

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Elektronický diferenciál pro studentský experimentální elektromobil

Oto Gürtler

Bakalářská práce

2009

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Oto GÜRTLER**

Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**

Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**

Název tématu: **Elektronický diferenciál pro studentský experimentální elektromobil**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) rozbor mechanického a elektronického diferenciálu, analýza a simulace průjezdu vozidla zatáčkou, návrh elektronických struktur řízení
- 2) návrh řešení elektronického diferenciálu s momentovou regulací motoru
- 3) návrh elektronického diferenciálu s otáčkovou regulací motoru
- 4) ověření navržených struktur

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Koreis, Josef - Řízení distribuce výkonu na poháněná kola vozidla
Vlk, František - Převodová ústrojí motorových vozidel
Skalický, Petr - Procesory řady 8051
Koreis, Josef - Modelování přenosu výkonu a informace
Oetter, Juraj - Výkonová elektrotechnika pre elektrické pohony
Zeman, Karel; Peroutka, Zdeněk; Janda, Martin - Automatická regulace pohonů s asynchronními motory

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Černý

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

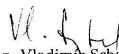
Datum zadání bakalářské práce: **18. prosince 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. února 2009

Čestné prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 27. 5. 2009

Oto Gürtler

Poděkování

Děkuji své rodině za podporu během studia. Rád bych poděkoval panu Ing. Černému za cenné rady a podmínky při zpracování této práce.

Anotace

Úkolem této bakalářské práce je stanovit požadavky a navrhnout strukturu elektronického diferenciálu pro vozidla, která mají jednotlivá kola hnané nápravy poháněna samostatně řízenými elektromotory. V práci jsou odvozeny vztahy pro otáčky kol v zatáčce a moment dodávaný na kola v průběhu zatáčení. Odvozené vztahy jsou převedeny do názorných grafů pomocí tabulkového editoru.

V práci je vysvětlena funkce mechanického diferenciálu a je porovnán se systémem dvou samostatně řízených motorů.

Podle odvozených vztahů pro otáčky a moment v průběhu zatáčení jsou realizovány programy pro mikropočítač řady z řady x51, který zajišťuje rozdělení výkonu na kola při zatáčení. Dále je vyřešeno snímání vstupních veličin a jejich převod na číselnou hodnotu.

Klíčová slova

Průjezd vozidla zatáčkou, mechanický diferenciál, elektronický diferenciál s řízením momentu, elektronický diferenciál s řízením úhlové rychlosti otáčení kol, vozidlo s samostatně řízenými motory, MMS.

Annotation

This work solves requirements and proposes structure of an electronic differential for vehicles with wheels powered by two independent regulated electric motors. Relations for angular speed of wheels and torque of wheels when cornering are derived in this work. Derived relations are tabulated into graphs, using a table editor.

In work is explained function of a mechanical differential and compares it with MMS system.

Using derived relations are realized programs for microcontrol from x51 family, which works as an electronic differential, distributed power to wheels when vehicle cornering. Sensing of input values is solved too, input values are converted into binary code.

Keywords:

Cornering with vehicle, mechanical differential, elektronical differential with torque control, elektronical differential with control of wheels angular speed, multi machine system, MMS.

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod..... | 9 |
| 1 Parametry experimentálního elektromobilu a požadavky na jeho funkci. | 11 |
| 2 Jízda vozidla v přímém směru | 13 |
| 3 Analýza průjezdu vozidla zatáčkou | 15 |
| 3.1 Úhlové rychlosti otáčení kol | 15 |
| 3.2 Moment dodávaný na jednotlivá kola..... | 19 |
| 4 Simulace otáčení kol v zatáčce za použití tabulkového editoru | 21 |
| 5 Mechanický nápravový diferenciál | 23 |
| 6 Porovnání mechanického diferenciálu a MMS | 27 |
| 7 Možnosti realizace elektronického diferenciálu pro dva samostatně řízené motory..... | 29 |
| 8 Elektronický diferenciál s momentovým řízením | 30 |
| 9 Elektronický diferenciál s řízením otáček kol..... | 32 |
| 10 Realizace snímání a obvodů pro elektronický diferenciál | 39 |
| 10.1 Snímání požadavku na moment nebo rychlost..... | 39 |
| 10.2 Snímání úhlu natočení řídítek | 39 |
| 10.3 Realizace a výběr A/D převodníku..... | 40 |
| 10.4 Odesílání hodnoty do měničů | 42 |
| 11 Praktická realizace..... | 44 |
| 11.1 Realizace testovacího přípravku s AD | 44 |
| 11.2 Přípravek s mikroprocesorem | 45 |
| 12 Ověření navržených struktur..... | 47 |
| Závěr..... | 48 |
| Vysvětlivky symbolů použitých v vzorcích..... | 50 |
| Použité zkratky | 51 |
| Seznam literatury | 52 |
| Seznam tabulek | 53 |
| Seznam obrázků..... | 54 |
| Seznam grafů | 55 |
| Seznam příloh..... | 56 |

Úvod

V osobní dopravě je dominantním prostředkem spalovací motor, ten je ve vozidle umístěn zpravidla pouze jeden a rozvedení točivého momentu na kola je provedeno pomocí mechanického diferenciálu. Pokud použijeme místo spalovacího motoru více elektromotorů, vozidlo lze zkonstruovat bez mechanického diferenciálu. Použití elektromotorů však v minulosti naráželo na překážky jako je obtížná regulovatelnost a nutný stálý příkon elektrické energie.

S rozvojem polovodičů lze realizovat frekvenční měniče pro regulaci asynchronních a synchronních motorů a stejnosměrné měniče pro regulaci stejnosměrných motorů. Pomocí mikroprocesorové techniky a vhodných snímačů lze dnes u všech elektromotorů dobře regulovat jak točivý moment¹ tak rychlost otáčení rotoru.

Výhodou elektromotorů proti spalovacímu motoru je jednoduchost, nulové emise škodlivých plynů, nižší hluk, vysoká účinnost, možnost rekuperace², široký rozsah otáček i momentu, a tedy možnost pracovat bez převodovky. Elektromotor také nepotřebuje žádné provozní kapaliny³, olejová náplň spalovacího motoru je opět značnou zátěží pro životní prostředí.

Existují i tzv. diesel-elektrické systémy, které se skládají z spalovacího motoru který pohání generátor a vyrobenou elektrickou energií jsou pak napájeny trakční elektromotory. Tyto systémy se využívají např. u těžkých strojů, těžkých nákladních vozidel a železničních trakčních vozidel, z důvodu snadnější regulovatelnosti elektromotoru, kdy nám stačí jeden převod, proti nutné převodovce s několika převodovými stupni pro spalovací motor.

U elektromobilů na baterie i u diesel-elektrického pohonu je často použita koncepce vozidla nazývaná MMS – Multi machine system (Obr. 1). Tato koncepce

¹ Dále píší jen „moment“.

² Při brzdění elektromotorem je vzniklou elektrickou energií dobíjen akumulátor. Energie tak může být opět využita.

³ Některé výkonné elektromotory ale potřebují okruh s chladicí kapalinou.

spočívá v použití více motorů, přičemž každý motor je řízen samostatně [1]. MMS je použito i u studentského experimentálního elektromobilu, pro který má být realizován elektronický diferenciál. Ten bude pracovat jako nadstavba dvou samostatně řízených výkonových měničů.

Použití řešení uspořádání vozidla jako MMS proti klasickému uspořádání s jedním motorem a mechanickým diferenciálem je výhodnější, protože výroba mechanického diferenciálu je nákladná, je nutná olejová náplň, která zatěžuje životní prostředí a ztráty v mechanických převodech snižují účinnost pohonu.

