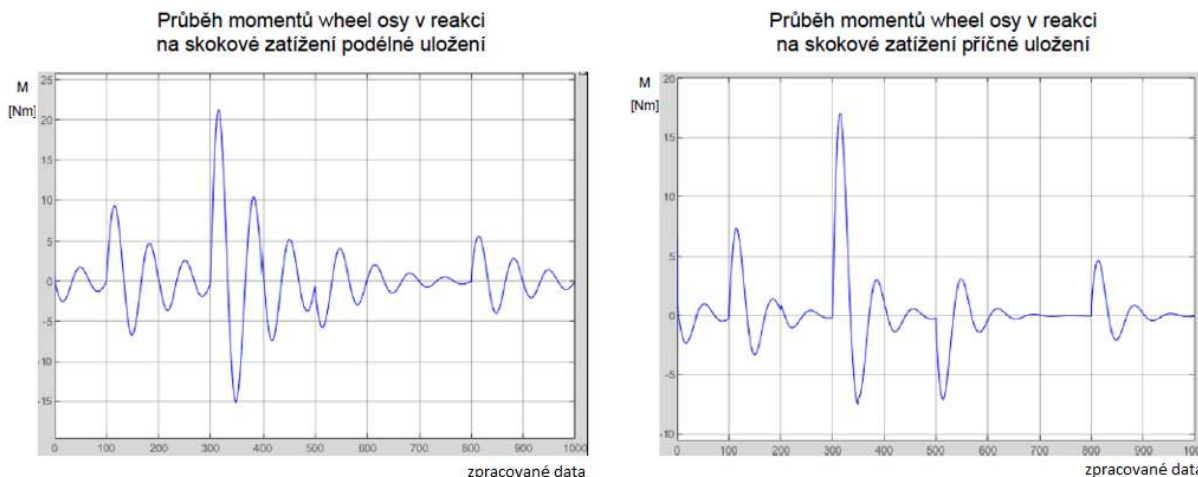
Obr. 18) Zobrazení rozvržení konceptu setrvačnicků a) podélné b) příčné

Na následujícím obr. 19 bylo zobrazeno působení generovaných momentů na základě změny momentu hybnosti. Dále bylo možné pozorovat řízení rozdílných os při natočení uložení setrvačnicků o  $90^\circ$ . Zobrazení tedy ilustrativně demonstruje nutnost dodržení předchozího uložení.



Obr. 19) Změna působení momentů v závislosti na natočení uložení gyroskopu

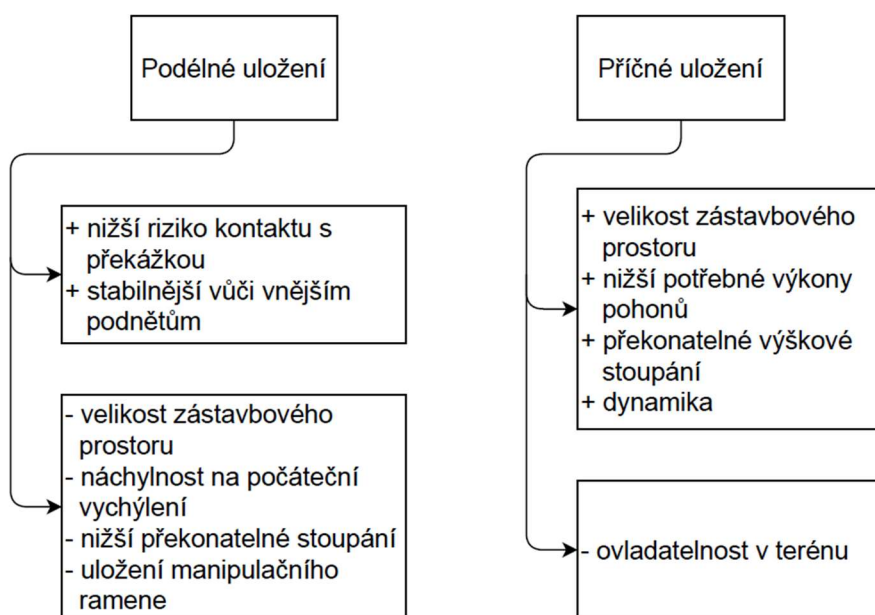
Navýšení momentů setrvačnosti os zapříčinilo také změnu velikosti potřebného momentu pro vyrovnání robotu a změnu dynamiky. Níže uvedený obr. 20 zobrazuje velikost změny momentu na wheel rotační ose, tedy momentu v pitch s obráceným znaménkem. Svislá osa znázorňuje moment na kole a podélná osa znázorňuje index zpracovaných dat.



Obr. 20) Potřebné momenty pro stabilizaci, skoku zátěžového momentu  
a) podélný koncept a, b) příčný koncept b.

Obě konstrukční varianty byly vyhodnoceny a získané výsledky byly shrnuty a uvedeny na obr. 21. Na základě šetření byla zvolena varianta b), tedy uložení příčné. Dalo by se ovšem říct, že každá varianta vyhovuje více jinému, přesněji definovanému terénu. Příčné uložení se hodí více do prostorů s dostatečným rozestupem překážek a členitějším terémem, naopak podélné by bylo vhodnější pro rovinější terén s překážkami.

### Porovnání vlastností dle uložení gyroskopů vůči kolu



Obr. 21) Porovnání vlastností dle uložení gyroskopů

## 8.2 Pohony

Robot je elektromechanické zařízení, které k vykonávání zadané operace vyžaduje vhodnou volbu pohonů, tedy prostředků pro vykonávání pohybu. Ve zvolené konstrukční variantě se rozeznávalo pět skupin pohonů, a to pohony pro manipulátor, pohon pro pojezdové kolo, pohon pro přestavění výšky kola, pohon pro gyroskop a pohon pro natočení gyroskopu.

Každá z těchto aplikací vyžadovala jiné vlastnosti zvolených motorů. Tato kapitola se zabývala teoretickým výběrem pohonů a postupem jejich dimenzování. Jejich konkrétní výběr byl upřesněn v kapitole 8.3. [3]

### **8.2.1 Pohon pro pojezdové kolo a natočení gyroskopu**

Požadavky kladené na pojezdové kolo odpovídaly volbě stejnosměrného motoru s permanentním magnetem. Tento motor dosahoval dobrého poměru výkonu a nízké hmotnosti spolu se snadným řízením otáček za pomoci změny napětí. Vzhledem k vysokým otáčkám tohoto motoru na úkor momentu, který je přímo úměrný velikosti proudu, bylo vhodné do systému motor-kolo zapojit převodovku. Ke změně směru otáčení elektromotoru dochází změnou polarit na svorkách. Jelikož se počítalo s nízkou rychlostí otáčení pojezdového kola robotu, zanedbalo se tření v uložení kola a dimenzování motoru vycházelo ze zjednodušené simulace viz. Příloha 5. Pomocí simulace se získala maximální úhlová rychlost kola a potřebný moment pro balancování. Stejný postup návrhu pohonu platil i pro natočení gyroskopu.

### **8.2.2 Pohon pro manipulátor**

Vzhledem k faktu, že se pro konstrukci robotu definovaného pro tuto práci počítalo s hobby manipulátorem, bylo nutné modifikovanou konstrukci doplnit o vhodné pohony. Pro zařízení s polohováním a s omezeným rozsahem natočení se jako ideální varianta jevila volba odpovídající modelářským servo pohonům. Servo pohonů je na trhu plná řada. Každé zařízení je specifické rozsahem natočení a tahem. Některé servo pohony jsou přizpůsobeny pro hobby manipulátory pomocí osy z druhé strany hřídele pohonu.

Za předpokladu, že by zvolený manipulátor měl být zatížený nad únosnost těchto speciálních servo pohonů, bylo by nutné konstrukci manipulátoru pro tyto klouby upravit pro usazení servo pohonů s vysokým tahem. Přesné určení pohonů manipulátoru je součástí kapitoly 8.3.2.

### **8.2.3 Pohon gyroskopu**

Gyroskop byl poháněn motorem při konstantně vysokých otáčkách, bylo tedy vhodné zvolit DC motor s dostatečným momentem pro rozběh setrvačníku do stanoveného času. Pro správnou funkci dvojice gyroskopů je nutné pamatovat na potřebu nesouhlasného směru otáčení, kterého může být dosaženo opačným zapojením polarit svorek.

### **8.2.4 Pohon přestavení výšky kola**

Předpokládaná konstrukce se od té výsledné liší ve změně způsobu zajištění stabilní polohy při odebrání vzorku. Původní záměr využití dvojice nohou ustoupil metodě přestavení výšky kola a tím usazení konstrukce na zem. Pro přestavení bylo nutné správně zvolit motory. Krokové motory s vhodným momentem a lehkou polohovatelností byly ideální možností pro tento návrh.

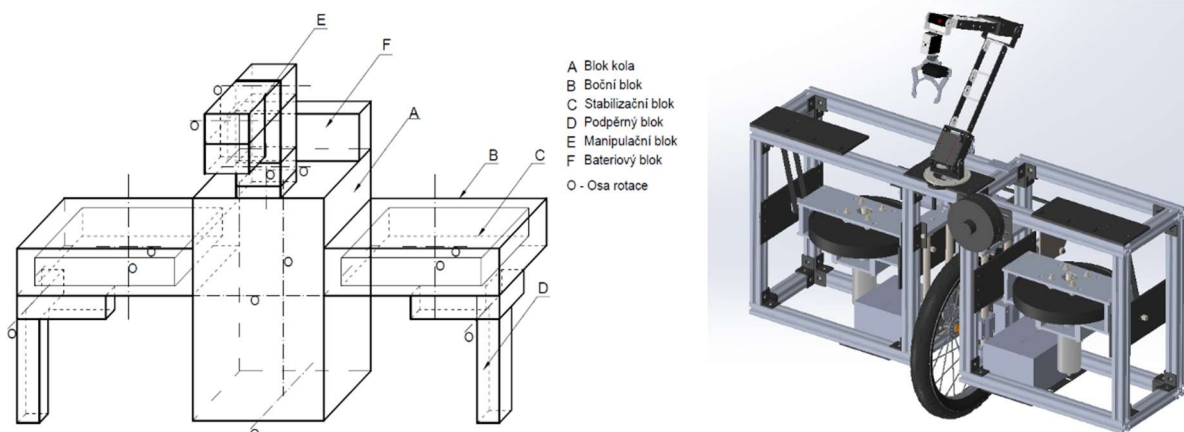
## **8.3 Konstrukce**

### **8.3.1 Konstrukce podvozku**

Pro samotnou konstrukci jednokolového robotu bylo nutné ideálně rozvrhnout jednotlivé bloky v sestavě, které byly zobrazeny na obr. 22. Toto rozvržení umožnilo ideální strukturování modelu na jednotlivé díly, podsestavy a výslednou sestavu. Jednotlivé umístění a schématické znázornění nebylo směrodatné, jednalo se tedy o zřehlednění návrhu a poskytnutí rychlé orientace v sestavě pro prvotní konstrukční řešení. Vlivem postupných iterací



vycházejících z postupu v Příloze 6 se výsledná konstrukce podstatně liší oproti schématu. Popis konstrukce se skládá z popisu jednotlivých bloků.



