

|                     |   |
|---------------------|---|
| Autor               | Ing. Milan Mihola   |
| Katedra, institut   | Robototechniky 354  |
| Název:              | Návrh a analýza lokomočního subsystému servisního robotu pro pohyb ve členitém terénu |
| Místo, rok, vydání: | Ostrava, 2011, 1. vydání  |
| Počet stran:        | 30  |
| Vydala:             | VŠB – Technická univerzita Ostrava  |
| Tisk:               | Katedra robototechniky, FS  |
| Náklad:             | 50 ks   |

Neprodejně

**ISBN 978-80-248-2468-0**

## **Návrh a analýza lokomočního subsystému servisního robotu pro pohyb ve členitém terénu**

*Design and analysis of locomotive subsystem of  
service robot intended for movement in broken terrain*

***Ing. Milan Mihola***

*Vědecké spisy Fakulty strojní*

*Edice: Autoreferáty disertačních prací, sv.186*

**2011**

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

# **Návrh a analýza lokomočního subsystému servisního robotu pro pohyb ve členitém terénu**

Autoreferát disertační práce

Studijní program: P2301 – Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301V013 - Robotika  
Školitel: Prof. Ing. Jiří Skařupa, CSc.  
Doktorand: Ing. Milan Mihola

Ostrava 2011

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Obsah .....  | 2  |
| Seznam použitých symbolů a značek .....  | 3  |
| 1. Úvod .....  | 4  |
| 2. Přehled současného stavu řešené problematiky .....                          | 5  |
| 3. Cíle disertační práce .....   | 7  |
| 4. Lokomoční subsystém mobilního servisního robotu .....                       | 8  |
| 5. Analýza lokomočního subsystému z pohledu překonávání překážek .....         | 12 |
| 5.1. Analýza pohybu robotu při překonávání překážky typu nájezdová rampa ..... | 13 |
| 5.2. Analýza pohybu robotu při překonávání překážky typu kvádr .....           | 16 |
| 6. Konstrukční řešení přední a zadní nápravy podvozku robotu .....             | 22 |
| 7. Výsledky, nové poznatky a praktické přínosy .....                           | 23 |
| 8. Seznam použité literatury .....   | 26 |
| 9. Seznam vlastních publikací a vědeckovýzkumných výsledků .....               | 27 |
| Přílohy .....  | 29 |
| I. <i>Abstract</i> .....   | 29 |
| II. <i>Životopis</i> .....   | 30 |
| III. <i>CURRICULUM VITAE</i> .....   | 30 |

## Seznam použitých symbolů a značek

|              |   |                     |
|--------------|---|---------------------|
| $D_{KV}$     | Výpočtový průměr pneumatiky                             | [mm]                |
| $D_k$        | Maximální průměr pneumatiky                             | [mm]                |
| $d_k$        | Velikost deformace pneumatiky                           | [mm]                |
| $f_k$        | součinitel valivého odporu                              | [-]                 |
| $\mathbf{G}$ | Matrice tíhových sil                                    | [N]                 |
| $G_R$        | Tíhová síla   | [N]                 |
| $g$          | Tíhové zrychlení  | [m/s <sup>2</sup> ] |
| $H$          | Výška překážky  | [mm]                |
| $i_{21}$     | Převodový poměr válcového ozubeného soukolí             | [-]                 |
| $i_{43}$     | Převodový poměr kuželového ozubeného soukolí            | [-]                 |
| $K_i$        | Označení kloubu 1 až 4                                  |                     |
| $L$          | Rozvor náprav   | [mm]                |
| $M_{Kp}$     | Krouticí moment na předním kole                         | [Nmm]               |
| $M_{Kz}$     | Krouticí moment na zadním kole                          | [Nmm]               |
| $m_R$        | Předpokládaná hmotnost robotu                           | [kg]                |
| $N_i$        | Normálová síla $N_1$ až $N_3$                           | [N]                 |
| $N_{Ki}$     | Normálová složka síly v místě kontaktu kola s podkladem | [N]                 |
| PJ           | Pohonná jednotka  |                     |
| T            | Těžiště robotu  |                     |
| $T_{Ki}$     | Tečná složka síly v místě kontaktu kola s podkladem     | [N]                 |
| $v_R$        | Rychlost robotu   | [m/s]               |
| $\kappa$     | Úhel vyplývající z výšky překážky typu kvádr            | [°]                 |
| $\mu$        | Koeficient tření  | [-]                 |
| $\nu$        | Úhel vyplývající z výšky překážky typu kvádr            | [°]                 |
| $\phi$       | Úhel sklonu rampy                                       | [°]                 |

## 1. Úvod

Zásahy při krizových situacích. To je téma, jež je pravidelně diskutováno při úniku nebezpečných chemických látek, objevení nelegální skládky toxického odpadu, nálezu nástražného výbušného systému, apod. V současnosti jsou při těchto situacích povolávány speciální protipožární a protichemické, resp. pyrotechnické jednotky.

Krizová situace je ve většině případů následkem havárie nebo úmyslného činu. Často se při ní setkáváme s nebezpečnými látkami, jež ohrožují životy a zdraví lidí nebo mohou způsobit škody na majetku, případně životním prostředím.

Všechny tyto situace nesou společný jmenovatel. Člověka riskujícího své zdraví nebo dokonce život při snaze o řešení vzniklých problémů. Jednou z možností, jak omezit riziko související se zásahy při krizových situacích, je nasazení mobilního servisního robotu, který může sloužit buď pouze k získávání informací z místa zásahu a tím snížení rizik při následném zásahu člověka nebo se může na zásahu přímo podílet [1.1].

Důležitou roli při nasazení mobilního servisního robotu hraje lokomoční subsystém neboli podvozek robotu. Jeho typ a vlastnosti výrazným způsobem ovlivňují možnosti nasazení a úspěšnost při plnění požadovaných úkolů.

Před vlastním návrhem mobilního servisního robotu určeného pro zásahy v krizových situacích je potřeba provést podrobný rozbor předchozích havárií a na jejich základě vytvořit seznam požadavků, které by měl robot splňovat. Stejně jako v případě jiných typů zařízení, jsme postaveni před otázkou, zda se snažit vytvořit servisní robot co nejvíce univerzální, pokrývající pokud možno co největší škálu krizových situací, se všemi výhodami a nevýhodami z této koncepce plynoucími, nebo zda se přiklonit k variantě s návrhem více typů méně univerzálních robotů. Samostatnou kapitolou jsou pak servisní roboty modulární, u nichž je možné v relativně krátkém čase provést přizpůsobení pro tu danou situaci.

## 2. Přehled současného stavu řešené problematiky

Mobilní servisní roboty můžeme rozdělit podle různých kritérií. Jedním z hlavních kritérií je typ lokomočního subsystému, na jehož základě je robot postaven [2.1]. V případě mobilních servisních robotů, využívaných k zásahům v krizových situacích, jsou v současnosti běžně používány pouze tři typy lokomočních subsystémů:

- kolové;
- pásové;
- hybridní (kombinace kolového a pásového).

Na základě provedené analýzy současného stavu v této oblasti servisní robotiky byli vybráni dva zástupci z každé skupiny. V následující tabulce jsou uvedeny jejich základní parametry, sloužící jako vstupní údaje při návrhu nového podvozku robotu:

| <b>Parametr<br/>/<br/>Robot</b> | <b>Délka<br/>robotu<br/>[mm]</b> | <b>Šířka<br/>robotu<br/>[mm]</b> | <b>Výška<br/>robotu<br/>[mm]</b> | <b>Maximální<br/>rychlost<br/>[km/h]</b> | <b>Max. úhel<br/>stoupání<br/>schodiště<br/>[°]</b> | <b>Typická<br/>doba<br/>provozu<br/>[hod]</b> |
|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|---|
| GRIZZLY-1<br>[2.2]              | 1500                             | 680                              | 900                              | 3  | -   | 1   |
| IBIS [2.3]                      | 1300                             | 780 až<br>850                    | 950                              | 8,5                                      | -   | 8   |
| Theodor [2.4]                   | 1300                             | 685                              | 1240                             | 3  | 45  | 3 až 4  |
| iRobot 510<br>[2.5]             | 686 až<br>965                    | 406 až<br>521                    | 188                              | 9,3                                      | -   | -   |
| DRAGON IV<br>[2.6]              | 1320                             | 710                              | 910                              | 2,7                                      | 45  | -   |
| KNIGHT<br>[2.7]                 | 1359                             | 705                              | 1016                             | 4  | 45  | 3 až 4  |

*Tab. 2.1 – Porovnání vybraných parametrů mobilních servisních robotů*

Z tabulky je zřejmé, že z pohledu půdorysných rozměrů nejsou mezi jednotlivými roboty významnější rozdíly. Jedinou výjimkou je iRobot 510, který se liší nejen rozměry a hmotností, ale také svou modulární koncepcí. Jeho porovnávání s ostatními tedy není příliš vhodné. Zaměříme-li se tedy na zbývající pětici robotů, svou maximální dosažitelnou rychlostí a typickou dobou provozu převyšuje ostatní šestikolový robot IBIS. Lze předpokládat, že schopnost překonávání překážek typu schodiště bude u tohoto typu robotu na horší úrovni, než je tomu v případě robotů s pásovým podvozkem. Tento handicap je možné do určité míry eliminovat volbou vhodného typu pneumatik a úrovní jejich nahuštění, případně přidáním mechanismem zlepšujícím možnosti překonávání vybraného typu překážek. Zároveň je potřeba věnovat pozornost pneumatikám z hlediska celkové šířky robotu, která může v případě robotu IBIS dosahovat až hodnoty 850mm a tím by bylo zabráněno možnému průjezdu zárubněmi dveří o rozměru 800mm.

