

Koncepce mechatronického podvozku do těžkého terénu a jeho realizace na RC modelu Axial AX10

Bc. Martin Veselý

Vedoucí práce: Ing. Martin, Novák, PhD.

Abstrakt

Práce hodnotí v první části požadavky podvozků automobilů pohybujících se v těžkém terénu. Následně zkoumá výhody a nevýhody klasických konceptů řešení. Na základě těchto zjištění a s požadavky na funkčnost a realizovatelnost se snaží nalézt takové řešení, které by odmítlo kompromis mezi jednotlivými vlastnostmi, ale řešilo problém komplexně. Druhá část se zabývá realizací nalezeného řešení na RC modelu Axial AX10 a porovnáním předpokládaných vlastností s reálným chováním modelu.

Klíčová slova

Mechatronika, mechatronická tuhost, teréní automobil

1. Úvod

U moderních podvozků nákladních i osobních automobilů do těžkého terénu jsou kladeny vysoké nároky na prostupnost terénem, vysokou užitnou hmotnost, ale i na dobré jízdní vlastnosti při vyšších rychlostech na silnicích. Může se jednat o stroje pracující v lesích, v armádě či v zemědělství. Klasické podvozky nejsou schopny splnit tyto požadavky současně, jedná se vždy o kompromis. Proto se práce zabývá hledáním řešení tohoto problému pomocí aktivních členů v mechanické soustavě podvozku.

Druhá část je věnována realizaci na dálkově řízeném modelu v měřítku 1:10 Axial AX10 a řízením mechatronického podvozku mikroprocesorem 8051.

V závěru je pak zhodnocena míra dosažení požadavků na RC modelu.

2. Přeformulování úlohy do technických požadavků

Na podvozku se požaduje, aby se dokázal v daném terénu dostat z jednoho místa do druhého, aniž by došlo ke kolizi, uvíznutí, zapadnutí, či převrácení. Terénem jsou na mysli následující povrchy: les, skalnaté povrchy, písek, sníh, koryta řek, staveniště a jiné. Z technického hlediska se v první řadě jedná o schopnost přenést tečnou sílu mezi koly automobilu a povrchem, v druhé pak minimalizaci odporových sil valení kol. Na to mají vliv vlastnosti výše zmíněných povrchů. Významné vlastnosti povrchů jsou: sypkost a měkkost materiálu, členitost povrchu, podélný a příčný sklon povrchu. V následující podkapitole jsou proto tyto vlastnosti povrchu analyzovány a jsou k nim stanoveny potřebné technické požadavky.

2.1 Analýza vlastností povrchu terénů a určení k nim potřebným požadavků podvozku

2.1.1 Sypké a měkké materiály

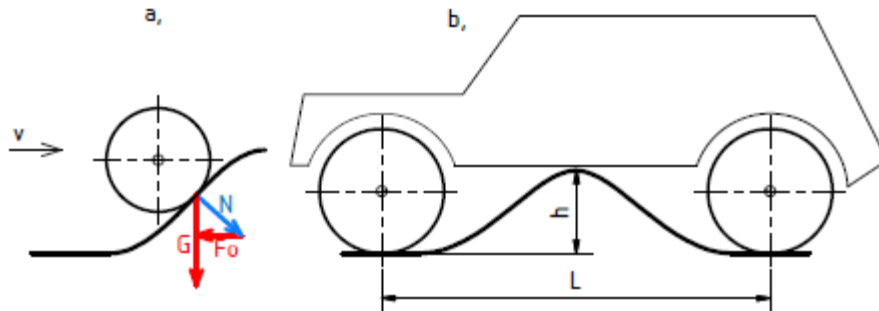
Sypké materiály jsou schopny přenést pouze omezenou reakční sílu v tečném směru v závislosti na normálové síle a styčné ploše. Není to způsobeno přímo třením mezi kolem a povrchem, ale odtržením jednotlivých vrstev materiálu.

U měkkých materiálů dochází k zaboření kola. Kolo se pak snaží ze zaboření neustále vyjízdet, čímž klesá normálová síla a roste síla odporová.

Podrobnějším zkoumáním těchto vlastností (přesahuje rámec tohoto článku) lze stanovit následující požadavek: Je zapotřebí, aby bylo co nejrovnoměrnější rozložení zatížení všech kol, čímž by u měkkých materiálů nedocházelo k zaboření kol a sypkých pak k překročení limitní tečné síly.

2.1.2 Členitost terénu

Rozumí se tím nerovnost povrchu (boule a díry). Při nájezdu kola na nerovnost klesá v závislosti na úhlu a zatěžovací síle normálová síla a tím i síla třecí a roste síla odporová. Při sjezdu naopak působí síla ve směru pohybu automobilu (záporná odporová síla) viz. obr. 1a.



Obr. 1 a. nájezd na nerovnost b. požadavek světlé výšky vozu

Z toho plynou následující požadavky: Při nájezdu kola na nerovnost by mělo být kolo co nejvíce odlehčeno a při sjezdu naopak co nejvíce zatíženo. Dále je tu požadavek na světlou výšku podvozku, aby automobil neuvízl na nerovnosti, která se nachází právě mezi přední a zadní nápravou (obr. 1.b). Nárok je kladen i na maximální zkřížení náprav.