Obr. 22) a) Schéma sestavy robotu b) Výsledný jednokolový robot

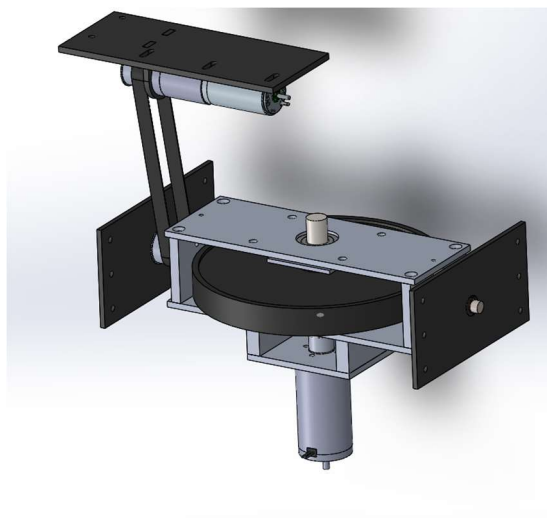
### Blok kola

Volba vhodného kola byla u této konstrukce velmi důležitá, neboť určovala přibližné rozměry celé sestavy. Vzhledem k faktu, že byl robot určen do obtížnějšího terénu, bylo zvoleno kolo o středně velkém průměru. Konkrétně se jednalo o 16“ kolo s BMX pevným nábojem. BMX kolo jako základ pro konstrukci bylo zvoleno především na základě jeho robustnosti, velikosti a díky možnosti lehké implementace pevného náboje zadního kola. U kola nebyla instalována volnoběžná spojka, která byla v této aplikaci nežádoucí. Kolo je poháněno motorem RE 65 Ø 65 mm, Graphite Brushes, 250 Watt, 48 V s planetovou převodovkou o převodovém poměru 25. Převodový poměr mezi kolem a převodovým motorem byl zvolen 1. Volba byla podložena výpočtem kola na nakloněné rovině viz. kap 9.2 a simulací. Využití převodového motoru na místo zvýšení převodu ozubených kol mezi kolem a motorem bylo způsobeno dostupností parametrů u těchto motorů a možností lehkého umístění odvalovacího napínacího kola mezi vratnou a napínací větev řetězu, které umožňovalo napnutí řetězu i nad konstrukční možnosti. Volba motoru vycházela ze simulace, která je obsahem Přílohy 5.

### Stabilizační blok

Gyroskop je nedílnou součástí tohoto konceptu, neboť vyrovnává robot generovaným momentem proti roll náklonu a díky dvojici těchto gyroskopů je možné současně ovládat pohyb i yaw. Konstrukce gyroskopu byla postavena na 7,5 kg závaží o vnitřním průměru 30 mm. Toto závaží bylo za studena nalisováno na obrobené hřídeli, která byla spojena s motorem gyroskopu pomocí pružné spojky. Motor RE 35 35 mm Graphite Brushes 90 Watt byl volen dle času rozběhu motoru, který je obsahem Přílohy 7. Čas potřebný pro rozběh setrvačníků do provozuschopného stavu je cca 1 minuta, maximální rychlosti je dosaženo při tří minutovém provozu. Generovaný vyrovnávací moment od gyroskopu je závislý na momentu setrvačnosti závaží, rychlosti jeho rotace a rychlosti jeho natočení. Při montáži bylo potřebné dbát na dostatečné vyvážení setrvačnicku, aby nedošlo k rozkmitání celé soustavy. Hřídel byla vložena a sevřena v ložiscích s kosoúhlým stykem, kde kontrola těchto ložisek byla obsahem Přílohy 9. Ložiska byla uložena v hliníkových profilech tvořící skříň setrvačnicku. Boční náklon byl umožněn díky bočním osám uložených v kluzných ložiscích vlisovaných do vypálených

profilů. Tyto osy byly následně zajištěny pojistnými kroužky. Z jedné strany setrvačníku byla nalisovaná řemenice s dvojicí per. Řemenice byla nalisována z důvodu zamezení axiálního posuvu. V řemenici byl uložen zubový řemen o délce 520 mm a šířce 15 mm, určený k přenosu momentu od motoru ke gyroskopu. Motor náklonu byl na základě simulace zvolen RE 40 Ø 40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt s planetovou převodovkou o převodovém poměru 53. Tato volba vycházela ze simulace a velikosti regulační odchylky. Simulace pro volbu tohoto převodového motoru byla značně zjednodušena. Reálná sestava se může od sestavené simulace značně lišit. Model sestavy gyroskopu lze vidět na obr. 23.

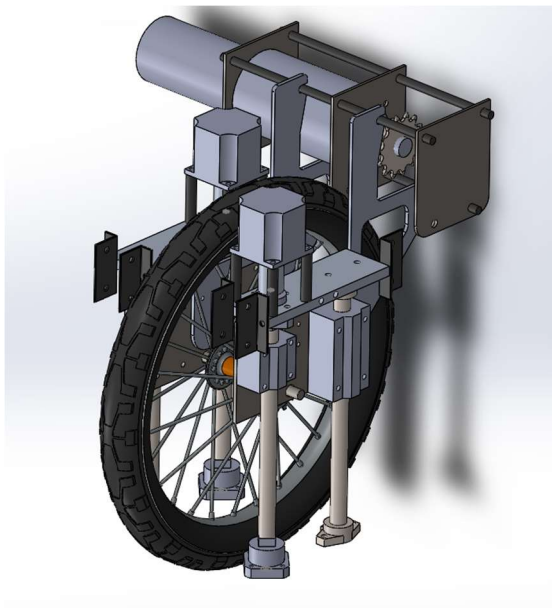


Obr. 23) Návrh setrvačníku

### Podpěrný blok

Jelikož byl podmínkou konstrukce sběr vzorků, musela být sestava opatřena jistým prvkem stabilizace v průběhu operace sběru. Původní řešení ve formě dvojice nohou ustoupilo výslednému řešení přestavby výšky robotu, a to především z důvodu nedostatečné stabilizace v terénu. Návrh mechanismu přestavby vedl k možnosti využít snížení těžiště v průběhu pohybu, a tedy ke snížení momentů setrvačnosti hlavních os. Jelikož bylo nutné udržet působící moment s možností změny směru na kole v průběhu přestavby, byl pohon pevně spojen s konstrukcí přestavení. Napínání řetězu bylo řešeno manuálně před spuštěním robotu, kde byl motor uchycen na profilované vidlici pomocí závitových tyčí. Případné nedostatečné napnutí bylo řešeno vložením napínacího odvalovacího kola.

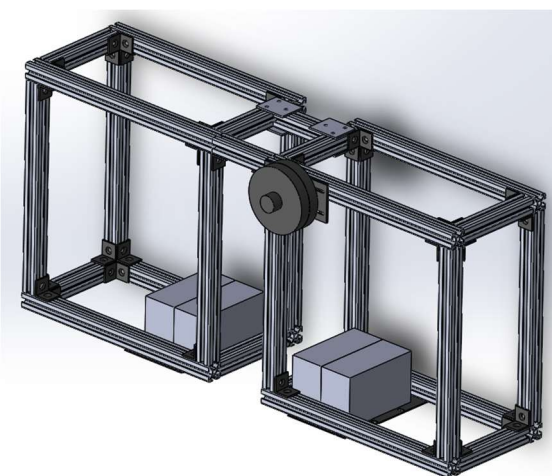
Soustava přestavení byla navržena na základě využití dvojice trapézových tyčí (šroubů) a tyčí vodících o průměru 16 mm. Tyče byly uloženy v odpovídajících držácích. K pohybu byla využita matice určená pro trapézový šroub a s vyrovnáním radiálních sil napomáhal dvojitý linearset uložený na tyči vodící. Tento mechanismus byl vhodným spojovacím materiálem spojen s deskou a vidlicí držící motor kola. Přestavba probíhá pomocí dvojice krokových motorů s momentem 1,3 Nm. Kontrola byla obsahem Přílohy 8. Uložení těchto motorů a trapézových tyčí zajišťujících samosvornost bylo zvoleno křížové, z důvodu omezení možného vzpěru při polohování. Výška přestavení je 140 mm a vycházela z maximální dosažitelné výšky omezené poloměrem kola, prvky uchycující kolo a mechanismem přestavení upevněného k rámu robotu. Zobrazení konstrukce přestavby spolu s použitým kolem je zobrazeno na obr. 24.



Obr. 24) Přestavení robotu

### Rám robotu

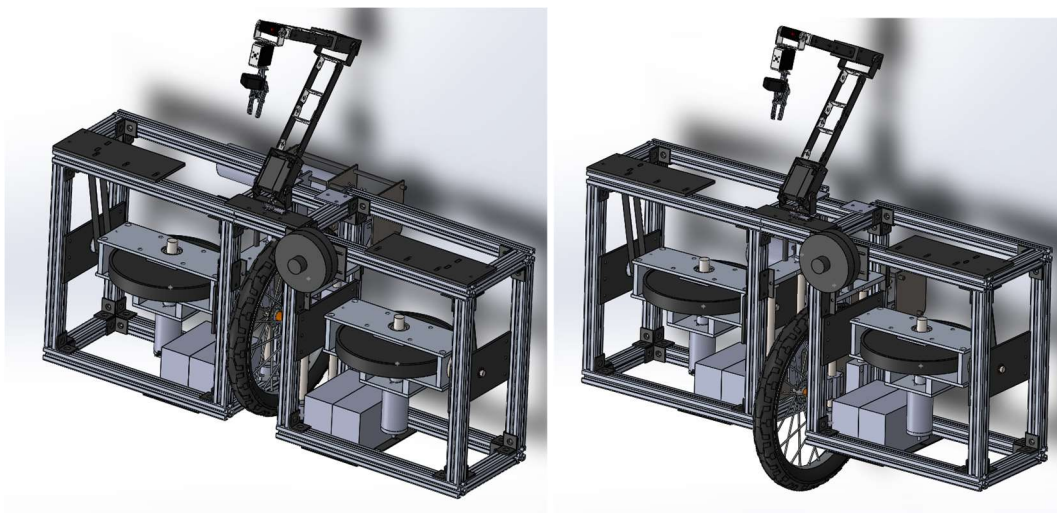
Rám robotu byl sestaven z jednoduchých hliníkových profilů 30 x 30 mm složených do rámu, viz obr 25. Součástí rámu byl také blok se zdrojem napětí o velikosti 48 V a závaží na vyvážení dysbalance polohy těžiště kvůli převodovému motoru kola.



Obr. 25) Rám robotu

### Sestava

Výsledná sestava byla složena ze zmíněných podsestav a manipulátoru uloženého na rámu robotu. Toto uložení je zobrazeno na obr. 26. Na rozdíl od původního schématu byly baterie umístěny ve spodní části robotu z důvodu snížení polohy těžiště. Výsledné řešení se rozchází se schématem konstrukce v mnoha bodech, a to z důvodu provádění velkého množství iterací konstrukce pro dosažení co možná nejlepších konstrukčních výsledků.



Obr. 26) Sestava a) usazená b) s přestaveným kolem

### 8.3.2 Manipulátor RRR

Na základě rešerše a požadavků na relativně lehký odebíraný vzorek bylo vhodné vytvořit vlastní manipulátor, který by byl dostačující pro tuto úlohu. Vyhotovený manipulátor lze vidět na obr. 27. Jednalo se o jednoduchou konstrukci skládající se z výpalků, modelářských serv, krátkého a dlouhého U držáku. Serva byla vhodně volena na základě maximálního momentu. Mezi plechové profily byly umístěny krátké U profily pro dosažení vyšší tuhosti. Manipulátor disponoval možností rotace kolem své osy. Pro polohování vzorku byl robot vybaven rotací kolem tří kloubů, jednalo se tedy o RRR manipulátor s přidáním rotací kolem osy griperu a osy robotu. Výsledný manipulátor byl plně dostačující a o váze cca 1 kg.