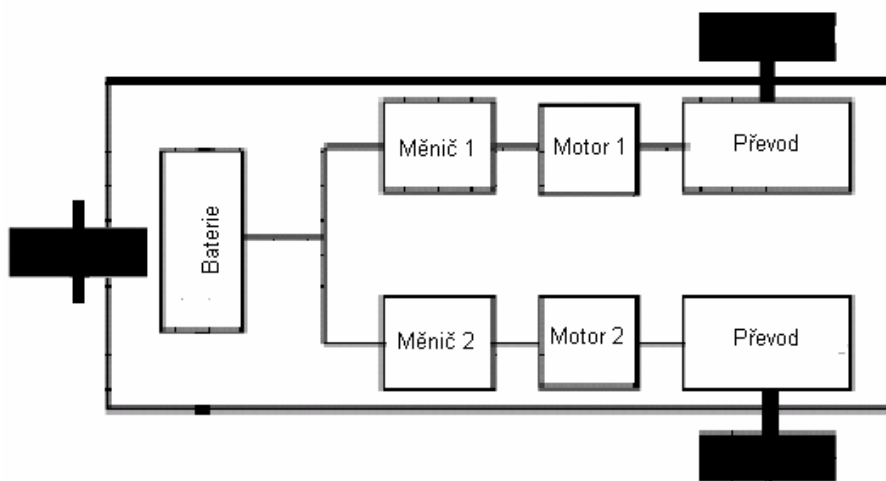
Tato bakalářská práce má za úkol stanovit požadavky na otáčky a moment kol při průjezdu zatáčkou. Dalším důležitým cílem je určit veličiny, které je nutné snímat a navrhnout způsob jejich snímání. Tyto veličiny budou zpracovány podle sestavených algoritmů a výsledné hodnoty je třeba přenést do podřízených měničů. Součástí práce je analýza a návrh řídicí struktury a algoritmů, posouzení vlastností různých možností řešení a následné sestavení elektronického obvodu a ověření jeho funkčnosti.

První část práce je věnována teoretickému rozboru. Je v ní popsána jízda vozidla, jak v přímém směru, tak v zatáčce. Odvozené vzorce jsou pak v tabulkovém editoru natabelovány a zobrazeny v grafech. Pro porovnání řešení s dvěma samostatně řízenými motory a řešení s jedním motorem je vysvětlena i funkce mechanického diferenciálu.

V druhé části jsou navrženy způsoby řízení jednotlivých motorů, je porovnána výhodnost jednotlivých typů řízení podle typu elektromotoru. Vztahy odvozeny v teoretické části jsou dále upraveny aby mohly být algoritmizovány pro mikroprocesor. Výsledkem práce jsou programy pro mikropočítač, který v navrženém zapojení tvoří samotný diferenciál. Samotné kódy programu a kompletní schémata i s návrhy plošného spoje jsou v příloze na konci práce, respektive na přiloženém CD. Zapojení bylo ověřeno v laboratoři a také v softwarovém simulátoru mikroprocesoru.

1 Parametry experimentálního elektromobilu a požadavky na jeho funkci

Studentský experimentální elektromobil, pro který má být navrženo řešení elektronického diferenciálu je přestavěné jízdní kolo na elektrickou tříkolku. Na rámu jsou umístěny dva elektromotory, pohánějící kola přes planetovou a řetězovou převodovku kola. Motor bude regulován výkonovým měničem. Oba měniče jsou napájeny z společné baterie (Obr. 1).



Obr. 1 Uspořádání elektromobilu – MMS [1]

Vozidlo je v tuto chvíli vybaveno stejnosměrnými motory s permanentními magnety. Předpokládá se, že budou vyzkoušeny i asynchronní motory. Jsou použity motory s vyššími otáčkami, které jsou zpřevodované „do pomala“.

Základní parametry elektromobilu (tabulka 1) byly zadány. Rám vozidla je použit z tříkolky pro tělesně postižené od firmy Loped v.o.s.. S celkovým sestavením a jízdními zkouškami se počítá až bude hotový elektronický diferenciál a především výkonové měniče, které jsou předmětem bakalářské práce jiných studentů.

| Parametr | Hodnota |
|-----------------------------|----------------|
| Rozvor | 1,01 m |
| Rozchod | 0,51 m |
| Celkový převod ⁴ | 1 : 22,7 |
| Výkon | 2 x 600 W |
| Maximální rychlost | 32 km/h |
| Max. otáčky elektromotorů | 3600 ot/min |

tabulka 1 Parametry experimentálního elektromobilu

Určení vozidla je ekologická a ekonomická doprava po městě. Vzhledem k své maximální rychlosti by se mělo jednat především o konkurenci jízdnímu kolo, případně malým skútrům. Koncepce „tříkolky“ byla zvolena proto, aby elektromobil byl využitelný i pro starší osoby a jízda na něm byla bezpečnější a komfortnější. Vzhledem k váze elektromotorů a baterie je i ovladatelnost a především manipulace s tříkolkou lepší, než s jednostopým vozidlem. Nad zadní nápravou je dostatečný prostor pro uložení baterií a motorů.

⁴ Celkovým převodem je myšlen převod „rotor elektromotoru – kolo“. Uvedené hodnota platí pro SS motor s planetovou převodovkou a převodem na kolo pomocí řetízku.

2 Jízda vozidla v přímém směru

Při jízdě vozidla v přímém směru se obě poháněná kola pohybují po stejně dlouhé dráze, tedy při určité jízdě rychlosti celého vozidla se otáčejí stejnou obvodovou rychlostí vozidla odpovídající rychlosti jízdy. Pak pro rychlost a otáčky kol platí:

$$v_{\text{jízdy}} = 2\pi n_L r = 2\pi n_R r \quad (2-1)$$

$$\omega_L = 2\pi n_L \quad (2-2)$$

$$\omega_R = 2\pi n_R$$

a

$$n_R = n_L = i_C n_m \quad (2-3)$$

Obě kola zatěžují motor stejným točivým momentem. Abychom udrželi přímý směr jízdy na obou kolech musí být stejný moment. Pokud by tomu tak nebylo vozidlo by mělo tendenci se stáčet na stranu k té straně, kde je na kolo přiváděn menší moment (toto kolo by mělo snahu zpomalovat své otáčky a vozidlo by se tak stáčelo, přední kolo by bylo smýkáno). Tento moment reprezentují okamžité jízdě odpory (valivý odpor pneumatik, aerodynamický odpor, odpor při jízdě ve stoupání vozovky) a akcelerace vozidla. Pro točivý moment pak platí:

$$M_R = M_L \quad (2-4)$$

a

$$M_M = (M_R + M_L) i_C, \quad (2-5)$$

pokud $i_C = 1$ pak můžeme napsat:

$$M_M = M_R + M_L \quad (2-6)$$

tento jednotkový převodový poměr mezi kolem a motorem, uvažují v celé práci, není-li uvedeno jinak.

Maximální hodnota momentu přenášeného na vozovku je dána zatížením kol a součinitelem adheze. Pokud bychom tento moment překročili, kola by začala prokluzovat. Moment dodávaný na kola představuje tažnou sílu, která pohání vozidlo,

od tohoto momentu se tedy odvíjí dynamika jízdy. Když je točivý moment na kolech vyšší, než jízdní odpory, tak vozidlo zrychluje, pokud nižší, vozidlo zpomaluje a pokud je stejný jako jízdní odpory vozidlo udržuje konstantní rychlost.

3 Analýza průjezdu vozidla zatáčkou

3.1 Úhlové rychlosti otáčení kol

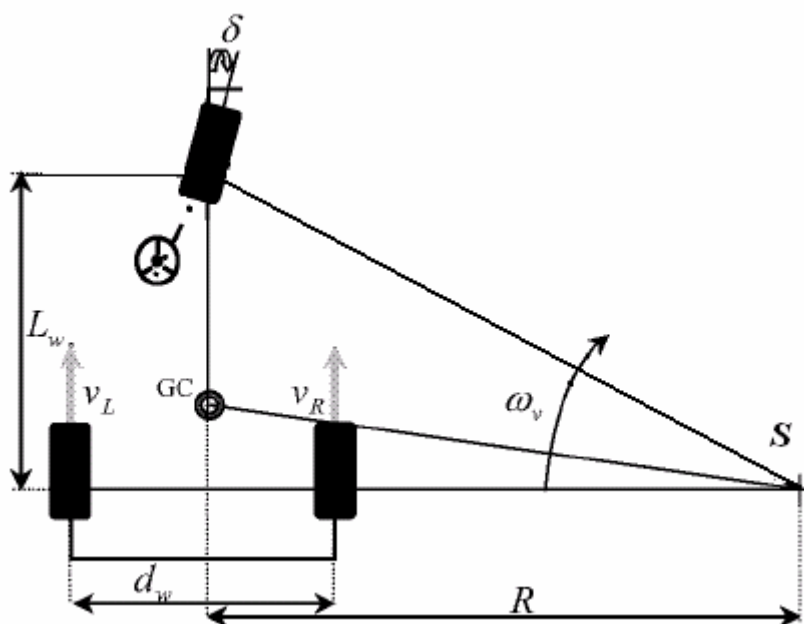
Pokud chceme začít zatáčet máme 2 způsoby jak s vozidlem zatočit [3]:

- Natočením kola řídící nápravy.
- Brzděním kol na vnitřní straně zatáčky nebo urychlením kol na vnější straně zatáčky.