2.1.3 Podélný a příčný sklon terénu

Při jízdě ve skloněném terénu dochází k většímu zatížení kol níže položených. Lze snadno dokázat (není obsahem článku), že na rozložení zatížení má vliv délka a šířka vozidla a výška těžiště vozidla.

Požadavky pak jsou: poloha těžiště (co nejnižší nad zemí nebo možnost ho přesouvat do stran) a tuhost podvozku vůči nápravám. Dále je nutné, aby nedocházelo k naklánění vlivem tíhové síly působící v těžišti (při bočním sklonu vozidla) a od kroutícího momentu od motoru (při jízdě do kopce vysoká odporová síla).

2.2 Požadavky při vyšších rychlostech na silnici

Požadavky jsou stejné jako u silničních automobilů. Jsou to zejména schopnost utlumit vyšší frekvence, tuhost podvozku a výška těžiště.

3. Vlastnosti klasických podvozků

Klasické koncepce jsou následující: Tuhé nápravy či polonápravy, na které je přenášena síla od rámu prostřednictvím tlumičů a pružin, jak lze vidět u nákladních automobilů. Dále pak koncept pevně spojené jedné nápravy s rámem a druhé kyvné (traktory). V obou případech jsou tato řešení kompromisem mezi světlou výškou a polohou těžiště, mezi rovnoměrným zatěžováním kol, tuhostí a velikostí maximálního zkřížení náprav.

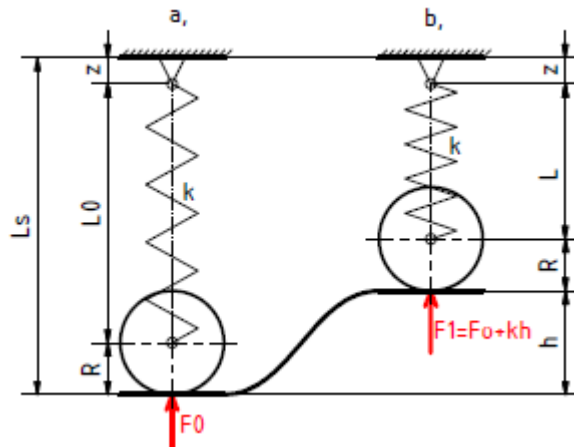
4. Návrh mechatronického podvozku

Cílem je nalézt řešení nedělající kompromisy mezi jednotlivými požadavky. Prostředek, kterým je tento problém řešen, je použití vhodných aktivních členů a jejich řízení. Řešení bylo

hledáno na zjednodušeném 1D "sky hook" modelu. Po jeho nalezení bylo převedeno zpět na 3D reálný model automobilu.

4.1 Hledání řešení na zjednodušeném modelu

Jako zjednodušený model byl zvolen 1D "sky hook" model (obr.2). Jedná se o kolo připevněné na pružině. Pružina je uchycena "k nebi".



Obr. 2. 1D sky hook model automobilu před a po nájezdu na nerovnost

Při nájezdu na nerovnost dojde ke stlačení pružiny a tím i k většímu zatížení kola. Jeden z požadavků je, že na kola na jedné nápravě mají mít stejné zatížení. Přeformulováním tohoto požadavku do 1D dostáváme, že přítláčná síla po i před nájezdem na nerovnost má být stejná.

$$F_0 = F_1 \quad (4.1)$$

Sílu F_1 lze vyjádřit jako

$$F_1 = F_0 + k \cdot h = F_0 + k \cdot (L_0 - L) = F_0 + k \cdot [(R + L_0 + z) - (R + L + z)], \quad (4.2)$$

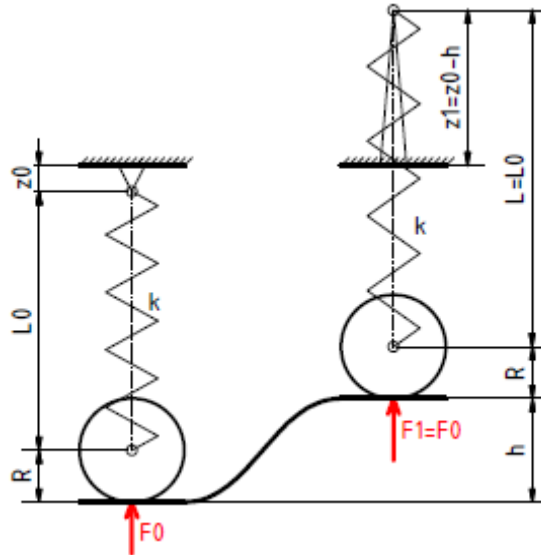
kde

R je poloměr kola,
 k tuhost pružiny,
 L, L_0, z délky.

Aby byly splněny oba vztahy, je třeba zvolit proměnný parametr (u reálného modelu pak aktivní člen). Lze zvolit mezi z -vzdáleností uchycení pružiny od "nebe" (u reálného modelu pak rámu automobilu), poloměrem kola R a tuhostí k pružiny. S přihlédnutím k technické realizovatelnosti byl zvolen jako proměnný parametr $z = z(x)$, kde x je trajektorie pohybu. Dosazením parametru $z(x)$ do rov.(4.1) a (4.2) dostáváme:

$$z_1 = z_0 - h \quad (4.3)$$

Důsledek (4.3) je znázorněn na obr.3.