Za předpokladu, že by měl navrhovaný robot plnit obdobné úkoly, jako výše porovnávaná pětice, je možné při předběžném návrhu půdorysných rozměrů budoucího podvozku mobilního robotu vycházet z následujících údajů:

- délka robotu v rozmezí od 1200mm do 1500mm;
- šířka robotu umožňující průjezd zárubněmi dveří o šířce 800mm.

Menší půdorysné rozměry znamenají lepší manévrovací schopnosti v omezeném prostoru, ale zároveň mohou znamenat horší stabilitu robotu při plnění požadovaného úkolu, resp. překonávání možných překážek. Je tedy potřeba najít vhodný kompromis mezi rozměry a stabilitou.

### 3. Cíle disertační práce

V současnosti je výzkum mobilních servisních robotů, určených pro pohyb ve členitém terénu, zaměřen na plnění požadovaných úkolů ve venkovním prostředí. S tím také souvisí zaměření výzkumu, např. na možnosti pohybu robotu po nezpevněném podkladu. Roboty určené pro zásahy při krizových situacích se ale často pohybují uvnitř budov, což znamená jiný typ podkladu a překážek, než na které se zaměřuje současný výzkum. Pro určení potřebných parametrů lokomočních subsystémů postavených na bázi pásů jsou k dispozici potřebné postupy výpočtů. V případě např. podvozků kolových je situace výrazně složitější.

V rámci této disertační práce by měli být splněny následující cíle:

- navrhnout lokomoční subsystém mobilního servisního robotu určeného pro pohyb ve členitém terénu;
- provést analýzu manévrovacích schopností navrženého subsystému;
- pro vybraný typ překážek určit potřebné výkony pohonných jednotek za pomoci dostupných postupů výpočtů, případně navrhnout postupy výpočtů vlastní;
- určení potřebných výkonů pohonných jednotek za pomoci vhodného simulačního softwaru;
- porovnání dosažených výsledků;
- konstrukční návrh vybraných částí lokomočního subsystému.



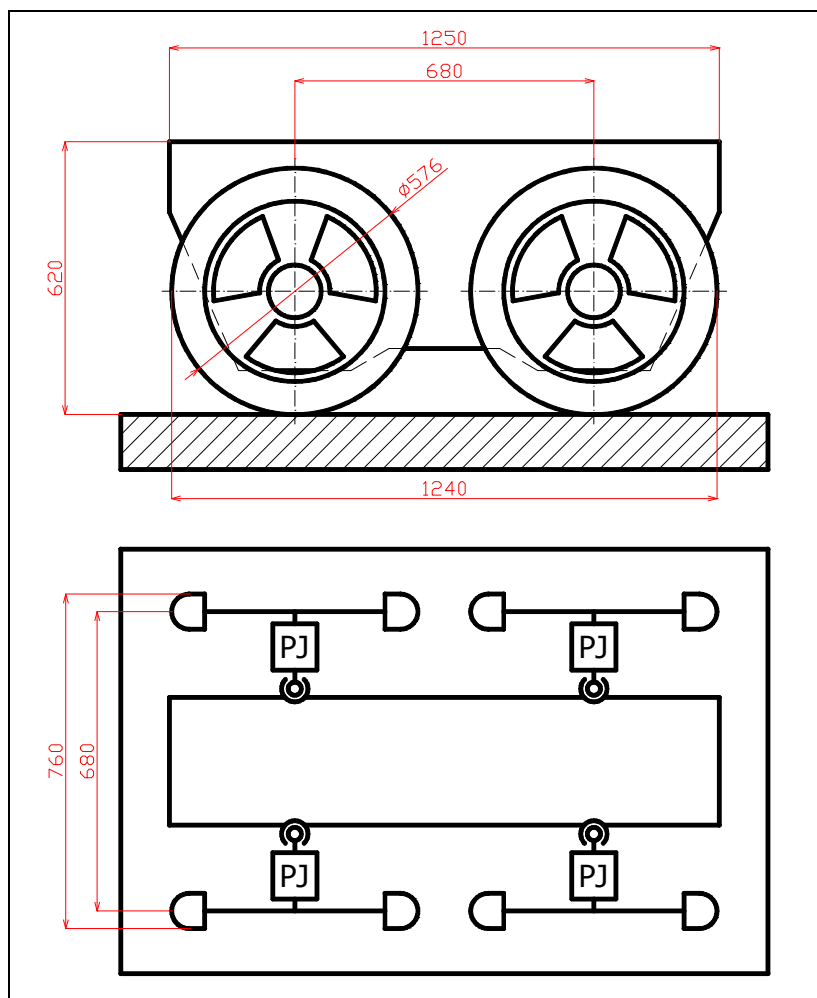
#### 4. Lokomoční subsystém mobilního servisního robotu

Návrh koncepce lokomočního subsystému mobilního servisního robotu byl proveden v rámci řešení projektu *FT-TA3/014 VÝZKUM A VÝVOJ SPECIÁLNÍHO VÍCEÚČELOVÉHO ZÁSAHOVÉHO VOZIDLA*. Vzhledem k tomu, že se jednalo o návrh druhé varianty lokomočního subsystému v rámci tohoto projektu, byla z konstrukčního hlediska dána určitá omezení v podobě použití kol z malého motocyklu a pohonných jednotek od společnosti MAXON MOTOR AG.

Vzhledem k rozměrům kol a předpokládanému místu nasazení bylo rozhodnuto o návrhu čtyřkolového podvozku mobilního servisního robotu. Také bylo potřeba přihlédnout k relativně nízkým výkonům pohonných jednotek. Z tohoto důvodu byla ke každému kolu přiřazena jednotka vlastní.

Toto řešení umožňuje navrhnout podvozek robotu spadající jak do kategorie *Auto*, tak do kategorie *Tank*, případně do obou dvou kategorií. A právě na tuto poslední možnost jsme se při návrhu lokomočního subsystému zaměřili. Výsledkem by tedy měl být mobilní servisní robot s lokomočním subsystémem umožňujícím jak plynulou změnu směru pohybu, tak možnost otáčení na místě kolem své osy.

Schéma navrženého lokomočního subsystému mobilního servisního robotu (včetně základních rozměrů) je na následujícím obrázku:

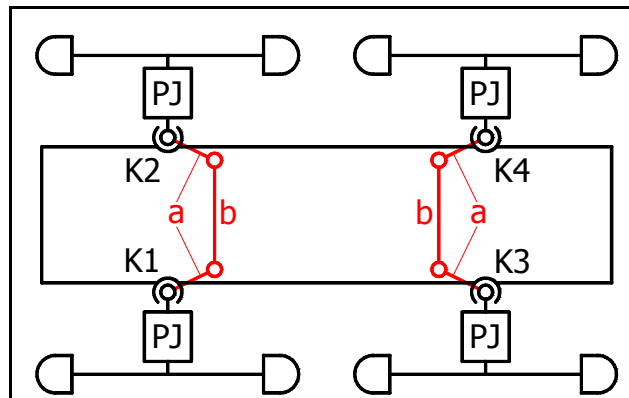


Obr. 4.1 – Základní schéma navrženého lokomočního subsystému mobilního servisního robotu

Šířka podvozku byla navržena na základě analýzy prostředí, ve kterém by měl robot vykonávat požadovanou činnost. Vychází z minimální vnitřní šířky zárubní dveří 800mm. Pro optimální fungování diferenčního řízení by měl mít rozvor náprav a rozchod kol stejnou velikost. Rozchod kol a tím pádem i rozvor náprav vychází ze šířek robotu a pneumatik.

Písmeny *PJ* jsou popsány bloky naznačující umístění pohonných jednotek. Vhodným řešením by bylo umístění pohonných jednotek přímo do kol robotu. Tím by došlo ke zlepšení rozložení hmotnosti robotu a celkovému zlepšení stability zařízení. Zároveň by došlo k uvolnění prostoru uvnitř těla robotu. Rozměry pohonných jednotek složených z komponent společnosti MAXON MOTOR AG a konstrukce zvolených kol nám ale toto řešení neumožňují.