Tento způsob se používá např. u pásových vozidel kde nemáme k dispozici řízenou nápravu. Jeho obrovskou nevýhodou je, že při tomto způsobu zatáčení u vozidel, která mají nenulový rozvor (mají 2 nápravy) dochází vždy k smýkání kol.

Jelikož navrhovaná tříkolka má přední kolo řiditelné, byla zvolena první možnost, natáčení předního kola.

Na obrázku (Obr. 2) je nakreslena geometrie průjezdu tříkolky zatáčkou.



Obr. 2 Geometrie vozidla v zatáčce [1]⁵

Jelikož poloměr otáčení se snímá složitě, zatímco úhel natočení řízené nápravy lze snímat velmi snadno, poloměr otáčení vypočteme pomocí goniometrických funkcí (3-1).

$$R = \frac{L_w}{\tan \delta} \quad (3-1)$$

Při jízdě v přímém směru můžeme odvodit úhlovou rychlost otáčení kol (3-2).

$$\omega_v = \frac{v_{jizdy}}{r} \quad (3-2)$$

ω_v je tedy úhlová rychlost otáčení kola určitého poloměru při určité rychlosti jízdy. Je zřejmé, že při jízdě v zatáčce a zachování rychlosti jízdy vozidla bude ω_v střední rychlostí otáčení kol, bude tedy nezávislá na poloměru zatáčky a proto jsem ji použil jako základní hodnotu k vypočtení otáček pravého, levého kola. Nazveme ji tedy základní hodnotou úhlové rychlosti otáčení kol.

⁵ S = střed otáčení, R = poloměr otáčení, L_w = rozvor vozidla, d_w = rozchod vozidla, ω_v = úhlová rychlost zatáčení, v_L = rychlost levého kola, v_R = rychlost pravého kola, δ = úhel natočení předního kola

Úhlovou rychlost otáčení vozidla (3-4) vypočteme pomocí dosazení do vzorce (3-3) z vzorce (3-2).

$$v_{jízdy} = \omega_u \cdot R \quad (3-3)$$

$$\omega_u = \omega_v \cdot \frac{r}{R} \quad (3-4)$$

Rychlost pohybu pravého, respektive levého kola lze vyjádřit:

$$v_L = \omega_u \cdot \left(R + \frac{d_v}{2}\right) \quad (3-5)$$

$$v_R = \omega_u \cdot \left(R - \frac{d_v}{2}\right) \quad (3-6)$$

Na vztazích vidíme, že úhlová rychlost zatáčení je stejná pro obě kola, oproti úhlové rychlosti otáčení kol v přímém směru se kola tedy budou muset točit tím rychleji, respektive pomaleji, čím se pohybují po delší, respektive kratší dráze. Úhlové rychlosti otáčení pravého respektive levého kola pak odvodíme snadno (3-7), (3-8).

$$\omega_L = \omega_v \cdot \frac{R + \frac{d_v}{2}}{R} = \omega_v \cdot \left(1 + \frac{d_v}{2R}\right) = \omega_v \cdot \left(1 + \frac{d_v}{2 \frac{L_v}{\tan \delta}}\right) = \omega_v \cdot \frac{L_v + \frac{d_v}{2} \cdot \tan \delta}{L_v} \quad (3-7)$$

$$\omega_R = \omega_v \cdot \frac{R - \frac{d_v}{2}}{R} = \omega_v \cdot \left(1 - \frac{d_v}{2R}\right) = \omega_v \cdot \left(1 - \frac{d_v}{2 \frac{L_v}{\tan \delta}}\right) = \omega_v \cdot \frac{L_v - \frac{d_v}{2} \cdot \tan \delta}{L_v} \quad (3-8)$$

Dále lze vypočíst diferenci otáček pravého a levého kola jako jejich rozdíl (3-9).

$$\Delta \omega = \omega_{v_R} - \omega_{v_L} = \omega_v \cdot \frac{L_v + \frac{d_v}{2} \cdot \tan \delta}{L_v} - \omega_v \cdot \frac{L_v - \frac{d_v}{2} \cdot \tan \delta}{L_v} = \omega_v \cdot \frac{d_v \cdot \tan \delta}{L_v} \quad (3-9)$$

Z (3-9) je tedy patrné, že rozdíl otáček pravého a levého kola je závislý na těchto veličinách:

- rychlosti vozidla (v rovnici (3-9) reprezentované základní úhlovou rychlostí otáčení kol)
- rozvoru vozidla L_V
- rozchodu vozidla d_V
- úhlu natočení předního kola.

Otáčky pravého a levého kola vyjádřit pomocí základních otáček pro danou rychlost a difference $\Delta\omega$, (3-10) a (3-11).

$$\omega_L = \omega_V + \frac{\Delta\omega}{2} \quad (3-10)$$

$$\omega_R = \omega_V - \frac{\Delta\omega}{2} \quad (3-11)$$

Pokud bychom znali úhlové rychlosti otáčení jednotlivých motorů (kol), např. pomocí snímače otáček umístěných na motoru, základní úhlovou rychlost (3-12) otáčení lze získat velmi snadno sečtením vztahů (3-10) a (3-11).

$$\omega_V = \frac{\omega_{V-L} + \omega_{V-R}}{2} \quad (3-12)$$

Skutečná úhlová rychlost otáčení kol je dána převodem od motoru ke kolu a otáčkami motoru (3-13). Jelikož je na elektromotoru obvykle převod „do pomala“, je výhodnější snímat otáčky přímo na hřídeli motoru, protože tam budou otáčky vyšší a čidlo nebude muset mít tolik pulsů na otáčku pro dostatečnou přesnost snímání v přijatelném časovém intervalu.

$$\begin{aligned} \omega_{k-L} &= k_{pre.} \cdot \omega_{V-L} \\ \omega_{k-R} &= k_{pre.} \cdot \omega_{V-R} \end{aligned} \quad (3-13).$$

Pro princip rozdělování otáček v závislosti na dráze vozidla je však převodový poměr nepodstatný, je zde uveden pouze pro úplnost a dále jej zanedbávám, respektive je uvažován jako „jednotkový“ (1:1).

Podle znaménka úhlu natočení řídicích můžeme rozlišit směr jízdy vozidla, podle toho jakou zvolíme základní orientaci úhlu δ :

- $\delta > 0 \Rightarrow$ vozidla zatáčí doprava
- $\delta = 0 \Rightarrow$ vozidlo jede rovně
- $\delta < 0 \Rightarrow$ vozidlo zatáčí doleva.

3.2 Moment dodávaný na jednotlivá kola.

Vozidlo se pohybuje po vozovce v přímém směru, motor odevzdává výkon, který pokrývá jízdní odpory. Vozidlo tedy jede konstantní rychlostí. Na obě kola působí stejný zatěžovací moment. Pak je zřejmé, že okamžitý výkon motorů P_M (3-14), nebo také výkon jízdních odporů, je roven součtu okamžitých výkonů pravého a levého kola (3-15), (3-16).

$$P_M = P_R + P_L = 2 \cdot \omega_V M_M \quad (3-14)$$

$$P_R = M_R \cdot \omega_R \quad (3-15)$$

$$P_L = M_L \cdot \omega_L \quad (3-16)$$

$$\omega_L = \omega_R = \omega_V \quad (3-17)$$

Jelikož jsou si rovné úhlové rychlosti (3-17), je zřejmé, že si budou rovny i momenty na jednotlivých kolech.