Obr. 3. 1D sky hook model automobilu s aktivním členem

Dalším požadavkem při vyjíždění na nerovnost bylo, aby kolo bylo odlehčeno. Mělo by tedy platit:

$$F < F_0 \quad . \quad (4.4)$$

Řešením je:

$$z = z_0 + y \quad , \quad (4.5)$$

kde y je přídavné posunutí úchyty pružiny, které může být různé od výšky nerovnosti v daném místě. Dosazením (4.5) do (4.2) dostáváme:

$$F = k \cdot [L_0 - (L_0 + z_0 - h - z)] = k \cdot (h + y) \quad . \quad (4.6)$$

Po vyjádření závislosti síly na velikosti nerovnosti z (4.6) dostáváme:

$$\frac{F}{h} = k + \frac{F}{\left(h \cdot \left(\frac{h}{y} + 1 \right) \right)} = k + k_M \quad , \quad (4.7)$$

Člen k_M zvětšuje tuhost soustavy. Je závislý na proměnném parametru y a rozměrově odpovídá tuhosti, nazýváme jej proto machatronickou tuhostí. I když soustava obsahuje pružné členy, můžeme pomocí aktivních členů docílit, aby se její chování blížilo soustavě absolutně tuhé, absolutně poddajné či dokonce se zápornou tuhostí.

Pro správné řízení proměnného parametru $z(x)$ je zapotřebí určit výšku nerovnosti h v každém okamžiku. Budeme-li $z(x)$ řídit v diskrétním čase t a připustíme-li malou odchylku síly

$$F(t) = F(t - \Delta t) + \Delta F(t) \quad , \quad (4.8)$$

pak výšku nerovnosti lze spočítat

$$\Delta h(\Delta t) = \Delta l(\Delta t) \quad . \quad (4.9)$$

Po dosazení dostáváme

$$F(t) = F(t - \Delta t) + \Delta l(\Delta t) \cdot k \quad . \quad (4.10)$$

Parametr $z(x)$ můžeme řídit odměřováním délky pružiny v diskrétním čase. Přírůstek síly pak bude záviset na velikosti časového kroku (rychlosti vzorkování) a rychlosti změny délky pružiny.

4.2 Řešení na 3D modelu automobilu

Základní rozdíl mezi 1D a 3D modelem spočívá ve skutečnosti, že 3D model má 4 kola uchycená nikoliv k nebi ale k rámu. Prostřednictvím rámu pak kola mezi sebou interreagují. Tomu je třeba podřídit i algoritmus řízení. Řízeným parametrem zde bude uchycení pružin vůči rámu (u reálných aut řízeno hydraulicky). Snímanou veličinou může zůstat deformace pružin, ale mnohem výhodnější je měřit úhly natočení náprav.

5. Realizace na RC modelu Axial AX10

Jedná se o rádiem řízený model v měřítku 1:10. Je používán v soutěžích RC Crawler. Model je zobrazen na obr.4 v jeho typickém prostředí.