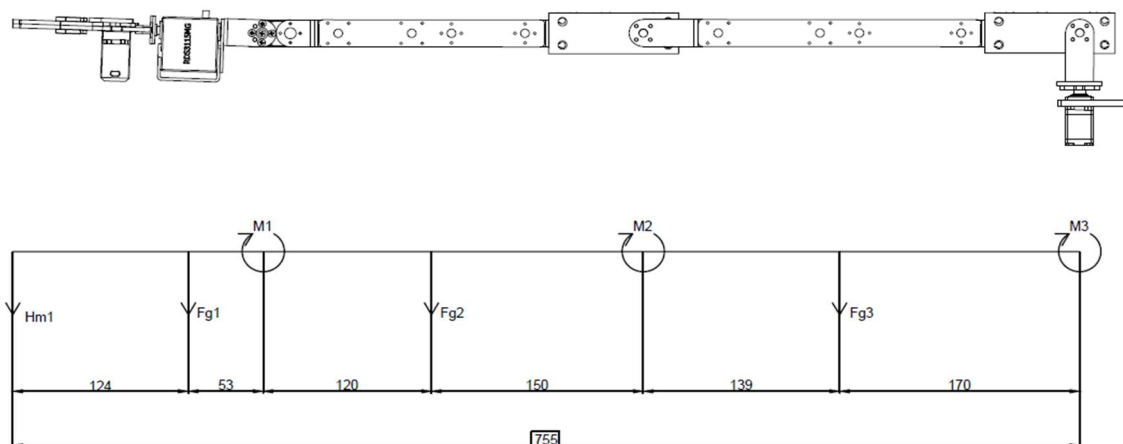


Obr. 27) RRR Manipulátor

#### Volba servo motorů

Na základě stanovení délky ramen manipulátoru a jeho narovnání v kloubech pro dosažení maximálního zatížení od působící hmotnosti, byl stanoven minimální moment pro činnost manipulátoru. Silová rovnováha byla zobrazena na obr. 28. Vypočtené momenty byly obsahem Přílohy 3, kde byly momenty vynásobeny koeficientem 1,3 pro zajištění dostatečné dynamiky. Tyto momenty odpovídaly zatížení 93,7 kg·cm pro  $M_3$ , 44,8 kg·cm pro  $M_2$  a 12,6 kg·cm pro  $M_1$ . Pro kloub  $M_3$  a  $M_2$  byl zvolen motor s tahem 75 kg·cm BH 565HV320, pro  $M_1$  a pohon griperu byl vybrán motor DS3128MG s tahem 25 kg·cm při 7,4 V. Servo pohon pro moment  $M_3$  neodpovídal vypočítanému tahu, ale díky metodě gradientního sestupu a

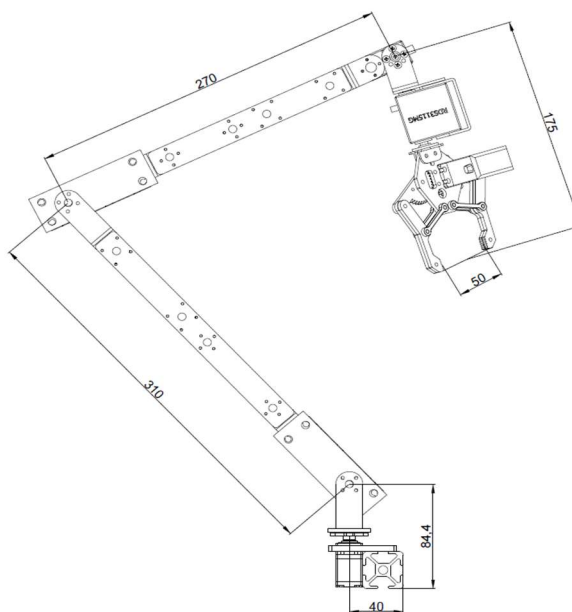
vymezení překážky země nedocházelo k protáhnutí ramene a bylo možné zvolené servo považovat za dostatečně výkonné.



Obr. 28) Silová rovnováha manipulátoru

### Polohování manipulátoru RRR

Polohování manipulátoru RRR bylo navrženo na základě metody gradientního sestupu se dvěma překážkami, kde první překážka přibližně charakterizovala klec robotu a druhá překážka definovala zem a zamezovala kolizi s ní. Jednalo se o inverzní úlohu kinematiky, tedy dopočítávání úhlů na základě polohy robotu a cílového bodu. Řešení probíhalo na základě literatury [7,10]. Obrázek 29 zobrazuje jednotlivé délky ramen a polohu prvního kloubu od hrany kostry robotu.

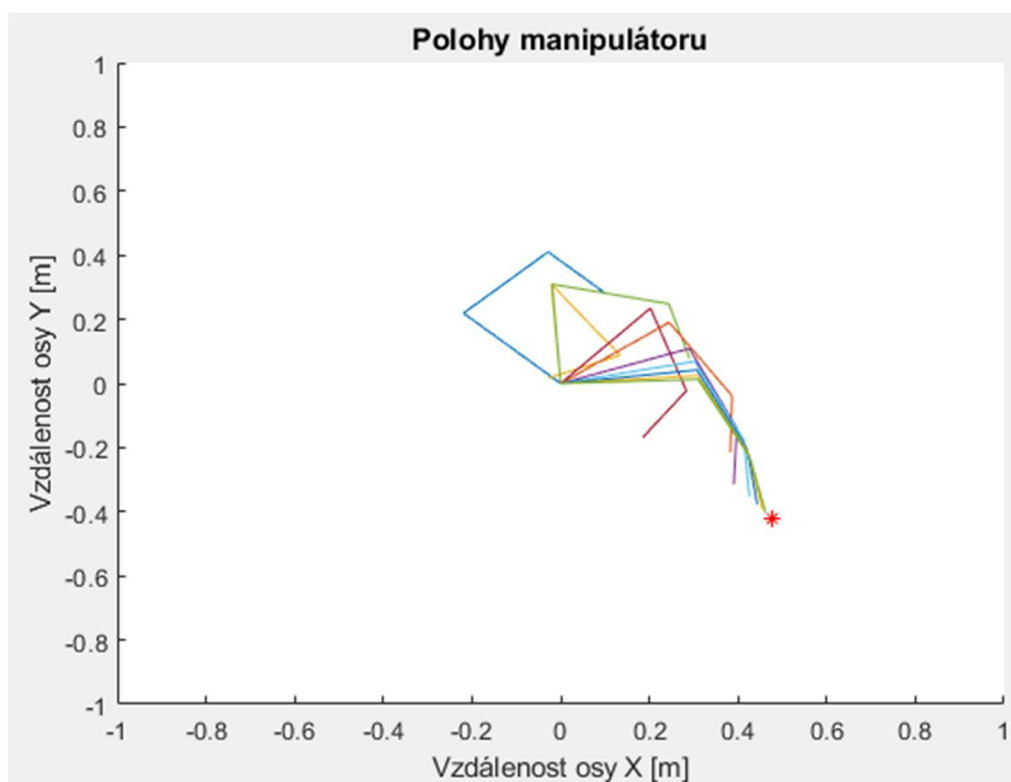


Obr. 29) Orientační rozměry manipulátoru

Uživatel bude manipulátor ovládat pomocí zadání natočení manipulátoru v ose a posunu cílového bodu v osách X, Y. Návrh a zobrazení provedení přepočtu natočení úhlů pomocí gradientního sestupu je zobrazen na obr. 30 a byl obsahem Přílohy 4. Uživateli bude

zprostředkován obraz např. pomocí arduino camera shieldu OV7670. Obraz má dvojí využití, jak pro lepší orientaci v terénu při polohování robotu, tak i pro usnadnění polohování manipulátoru. Jelikož měl mít vzorek hmotnost až 500 g a předpokládá se, že byl vyroben ze železa, jeho velikost odpovídá krychli o délce strany 40 mm. Čelisti gripperu bylo možné rozevřít až na 50 mm. Byl zde tedy prostor pouze 10 mm pro kompenzování nárůstu svírané délky vlivem natočení vzorku. Alternativní návrh detekce vzorku a jeho automatické odebrání se tedy jevil jako příliš složitý jak na potřebné vybavení vhodnými senzory, tak na přesnost polohování robotu vůči vzorku. Manuálně ovládaný sběr byl tedy vhodnou variantou pro tuto aplikaci.

Jelikož nebyl jasně definován materiál a tvar odebíraného vzorku, byl zaveden předpoklad, že byl užitý gripper zvolen adekvátně. Hobby manipulátor disponoval možností osazení širokého spektra gripperů. Pro dodatečně definovaný vzorek může nastat situace, že manipulátor bude muset být osazen gripperem vhodnějším.



Obr. 30) Zobrazení polohování manipulátoru

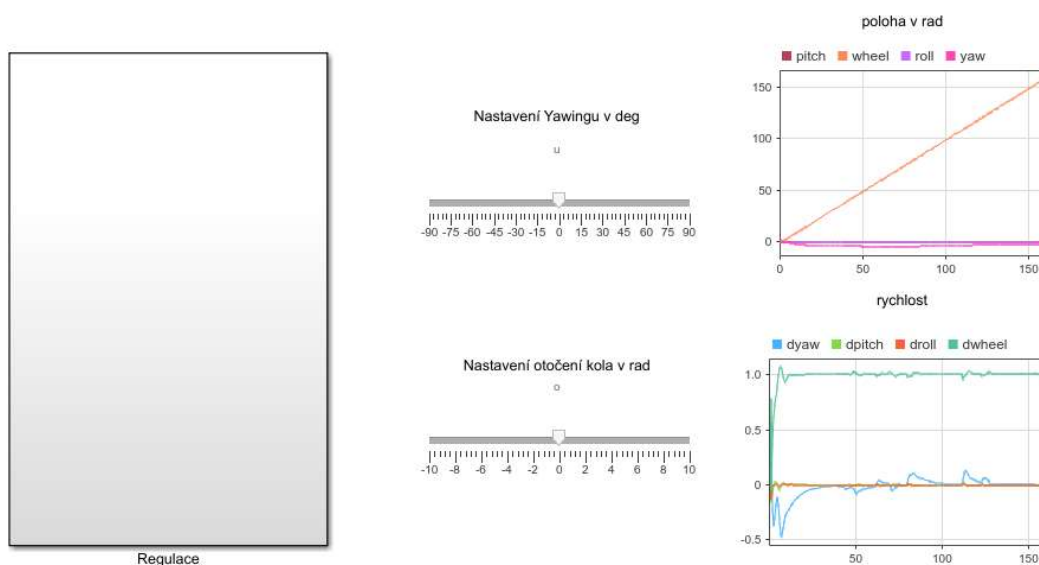
Detekování země od robotu pro stanovení vzdálenosti překážky by mohlo probíhat odměřováním např. ultrazvukovým snímačem Baumer s rozsahem 100-1000 mm. Jeho výhodou je především přesnost a relativně malá spotřeba energie.