V zatáčce se úhlové rychlosti otáčení kol (3-18), (3-19) změní o $\Delta\omega$ (3-9).

$$\omega_L = \omega_M - \Delta\omega \quad (3-18)$$

$$\omega_R = \omega_M + \Delta\omega \quad (3-19)$$

Pokud toto dosadíme do rovnice s výkony, je zřejmé že o kolik narostly otáčky jednoho kola, o tolik poklesly otáčky kola druhého. Výkon dodávaný na jednotlivá kola se tedy u obou kol změnil úměrně změně otáček kol. Celkový výkon P_M (3-20) musí však zůstat konstantní (zanedbáváme odpory v zatáčce jako např. smýkaní pneumatik, jejich zdeformování vlivem odstředivé síly atd.). Z tohoto plyne, že točivý

moment dodaný na kola zůstane proti jízdě v přímém směru nezměněn (3-21), změní se pouze otáčky [3].

$$P_M = P_R + P_L = M_R \cdot (\omega_V + \Delta\omega) + M_L \cdot (\omega_V - \Delta\omega) \quad (3-20)$$

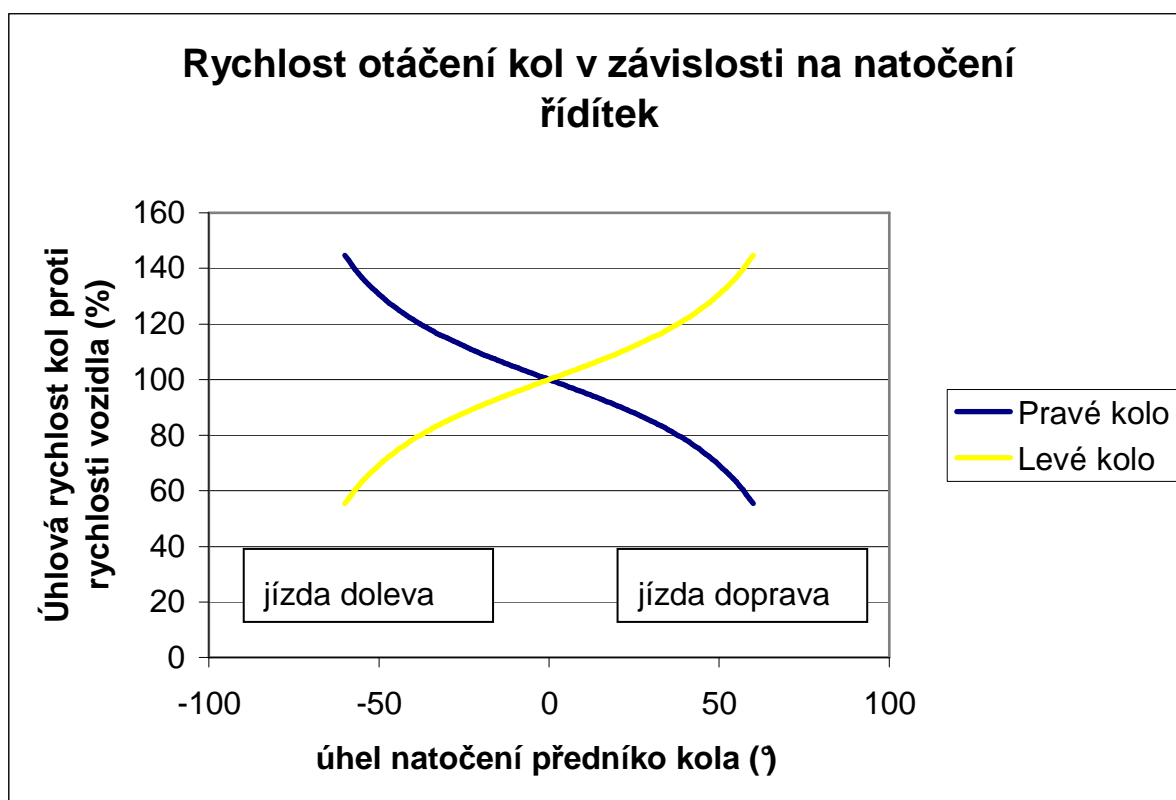
$$M_R = M_L = \frac{1}{2} M_M \quad (3-21)$$

4 Simulace otáčení kol v zatáčce za použití tabulkového editoru

Vztahy (3-7) a (3-8) byly přepsány do tabulkového editoru MS Excel. Za proměnné dosadíme skutečné parametry vozidla:

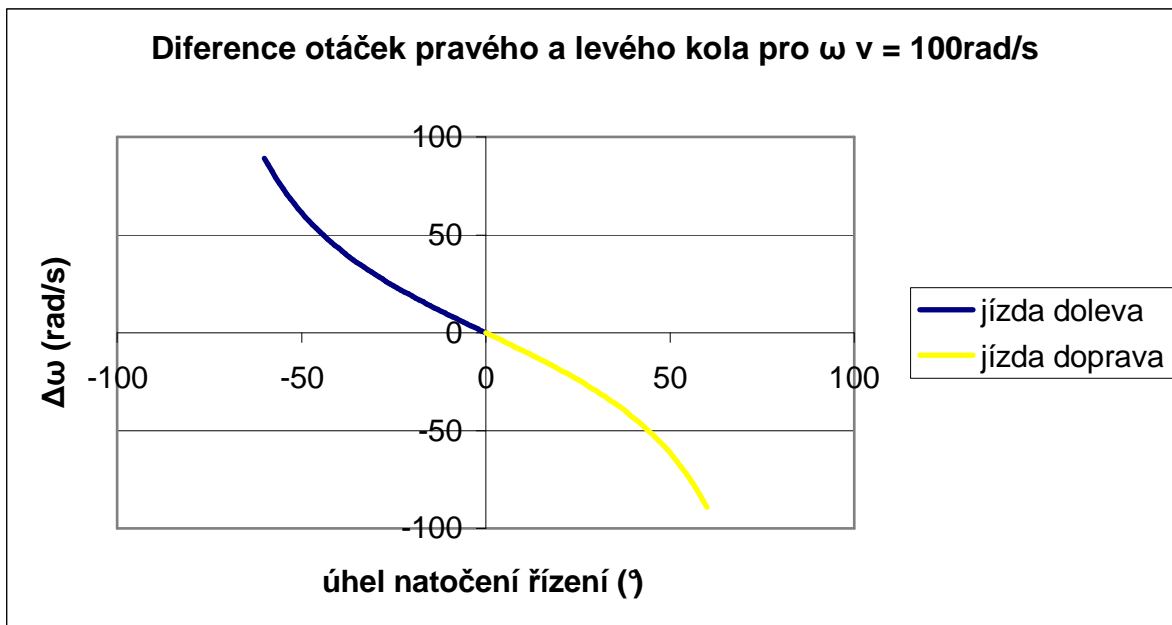
- $d_v = 0,51$ m
- $L_v = 1,01$ m
- ω_v , základní úhlovou rychlost jsem zvolil $100 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, aby výsledky byly názorně přímo v procentech
- δ , úhel natočení řídicích jímek jsem tabeloval po 1° od -60° do 60° .

Výsledná funkce spočtená pro pravé i levé kolo je vynesena v grafu (Graf. 1).



Graf. 1 Úhlová rychlost otáčení kol v závislosti na úhlu natočení řídicích jímek, pro základní úhlovou rychlost 100 rad/s .

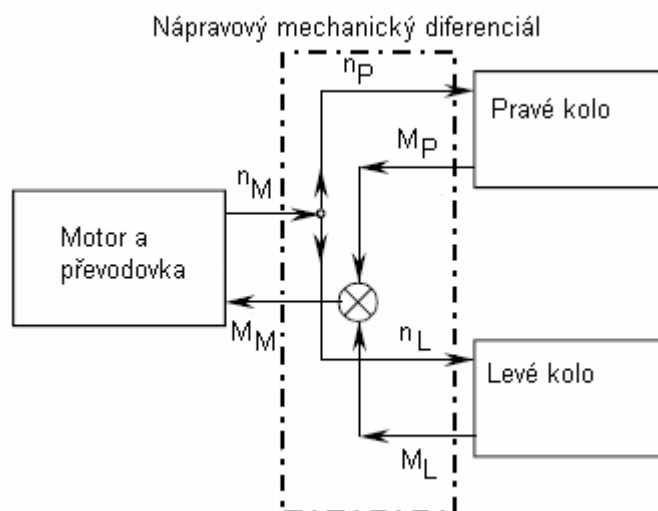
Podle vztahu (3-9) můžeme obdobným způsobem dopočítat hodnoty $\Delta\omega$ (diference otáček pravého a levého kola). Za proměnné dosadíme opět parametry vozidla. Hodnota $\Delta\omega$ je vynesena do grafu (Graf. 2).