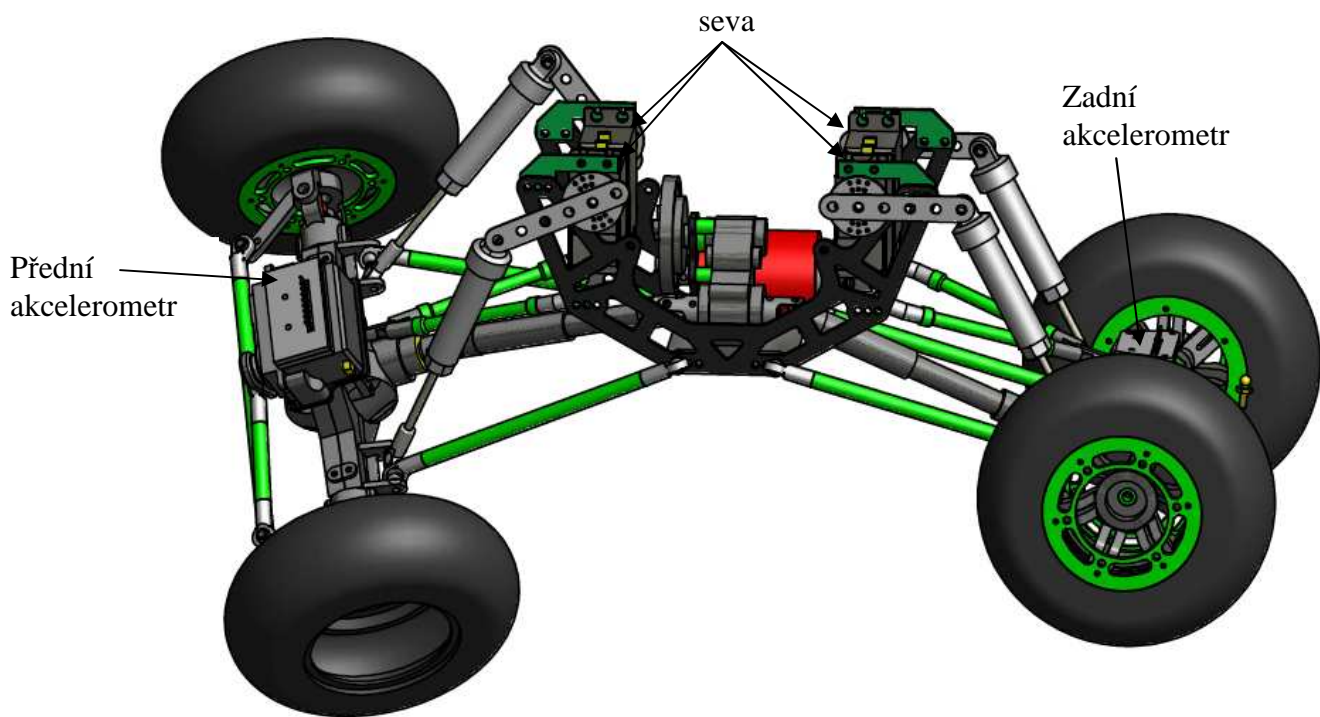


Obr. 4. RC model 1:10 Axial AX10

5.1 Prostředky řízení podvozku

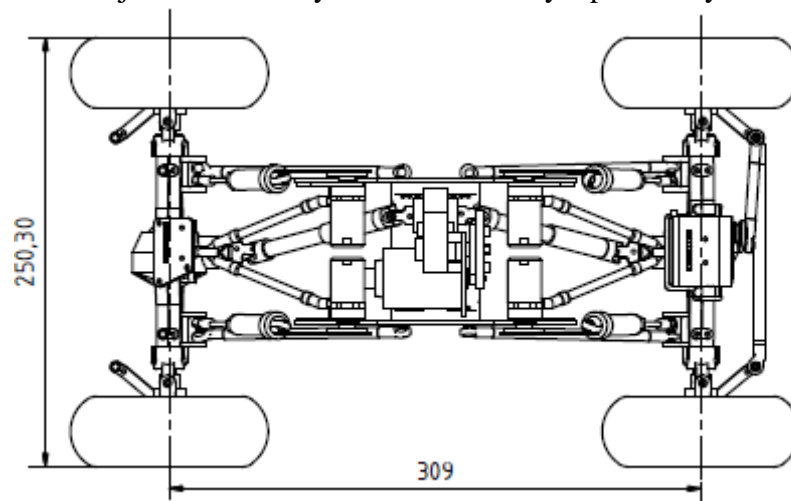
Jako aktivní členy (řízení polohy uchycení tlumičů) byli zvoleny modelářská serva HS-645MG. Pro určení naklonění náprav byly použity 3osé akcelerometry MMA7361L.

Uspořádání je zobrazeno na obr.5. Zpracování signálů pro serva z vstupních členů realizuje 8-bitový mikroprocesor F122 8051 od společnosti Siliconlabs.