## 9 SIMULACE A VÝPOČTY

### 9.1 Simulace

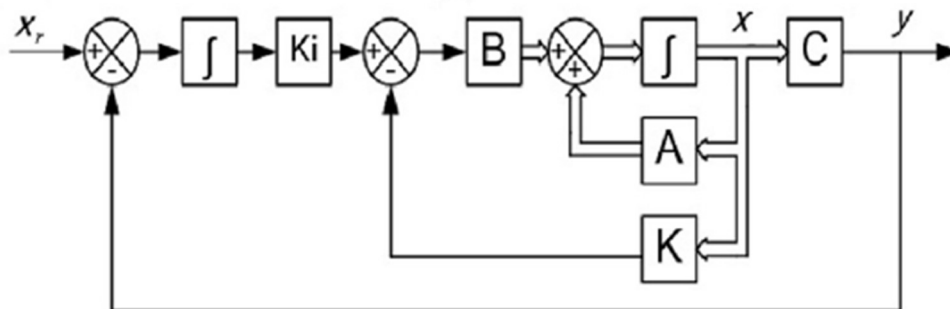
Simulace byla klíčovou částí celé konstrukce, neboť na základě dat získaných při simulacích mohlo dojít k dimenzování motorů a hlavních rozměrů pro získání co možná nejúčinnějšího systému, jehož pravá efektivita se projeví v celkové energetické bilanci. Zároveň mohly být stanoveny základní dynamické vlastnosti výsledného systému

Simulace byla postavena na metodě LQR (lineárně kvadratický regulátor) regulace, která je vhodná pro tzv. MIMO simulace tedy multiple-input multiple-output. Simulace byla umožněna díky podkladům Unicycle robotu viz. Příloha 2, ze kterých byl převzat matematický linearizovaný model. Na základě tohoto modelu byly propočítány matice  $M$ ,  $A$  a  $B$  užitě v simulaci a pomocí MATLAB scriptu LQR byl získán parametr  $K$ . Navrhnutý regulátor je obsahem Přílohy 5 a popis jeho vnitřní struktury byl zobrazen na obr. 31 a obr. 32. [8,9,18,26]



Obr. 31) Vstupní ovladatelné GUI

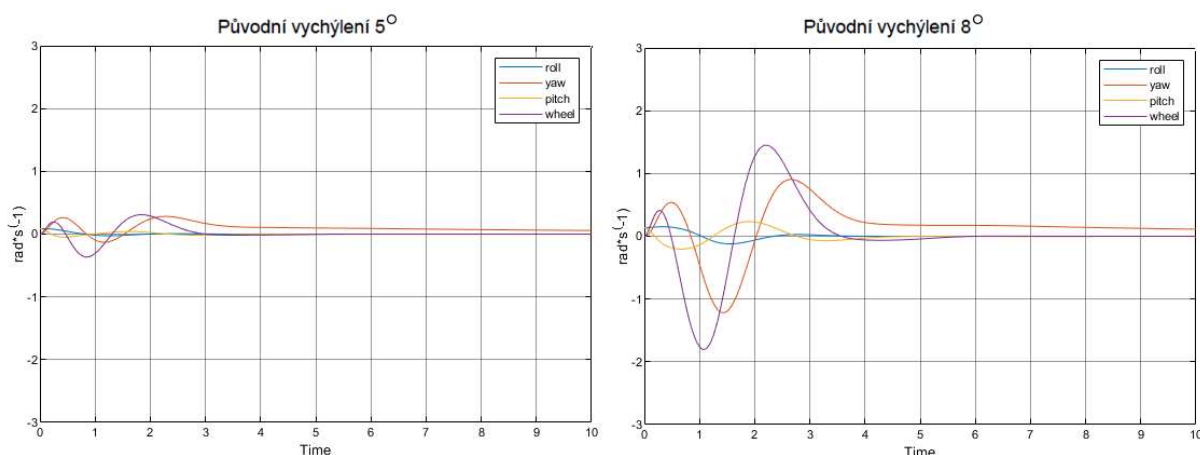
Vstupem do simulace, která je obsahem Přílohy 5, byl spouštěcí skript Unicycle. Metodika simulace byla rozvržena do tří samostatných simulačních bloků a do simulace výchozího náklonu. Toto rozvržení sloužilo primárně pro získání opakovatelnosti cyklu a zobrazení reakce náklonů při změně vstupu v reálném čase. Hlavním výstupem byla ovšem simulace pohybu robotu v prostoru na základě zadání počátečního a cílového bodu. Vnitřní regulace vycházela z úpravy obdenného modelu podle schématu LQR regulace a je zobrazena na obr. 32.



Obr. 32) Schéma LQR regulace [26]

### 9.1.1 Simulace výchozího náklonu

Pro konstrukci bylo důležité sestavit simulace pro zjištění, zdali je robot vůbec schopen fungovat v reálných hodnotách působících momentů. Prvním testem byl test výchozí stability, kde byl předpoklad původní vychýlení robotu v roll a pitch o  $5^\circ$  až  $8^\circ$  (poslední stabilní krok úhlu). Rychlost stabilizace určoval jak náklon, tak i předběžně limitně omezené momenty pohonů a gyroskopů na  $\pm 30$  Nm pro získání výsledků přibližujících se více realitě. Následující obr. 33 zobrazuje chování soustavy při vyrovnávání počáteční výchylky.

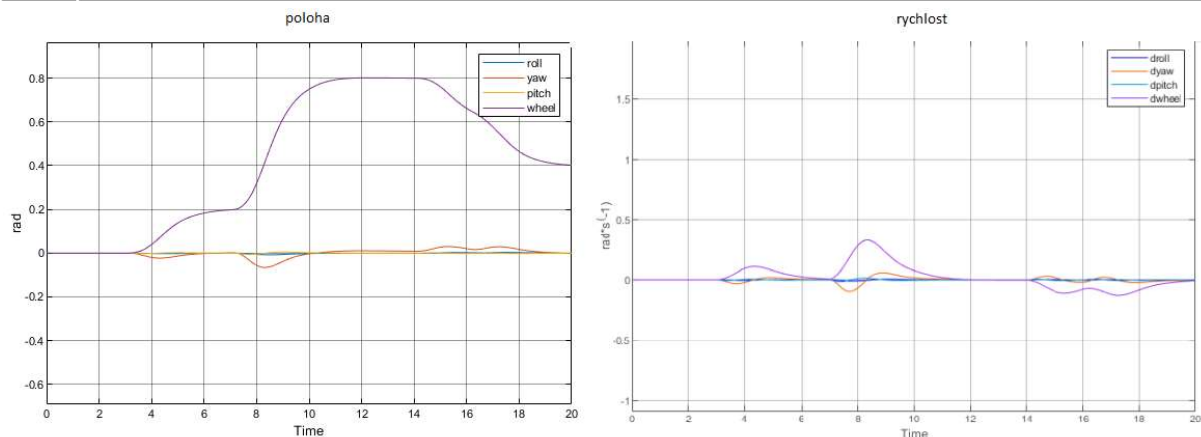


Obr. 33) Vyvažování polohy na základě výchozího vychýlení  
a)  $5^\circ$  b)  $8^\circ$  (poslední stabilní krok úhlu)

### 9.1.2 Blok řízení skokové změny natočení

Řízení pomocí reakce na skokové změny určeného vychýlení umožnilo dimenzování vhodného vyvážení a snížení odezvy vyrovnání robotu. Jádrem bloku je systém pěti rozdílných skokových změn osy natočení kola. Čas mezi jednotlivými skoky byl dostatečný pro ustálení jednotlivého skoku, a tedy zamezení ovlivnění ustálení skoku následujícího. Příložený obr. 34 zobrazuje polohu a rychlost natáčení os v čase.

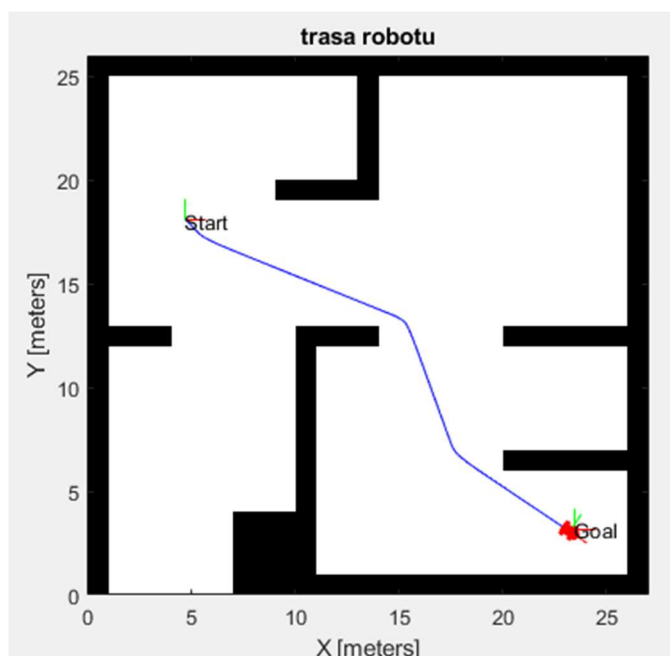




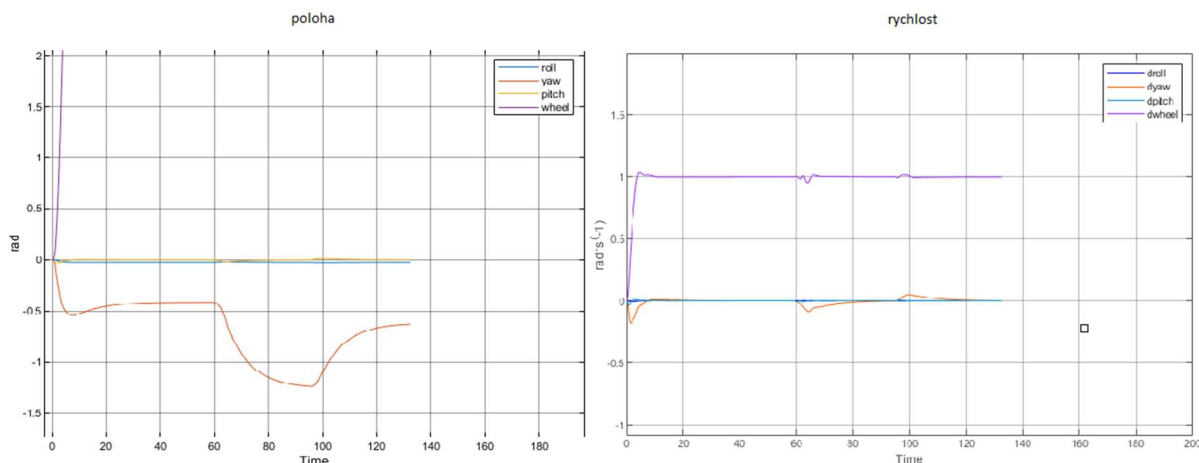
Obr. 34) Reakce na skokové změny požadovaného úhlu,  
 a) poloha b) rychlost

### 9.1.3 Simulace pohybu terénem

Poslední a nejdůležitější byla simulace pohybu obtížnějším terénem. Předpokladem pro provedení simulace byla řešená úloha ve 2D s překážkami. Pro zjednodušení se tedy nepočítalo se zakřivením terénu, který do jisté míry kompenzovalo kolo. Podkladem pro zpracování této úlohy byla řešená úloha, která byla obsahem programu MATLAB. Vstupem byla vzorová mapa (obr. 36), do které se zadal výchozí bod robotu a bod vzorku. V této simulaci byly již upraveny veškeré parametry pro zamezení pádu robotu. Následně byla dopočítána vhodná trajektorie a vypočteno nutné natočení kola (wheel) a rotace v yaw. Tyto hodnoty prochází regulací a určují potřebné momenty pro udržení rovnovážného stavu. Na základě zbylého momentu, kterým může být kolo poháněno, lze dopočítat možnosti překonání výškového profilu terénu. Pohyb a řízení pohybu bylo zobrazeno na obr. 35 a obr. 36.