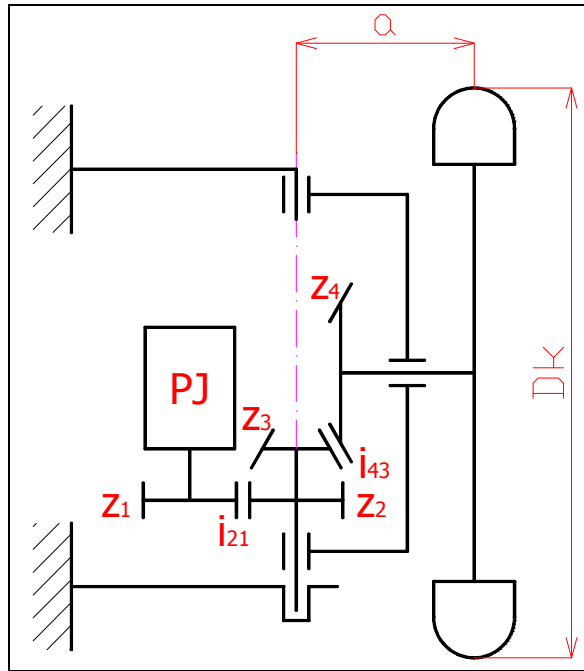
Na základě analýzy možností natočení kol vůči tělu robotu vplynulo následující kinematické schéma mechanismu natáčení kol, vycházející z principu Ackermannova řízení [4.1].



Obr. 4.2 – Schéma mechanismu natáčení kol mobilního robotu

Při návrhu rozmístění jednotlivých komponent lokomočního subsystému bylo potřeba brát v potaz nejen relativně nízký výkon, ale také rozměry pohonných jednotek. Maximální průměr 81mm a celková délka 401mm výrazným způsobem ovlivňuje možnosti jejich umístění. Bylo tedy potřeba navrhnout mechanismus pro přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na kolo takovým způsobem, aby bylo možné do prostoru těla robotu umístit také akumulátory a komponenty řídicího subsystému.

Na obr. 4.3 je naznačeno kinematické schéma mechanismu pro přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na kolo podvozku robotu. Skládá se z dvojice ozubených soukolí, válcového pro přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na vloženou hřídel a kuželového, které slouží k přenosu krouticího momentu z vložené hřídele na kolo robotu.



Obr. 4.3 – Kinematické schéma mechanismu pro přenos krouticího momentu

Vhodnou volbou převodového poměru kuželového ozubeného soukolí  $i_{43}$  a vzdálenosti středu pneumatiky kola od osy kloubu  $a$  je možné docílit toho, že při natáčení kol za pomoci mechanismu řízení bude docházet k odvalování pneumatiky po podložce bez toho, aby docházelo k prokluzu mezi pneumatikou a podložkou, případně působení krouticího momentu od kola přes převodový mechanismus na pohonnou jednotku.

V případě, že bude mít mechanismus pohonného ústrojí parametry dle tab. 3.6, bude dosaženo efektu popsaného výše.

| $D_{kv}$ | $a$       | $i_{43}$ |
|----------|-----------|----------|
| 546mm    | 170,630mm | 1,6      |

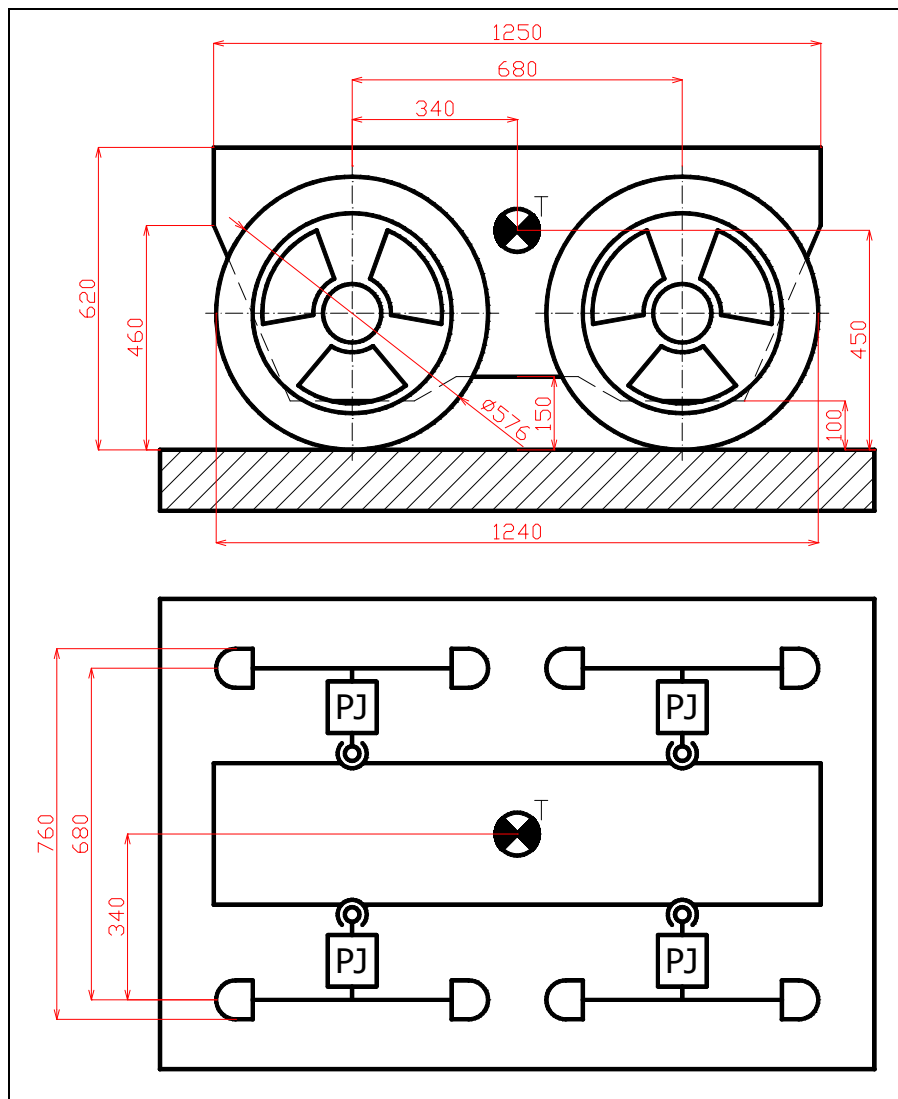
Tab. 4.1 – Parametry mechanismu pohonného ústrojí

Vzhledem k předpokládané deformaci pneumatiky při zatížení, byl ve výpočtu maximální průměr pneumatiky  $D_K$  nahrazen výpočtový průměrem  $D_{KV}$ , v němž je zohledněna deformace pneumatiky  $d_k$ .

## **5. Analýza lokomočního subsystému z pohledu překonávání překážek**

Výčet možných překážek by byl velice dlouhý a seznam možných způsobů jejich překonávání ještě výrazně delší. Z tohoto důvodu budou provedeny analýzy jen u několika vybraných typů překážek. Z předchozího výčtu je možné vynechat zárubně dveří, resp. jejich šířku. Ta byla respektována při předběžném návrhu půdorysných rozměrů lokomočního subsystému. Ve výčtu byly dále zmíněny překážky typu nájezdová rampa a schodiště. Pro analýzu podvozku robotu bude k těmto dvě typům překážek přidána třetí ve tvaru kvádrů, na níž bude provedeno srovnání dostupných výpočtů s výsledky simulací v prostředí softwaru společnosti MSC.Software MD Adams 2010.

Aby bylo možné provést potřebné analýzy, je potřeba upřesnit obrys těla podvozku robotu i s příslušnými rozměry. Přední i zadní část podvozku jsou shodně tvořeny šikmými plochami umožňujícími lepší překonávání potenciálních překážek. Zároveň také jejich poloha vůči kolům má pozitivní vliv na terénní schopnosti robotu. Úprava střední části podlahy podvozku by se také měla kladným způsobem projevit při překonávání překážek, které by svým rozměrem odpovídali prostoru mezi koly přední a zadní nápravy a podlahou podvozku a mohly by způsobit uvíznutí robotu.



Obr. 5.1 – Předběžný návrh podvozku robotu

Co se celkových rozměrů týká, je navržený podvozek mobilního servisního robotu srovnatelný s roboty uvedenými v kapitole 2. *Přehled současného stavu řešené problematiky.*