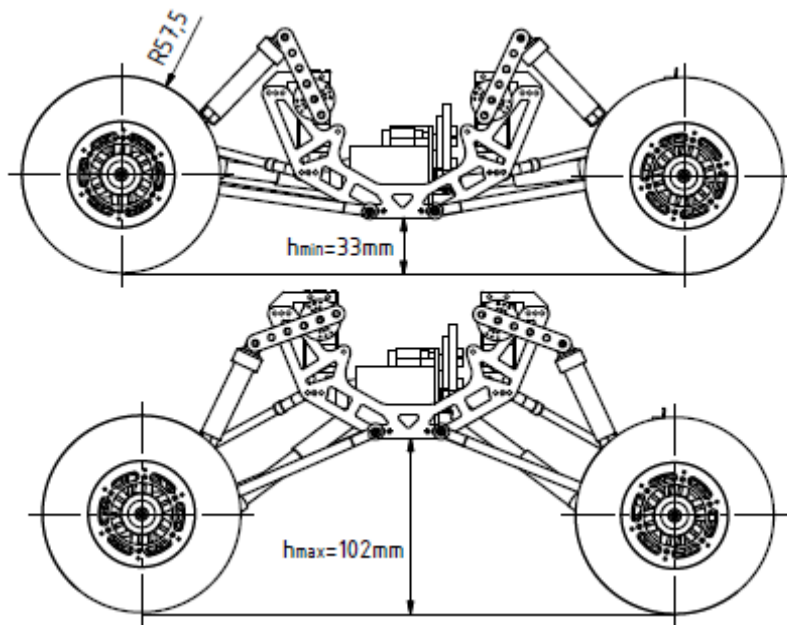


Obr. 5. Umístění serv a akcelerometrů na podvozku

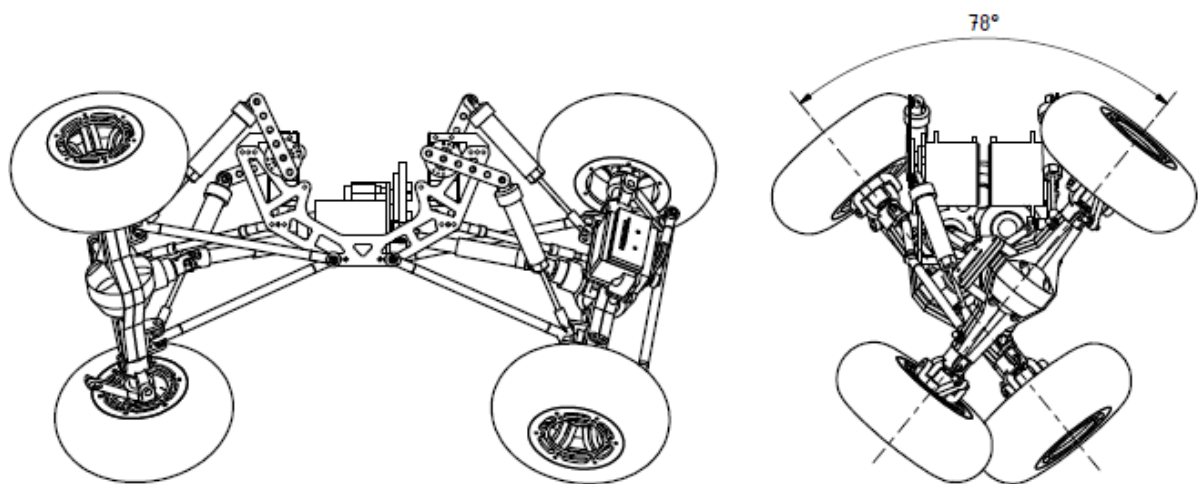
Na obr.6 ,obr.7 a obr.8 jsou znázorněny základní rozměry a parametry RC modelu.