Obr. 35) Zobrazení trajektorie robotu v rovině

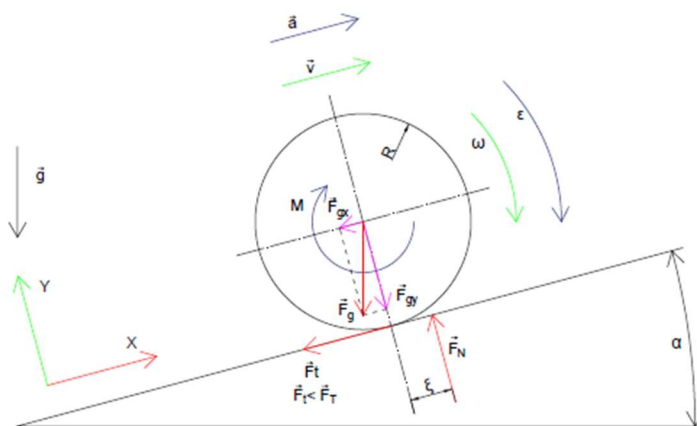


Obr. 36) Zobrazení a) natočení robotu b) rychlosti robotu

Na obr. 36 lze pozorovat, že docházelo k výkmitu i po úpravě konstrukce a optimalizaci okrajových podmínek. Tyto výkmity způsobují chybu při polohování robotu. Zároveň docházelo k nedostatečnému polohování v yaw. Lze tedy konstatovat, že pro samotné řízení byla tato metoda značně nevhodná nebo by bylo potřeba upravit samotný regulátor. Simulace se dále brala jako nástroj pro dosažení přesnějšího konstrukčního řešení a představě o fungování jednokolového robotu. Daleko více by se pro reálnou aplikaci hodilo využití natáčení os uživatelem v reálném čase, neboť by byl uživatel tyto výkmity a omezený poloměr otáčení schopen kompenzovat.

## 9.2 Pohyb kola po nakloněné rovině

Simulace počítala se zjednodušením terénu na čistě rovinný. V reálných podmínkách bylo ovšem potřebné zjistit maximální možný výškový profil, který byl robot schopen překonat. K výpočtu byla zapotřebí hodnota maximální úhlové rychlosti a úhlového zrychlení kola. Tyto parametry byly odečteny ze simulace. Na základě výpočtu byla zjištěna hodnota maximálního stoupání pro robot s ustálenou výchozí polohou (překonatelný výškový profil v průběhu provozu) a hodnota maximálního stoupání pro výchozí vychýlení (start robotu a přestavení v terénu). Na následujícím obr. 37 bylo zobrazeno uvolnění kola na nakloněné rovině.



Obr. 37) Uvolnění kola robotu na nakloněné rovině

Na základě uvolnění mohly být sestaveny silové a momentové rovnice nutné pro další výpočty:

$$F_x: m \cdot a = -F_t - F_{gx} \quad (1)$$

$$F_y: 0 = F_N - F_{gy} \quad (2)$$

$$M_z: -J \cdot \varepsilon = F_N \cdot \xi - M - F_t \cdot r \quad (3)$$

$$a = \varepsilon \cdot r \quad (4)$$

Uvedené silové a momentové rovnice bylo třeba upravit pro získání maximálního možného momentu nutného pro zdolání určitého výškového profilu. Následně byl pomocí numerické metody půlení intervalů zjištěn maximální výškový profil ve stupních překonatelný pomocí maximálního momentu ve vychýlené poloze a v poloze ustálené.

$$M = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \xi + m \cdot \varepsilon \cdot r + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot r + J\varepsilon \quad (5)$$

Úhel maximálního sklonu pro vychýlený počáteční stav:

$$59.818 = 65 \cdot 9.81 \cdot \cos(\alpha) \cdot 0.0045 + 65 \cdot 3 \cdot 0.1905 + 65 \cdot 9.81 \cdot \sin(\alpha) \cdot 0.1905 + 0.0544 \cdot 3 Nm \quad (6)$$

$$\alpha = 9.3^\circ \quad (7)$$

Pro stanovení maximálního sklonu vychýleného počátečního stavu bylo zapotřebí stanovit minimální zrychlení kola robotu pro vyrovnání stabilní polohy. Tento odečet byl proveden na základě omezení momentu motoru na hodnotu 7 Nm.

Úhel maximálního sklonu pro ustálený stav robotu (pohyb):

$$59.886 = 65 \cdot 9.81 \cdot \cos(\alpha) \cdot 0.0045 + 65 \cdot 0.5 \cdot 0.1905 + 65 \cdot 9.81 \cdot \sin(\alpha) \cdot 0.1905 + 0.0544 \cdot 0.5 Nm \quad (8)$$

$$\alpha = 24.8^\circ \quad (9)$$

Kde:

$F_t$	Tečná síla [N]
$F_N$	Normálová síla [N]
$F_g$	Gravitační síla [N]
$F_{gx}$	Průmět gravitační síly do osy X [N]
$F_{gy}$	Průmět gravitační síly do osy Y [N]

$m = 65 \text{ kg}$	Hmotnost Unicycle robotu [kg]
$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	Tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]
$M = 60 \text{ N}\cdot\text{m}$	Moment [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ]
$J = 0.0544 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	Moment setrvačnosti kola [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]
$\varepsilon = 0,5 \text{ (3) rad}\cdot\text{s}^{-2}$	Úhlové zrychlení (původní vychýlení) [ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$ ]
$\xi = 0,0045$	Rameno valivého odporu [m] [27]
$R = 0,1905 \text{ m}$	Poloměr kola [m]

Na základě dosazení do vzorce bylo stanoveno maximální převýšení na hodnotu  $9,3^\circ$  pro robot ve vychýlené počáteční pozici. Po dosažení ustálené polohy, tedy v průběhu průjezdu terénem, bylo toto převýšení podstatně větší. Jednalo se o hodnotu  $24,8^\circ$  při rychlosti  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a s maximálním zrychlením  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Jednalo se ovšem o teoretickou hodnotu, kde není prostor pro neočekávanou potřebu změny zrychlení kola z důvodu vyrovnání působení vnějšího vlivu na konstrukci robotu. Reálné hodnoty se pohybují kolem  $8^\circ$  pro výchozí stav a  $20^\circ$  pro pohyb terénem.

Hodnoty maximálního převýšení musí být ověřeny splněním podmínky valení. Tato kontrola vycházela z předpokladu splnění podmínky, že tečná síla je menší než síla třecí. Detailní výpočet je obsahem Přílohy 10.

Pro  $9,3^\circ$

$$|F_{t9}| = 140,2 \text{ N} \quad (10)$$

$$F_{T9} = 377,6 \text{ N} \quad (11)$$

$$F_{T9} > |F_{t9}| \Rightarrow \text{podmínka valení pro náklon } 9,3^\circ \text{ splněna} \quad (12)$$

Pro  $24,8^\circ$

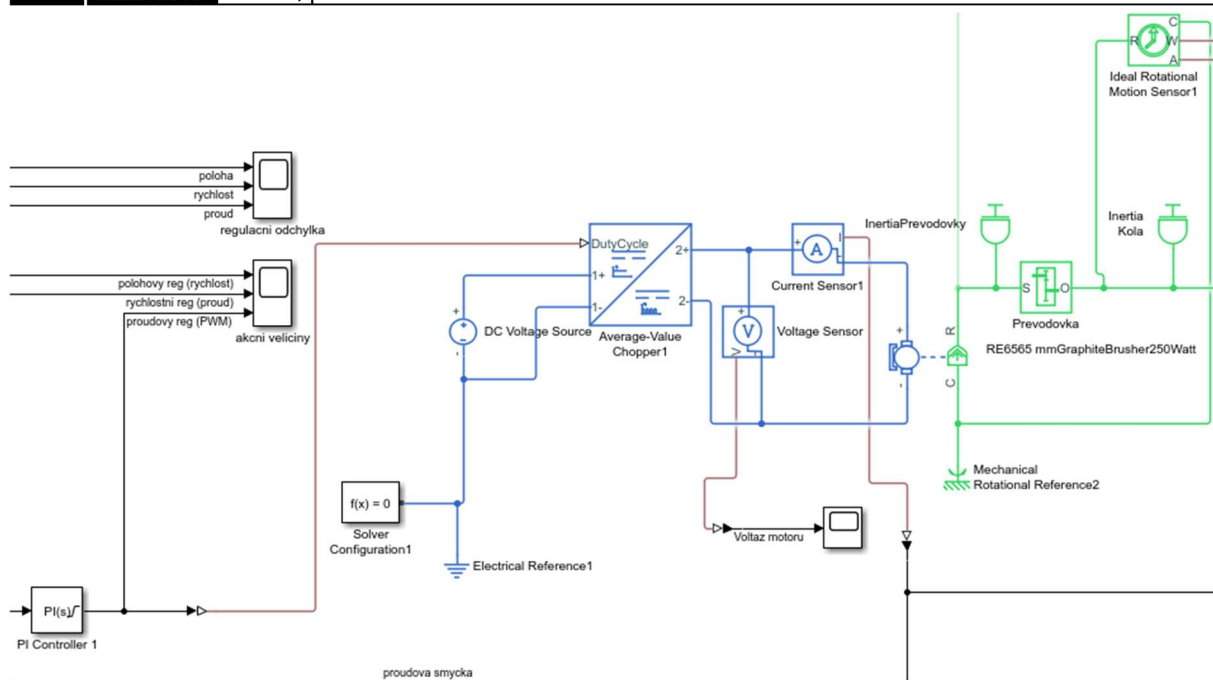
$$|F_{t24}| = 273,7 \text{ N} \quad (13)$$

$$F_{T24} = 347,3 \text{ N} \quad (14)$$

$$F_{T24} > |F_{t24}| \Rightarrow \text{podmínka valení pro náklon } 24,8^\circ \text{ splněna} \quad (15)$$

### Dimenzování pohonů

Dimenzování pohonů vycházelo z regulace závislé na vlastnostech zvolených motorů, mechanické soustavy a především na požadovaných změnách polohy. Motory byly regulovány polohovou, rychlostní a proudovou smyčkou se čtyř kvadrantovým měničem. Bylo tak možné měnit smysl otáčení motoru a využít ho i k brždění. Na následujícím obr. 38 lze vidět náhled na schéma regulace DC motoru kola.



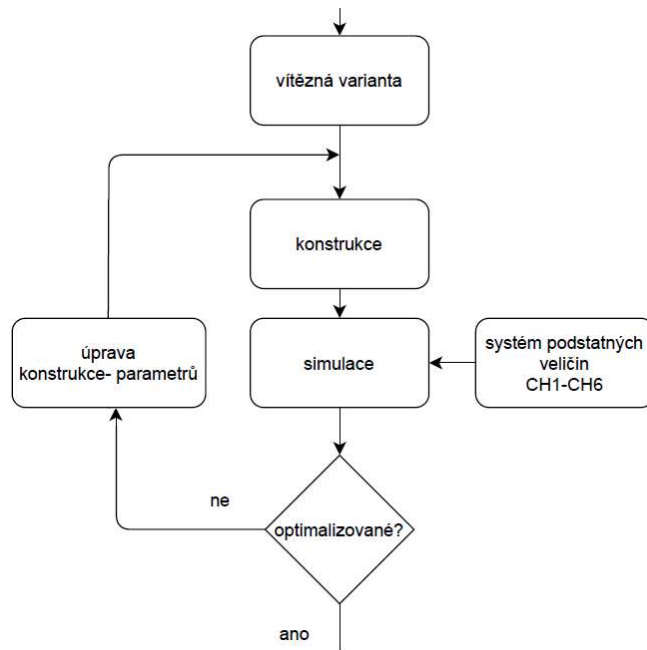
Obr. 38) Náhled do regulace DC motoru kola

Úprava P a I prvků regulátorů probíhala postupně počínaje úpravou proudové smyčky, která byla laděna při zastaveném motoru nástrojem Tune. Rychlostní a polohové regulátory byly vzájemně odladěny na co možná nejrychlejší odezvu. Díky vhodné optimalizaci pohonů a nízkých regulačních odchylek sloužila tato simulace pouze pro volbu pohonů a nepodílela se tak na zpětné regulaci polohy.