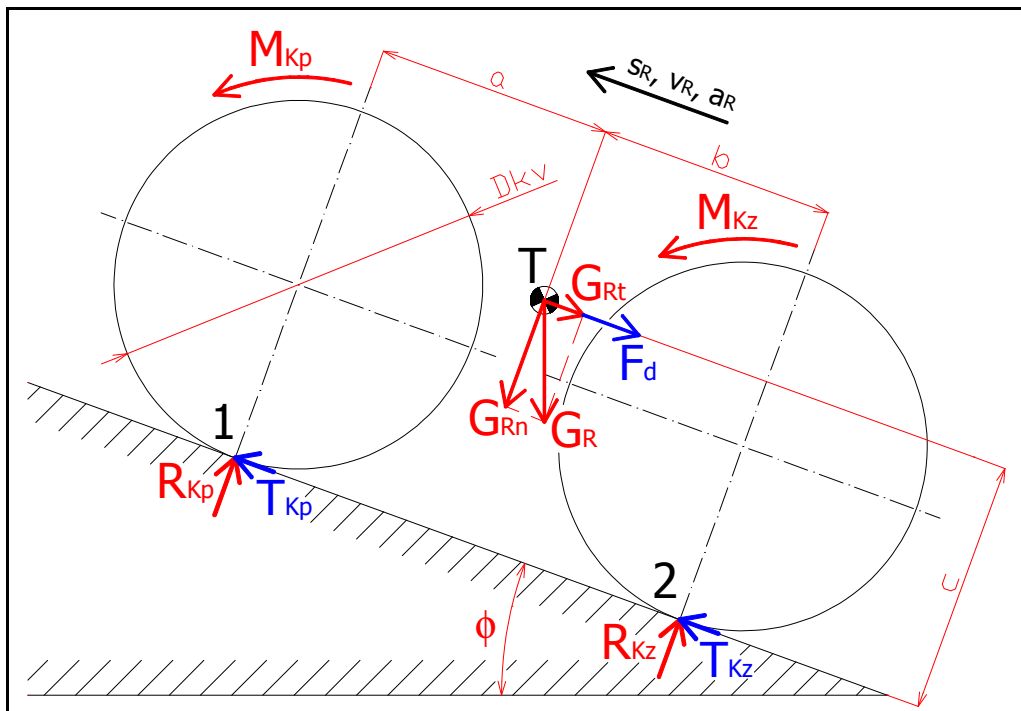
Dalším důležitým parametrem, při provádění pohybové analýzy, je vlastní hmotnost robotu a poloha jeho těžiště  $T$  (obr. 5.1). Vzhledem k relativně nízkému výkonu pohonných jednotek byla určena maximální celková hmotnost robotu  $m_R = 280\text{kg}$ . V porovnání s roboty uvedenými v kapitole 2 se jedná o hodnotu spíše vyšší.

### 5.1. Analýza pohybu robotu při překonávání překážky typu nájezdová rampa

Nájezdová rampa představuje jeden z rozšířených způsobů překonávání různých výškových úrovní terénu, hlavně v místech, kde je předpokládán pohyb osob i vozidel

různého typu. Její sklon by se měl pohybovat v rozmezí  $0^\circ$  až  $12,5^\circ$ . Je možné se také setkat s případy, kdy je sklon rampy větší, např.  $35^\circ$ , což odpovídá sklonu schodiště s normálním sklonem. Ve většině podobných případů se jedná o nájezdovou rampu tvořící součást právě zmíněného schodiště. Pro určení potřebných výkonů, resp. krouticích momentů pohonných jednotek bude uvažováno právě s hodnotou sklonu rampy  $35^\circ$ .

U čtyřkolového podvozku mobilního servisního robotu musíme nejprve určit rozložení hmotnosti robotu mezi jednotlivá kola. Vzhledem k poloze těžiště je možné konstatovat, že kola přední nápravy budou zatěžována stejně velkou silou. Totéž platí o kolech zadní nápravy. Na základě tohoto předpokladu je možné postup výpočtu reakcí vznikajících mezi koly a podkladem zjednodušit na výpočet reakcí u jednostopého vozidla a na základě soustavy rovnic určit hledané reakce.



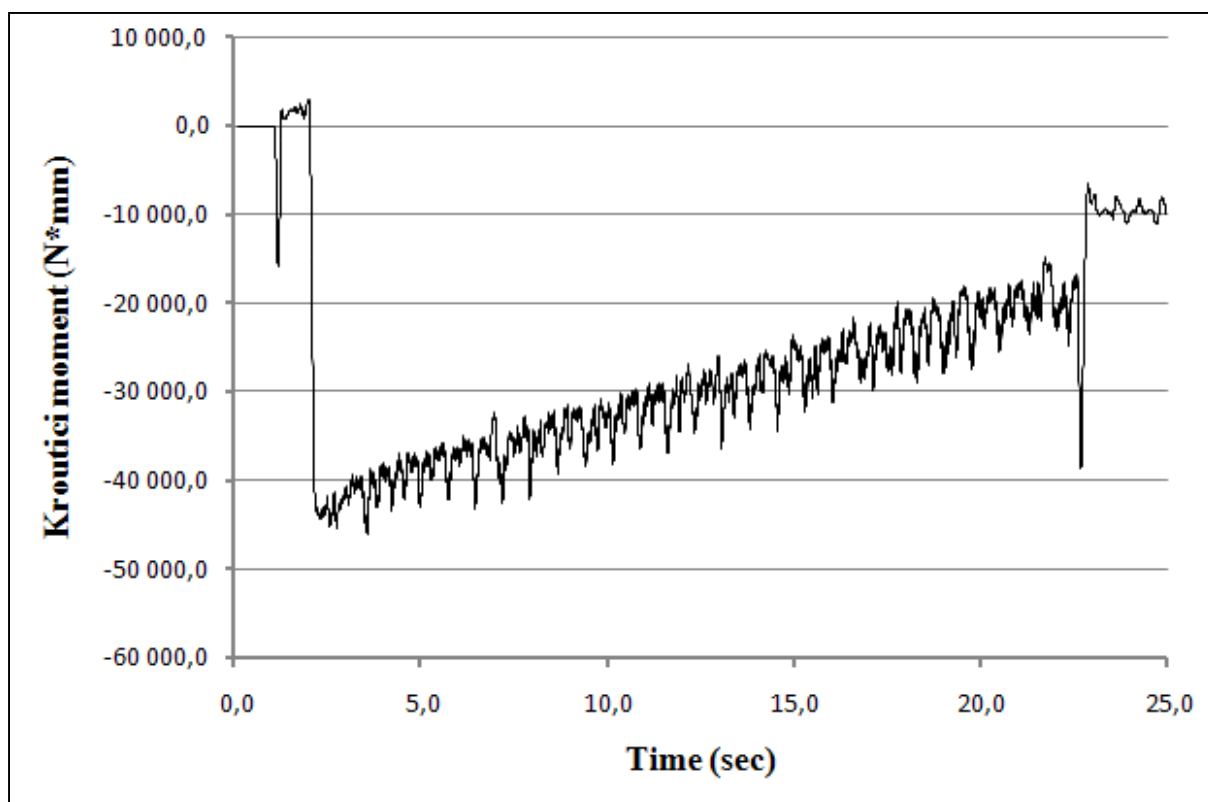
Obr. 5.2 – Schéma silového působení podvozku robotu na nájezdové rampě

Na základě podmínek rovnováhy sil a momentů a s přihlédnutím k součiniteli tření byly určeny velikosti sil v místech kontaktů kol s podkladem a velikosti krouticích momentů, jež by museli být přeneseny z pohonných jednotek na jednotlivá kola podvozku, aby se mohl robot pohybovat požadovanou rychlostí  $v_R$  po nájezdové rampě směrem vzhůru.

| Veličina           | $R_{Kz}$ [N] | $R_{Kp}$ [N] | $M_{Kp}$ [Nm] | $T_{Kz}$ [N] | $M_{Kz}$ [Nm] |
|--------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Vypočítaná hodnota | 1083,8       | 41,2         | 9,28          | 753,8        | 205,8         |

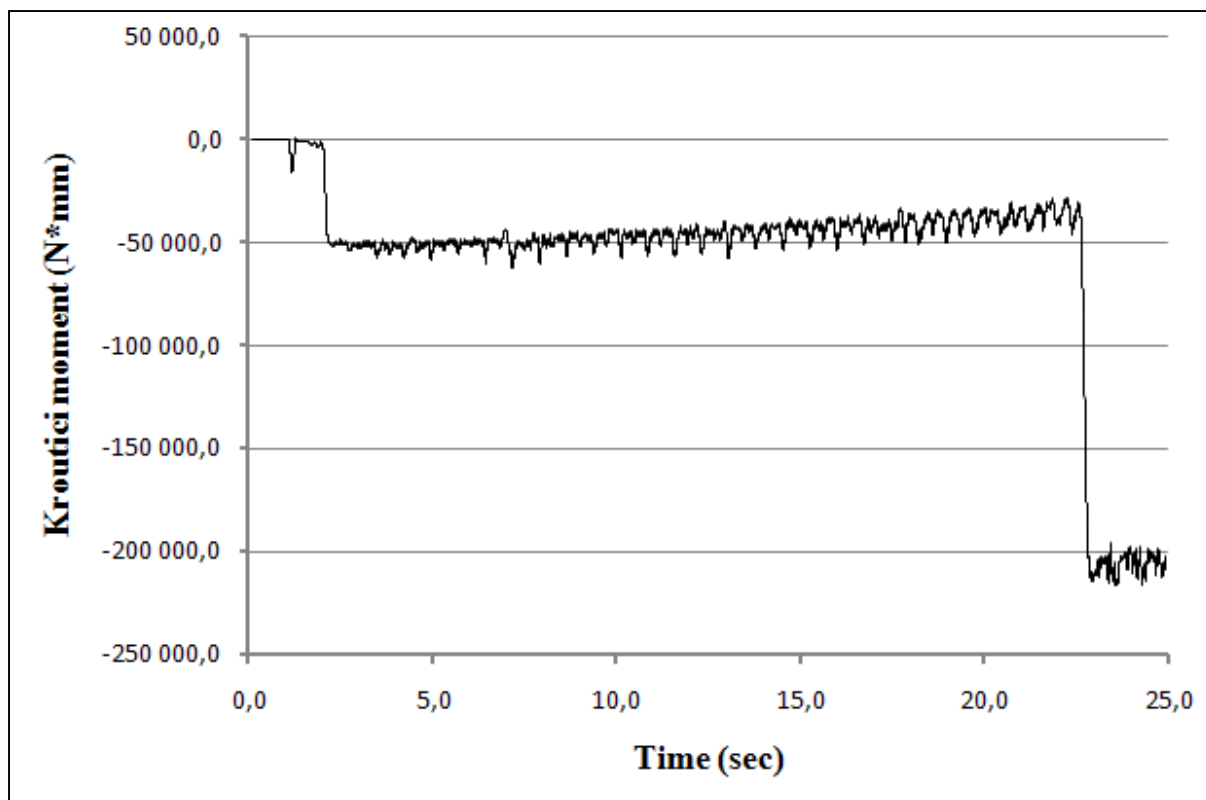
Tab. 5.1 – Hodnoty sil a momentů získaných za pomoci výpočtu

Na následujících obrázcích jsou naznačeny průběhy požadovaných krouticích momentů při najíždění na rampu. Aby bylo možné tyto výsledky získat, byl vytvořen algoritmus řízení jednotlivých pohonných jednotek, vycházející z principu momentového řízení využívaného u průmyslových robotů.