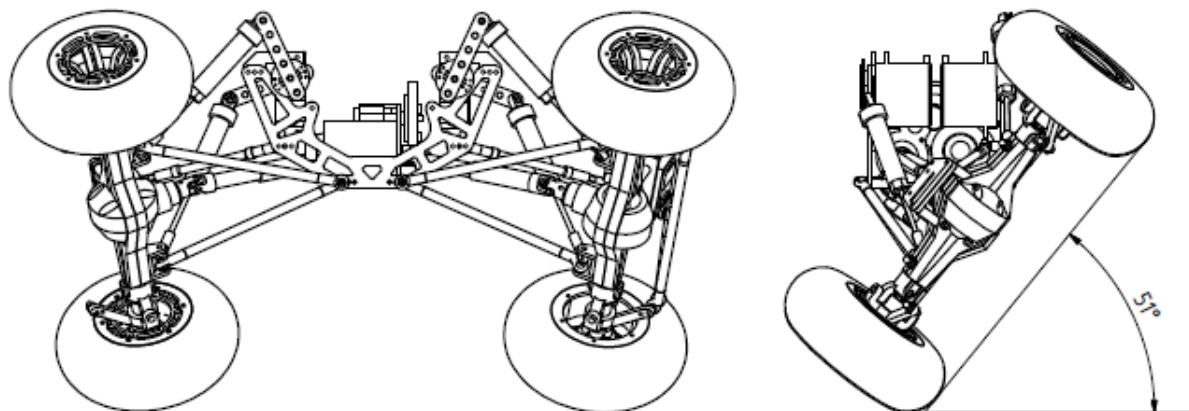
Obr. 6. Půdorys



Obr. 7. Bokorys s minimální a maximální světlou výškou



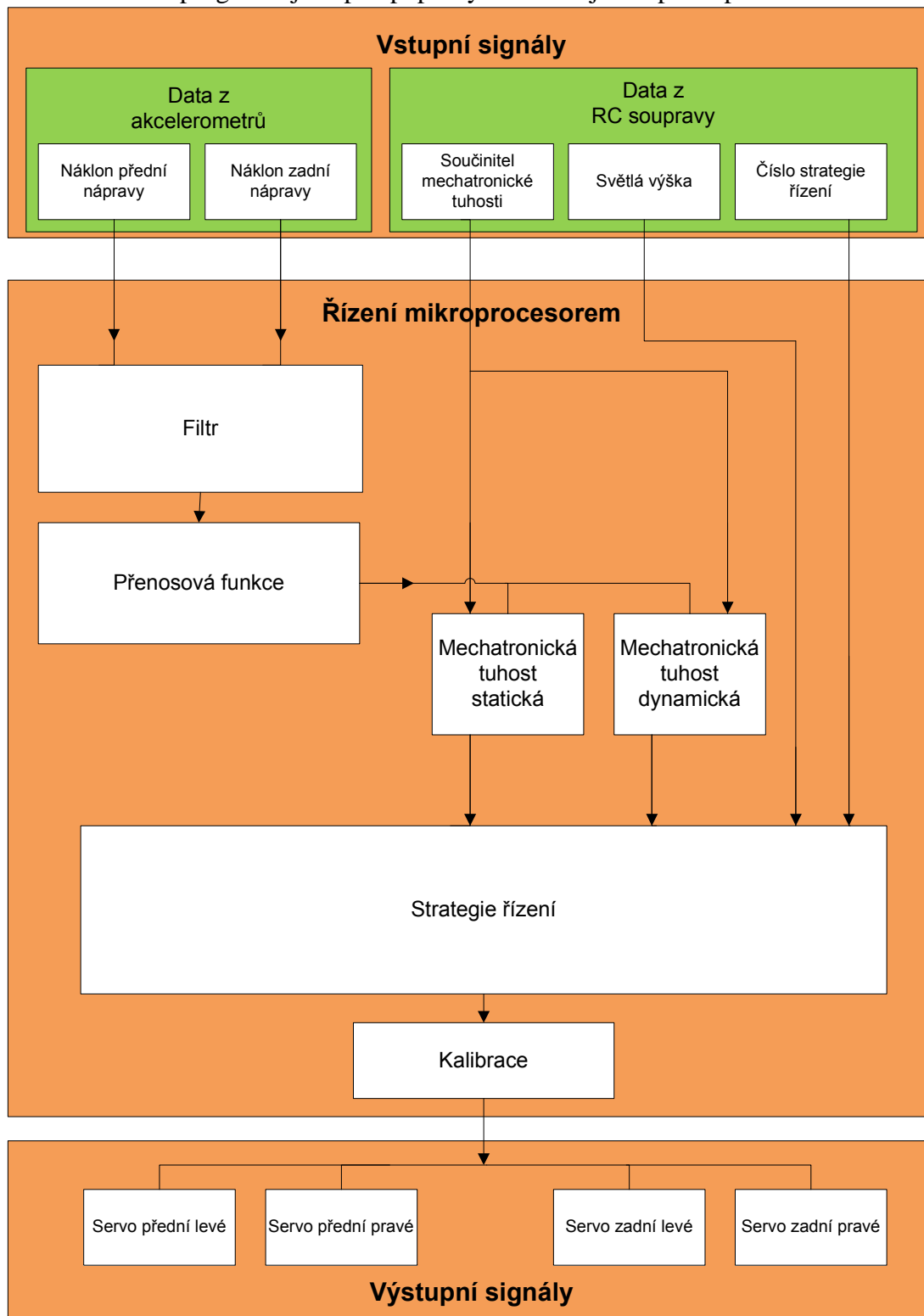
Obr. 8. Maximální zkrřížení



Obr. 9. Maximální přiklonění RC modelu ke svahu

6. Řídicí algoritmus

Algoritmus řízení byl naprogramován v jazyce C. Zjednodušený schéma řízení je na obr.10. Jednotlivé části programu jsou pak popsány v následujících podkapitolách.

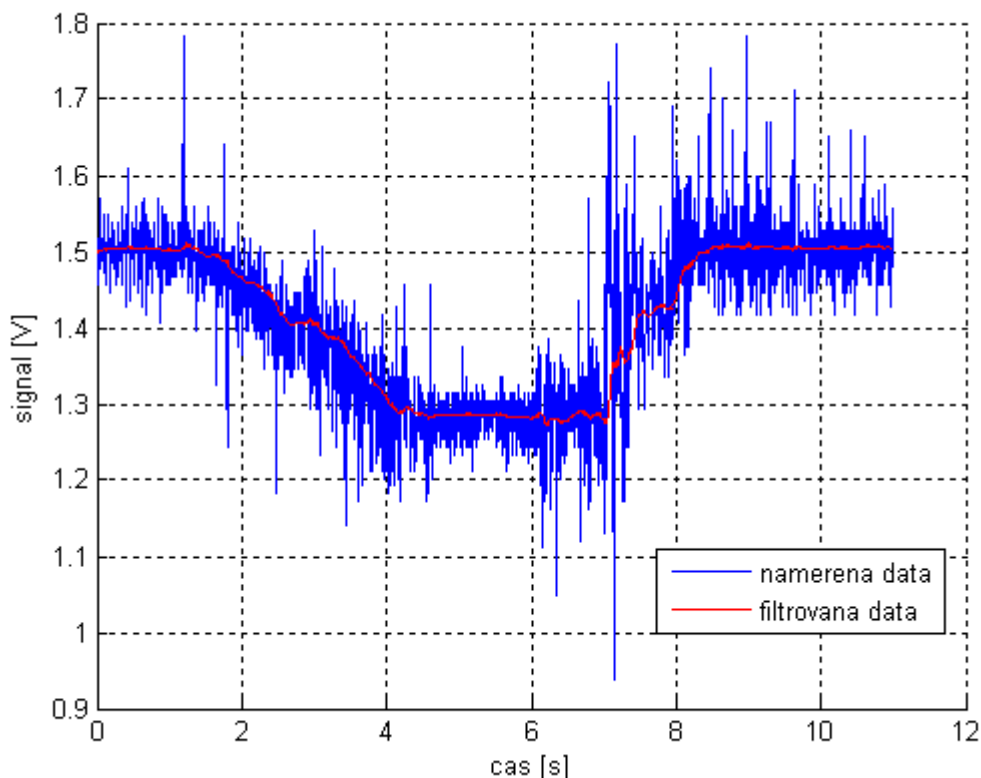


Obr. 10. Blokové schéma řídicího algoritmu

6.1 Filtr

Akcelometry slouží k měření zrychlení. Úhel nápravy je dán promítnutím tíhového zrychlení do daného směru souřadného systému spojeného s nápravou. Akcelometry však měří i