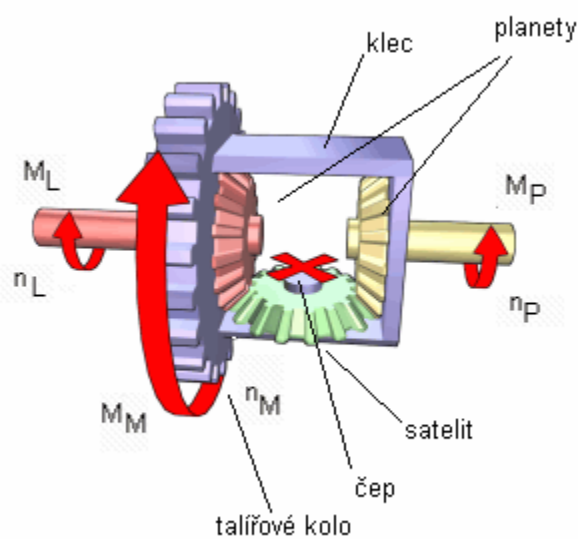
Graf. 2 Závislost difference otáček pravého a levého kola v závislosti na úhlu natočení řízení pro základní úhlovou rychlost 100 rad/s

Diference otáček mezi pravým a levým kolem je velmi užitečný údaj. Pokud je tato hodnota natabelovaná, po přepočtu na aktuální rychlost z ní lze pak velmi a rychle a snadno určit úhlové rychlosti otáčení jednotlivých kol.

5 Mechanický nápravový diferenciál



Obr. 3 Blokové schéma mechanického diferenciálu [2]



Obr. 4 Nákres mechanického diferenciálu [2]⁶

Od převodovky je poháněno talířové kolo v stálém převodu, s talířovým kolem je pevně spojena klec. V kleci je na čepu volně usazeno ozubené kolo, které se

⁶ n_P = otáčky pravého kola, n_L = otáčky levého kola, n_M = otáčky motoru, M_P = moment pravého kola, M_L = moment levého kola, M_M = moment motoru.

nazývá satelit. Planety jsou pak obvykle pomocí kloubových hřídelí (poloos) spojeny s poháněnými koly.

U jednoduchého nápravového diferenciálu bez uzávěrky se rozdělení momentu a otáček na kola děje na základě těchto faktorů:

- rozdílná rychlost otáčení jednotlivých kol v důsledku průjezdu zatáčkou, vnější kolo je kinetickou energií určitou rychlostí jedoucího vozidla nuceno se otáčet rychleji, vnitřní kolo je naopak bržděno a otáčí se pomaleji
- poklesem odebíraného momentu na jednom z kol v důsledku např. povrchu s malou adhezí nebo různého zatížení jednotlivých kol.

Když zanedbáme mechanické ztráty v diferenciálu, je zřejmé že výkon dodaný na talířové kolo, se musí rovnat výkonu odevzdanému planetami (5-1). Ve vzorcích pro zjednodušení předpokládám, že všechny převodové poměry diferenciálu jsou rovny jedné.

$$P_M = P_R + P_L = M_M \cdot \omega_M = M_R \cdot \omega_R + M_L \cdot \omega_L \quad (5-1)$$

V přímém směru víme že:

$$\omega_L = \omega_R, \quad (5-2)$$

a tedy musí platit:

$$M_L = M_R = \frac{1}{2} M_M. \quad (5-3)$$

Toto platí pokud oba hřídele zatěžují diferenciál stejným točivým momentem, tedy obě kola musí mít dostatečnou adhezi, aby tento moment byla schopna přenést.

Důvodem proč se diferenciál prosadil v konstrukci automobilu je fakt, že při jízdě v zatáčce se kola na každé straně vozidla v důsledku rozdílné dráhy točí jinou rychlostí. Při průjezdu levé zatáčky se levé kolo začne přibrzďovat, rychlost otáčení levého planetového převodu bude nižší než rychlost otáčení klece. Tím se satelit uvede do otáčivého pohybu. Otáčením satelitu urychluje rychlost otáčení pravého planetového převodu. Dojde tedy k rozdílu, diferenci $\Delta\omega$ v otáčkách kol oproti

otáčkám kol při stejné rychlosti v přímém směru (5-4), (5-5). Satelit se na čepu otáčí právě rychlostí $\Delta\omega$ [3].

$$\omega_L = \omega_M - \Delta\omega \quad (5-4)$$

$$\omega_R = \omega_M + \Delta\omega \quad (5-5)$$

$$P_M = P_R + P_L = M_M \cdot \omega_M = M_R \cdot (\omega_R + \Delta\omega) + M_L \cdot (\omega_L - \Delta\omega) \quad (5-6)$$

$$M_L = M_P = \frac{1}{2} M_M \quad (5-7)$$

Je tedy zřejmé, že i při jízdě v zatáčce je moment na kola rozdělován rovnoměrně (5-7). Při průjezdu zatáčkou je zpravidla vnitřní kolo nadlehčeno a vnější více zatíženo, více zatížené kolo je schopno přenést vyšší moment, ale kolo méně zatížené by při tomto momentu již začalo po vozovce smýkat. Tento fakt omezuje možnost akcelerace v zatáčce, při přílišné akceleraci v zatáčce se prvně začne smýkat vnitřní kolo, zatímco vnější udrží vozidlo v jízdě dráze.

Pokud se jedno kolo, např. pravé dostane na povrch s velmi malým součinitelem adheze, klesne i moment, kterým je zatížena pravá planeta. Levá planeta je však stále bržděna protože levé kolo má dostatečnou adhezi. Satelit se začne otáčet na svém čepu, rychlost otáčení je stejná jako rychlost otáčení klece, na pravé planetě se tedy sečte otáčivý pohyb klece a otáčivý pohyb satelitu. Pravé kolo (bez adheze) se tak roztočí dvojnásobnými otáčkami. Toto je velmi nevýhodná vlastnost diferenciálu, protože veškerý výkon motoru je v tomto případě přiváděn na kolo bez adheze. Rozjezd ve chvíli kdy vozidlo má jedno hnané kolo např. na ledu je pak téměř nemožný. Tomuto jevu se brání uzávěrkou diferenciálu.

Zámek diferenciálu zamezí otáčení ozubeného kola satelitu a obě kola se pak i při nepříznivých adhezních podmínkách točí stejnou rychlostí. Uzávěrka diferenciálu však komplikuje složitost diferenciálu, zvyšuje jeho hmotnost a výrobní náročnost. Uzávěrka může být aktivována pouze při nízké rychlosti na nebezpečném povrchu, aby kola, která se točí stejně rychle, mohla v zatáčce prokluzovat [2].

Těmito diferenciály jsou vybavena terénní vozidla. Uzávěrka je ovládána mechanicky, elektricky nebo hydraulicky. Uzávěrku může aktivovat buď řidič manuálně, nebo se o její aktivaci stará elektronika - ta uzavření diferenciálu

vyhodnocuje podle aktuálních jízdních podmínek. Výjimku tvoří motokárový sport, kde jsou kola pevně spojena a při průjezdu zatáčkou kloužou po vozovce smykem, což umožňuje především nízká hmotnost motokáry a sportovní využití, při kterém je hospodárnost provozu a opotřebení pneumatik vedlejší.

Existují ještě diferenciály takzvané samosvorné. Samosvorné diferenciály pracují na principu zvětšeného tření, které brání zvětšování rozdílu v otáčkách kol. Toto řešení je využíváno v motoristickém sportu, protože umožňuje důraznější akceleraci v zatáčce, výrazně ale snižuje účinnost diferenciálu při průjezdu zatáčkou. Samosvorné diferenciály jsou využívány především u sportovních vozidel nebo se využívají jako diferenciály mezi-nápravové, např. systém Quattro od firmy Audi.

6 Porovnání mechanického diferenciálu a MMS

Mechanický diferenciál je u silničních vozidel v tuto chvíli dominantním prostředkem pro vyřešení rozdílu otáček kol při průjezdu zatáčkou. Toto je dáno používáním spalovacího motoru. Použití dvou spalovacích motorů, které by byly samostatně regulovány si lze velmi těžko představit. U pohonu elektromotorem je však situace jiná.

Výhody mechanického diferenciálu:

- jednoduchá a spolehlivá mechanická konstrukce
- stačí nám jeden motor s nenáročnou regulací
- diferenciálem lze realizovat přímo převodový poměr, další převody nejsou nezbytně nutné.