Pro ideální volbu motoru natočení gyroskopu muselo dojít k výraznému zjednodušení simulace. Předpokladem pro zjištění výsledného momentu bylo složení potřebných momentů v yaw a roll. Získaný moment byl pokrácen počtem gyroskopů a výsledný moment byl přiřazen pouze rychlosti natáčení  $d\Omega$ , dle vzorce  $\tau = l_{CFW} \cdot \omega_s \cdot d\Omega$ . V reálné simulaci by bylo potřeba zkoumat aktuální polohu gyroskopu vůči výchozí pozici a vůči druhému gyroskopu pro získání reálné hodnoty momentů v roll a yaw. Tato simulace by byla značně složitá a pro splnění konstrukčních cílů práce nebyla zcela nutná.

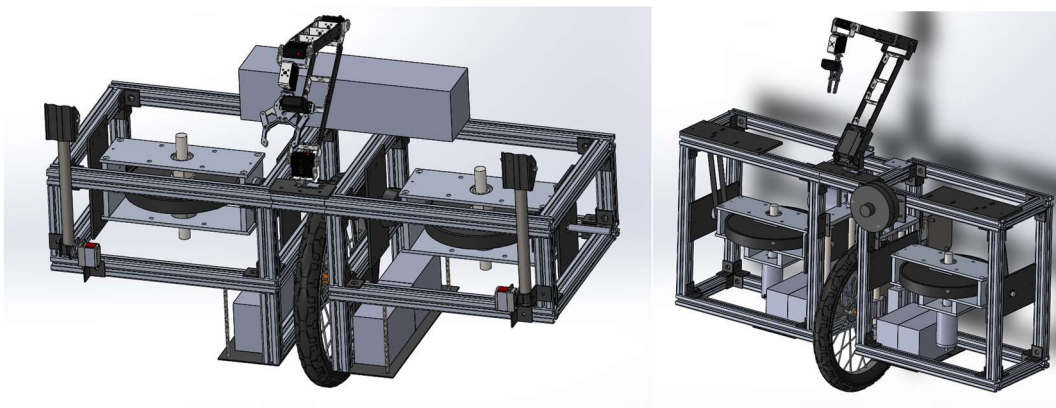
### 9.3 Optimalizace

Při optimalizaci docházelo ke změně konstrukce robotu s cílem dosažení funkčnosti konstrukce nebo lepších vlastností konstrukce. Podkladem pro optimalizaci byla změna parametrů konstrukce, které vstupují do simulace, viz. Příloha 6. Náhled na Algoritmus zpracování diplomové práce lze vidět na obr. 39.



Obr. 39) Algoritmus zpracování diplomové práce

Díky optimalizaci bylo možné vhodně otestovat a ověřit správnost výsledného konstrukčního řešení oproti jeho iteracím. Tato metoda byla užita především pro vhodný výběr pohonů kola, gyroskopu a celkovému rozložení komponent. Porovnání jednoho z předchozích řešení s řešením aktuálním bylo zobrazeno na obr. 40.



Obr. 40) Řešení optimalizace a) 1. iterace, b) výsledné řešení

V porovnání s výchozím konceptem měl robot sníženou délku, což navýšilo jeho polohovatelnost. Zároveň jeho příslušenství bylo uloženo uvnitř klece, namísto externího uložení. Celkově došlo ke snížení hmotnosti, a tím i momentů setrvačnosti hlavních os. Otočení klecí způsobilo taktéž navýšení tuhosti celé konstrukce. Nevýhodou tohoto konceptu byl průjezd terénem o stoupání bočního profilu maximálně  $13^\circ$  po celé délce robotu (vychází z výšky maximálního přestavení robotu a jeho šířky). Výsledná soustava a její simulace pracovala s konstrukčními parametry odečtenými z modelu zapsanými ve skriptu Vstupy. Tyto parametry jsou zobrazeny na následujícím obr. 41. Do simulace vstupovaly taktéž parametry pohonů a jejich mechanických soustav.

```

% simulované zařízení
r=0.381/2;           %poloměr kola
mw=1.931;           %hmotnost kola
mf=65;              %hmotnost rámu
lf=0.35;            %vzdálenost těžiště
if1=5.14;           %moment setrvačnosti Roll
if2=4.17;           %moment setrvačnosti Yaw
if3=1.88;           %moment setrvačnosti Pitch
iw1=0.0275;        %moment setrvačnosti v X kola
iw2=0.0275;        %moment setrvačnosti v Y kola
iw3=0.0544;        %moment setrvačnosti v Z kola
lcfw=0.0282;       %moment setrvačnosti v Y setrvačnicku
omegas=314.2;      %úhlová rychlost setrvačnicku
g=9.81;            %gravitační zrychlení

```

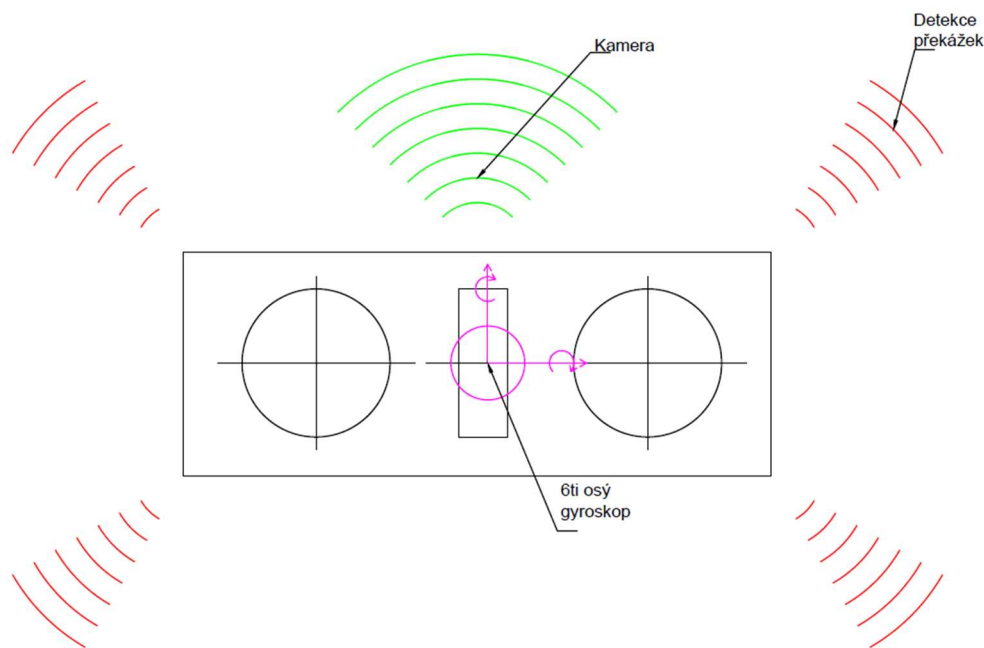
Obr. 41) Parametry konstrukčních vstupů do simulace

## 9.4 Senzory

Jelikož by byla samotná simulace pro reálnou aplikaci nepoužitelná, bylo třeba zvolit dostatečný sensorický systém jednokolového robotu, který by byl vhodný pro získávání potřebných dat a docílení kvalitního řízení stabilní polohy. Nejdůležitějším údajem pro správnou funkci robotu je získání informací o poloze, jak posuvů, tak rotací. K získání těchto informací byl použit šestiosý gyroskop, kde by na základě získaných informací o poloze bylo možné zautomatizovat řízení potřebných momentů pro vyrovnání rotace kolem os a řídit tak natočení v yaw a wheel ose.

Jak již bylo naznačeno, teoretické řízení bude probíhat na základě pokynů uživatele, který bude zadávat požadované natočení yaw a posuv pomocí natočení wheel rotační osy. Uživateli by měl orientaci v terénu usnadnit vizuální záznam pořízený vhodně zvoleným kamerovým systémem a přenesený k uživateli v reálném čase například přes Bluetooth. Tento záznam slouží také pro usnadnění odebírání vzorku. Jelikož byl robot situován především do stran, vizuální záznam nemusí detekovat všechny možné hrozby pro chod robotu. Rohy konstrukce by tedy měly být opatřeny alternativou parkovacího signalizačního systému, který by uživatele frekvencí světelného impulzu upozornil na vzdálenost kolizní překážky a uživatel by tak měl možnost kolizi zabránit. Příklad takového rozložení je zobrazen na obr. 42.

Z hlediska polohování a kontroly správné činnosti celého systému by bylo vhodné použít motory opatřit patřičnými enkodéry, které poskytnou žádoucí zpětnou vazbu s řídicím systémem. Veškeré zvolené motory mají možnost připojení těchto enkodérů.



Obr. 42) Příklad rozložení senzorického systému

## 9.5 Napájení a energetická bilance

Předpokladem pro konstrukci jednokolového robotu byla i možnost dostatečné mobility, tedy možnosti pohybovat se bez připojení k externí síti. Z toho plyne potřeba dostatečného množství akumulované energie uložené v bateriích umístěných v konstrukci robotu. Základem pro odhad energetické náročnosti je provedení simulovaného cyklu, jehož výstupními hodnotami je právě množství odebrané energie jednotlivých pohonů z tohoto energetického zdroje. Následně může být uveden odhad doby provozu robotu, úprava výběru baterií za baterie o větší kapacitě nebo doporučení pracovního postupu pro uvedení robotu do provozu, např. rozběhem gyroskopů na energii z externí sítě.

Jelikož byla ovšem simulace této práce značně zjednodušená, nebylo možné přesně stanovit reálnou spotřebu ani se jí odhadem přiblížit. Zvolena byla sestava čtyř baterií pro poskytnutí napětí 48 V s kapacitou 12 Ah pro napájení DC motorů. Tato kapacita byla brána jako směrodatná s doplňujícím doporučením externího napájení při rozběhu setrvačnicků.