ostatní složky: vibrace od nerovností terénu a šum. Dalším problémem je kladná zpětná vazba. Jestliže akcelerometry naměří určité zrychlení a serva zpětně pohnou nápravou, je tento pohyb opět zachycen akcelerometry. Soustava se tak stává nestabilní. Vhodnější by bylo použít gyroskopy. Samostatné akcelerometry lze i tak úspěšně použít, bude-li signál dobře filtrován. Vychází se z předpokladu, že frekvence naklánění náprav (max. několik Hz) je menší nežli frekvence od šumu. Je proto zapotřebí navrhnout filtr s dolní propustí. V soustavě je nejprve začleněn nedokonalý analogový filtr v podobě RC článku. Poté je signál A/D převodníkem převeden do digitální podoby a následuje diskretní filtr. Pro návrh digitálního filtru byla naměřena data z akcelerometru umístěném na přední nápravě při nájězdu a sjezdu z nerovnosti stejnou frekvencí jako sampuluje mikroprocesor jeden signál. Frekvence vzorkování byla změřena na 285 S/s.



Obr. 11. Signál z akcelerometru při nájězdu a sjezdu z nerovnosti

Na filtr jsou kladeny požadavky na co nejmenší výpočetní náročnost a co nejmenší fázové zpoždění. Je dále nezbytné dodržet pokud možno co největší rychlost samplování aby při značném šumu nedocházelo k aliasingu. Z těchto důvodů byl zvolen filtr typu IIR. Koeficienty filtru byli nalezeny pomocí programu Matlab filtr designer. Na obr.11 jsou pak naměřená a filtrovaná data.

6.2 Přenosová funkce

Přenosová funkce je poměr výstupu ku vstupu soustavy. V řešeném případě závislost signálu pro servo ku signálu z akcelerometru taková, aby při libovolném natočení nápravy byl rám RC modelu stále v jedné rovině se zemskou. Protože v dokumentaci akcelerometrů není uvedena funkce určující závislost výstupního signálu na zrychlení a matematický model kinematiky RC modelu je pro 8-bitový procesor příliš složitý, byl přenos určen pomocí regrese vhodným polynomem v naměřených bodech z akcelerometru a k nim příslušné

hodnoty natočení serv odměřené z virtuálního 3D modelu. Data pro určení regrese jsou v tab.1.

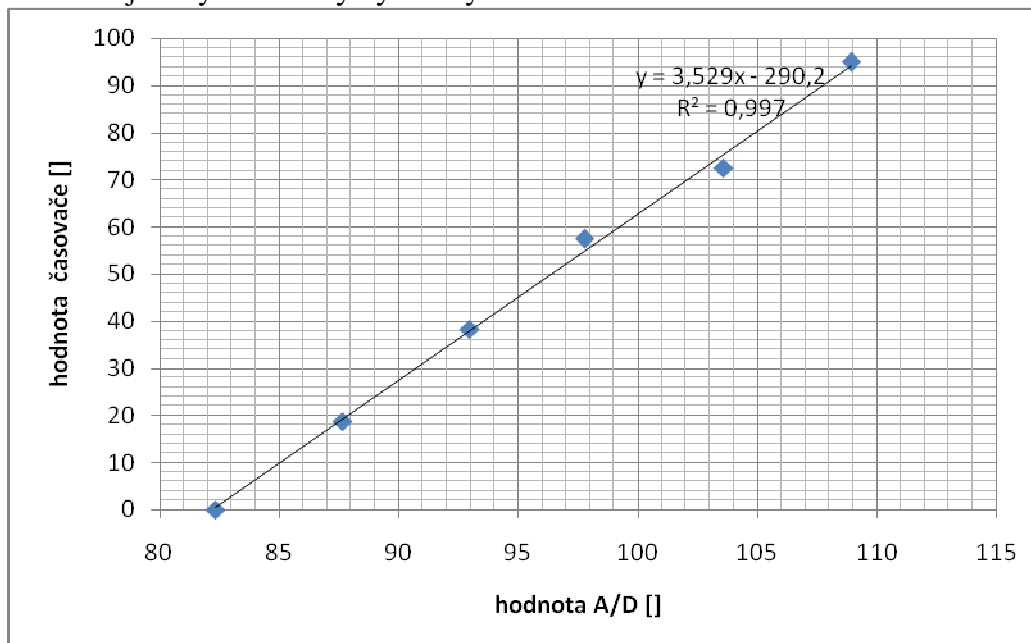
Tabulka 1.

úhel nápravy [°]	akcelerometer		servo		
	napětí [V]	hodnota A/D	uhel serva [°]	delka pulzu [ms]	hodnota časovače
0	1,55	82	0	1,50	0
10	1,65	88	7,99	1,59	19
20	1,75	93	16,35	1,68	38
30	1,84	98	24,48	1,77	57
40	1,95	104	30,92	1,84	72
50	2,05	109	40,49	1,95	95

Do přenosu vstupuje pak hodnota akcelerometru po A/D převodu a hodnota časovače mezi přerušeními.

Poz: u všech hodnot časovače je odečtena konstanta tak aby při nulovém úhlu nápravy byla i nulová hodnota časovače.