Nevýhody mechanického diferenciálu:

- mechanické ztráty
- opotřebení převodů v průběhu provozu
- výrazné zkomplikování konstrukce, aby umožňoval rozdělování točivého momentu vzhledem k adhezním podmínkám a aktuálnímu zatížení kol
- nutná olejová náplň, která se musí udržovat a je zátěží pro životní prostředí.

Pro aplikaci na elektro-tříkolce nepočítáme s velkou rychlostí ani výkonem. Rozdílné zatížení kol v zatáčce tedy pro tuto aplikaci není nijak zvlášť kritické, průjezd zatáčkou „smykem“ v důsledku přílišné akcelerace, můžeme za běžných adhezních podmínek vyloučit, nedotáčivost, respektive přetáčivost v rychlostech jakými se bude pohybovat a vzhledem k účelu jakému bude využívána je také zanedbatelná. Pokud se ale zamyslíme nad všemi výhodami a nevýhodami řešení s mechanickým diferenciálem a jedním motorem, bude použití řešení s dvěma samostatně řízenými motory výhodnější z důvodů:

- Pevné rozdělení momentu mezi kola.
S mechanickým diferenciálem je rozjezd v chvíli kdy je jedno kolo např. na ledu velmi problematický. U řešení s dvěma motory jsou obě kola řízena samostatně a řízení jednoho kola není nijak ovlivněno adhezí kola druhého. Rozjezd je tak možný i v případě že je jedno kolo bez adheze.
- Mechanický diferenciál vyžaduje údržbu.
U řešení s dvěma motory odpadnou veškeré problémy s olejovou náplní. Elektronické součástky jsou oproti mechanickým převodům trvanlivější a nepodléhají opotřebení.
- Levnější diferenciál.
Lze s jistotou tvrdit že výroba elektronického obvodu bude méně nákladná než strojírenská výroba mechanických součástí.
- Lepší rozložení hmotnosti.
Těžký motor je umístěn přímo u kola, tedy toto kolo je optimálně zatíženo, u vozidla je lépe rozložena jeho hmotnost. Například pro použití synchronních motorů se předpokládá umístění motoru přímo do kola, což je vzhledem k rozložení hmotnosti nejideálnější řešení. Jediným problémem pak je, že jsou nadměrně namáhány tlumící prvky uložení kola (velká neodpružená hmotnost). Umístění motoru do kola se používá především u synchronních motorů, které mají kompaktní rozměry a velký moment při malých otáčkách, nepotřebují tak převodovku.

7 Možnosti realizace elektronického diferenciálu pro dva samostatně řízené motory

Elektronický diferenciál bude pracovat jako nadstavba měničů které budou regulovat dva elektromotory. Úkolem elektronického diferenciálu je tedy pouze odesílat požadované informace do jemu podřízeného měniče. Tento přenos informace bude uskutečněn po sériové lince, jelikož jak měnič tak diferenciál budou řízeny mikroprocesory.

Pro návrh řešení jsem zvolil dvě alternativy způsobu řízení měniče, odesláním požadavku na moment, nebo požadavku na otáčky.

Volba způsobu řízení je závislá především na druhu použitého elektromotoru a měniče. Měnič bude zároveň pracovat jako regulátor elektromotoru a musí tedy umožňovat dané řízení, diferenciál pouze odesílá požadovanou hodnotu do měniče. U experimentálního elektromobilu je uvažováno použití buď stejnosměrného motoru s permanentními magnety, nebo asynchronního motoru.

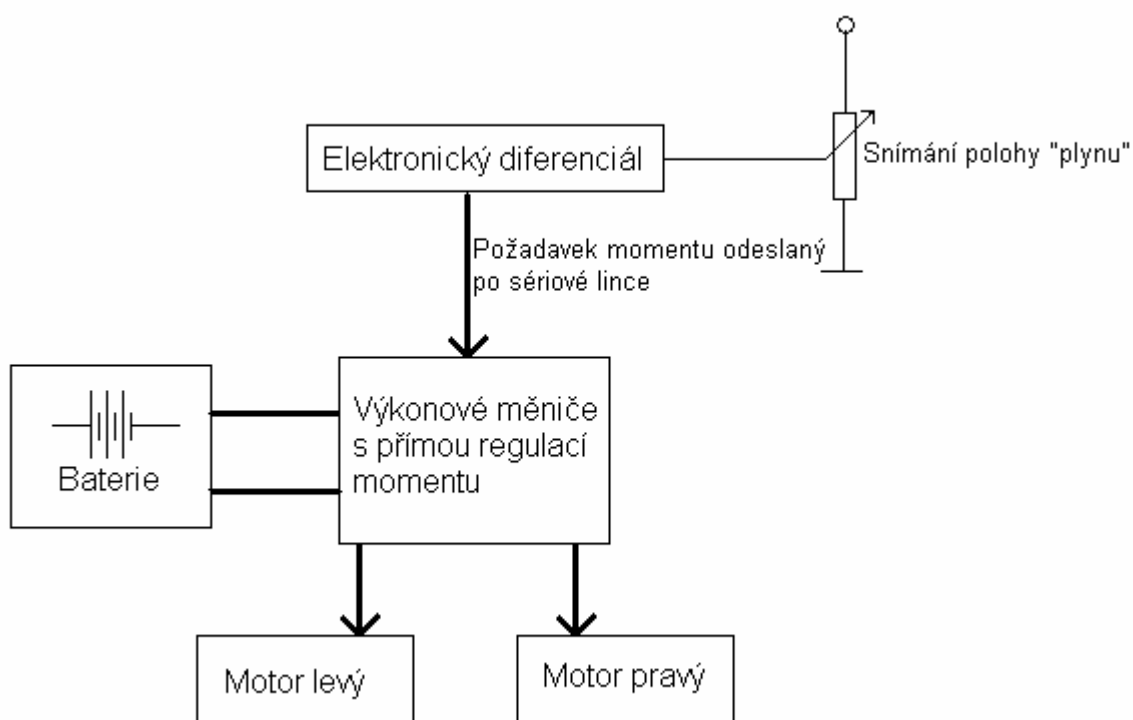
U stejnosměrného motoru s permanentními magnety je základní regulací regulace momentu. Moment je totiž přímo úměrný rotorovému proudu. Regulovat otáčky je také možné, ale regulační smyčka otáček je nadřazena regulační smyčce momentu a je tedy komplikovanější. Výhodnější u stejnosměrného motoru tedy bude regulace momentu [4].

Asynchronní motory jsou regulovány frekvenčními měniči, přičemž rychlost otáčení přímo závisí na frekvenci napájecího napětí. Základní regulací je tedy regulace otáček. Regulace momentu je u asynchronních motorů také možná, ale vyžaduje složitější regulační strukturu, musíme snímat skutečné otáčky motoru a celkově je náročnější, přesto se ale používá. U asynchronního motoru bude jednodušší výkonový měnič, který bude regulovat otáčky.

8 Elektronický diferenciál s momentovým řízením

Z předchozího plyne, že na obě kola je žádoucí jak při jízdě v přímém směru, tak při jízdě v zatáčce dodávat stejný moment, rozdílné jsou pouze otáčky. Zvýšení respektive snížení otáček kola je provedeno setrvačností vozidla, které vjede do zatáčky, toto je možné jelikož kola jsou umístěna samostatně a nejsou pevně spojena hřídelí. Pokud se jedno kolo dostane na povrch s sníženou adhezí, začne prokluzovat, na druhé kolo je však moment stále dodáván, na rozdíl od mechanického diferenciálu.

Velikost momentu je vyhodnocována pouze na základě „sešlápnutí plynu“. Elektronický diferenciál pracující jako nadstavba měničů pro motory, pouze odesílá informaci o poloze akcelérátoru snímanou AD převodníkem po sériové lince (Obr. 5), tedy vlastně požadavek na tažnou sílu (točivý moment), do měniče regulujícího moment elektromotorů.



Obr. 5 Blokové schéma pohonu pro řízení s přímým požadavkem momentu

Samotné ovládání rychlosti vozidla je pak analogické k chování spalovacího motoru plynovým pedálem. Při rozjezdu podle stupně „sešlápnutí“ akcelérátoru vozidlo

zrychluje. Ve chvíli kdy dosáhne požadované rychlosti pedál postupně uvolňujeme až do chvíle, než je tažná síla stejná jako síla nutná k překonání jízdních odporů při požadované rychlosti. Když pedál uvolníme více, tažná síla bude menší, než jízdní odpory a vozidlo bude zpomalovat.