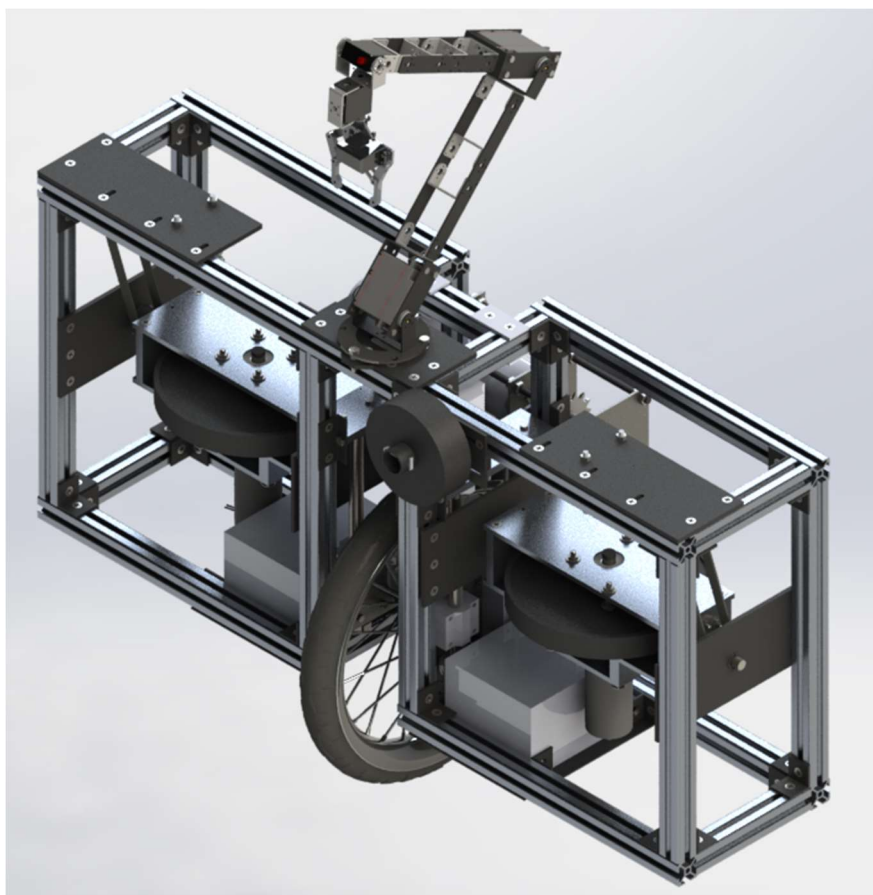


## 10 VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

Systém výkresové dokumentace vycházel z konstrukce jednokolového robota, která byla rozdělena na několik podsestav. Výkresy jsou logicky uspořádány ve smyslu značení X-AA-BBB-CC. Kde X značí verzi celkové sestavy, AA značí číslo podsestav a písmena BBB značí číslo dílu v kusovníku. Písmena CC jsou užita z důvodu výskytu jednoduchých svarek a kusovníků, označují tedy jednotlivé svařence, popřípadě list kusovníku s příponou K. V případě označení nadřazené skupiny byly zbylé číslice doplněny na nuly (název výkresu finální sestavy 7-00-000-00).

Kostra robota byla složena z hliníkového profilu 30 x 30 mm. Profily byly řezány na určitou délku bez určení více specifických tolerancí. Výkresy nejsou obsahem dokumentace, pouze v kusovnících sestav byla stanovena délka řezaného profilu. Ekonomické zhodnocení dále počítalo s výslednou délkou profilů a možným odpadem, na základě délky prodáváných polotovarů.

Výkresová dokumentace vychází ze sedmé iterace řešení a její výsledný model byl zobrazen na renderovaném obr. 43. Model sloužil jako podklad výkresové dokumentace, která je směrodatná a upravena dle literatury [4,5,11]. Výkresová dokumentace se může od modelu mírně lišit. Výkresová dokumentace sestavy byla z důvodu přehlednosti uložena do složek dle příslušné hierarchie v digitální formě.



Obr. 43) Finální render sestavy



## 11 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Předmětem ekonomického zhodnocení bylo stanovení výsledných odhadních nákladů celého zařízení. Jelikož byla konstrukce složena především z výpalků a nakoupených součástí, bylo možné stanovit odhadní náklady poměrně snadno a přesně. Výpočet byl rozdělen na propočet ceny jednotlivých podsestav, určených v kapitole 9. Náklady jednotlivých komponent tedy vycházely z kusovníků podsestav a doplňkové díly byly uvedeny v ceně sestavy. Přesný rozpis cen byl obsahem Přílohy 13.

Tab 7) Ekonomická bilance jednokolového robotu

název:	kusů:	cena/ks	cena
Klec	1	9 822,46 Kč	9 822,46 Kč
Natočení_G_Pravé	1	11 148,73 Kč	11 148,73 Kč
Natočení_G_Levé	1	11 148,73 Kč	11 148,73 Kč
Přestavení	1	34 982,85 Kč	34 982,85 Kč
Gyroskop	2	7 220,88 Kč	14 441,76 Kč
Protizávaží	1	206,47 Kč	206,47 Kč
Manipulátor	1	6 206,52 Kč	6 206,52 Kč
Kolo bmx 16"	1	1 529,00 Kč	1 529,00 Kč
Náboj zadní FORCE BASIC BMX	1	254,00 Kč	254,00 Kč
Pevná osa: 14 x 180 x 110 mm	1	0,00 Kč	0,00 Kč
Šroub 3842528593, S6x16-T25	68	14,76 Kč	1 003,59 Kč
Matice T do drážky,3842501753, N8 M6	68	9,32 Kč	633,76 Kč
Ozubený řemen neopren HTD3M L=420	2	342,00 Kč	684,00 Kč
04B-1 Válečkový Řetěz L=580	1	65,20 Kč	65,20 Kč
Vymezovací podložka 1 mm Ø7 6651006	48	0,32 Kč	15,36 Kč
Vymezovací podložka 1 mm Ø15 6651014	4	0,32 Kč	1,28 Kč
Napínací kroužek 05 B1-30 zubů	1	1 278,00 Kč	1 278,00 Kč
<b>Celkové náklady</b>			<b>93 421,71 Kč</b>

Výsledné materiálové náklady vyhotoveného jednokolového robotu byly 93 421,71 Kč. Jedná se ovšem o odhad zjednodušený, kde není počítáno s cenami vypálených součástí, obrobených hřídelí a hliníkových součástí. Zároveň nebyly připočteny náklady na úpravu nakupovaných součástí. Výsledné náklady zhotovené konfigurace byly stanoveny na cca 110 000 - 120 000 Kč. Tyto náklady však stále nejsou finální, neboť je tento robot potřeba osadit vhodnou elektronikou, která se také razantně promítne na výsledné výši nákladů.



## 12 ZHODNOCENÍ A DISKUSE

Práce byla vzhledem k charakteru úlohy konstrukce jednokolového robotu relativně obtížná na vhodné rozvržení pracovního postupu, neboť každý prvek navrhnuté soustavy ovlivňuje výsledné chování robotu. Kvůli přehlednosti zpracování a cílenému získávání potřebných hodnot byla simulace balancování rozdělena na tři různé simulační bloky: simulace s pevným skokovým zátěžovým cyklem, simulace s manuálním trasováním a simulace pohybu po stanovené trajektorii. Díky tomu mohlo dojít k optimalizaci finálního řešení. Na základě simulací bylo možné zvolit potřebné motory pro udržení schopnosti balancování pro stanovené okrajové podmínky a s dostatečnými regulačními odchylkami.

Dalším krokem byla konstrukce manipulátoru a řešení polohování modelářských serv tak, aby nedošlo ke kolizi se zemí a kostrou robotu. Díky řešení gradientního sestupu, který minimalizuje potřebné pronutí manipulačního ramene, bylo možné volit motory s nižším výkonem.

V poslední fázi došlo k relativně přesnému odhadu materiálových nákladů tohoto zařízení, které ovšem nepočítá s cenou za finální funkční produkt, neboť je zapotřebí robot osadit vhodnou elektronikou. Zároveň je nutné v nákladech konstrukce zohlednit náklady na mzdu zaměstnance a náklady na nutnou kooperaci.

### **Možná nadstavba práce**

Jelikož tato práce řešila konstrukční problematiku jednokolového robotu a nezpracovaných oblastí je poměrně mnoho, může se pokračování ubírat prakticky libovolným směrem. Především se jedná o reálnou konstrukci, a s tím spojené reálné testování a porovnání s teoretickým řízením. Práce se vůbec nezaobírala elektroinstalací a hardwarem s ní spojeným. Možnost návrhu elektroinstalace pro další práci se tedy přímo nabízí. Další možností je návrh a realizace bezdrátového ovladače pro uživatele. Kostra robotu byla tvořena z hliníkových profilů 30 x 30 mm. Jako další činnost by mohl být výpočet v programu ANSYS pro kontrolu vhodnosti použití profilů 20 x 20 mm. Jednalo by se o odlehčení celé konstrukce.

### **Využití v praxi**

Reálné využití jednokolových robotů v praxi je poměrně složitá otázka, a to především v kontextu s rozsáhlými možnostmi využití obdobných zařízení, popřípadě zařízení pracujících na zcela jiném principu, ale splňující zadání stejně a mnohdy i lépe. Odpověď na tuto otázku je tedy značně subjektivní. S přihlédnutím na dnešní technologie si myslím, že reálná využitelnost s ohledem na zadání (obtížnější terén a stání) není zcela korespondující s náročností zpracování a finanční tak, aby byla běžně využívána. Jedná se tedy především o konstrukce určené k dalšímu výzkumu. Alternativu vidím ve dvoukolových robotech a dronech. Naopak při úpravě zadání na hladký povrch se může jednat o zajímavou alternativu stávajícího způsobu logistiky například ve skladech, popřípadě díky své možné robustnosti (Ballbot) jako asistent. Jednokolový robot se ale jeví, jako jednoúčelové zařízení, které má mnoho nevýhod, ale pro jisté operace může dosahovat obrovských výhod.



## 13 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byl sestaven jednokolový robot, který byl postaven na robotickém podvozku Unicycle. Tento výběr byl podložen vhodně sestavenou multikriteriální analýzou. Samotná konstrukce je se svou hmotností kolem 65 kg poměrně robustní a díky vhodně zvolenému pohonnému systému tedy vhodná i do složitějšího terénu.

Na odebrání vzorku se podílí navrhnutý manipulátor, který má základy v konstrukci hobby manipulátoru. Tento manipulátor díky řízení kloubů metodou gradientního sestupu disponuje dostatečnou dynamikou pro sběr vzorku o hmotnosti 500 g. U reálného konstrukčního výstupu je vhodné konstrukci, popř. manipulátor, osadit zdrojem vizuálního záznamu pro snadné polohování.

Robot je díky dvojici gyroskopů schopen měnit svoje natočení téměř na místě. Na robotu byly provedeny simulace s parametry o rychlosti  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a o velikosti zrychlení až  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Robot je na základě těchto parametrů schopen při pohybu překonat stoupání až  $24^\circ$ .

Celá konstrukce byla zpracována ve formě 3D modelu. Tento model sloužil jako podklad pro zpracování detailní výkresové dokumentace, která je směrodatná.

Výsledná ekonomická bilance zpracované konstrukční části stanovila pořizovací náklady přibližně na 120 000 Kč. Tato částka však není konečná, jelikož v ní není zahrnuta pořizovací cena potřebné elektroniky, kterou je zapotřebí robot osadit pro jeho správnou funkci.