V obr.12 jsou tyto hodnoty vyneseny.



Obr. 12. Přenosová funkce

Z obr.12 je zřejmé, že nejlepší regresní funkcí je přímka.

6.3. Mechatronická tuhost statická

V reálném prostředí nastávají situace, kdy u zkřížených náprav potřebujeme změnit rozložení zatížení mezi koly, například nestabilitou či dírou v povrchu. Z důvodu menší výpočetní složitosti není počítáno přímo s mechatronickou tuhostí ale se členem přičítající se ke vstupnímu signálu. Tento člen je vypočítán jako

$$S = (N_p - N_z) \cdot f \quad , \quad (6.1)$$

kde

S je přídavný člen,

N_p náklon přední nápravy,

N_z náklon zadní nápravy a f je součinitel mechatronické tuhosti.

Rovnice (6.1) znamená, že jsme určili vzájemný úhel mezi nápravami a tento úhel zvětšili respektive zmenšili součinitelem f . Výstupní signály pro serva přední a zadní nápravy je pak vypočítán jako:

$$\begin{aligned} Y_p &= G \cdot (N_p + S) \\ Y_z &= G \cdot (N_z - S) \end{aligned} \quad (6.2)$$

kde Y_p je výstupní signál pro serva přední nápravy,
 Y_z výstupní signál pro serva zadní nápravy a
 G je přenos.

6.3. Mechatronická tuhost dynamická

V kapitole 2.1.2 byl určen požadavek, aby kolo vyjíždějící na nerovnost bylo odlehčeno a při sjezdu z nerovnosti naopak více zatíženo. Postup je stejný jako v kapitole 6.2 s rozdílem určením přídatného členu. Ten se stanovuje následovně:

$$S = [(N_p(t) - (N_p(t - \Delta t))) + (N_z(t) - (N_z(t - \Delta t)))] \cdot f \quad (6.3)$$

Hodnota zvednutí či poklesu kola se stanoví jako rozdíl náklonu jedné nápravy v rozdílných časech. Díky této funkci má pak vozidlo podstatně menší odpor v dopředném směru. Chování vozidla se dá pak přirovnat chůzi po schodech. Chceme-li se dostat na schod, nejprve přeneseme váhu na jednu nohu a druhou nohu zvedneme a položíme ji na schod, poté váhu přeneseme zpět. V našem případě rozhoduje o velikosti odlehčení zvedaného kola a zatížení kola druhého součinitel f . V obou případech lze součinitel f řídit vysílačem RC soupravy.

6.3. Strategie řízení

V tomto bloku jsou samotné algoritmy řízení. Je zde režim pro jízdu na silnici, režim se statickou a dynamickou tuhostí a řízení světlé výšky vozu. Dále se zde provádějí korekce zohledňující limity serv a samotného zavěšení náprav.

7. Testování

Testování jízdních vlastností probíhalo v přírodní rezervaci Divoká Šárka. Zkoumalo se chování RC modelu na různých terénech a zkoušeli se různé strategie řízení při projíždění stejného úseku. Chování bylo také porovnáváno v režimu bez řízení podvozku.

V nejextrémnějších situacích se ukázali jasné východy mechatronického podvozku, protože dokázal kritická místa projet, kdežto neřízený podvozek nikoliv. Ukázala se však i nevýhoda. Při výjezdech do kopce je vysoký kroutící moment motoru. Ten pak nadzdvíhal přední kolo. To muselo být kompenzováno zvýšením statické mechatronické tuhosti. Pro odstranění této chyby, bude třeba řídit mechatronickou tuhost též podle proudu tekoucího do motoru.

Fotografie z testování jsou na obr.11 a 12, video pak umístěno na adrese <http://www.youtube.com/watch?v=SwZ2DiXzI7s&feature=youtu.be> .



Obr. 11. Testování RC modelu



Obr. 12. Testování RC modelu

7. Závěr

V první části práce byly nalezeny vlastnosti podvozků automobilů, které ovlivňují průchodnost automobilu terénem. Analýzou těchto vlastností pak byl vytvořen koncept mechatronicky řízeného podvozku do těžkého terénu.

Druhá část se pak zabývá realizací konceptu na RC modelu 1:10 Axial AX10. Pro mikroprocesor, řídící podvozek, byl vytvořen program v programovacím jazyce C. Testováním pak byli prokázány tyto vlastnosti. Povozeček je schopen za jízdy měnit světlostou výšku vozu. Je schopen aktivně měnit rozložení zatížení kol při zkřížení náprav a to buď řízením koeficientu tuhosti, nebo rychlostí zdvihání kola. Při jízdě v příčném svahu podvozek posouvá těžiště směrem ke svahu. Má možnost vypnutí systému řízení, pro jízdu při vyšších rychlostech na silnicích.

Seznam symbolů

F	síla	[N]
k	tuhost pružiny	[N/m]
t	čas	[s]
l	délka pružiny	[m]

Seznam použité literatury

- [1] Stejskal V., Brousil J., Stejskal S.: Mechanika III. Vydavatelství ČVUT v Praze
- [2] Valášek M. a kol.: Mechatronika. Vydavatelství ČVUT v Praze, 1996.