Obr. 5.3 – Předpokládaný průběh působení kroucího momentu  $M_{Kp}$  na přední kolo při najíždění skutečného robotu na rampu



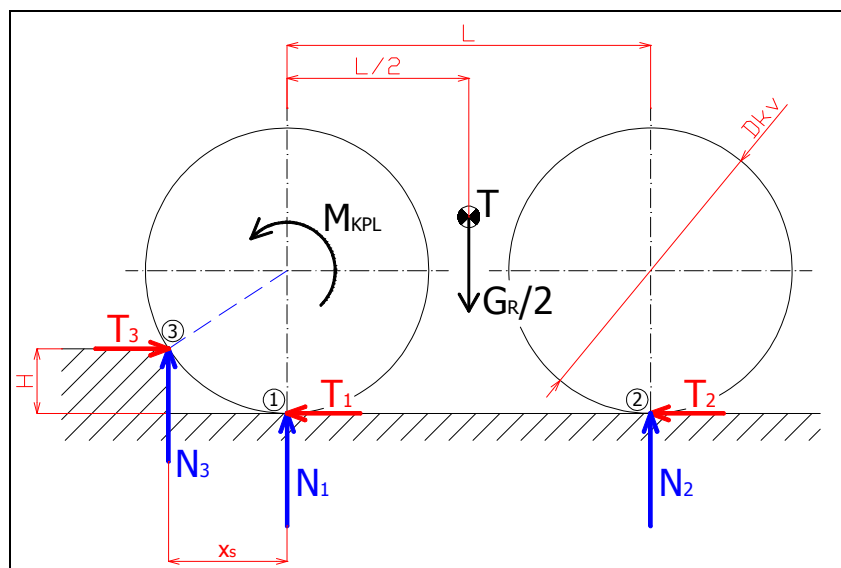


*Obr. 5.4 – Předpokládaný průběh působení kroucího momentu  $M_{Kz}$  na přední kolo při najíždění skutečného robotu na rampu*

Na základě porovnání hodnot uvedených v tab. 5.1 a průběhů působících kroucích momentů na obr. 5.3 a 5.4 během posledních dvou sekund simulace je možné konstatovat, že dosažené výsledky jsou si velmi podobné.

## **5.2. Analýza pohybu robotu při překonávání překážky typu kvádr**

V případě překonávání překážky typu kvádr, hraje důležitou roli nejen potřebný výkon pohonných jednotek, ale také koeficienty tření v místech kontaktů kol s podkladem, resp. překážkami. Na základě analýzy dostupných literárních zdrojů byly provedeny výpočty potřebných kroucích momentů při překonávání překážky o výšce  $H = 200\text{mm}$  v případě pohonu pouze předních, resp. pouze zadních kol robotu. Tyto hodnoty byly následně porovnány s výsledky simulací provedenými v prostředí softwaru MD ADAMS.



Obr. 5.5 – Schéma silového působení při překonávání překážky typu kvádr a pohonu pouze předních kol

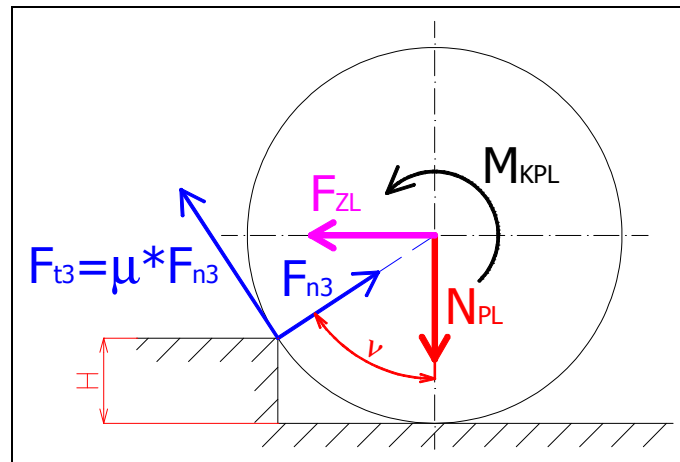
| Veličina                                  | Výsledek výpočtu | Výsledek simulace | Rozdíl uvedených hodnot v % |
|---|------------------|-------------------|-----------------------------|
| Normálová síla $N_2$                      | 878,0N           | 875,2N            | 0,01 <                      |
| Normálová síla $N_3$                      | 495,0N           | 504,5N            | 1,02                        |
| Krouticí moment na předním kole $M_{KPL}$ | 130 214,2Nmm     | 131 670Nmm        | 1,01                        |

Tab. 5.2 – Velikosti hledaných sil a krouticích momentů

Rozdíly mezi hodnotami získanými za pomoci výpočtů a simulace se pohybuje na úrovni 1%. Výsledky je tedy možné považovat za totožné. Byly provedeny také analýzy pro překážky o výškách 20, 40, 80, 100, 140, 180 a 220mm. Rozdíly mezi získanými hodnotami se pohybovaly do 5%. To je dáno možnostmi nastavení vazeb a kontaktů mezi jednotlivými částmi analyzovaného modelu.

Jak již bylo zmíněno výše, důležitou roli zde hraje také hodnota koeficientu tření mezi koly podvozku a v tomto případě překážkou. Na základě následujícího obrázku, resp.

z podmínky rovnováhy sil a podmínky statického tření je možné určit maximální výšku překážky, kterou by měl být schopen robot překonat [5.1], [5.2]:



Obr. 5.6 – Vliv statického tření na možnosti překonání překážky typu kvádr

Na základě velikostí sil  $F_{ZL}$  a  $N_{PL}$  a koeficientu tření  $\mu$  mezi kolem robotu a překážkou určíme nejprve velikost úhlu  $\nu$ :

$$\nu = \operatorname{arctg} \left( \frac{1 - \mu \cdot \frac{F_{ZL}}{N_{PL}}}{\mu + \frac{F_{ZL}}{N_{PL}}} \right) \quad (5.1)$$

V případě podvozku s pohonem pouze předních kol je síla  $F_{ZL} = 0\text{N}$ . Sílu  $N_{PL}$  určíme z předpokládané hmotnosti robotu  $m_R = 280\text{kg}$  a polohy těžiště robotu. Hodnota koeficientu tření  $\mu = 0,825$  odpovídá kontaktu pneumatiky z pryže a překážky z betonu. V případě pneumatiky s výrazným vzorkem může koeficient tření dosahovat hodnoty 1. Na základě těchto hodnot byly určeny velikosti úhlů  $\nu$ :

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| Koeficient tření $\mu = 0,825$ | $\nu = 39,523^\circ$ |
| Koeficient tření $\mu = 1$     | $\nu = 45^\circ$     |

Tab. 5.3 – Velikosti úhlů  $\nu$  v závislosti na koeficientu tření  $\mu$

Maximální výšku překážky  $H$  poté určíme pomocí vztahu:

$$H = \frac{D_{KV}}{2} \cdot [1 - \sin(90 - \nu)] \quad (5.2)$$

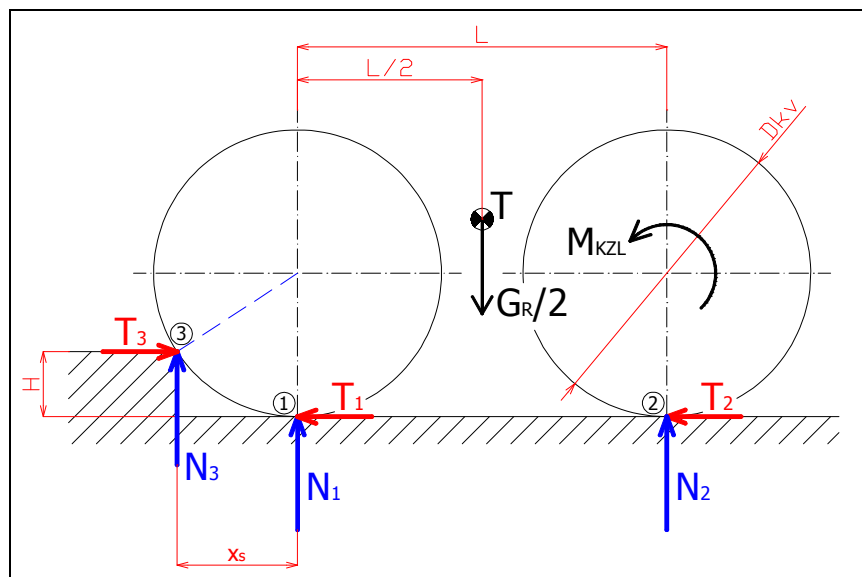
V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty maximální výšky překážky pro výše uvedené koeficienty tření:

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| Koeficient tření $\mu = 0,825$ | $H = 62,415\text{mm}$ |
| Koeficient tření $\mu = 1$     | $H = 79,96\text{mm}$  |

Tab. 5.4 – Maximální výška překážky  $H$  pro daný koeficient tření  $\mu$

Kritickým parametrem se v případě podvozku robotu s pohonem pouze předních kol stává koeficient tření mezi kolem a překážkou. I v případě použití pneumatik s výrazným vzorkem, kdy se koeficient tření může blížit hodnotě 1, je výška překážky maximálně 80mm. Také s přihlédnutím k zatížení předních kol podvozku při pohybu po nájezdové rampě je možné učinit závěr, že navržený čtyřkolový robot s pohonem pouze předních kol není příliš vhodný pro pohyb ve členitějším terénu.

V případě čtyřkolového podvozku s pohonem pouze zadních kol je možné postupovat obdobným způsobem, jako v předchozím případě. Na základě podmínek rovnováhy sil a momentů, vycházejících z následujícího obrázku, je možné určit potřebný krouticí moment, jenž musí být z pohonných jednotek přenesen na zadní kola podvozku robotu, aby došlo ke ztrátě kontaktu mezi předním kolem a podkladem v bodě 1.



Obr. 5.7 – Schéma silového působení při překonávání překážky typu kvádr a pohonu pouze zadních kol

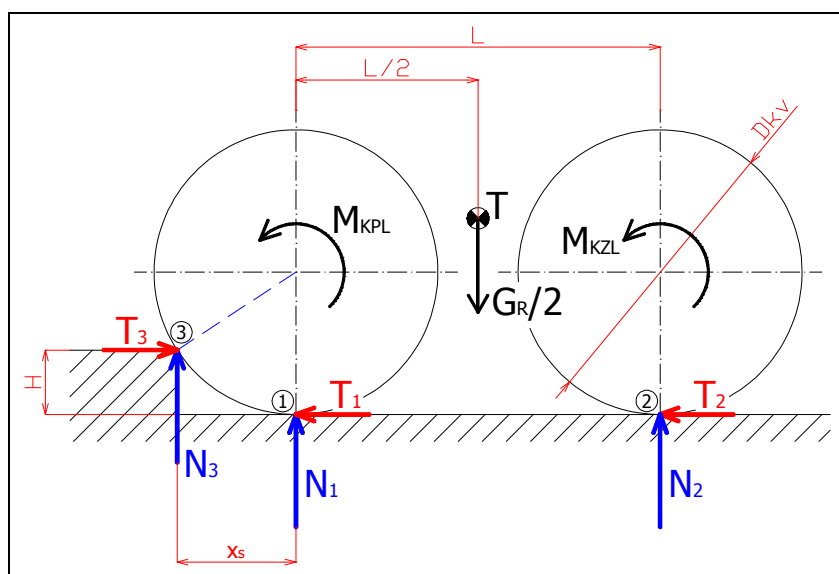
V následující tabulce jsou uvedeny výsledky výpočtů a simulace provedené pro překážku o výšce  $H = 200\text{mm}$  a jejich vzájemné porovnání:

| Veličina                                 | Výsledek výpočtu | Výsledek simulace | Rozdíl uvedených hodnot v % |
|--|------------------|-------------------|-----------------------------|
| Tečná síla $T_3 (= T_2)$                 | 1011,0N          | 995,0N            | 1,6                         |
| Normálová síla $N_2$                     | 1092,0N          | 1083,3N           | 0,01 <                      |
| Krouticí moment na zadním kole $M_{KZL}$ | 276 021Nmm       | 267 890Nmm        | 2,9                         |

Tab. 5.5 – Hodnoty vypočítaných sil a krouticích momentů

Potřebný krouticí moment v tomto případě již převyšuje hodnotu maximálního momentu, který mohou pohonné jednotky vyvinout. Na základě parametrů pohonných jednotek byla určena maximální výška překážky  $H = 174,4\text{mm}$ .

V případě čtyřkolového podvozku s poháněnými předními i zadními koly je určení potřebných krouticích momentů, jež musí vyvinout pohonné jednotky výrazně náročnější, než tomu bylo v předchozích případech. Pro určení závislosti mezi výškou překážky  $H$  a požadovanými krouticími momenty bylo nutné vztahy odvodit.



Obr. 5.8 – Schéma silového působení při překonávání překážky typu kvádr a pohonu předních i zadních kol

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky výpočtu pro překážku o výšce  $H = 200\text{mm}$  a jejich srovnání s výsledky simulace:

| <b>Veličina</b>                           | <b>Výsledek výpočtu</b> | <b>Výsledek simulace</b> | <b>Rozdíl uvedených hodnot v %</b> |
|---|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Krouticí moment na předním kole $M_{KPL}$ | 88 480Nmm               | 89 245,0Nmm              | 0,9                                |
| Krouticí moment na zadním kole $M_{KZL}$  | 88 480Nmm               | 90 472,4Nmm              | 2,3                                |

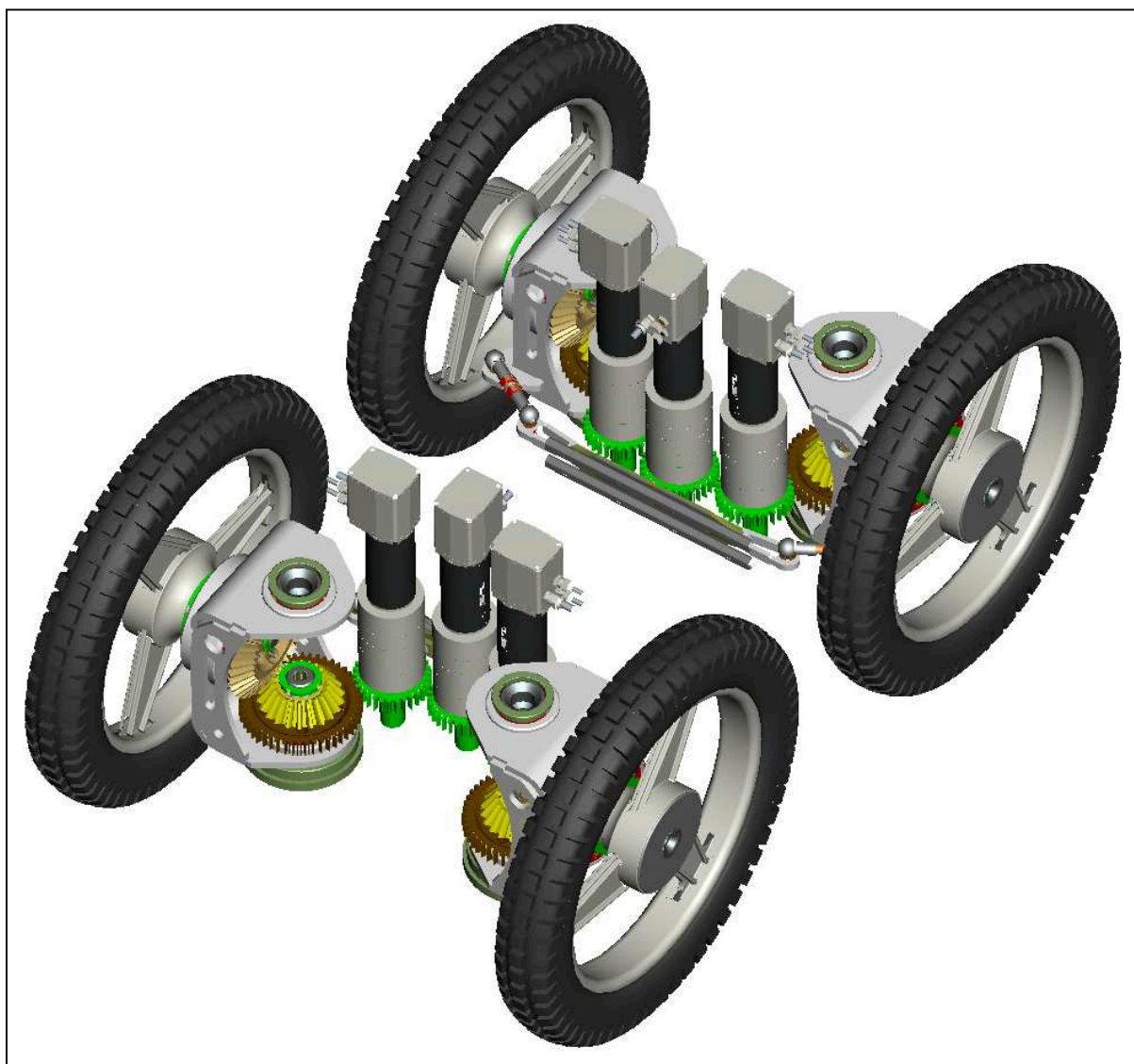
*Tab. 5.6 – Velikosti potřebných krouticích momentů  
a porovnání výsledků výpočtu a simulace*

Velikosti potřebných krouticích momentů, jež musí vyvinout pohonné jednotky, jsou znatelně nižší, než tomu bylo v předchozích případech. Rozdíly mezi hodnotami, určenými na základě výpočtů a simulace, se liší opět o jednotky procent.