## 14 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SMRČEK, Juraj, Mikuláš HAJDUK, Zdenko BOBOVSKÝ a Rudolf JÁNOŠ. *Robotika: metodika nasadzovania servisných robotov*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2013. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 978-80-553-1523-2.
- [2] NEHMZOW, Ulrich. *Mobile robotics: a practical introduction*. Second edition. London: Springer-Verlag, 2003. ISBN 1852337265.
- [3] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-141-1.
- [4] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 5. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-838-0.
- [5] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [6] KOLÍBAL, Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. Košice: Viena, 2000. Edice vědecké a odborné literatury. ISBN 80-88922-27-5.
- [7] GREPL, Robert. *Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-226-8.
- [8] VÍTEČEK, Antonín a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Zpětnovazební řízení mechatronických systémů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3232-6.
- [9] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a simulace mechatronických systémů pomocí programu MATLAB SIMULINK*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3231-9.
- [10] GREPL, Robert. *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3530-8.
- [11] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [12] Gyrover [online]. In: 2012 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/space/www/gyrover/gyrover.html>
- [13] BURATOWSKI, CIEŚLAK, GIERGIEL a UHL. A SELF-STABILISING MULTIPURPOSE SINGLE WHEEL ROBOT. In: *Wikipedia* [online]. Warsaw: JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, 2012 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [http://www.patrykcieslak.eu/Publications/patryk\\_cieslak\\_monowheel\\_jtam.pdf?i=1](http://www.patrykcieslak.eu/Publications/patryk_cieslak_monowheel_jtam.pdf?i=1)
- [14] CHASE, Richard a Abhilash PANDYA. Gyrover. In: *Mdpi* [online]. Wayne State University: mdpi, 2012 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2218-6581/1/1/3/htm>. ISSN 2218-6581.
- [15] Schearer, Eric. (2020). Modeling Dynamics and Exploring Control of a Single-Wheeled Dynamically Stable Mobile Robot with Arms. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/240832277\\_Modeling\\_Dynamics\\_and\\_Exploring\\_Control\\_of\\_a\\_Single-Wheeled\\_Dynamically\\_Stable\\_Mobile\\_Robot\\_with\\_Arms](https://www.researchgate.net/publication/240832277_Modeling_Dynamics_and_Exploring_Control_of_a_Single-Wheeled_Dynamically_Stable_Mobile_Robot_with_Arms)

- [16] Jespersen, Thomas. (2019). Kugle - Modelling and Control of a Ball-balancing Robot. 10.13140/RG.2.2.31490.73928.
- [17] Razero III 2010. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://i.pinimg.com/236x/e2/f7/f2/e2f7f2b00418855355499a05d93f2f21--robot-design-a-robot.jpg>
- [18] Chantarachit, Surachat. (2018). Design and simulate of LQR-Fuzzy controller for unicycle robot with double flywheels. MATEC Web of Conferences. 192. 02001. 10.1051/mateconf/201819202001.
- [19] Cubli: A Cube that can Jump and Self-balance. *Interestingengineering* [online]. Interesting Engineering, 2016, 2016 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/cubli-cube-can-jump-self-balance>
- [20] Bb-8. In: <https://howbb8works.com/> [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://howbb8works.com/>
- [21] PRBT. *Robots.ros.org* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://robots.ros.org/prbt/>
- [22] Lwa-4p. *Robots.ros.org* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://robots.ros.org/schunk-lwa-4p/>
- [23] ROT3U 6DOF. *Amazon* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.amazon.es/diymore-aluminio-mec%C3%A1nico-rob%C3%B3tico-Arduino/dp/B01LW0LUPT>
- [24] 6 axis. In: *Touringmachine* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.touringmachine.com/Articles/aircraft/6/>
- [25] TALPOVÁ, Michaela. Technické opotrebení staveb v obecném pojetí z hlediska systému podstatných veličin. *Tzb* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2015 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/udrzba-budov/13102-technicke-opotrebeni-staveb-v-obecnem-pojeti-z-hlediska-systemu-podstatnych-velicin>
- [26] CHANTARACHIT, Surachat a Manukid PARNICHKUN. Development and control of a unicycle robot with double flywheels [online]. 2016 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: [researchgate.net/publication/311502659\\_Development\\_and\\_control\\_of\\_a\\_unicycle\\_robot\\_with\\_double\\_flywheels](https://www.researchgate.net/publication/311502659_Development_and_control_of_a_unicycle_robot_with_double_flywheels)
- [27] Valivé tření. *Converter* [online]. 2002 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/valive-treni.htm>

# 15 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 15.1 Seznam použitých zkratk

2D	Two-dimensional
3D	Three-dimensional
SR	Servisní robot
MSR	Mobilní servisní robot
RC	Remote control
DC	Direct current
IP	Ingress Protection
BMX	Bicycle Motocross
LQR	Linear-Quadratic Regulator
MIMO	Multiple-input multiple-output
P	Proporcionální člen
I	Integrační člen

## 15.2 Seznam použitých symbolů

$\alpha$	[°]	Úhel stoupání
$\varepsilon$	[rad·s <sup>-2</sup> ]	Úhlové zrychlení kola
$\omega_s$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost setrvačnicku
T	[Nm]	Generovaný moment gyroskopu
A	[m·s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení robotu
$d_{Ls}$	[kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Změna momentu hybnosti
$F_{gx}$	[N]	Tíhová síla v X
$F_{gy}$	[N]	Tíhová síla v Y
$F_n$	[N]	Normálová síla
$F_t$	[N]	Tečná síla
$F_{t24}$	[N]	Tečná síla pro 24°
$F_{T24}$	[N]	Třecí síla pro 24°
$F_{T9}$	[N]	Třecí síla pro 9°
$F_{t9}$	[N]	Tečná síla pro 9°
$F_x$	[N]	Síla v ose X
$F_y$	[N]	Síla v ose Y
J	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
$J_1$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti osy X
$J_2$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti osy Y
$J_3$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti osy Z
$K_1$	[-]	Kritérium: Stabilita
$K_2$	[-]	Kritérium: Cena
$K_3$	[-]	Kritérium: Složitost konstrukce a její využití

K <sub>4</sub>	[-]	Kritérium: Možnost překonávání terénu
K <sub>5</sub>	[-]	Kritérium: Ovladatelnost
K <sub>6</sub>	[-]	Kritérium: Rychlost
K <sub>7</sub>	[-]	Kritérium: Výdrž
K <sub>8</sub>	[-]	Kritérium: Objem vzorku
K <sub>9</sub>	[-]	Kritérium: Plynulost balancování
K <sub>10</sub>	[-]	Kritérium: Výška robotu (výška těžiště)
K <sub>11</sub>	[-]	Kritérium: Akcelerace
I <sub>cFW</sub>	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti setrvačnicku
L <sub>s</sub>	[kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Moment hybnosti
m	[kg]	Hmotnost robotu
M	[Nm]	Působící moment na kole
M <sub>1</sub>	[Nm]	Moment na kloubu manipulátoru 1
M <sub>2</sub>	[Nm]	Moment na kloubu manipulátoru 2
M <sub>3</sub>	[Nm]	Moment na kloubu manipulátoru 3
Omega	[rad·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost natočení gyroskopu
pitch	[rad]	Naklánění
Pitch_torg	[Nm]	Pitch klopný moment
r	[m]	Poloměr kola
roll	[rad]	Valení
Roll_torg	[Nm]	Roll klopný moment
TauP	[Nm]	Pitch generovaný klopný moment
TauR	[Nm]	Roll generovaný klopný moment
TauY	[Nm]	Yaw generovaný klopný moment
VK <sub>1-11</sub>	[-]	Váha kritéria 1-11
wheel	[rad]	Natočení kola
yaw	[rad]	Stáčení
Yaw_torg	[Nm]	Yaw klopný moment
Zb	[-]	Výsledná známka: Ballbot
Zg	[-]	Výsledná známka: Gyrover
ZKb <sub>1-11</sub>	[-]	Známka kritéria Ballbot
ZKg <sub>1-11</sub>	[-]	Známka kritéria Gyrover
ZKu <sub>1-11</sub>	[-]	Známka kritéria Unicycle
Zu	[-]	Výsledná známka: Unicycle

### 15.3 Seznam tabulek

Tab 1)	Tabulka kritérií .....	33
Tab 2)	Zdůvodnění váhy kritéria .....	34
Tab 3)	Známky Gyroveru .....	35
Tab 4)	Známky hodnocení Ballbot varianty .....	35
Tab 5)	Tabulka hodnocení kritérií Unicyclu.....	36
Tab 6)	Výsledky analýzy pro volbu ideálního koncepčního řešení.....	36
Tab 7)	Ekonomická bilance jednokolového robotu.....	59

## 15.4 Seznam obrázků

Obr. 1)	Vývoj robotických systémů [6] .....	17
Obr. 2)	Kategorizace robotických systémů [6] .....	18
Obr. 3)	Schéma znaků mobilního SR [6] .....	19
Obr. 4)	Systémový model MSR, Elektronický přístup [6].....	19
Obr. 5)	Zobrazení pohybových os.....	20
Obr. 6)	Zobrazení Gyroveru a) schématické rozložení stavebních prvků [14], b) zobrazení v provozu [13] .....	21
Obr. 7)	Ballbot a) Razer 2010 [17], b) Kugle V1 [16].....	22
Obr. 8)	Unicycle robotický podvozek [18] .....	23
Obr. 9)	The Cubli [19] .....	23
Obr. 10)	Sphero-BB-8 a) bez krytování [20], b) s krytovaním [20] .....	24
Obr. 11)	PRBT manipulátor [21].....	25
Obr. 12)	LWA 4P manipulátor [22].....	26
Obr. 13)	ROT3U 6DOF [23].....	26
Obr. 14)	Spojitosť SPV se vstupními veličinami .....	28
Obr. 15)	Obecný návrh Gyrover robotu .....	31
Obr. 16)	Návrh Ballbot robotu .....	32
Obr. 17)	Návrh Unicycle robotu .....	32
Obr. 18)	Zobrazení rozvržení konceptu setrvačnicků a) podélné b) příčné.....	38
Obr. 19)	Změna působení momentů v závislosti na natočení uložení gyroskopu ....	38
Obr. 20)	Potřebné momenty pro stabilizaci, skoku zátěžového momentu a) podélný koncept a, b) příčný koncept b. ....	39
Obr. 21)	Porovnání vlastností dle uložení gyroskopů.....	39
Obr. 22)	a) Schéma sestavy robotu b) Výsledný jednokolový robot .....	41
Obr. 23)	Návrh setrvačnicku .....	42
Obr. 24)	Přestavení robotu .....	43
Obr. 25)	Rám robotu .....	43
Obr. 26)	Sestava a) usazená b) s přestaveným kolem .....	44
Obr. 27)	RRR Manipulátor .....	44
Obr. 28)	Silová rovnováha manipulátoru.....	45
Obr. 29)	Orientační rozměry manipulátoru.....	45
Obr. 30)	Zobrazení polohování manipulátoru.....	46
Obr. 31)	Vstupní ovladatelné GUI .....	47
Obr. 32)	Schéma LQR regulace [18] .....	48
Obr. 33)	Vyvažování polohy na základě výchozího vychýlení a) 5° b) 8° (poslední stabilní krok úhlu) .....	48
Obr. 34)	Reakce na skokové změny požadovaného úhlu, a) poloha b) rychlost .....	49
Obr. 35)	Zobrazení trajektorie robotu v rovině.....	49
Obr. 36)	Zobrazení a) natočení robotu b) rychlosti robotu .....	50
Obr. 37)	Uvolnění kola robotu na nakloněné rovině.....	50
Obr. 38)	Náhled do regulace DC motoru kola .....	53
Obr. 39)	Algoritmus zpracování diplomové práce.....	54
Obr. 40)	Řešení optimalizace a) 1. iterace, b) výsledné řešení .....	54

Obr. 41)	Parametry konstrukčních vstupů do simulace .....	55
Obr. 42)	Příklad rozložení sensorického systému .....	56
Obr. 43)	Finální renderovaná sestava .....	57

## 16 SEZNAM PŘÍLOH

### Elektronické přílohy

- 1 Multikriteriální analýza
- 2 Matematický model
- 3 Momenty manipulátoru
- 4 MATLAB script manipulátor – simulace
- 5 MATLAB Unicycle simulink – simulace
- 6 Algoritmus DP
- 7 Doba rozběhu motoru setrvačnicku – simulace
- 8 Kontrola krokových motorů
- 9 Životnost ložiska
- 10 Podmínka valení
- 11 Výkresová dokumentace DP
- 12 3D model - step
- 13 Ekonomická bilance
- 14 Ostatní konstrukční podklady