Výhody momentové regulace:

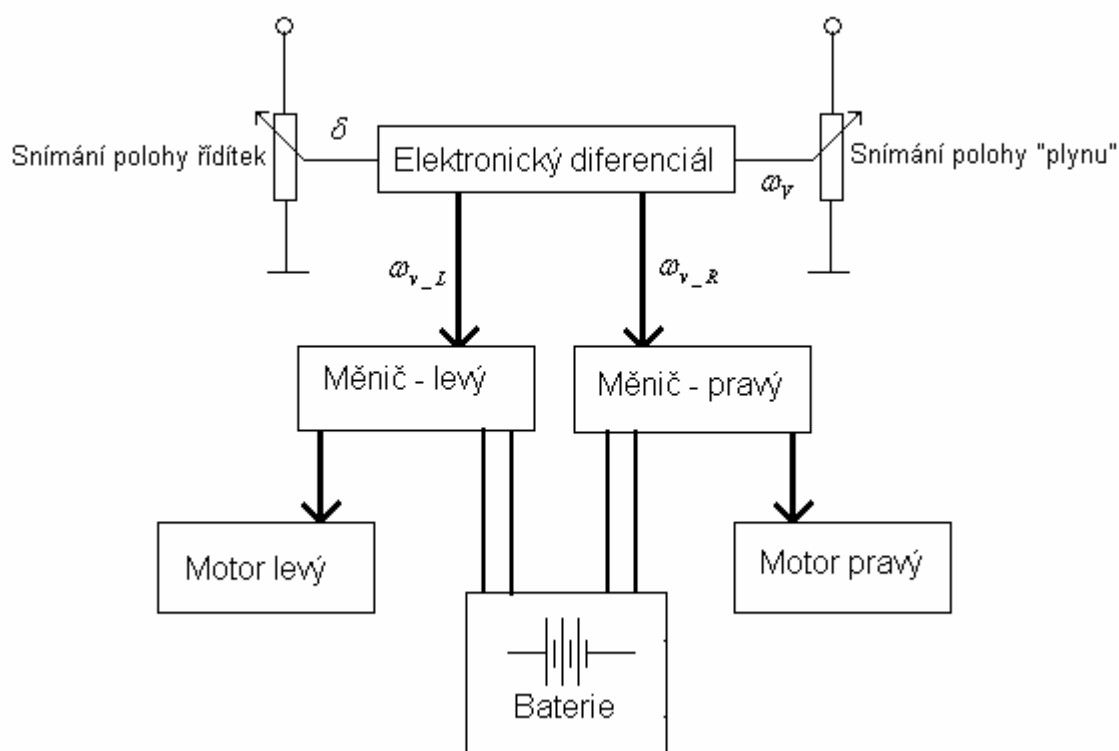
- Nemusíme řešit snímání natočení řídítek.
Vystačíme tedy s jedno-kanálovým AD převodníkem. Celý obvod je znatelně jednodušší, na vozidle tedy nemusíme konstruovat snímač úhlu natočení řídítek.
- Nízké nároky na výpočetní výkon mikroprocesoru.
Procesor pouze obsluhuje AD převodník a odesílá hodnotu z něj získanou po sériové lince.

Nevýhody momentové regulace:

- Nutnost neustálé práce řidiče „s plynem“.
Při jízdě s vozidlem musíme podle velikostí jízdních odporů (jízda do stoupání, vítr) pracovat s „plynem“ abychom udrželi konstantní rychlost. Stejně jako např. v automobilu se spalovacím motorem. Jelikož diferenciál nemá informaci o otáčkách kol (tedy vlastně rychlosti vozidla) nelze regulovat rychlost vozidla přímo.

9 Elektronický diferenciál s řízením otáček kol

Druhou možností realizace elektronického diferenciálu je, že na základě sešlápnutí pedálu akcelérátoru a úhlu natočení řídítek budeme počítat úhlové rychlosti otáčení pro jednotlivá kola. Blokové schéma pak obsahuje snímač úhlu natočení, snímač polohy akcelérátoru a obvod který provádí výpočty a výsledky odesílá po sériové lince do podřízených měničů.



Obr. 6 Blokové schéma rychlostní regulace

Poloměr otáčení byl stanoven experimentálně roztlačením tříkolky při max. rejdu řídítek. Pásmem bylo změřeno, že s tříkolkou lze zatočit na průměru 1,5 m, tedy poloměr zatáčení 0,75 m, podle vzorce (3-1) byly vypočteny úhly natočení řídítek na $\pm 50^\circ$.

Problémem je, že při zatáčení při maximální rychlosti by vnější kolo bylo přetáčeno (otáčky motoru by byly vyšší než maximální). Rychlost vozidla v oblouku však bude omezena ještě adhezí pneumatik, jelikož ve chvíli, kdy by se kola dostala do smyku k přetáčení motorů by nedocházelo, navíc předpokládáme, že v situaci kdy

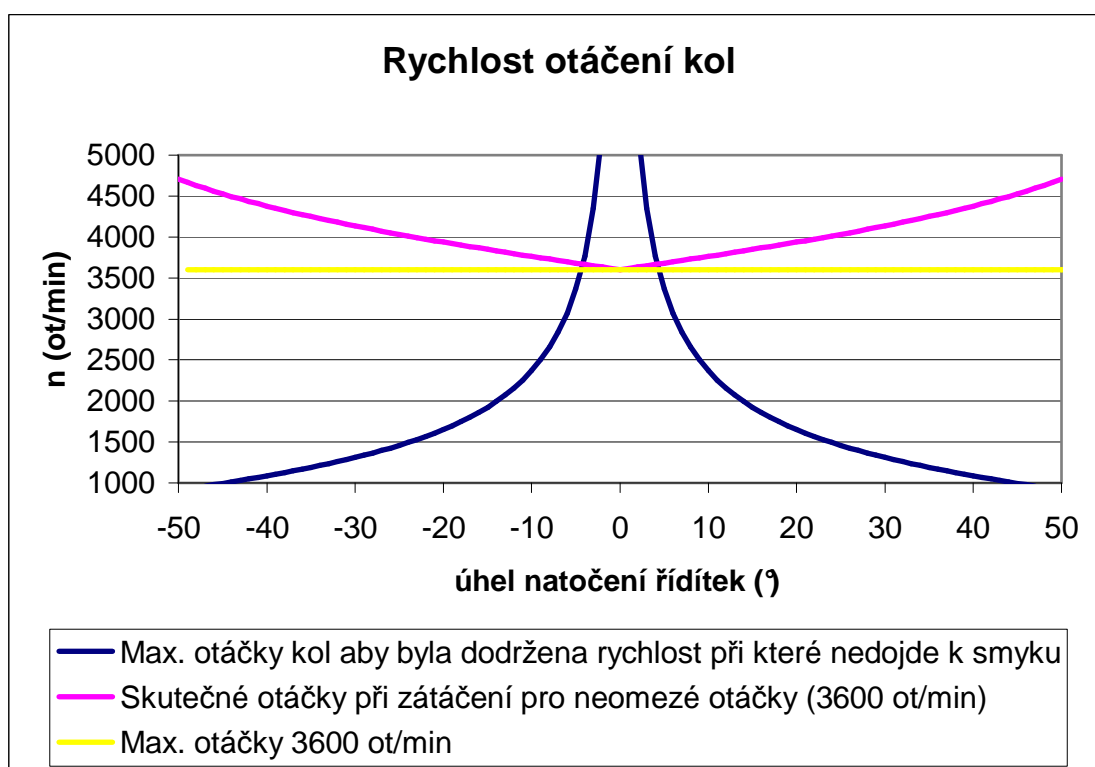
se kola začnou smýkat, řidič sníží rychlost jízdy. Maximální rychlost vozidla v oblouku můžeme snadno vypočítat [5].

$$F_{ODS} = \frac{m \cdot v_{\max}^2}{R} \quad (9-1)$$

$$F_{ODS}' = m \cdot g \cdot \mu \quad (9-2)$$

$$F_{ODS}' = F_{ODS} \Rightarrow v_{\max} = \sqrt{g \cdot \mu \cdot R} \quad (9-3)$$