Také v tomto případě byla provedena analýza kontaktů mezi koly robotu a podkladem, resp. překážkou z pohledu potřebných koeficientu tření. Při daných velikostech krouticích momentů je požadována hodnota tření na úrovni minimálně 0,324 v případě zadního kola a 0,76 v případě předního kola.

## 6. Konstrukční řešení přední a zadní nápravy podvozku robotu

Na následujícím obrázku je již konkrétní konstrukční návrh přední a zadní nápravy podvozku čtyřkolového robotu. A to včetně mechanismu natáčení kol navrženého dle principu Ackermannova řízení. Prostor mezi nápravami umožňuje uložení akumulátorů a komponent řídicího subsystému.



*Obr. 6.1 – Konstrukční řešení přední a zadní nápravy podvozku robotu*

Součástí práce jsou také možné konstrukční úpravy mechanismu řízení, vedoucí k odstranění nedostatků lokomočního subsystému např. při jízdě vpřed a zatáčením pouze za pomoci kol jedné nápravy. Tyto úpravy se ale z pohledu konstrukční složitosti, náročnosti řízení a pořizovacích nákladů ukázali jako neadekvátní vzhledem ke svým přínosům.

## 7. Výsledky, nové poznatky a praktické přínosy

Cílem této disertační práce bylo navržení a analýza lokomočního subsystému, neboli podvozku mobilního servisního robotu, určeného pro pohyb ve členitém terénu.

Návrh lokomočního subsystému probíhal v rámci řešení projektu *FT-TA3/014 Výzkum a vývoj speciálního víceúčelového zásahového vozidla*. Jeho parametry byly určeny na základě analýzy v současnosti používaných mobilních servisních robotů, určených pro zásahy v krizových situacích. Vzhledem k tomu, že tato varianta podvozku byla navrhována až jako druhá v pořadí, byl dán požadavek na využití konkrétních pohonných jednotek a kol z malého motocyklu. Výsledkem je návrh čtyřkolového podvozku mobilního servisního robotu.

Vzhledem k relativně nízkým výkonům vybraných pohonných jednotek bylo rozhodnuto o přiřazení vlastní pohonné jednotky každému z kol podvozku. Pro přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na kolo robotu byl navržen mechanismus eliminující nežádoucí jevy spojené s působením sil vznikajících při natáčení kol. Navržené konstrukční řešení umožnilo vytvoření podvozku spadajícího jak do kategorie *Auto*, tak do kategorie *Tank*. S tím také souvisí možnosti pohybu robotu ve členitém terénu. Navržené konstrukční řešení sebou přináší vyšší nároky na řídicí subsystém. Bylo tedy potřeba určit závislosti mezi požadovanou rychlostí a směrem pohybu robotu a výstupními otáčkami odpovídajících pohonných jednotek.

Při pohybu ve členitém terénu je velmi pravděpodobné, že se robot bude muset potýkat s překážkami různého typu. V této práci byla provedena analýza potřebného výkonu pohonných jednotek při překonávání překážek typu nájezdová rampa a kvádr. Analýza byla provedena dvojnásobným způsobem. Na základě podmínek rovnováhy sil a momentů a goniometrických funkcí a v prostředí simulačního softwaru MD ADAMS společnosti MSC.Software. V prvním případě bylo potřeba vytvořit zcela nový postup výpočtu potřebných výkonů pohonných jednotek pro podvozek s pohonem předních i zadních kol a překážku typu kvádr.

Aby bylo možné získat korektní výsledky z analýz prováděných ve výše zmíněném simulačním softwaru, byl nejprve vytvořen 3D model podvozku robotu. V případě skutečného podvozku robotu by byla kola opatřena pryžovými pneumatikami. V prostředí softwaru MD



ADAMS je sice možné nadefinovat model pneumatiky. Úroveň tohoto modelu ale není na takové úrovni, aby jej bylo možné využít pro požadovaný typ simulací. Proto bylo u 3D modelu nutné provést určitá zjednodušení a zvolit velmi nízkou rychlost pohybu robotu při překonávání daných překážek.

Za účelem analýzy podvozku robotu při překonávání překážek, bylo nutné vytvořit pokročilejší řídicí subsystém jednotlivých pohonných jednotek. Tento subsystém byl vystavěn na principu momentového řízení. Pro řízení pohonných jednotek skutečného podvozku robotu bylo počítáno s jednotkami EPOS. Vzhledem k nedostatku informací, potřebných k vytvoření řídicího subsystému, byly tyto jednotky nahrazeny proporcionálně integračním regulátorem a tyristorovým měničem.

Aby bylo možné porovnat výsledky výpočtů a simulací, bylo nutné z výpočtů vypustit některé koeficienty, např. účinnosti převodových mechanismů, z důvodu nemožnosti zavedení těchto parametrů také u modelu podvozku. Rozdíly mezi získanými výsledky z výpočtů a simulací se lišili v řádech jednotek procent.

Jedním z cílů práce byla analýza pohybu podvozku robotu po schodišti. Z důvodu nemožnosti nadefinování pneumatiky s reálnými vlastnostmi v prostředí simulačního softwaru MD ADAMS nebylo možné získat relevantní výsledky. Z tohoto důvodu byla provedena pouze kontrola možných kolizí jednotlivých částí podvozku a schodiště. Vzhledem k velmi specifickým požadavkům kladeným na možnosti definování kontaktu mezi pneumatikou a podkladem, resp. překážkami se nepodařilo nalézt vhodnější simulační software, než výše zmíněný produkt společnosti MSC.Software.

Závěr práce je věnován vlastnímu konstrukčnímu řešení přední a zadní nápravy podvozku robotu a to včetně mechanismu natáčení kol, vytvořeného dle principu Ackermannova řízení. Byly navrženy také alternativní konstrukční řešení mechanismu natáčení kol, řešící dílčí nedostatky původního mechanismu. Vzhledem k jejich konstrukční složitosti, nárokům na řídicí subsystém a energetické náročnosti bylo rozhodnuto o ponechání stávajícího řešení.

Problematika pohybu servisního robotu členitým terénem je velmi náročná vzhledem k množství druhů překážek, se kterými se můžeme při plnění daného úkolu setkat. Použití

simulačních softwarů typu MD ADAMS je možností, jak získat požadované výsledky při nižších nákladech na vývoj, než je tomu v případě testování na reálných mechanismech. Možnosti těchto softwarů jsou v současnosti dosti omezené. Je ale možné předpokládat, že se tato situace v budoucnu výrazným způsobemlepší. Poté bude možné provádět simulace pohybu robotu při překonávání tvarově výrazně složitějších překážek, než tomu bylo v této práci.

### **Nové poznatky a praktické přínosy:**

V práci jsou uvedeny postupy výpočtů potřebných výkonů pohonných jednotek mobilního robotu v okamžiku překonávání daných překážek. V případě překážky typu kvádr a pohonu předních i zadních kol bylo nutné vytvořit postupy zcela nové. Byl vytvořen řídicí algoritmus, potřebný pro provádění analýz pohybu čtyřkolového robotu při překonávání překážek v prostředí simulačního softwaru MD ADAMS. Pro přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na kolo robotu byl navržen mechanismus eliminující nežádoucí působení sil vznikajících při natáčení kol robotu.

## 8. Seznam použité literatury

### Kapitola: 1. Úvod

- [1.1] KÁRNÍK, L. *Nasazování servisních robotů do nestrojírenských oblastí*. 1st ed. Ostrava: VŠB-TU, 2010. ISBN 978-80-248-2318-8.

### Kapitola: 2. Přehled současného stavu řešené problematiky

- [2.1] KÁRNÍK, L. *Modelování a analýza servisních robotů* [online]. Ostrava: VŠB-TU, 2007 Available from: [http://robot2.vsb.cz/elekskripta/servisni\\_roboty/index.htm](http://robot2.vsb.cz/elekskripta/servisni_roboty/index.htm) .
- [2.2] *Armed Forces International* [online]. Grizzly-1 EOD Robot. Dostupné z WWW: <http://www.armedforces-int.com/article/grizzly1-eod-robot.html>>.
- [2.3] *PIAP-security engineering* [online]. IBIS - Pyrotechnical and Combat Robot. Dostupné z WWW: [http://www.antiterrorism.eu/combat\\_robot.php](http://www.antiterrorism.eu/combat_robot.php)>.
- [2.4] *Telerob-EOD* [online]. Army Technology. Dostupné z WWW: <http://www.army-technology.com/contractors/mines/telerob/>>.
- [2.5] *IRobot Ground Robots* [online]. IRobot Corporation. Dostupné z WWW: [http://www.irobot.com/gi/ground/510\\_PackBot](http://www.irobot.com/gi/ground/510_PackBot)>.
- [2.6] *Shenyang North Equipment Manufacture Co.* [online]. Dragon IV EOD Robot. Dostupné z WWW: <http://www.bfzbzz.com/ereadnews.htm>>.
- [2.7] *WM Management Group* [online]. Knight EOD ROV. Dostupné z WWW: <http://www.wmrobots.com/wmrobots/knighteodrobot.html>>.

### Kapitola: 4. Lokomoční subsystém mobilního servisního robotu

- [4.1] *Robotika.cz* [online]. Odometrie. Dostupné z WWW: <http://robotika.cz/guide/odometry/cs>>.

### Kapitola: 5. Analýza lokomočního subsystému z pohledu překonávání překážek

- [5.1] TANTICHATTANONT, P.; SONGSCHON, S.; LAKSANACHAROEN, S.: *Quasi-Static Analysis of a Leg-Wheel Hybrid Vehicle for Enhancing Stair Climbing Ability*. Sanya, China, 2007.
- [5.2] TAKAHASHI, M., YONEDA, K., HIROSE, S.: *Rough Terrain Locomotive of a Leg-Wheel Hybrid Quadruped Robot*. Proc. Of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, Florida. Pp. 1090-1095.

## 9. Seznam vlastních publikací a vědeckovýzkumných výsledků

### Patentové přihlášky a užitné vzory:

1. KOCICH, R., MIHOLA, M., MACHÁČKOVÁ, A., KLEČKOVÁ, Z. *Tepelný výměník pro kogenerační jednotku s mikroturbínou*. Úřad průmyslového vlastnictví. 2010. č. p.: 21319.
2. KOCICH, R., MIHOLA, M. *Výměník tepla*. PV 2009-815.
3. KOCICH, R., MIHOLA, M., MACHÁČKOVÁ, A., KLEČKOVÁ, Z. *Úhlové protlačování se zkrutem*. PV 2010-142.

### Články:

1. MIHOLA, M. *Prostředky a postupy návrhu servisního robotu pro uvedené činnosti*, Workshop 2006. Ostrava: katedra robototechniky FS VŠB-TU, 2006, sborník anotací str. 40, ISBN 80-248-0999-0.
2. BURKOVIČ, J., MIHOLA, M., KOT, T. *Robotization In Technology Of Machining*, Acta Mechanica Slovaca. Ostrava: katedra robototechniky FS VŠB-TU, 2006, s. 77-82, ISSN 1335-2393.
3. MACHÁČKOVÁ, A., KOCICH, R., KLEČKOVÁ, Z., MIHOLA M. *Nové technologie pro kogenerační jednotky*. Mechanical Engineering Journal, 2009, roč. XIII, č. 7, s. 164-165. ISSN 1335-2938.
4. MACHÁČKOVÁ, A., KOCICH, R., KLEČKOVÁ, Z., MIHOLA, M.: *Nové technologie pro kogenerační jednotky*. STROJÁRSTVO, MEDIA/ST s.r.o., 2009, s. 164-165.
5. KRYS, V., MIHOLA, M., NOVÁK, P.: *Manipulační subsystém mobilního robotu HERCULES (Manipulation subsystem of HERCULES mobile robot)*. Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series, VŠB - TU Ostrava, 2010, s. 221-229.
6. KOCICH, R., FIALA, J., SZURMAN, I., MACHÁČKOVÁ, A., MIHOLA, M.: *Twist-channel angular dressing: effect of the strain path on grain refinement and mechanical properties of copper*. Journal of Materials Science, 2011, ISSN 0020-2461.

### Příspěvky ve sbornících:

1. KRYS, V., KOT, T., BABJAK, J., MIHOLA, M., NOVÁK, P., SMUTNÝ, P.: *Manipulátor mobilního robotu HERCULES (The HERCULES Mobile Robot Manipulator)*. 11th International Workshop on Research and Education in Mechatronics, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 2010, s. 185-189. 978-80-248-2258-7.
2. MOSTÝN, V., NOVÁK, P., KOT, T., MIHOLA, M., KRYS, V.: *Simulační model manipulačního ramene servisního robotu (Simulation Model of Manipulating Arms of the Service Robot)*. Proceeding of Lectures of 3rd International Conference Modelling of the

Mechanics and Mechatronics Systems - MMaMS '2009, TU Košice, 2009, s. 312-318. 978-80-553-0288-1.

3. MACHÁČKOVÁ, A., KOCICH, R., KLEČKOVÁ, Z., MIHOLA, M.: *Likvidace NOx v energetických procesech dospalováním (NOx disposal in energetic processes by reburning)*. Proceedings of World Sustainable Energy Days 2009, O.Ö. Energiesparverband, 2009, s. 1-1.
4. MACHÁČKOVÁ, A., KOCICH, R., KLEČKOVÁ, Z., MIHOLA, M.: *Tvorba NOx při spalování plynného paliva - využití softwaru FLUENT (NOx formation on gaseous fuels burning - Fluent software utilization)*. Materials, Metallurgy and Interdisciplinary, Co-working, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 270-279. 978-80-248-1843-6.

### **Registrované funkční vzorky:**

1. MIHOLA, M. *Ohýbačka přepouštěcích trubiček*. 2010. ev. č.: 030/04-05-2010\_F.
2. KRYS, V., MIHOLA, M. *Pohonná jednotka manipulátoru*. 2010. ev. č.: 033/04-05-2010\_F.
3. KOCICH, R. MIHOLA, M. *Úhlové protlačování se zkrutem*. 2009. ev. č.: 014/22-10-2009.
4. KRYS, V., MIHOLA, M., BABJAK, J., KOT, T., NOVÁK, P., SKAŘUPA, J. *Robotický manipulátor*. 2009. ev. č.: 018/19-11-2009\_F.
5. KOCICH, R., MIHOLA, M., MACHÁČKOVÁ, A., KLEČKOVÁ, Z. *Tepelný výměník pro kogenerační jednotku s mikroturbinou*. 2009. ev. č.: 015/22-10-2009.

## **Přílohy**

### ***I. Abstract***

This thesis is focused on the design of a locomotive subsystem for a mobile service robot intended for movement on broken terrain. The introduction of the thesis is devoted to a description of the area affected by a crisis situation as well as to a description of a possible scenario considering an intervention with and without a mobile service robot. The following part of the work is an analysis of the current state of mobile service robots that are intended for crisis situation solutions. On the basis of this analysis, some parameters of an expected locomotive subsystem are determined. In accordance with the next requirements, a design of a four-wheel locomotive subsystem for a mobile robot is made. This subsystem is analyzed in view of the possibility for individual wheel steering (maneuverability). The next part of the thesis brings the design of a mechanism for torque transfer from the control section to the wheel of the robot. The next step consisted of a necessary power determination for drive units that is required for movement on a highway ramp. There are used relations resulting from the equilibrium conditions of forces and torques. Obtained values are consequently compared with results of simulation executed in software MD ADAMS. A similar procedure was executed for a step obstacle but with a more advanced algorithm based on the moment control principle utilization. The results of simulation are again compared to the solved ones. The analysis of robot movement upstairs is done only with a focus on a possible crash. The conclusion of the thesis summarizes the design of the front as well as the rear axle of the robot chassis. There is suggested a possible solution of the problem raised from the designed mechanism for wheel steering.

## II. Životopis

**Narozen:** 30.1. 1981 v Opavě, okres Opava

**Národnost:** Česká

**Funkce, pracoviště:** Odborný asistent na katedře robototechniky  
Fakulty strojní, VŠB-TU Ostrava

### Kvalifikace:

1994-1999: Studium na Střední průmyslové škole v Ostravě-  
Vítkovicích, obor "*Strojírenství se zaměřením na  
výpočetní techniku*".

1999-2004 Studium na VŠB-TU Ostrava, fakulta strojní, obor "*Výrobní systémy  
s průmyslovými roboty a manipulátory*". Obhajoba diplomové práce „*Návrh  
hybridního kolového a kráčejičího robotu*“ a získání titulu inženýr.

### Průběh praxe:

2006-2008 Vědecko-výzkumný pracovník na CPIT při VŠB-TU Ostrava.

2008-dosud Odborný asistent na katedře robototechniky Fakulty strojní VŠB-TU Ostrava.



## III. CURRICULUM VITAE

**Born:** 30.1. 1981 in Opava

**Nationality:** Czech

**Position:** Lecturer on Department of Robotics, Faculty of Mechanical Engineering,  
VŠB-TU Ostrava

### Education:

1994-1999 High School in Ostrava-Vítkovice Dept. "*machinery with respect on  
computer science*".

1999-2004 VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Machinery, Dept.  
“*Manufacturing systems with industrial robots and manipulators*”. Defence  
of diploma work “*Design of hybrid wheel and walking robot*” MSc degree.

### Professional Experience:

2006-2008 Research Fellow on CPIT by VŠB-TU Ostrava

2008-still Lecturer on Department of Robotics, Faculty of Mechanical Engineering,  
VŠB-TU Ostrava