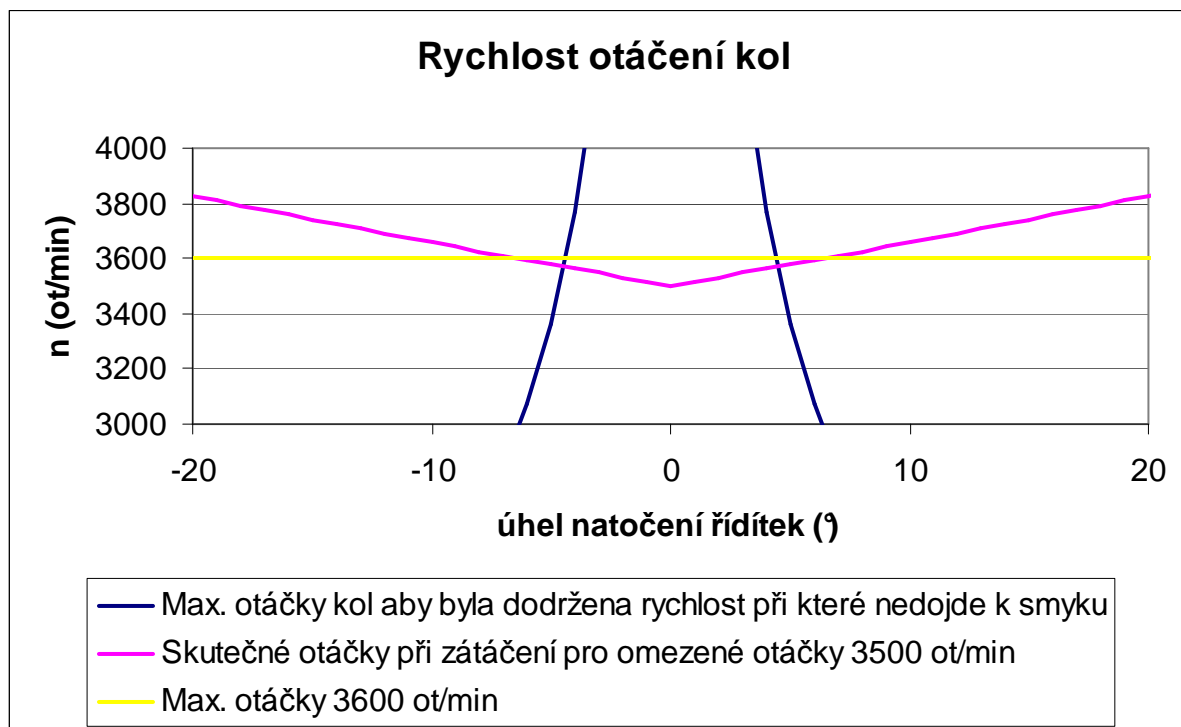
Ve chvíli kdy se odstředivá síla (9-1) rovná právě síle, jakou jsou schopny pneumatiky přenést (9-2), by došlo k smyku vozidla, vztah (9-3) tedy platí pro maximální rychlost tříkolky v zatáčce. Součinitel adheze použitý při výpočtu, $\mu=1$, odpovídá suché vozovce s kvalitním povrchem [5]. Tento vztah je zjednodušený, tříkolku uvažujeme jako hmotný bod, takže zanedbáváme vliv rozložení hmotnosti tříkolky, deformace pneumatik atd. Jelikož tříkolka nedosahuje příliš velkých rychlostí, tohoto vztahu je použito pro orientační stanovení omezení otáček motoru.



Graf. 3 Otáčky motoru při zatáčení ve vztahu k maximální rychlosti průjezdu zatáčkou

Na grafu (Graf. 3) vidíme, že pro prudké zatáčky jsme s max. otáčkami nad otáčkami, při kterých by se vozidlo dostalo do smyku. Problémem je, že pro natočení

řídítek 0-4°, jsou maximální otáčky vyšší než 3600 ot/min a přesto je vozidlo při této rychlosti a zatáčení ještě stabilní. Při jízdě max. rychlostí a jemném zatáčení by tedy došlo k „přetáčení“ vnějšího elektromotoru.



Graf. 4 Rychlost otáčení kol pro otáčky omezené na 3500 ot/min

Na grafu (Graf. 4) je zobrazen průběh otáček kol pokud je omezíme na maximální hodnotu 3500 ot/min. Je vidět, že v oblasti, kdy je tříkolka stabilní (není ve smyku) jsou otáčky jednotlivých kol nižší, než otáčky maximální, motory tak běží stále bez překročení maximálních konstrukčních otáček.

Omezením max. otáček na 3500 ot/min snížíme maximální rychlost tříkolky pouze o 2,7%, tedy po zaokrouhlení o 1 km/h, což je zanedbatelná hodnota.

Po provedení jízdních zkoušek si myslím že toto omezení by nebylo nutné, protože motor max. otáček dosáhne zpravidla jen v nezatíženém stavu, a z grafu (Graf. 3) je zřejmé, že jízda, při které by hrozilo překročení max. otáček by byla těsně před hranicí smyku na čistém a dobře přilnavém povrchu.

Výpočtem (9-4) stanovíme konstantu na 1 bit AD převodníku pro snímání úhlu natočení řídicího kole.

$$k_{\delta} = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{2^{n_{\text{bit}}} - 1} = \frac{100}{255} = 0,392156862 \text{ } ^{\circ} / \text{bit} \quad (9-4)$$

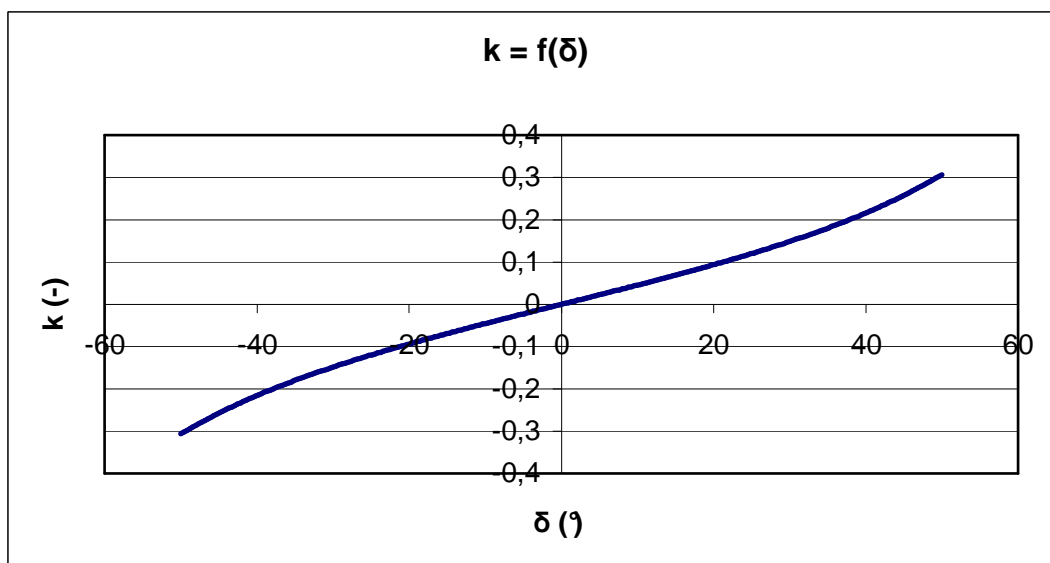
Max. otáčky které lze navolit plynovým pedálem (při jízdě přímo) jsou nižší než požadované otáčky kola v oblouku. Proto jsem snížil počet bitů, kterými bude snímán pedál akceleračního na 7, abych zamezil přetečení 8-mi bitové hodnoty. Toto omezení je provedeno snadno, po sejmutí 8-mi bitové hodnoty je tato hodnota vydělena dvěma. Pak jsem z maximálních otáček v přímém směru a počtu hodnot, které lze sejmut, spočetl regulační krok otáček na jeden bit odeslaný do měniče (9-5).

$$k_{\omega} = \frac{n_{\max}}{2^{n_{\text{bit}}} - 1} = \frac{3500}{127} = 27,55905512 \text{ } \textit{ot} / \textit{min} / \textit{bit} \quad (9-5)$$

Pro algoritmus řízení otáček kol jsem vycházel ze vzorců (3-7) a (3-8), které jsem optimalizoval pro výpočet s mikroprocesorem řady 8052. Jako výchozí hodnotu jsem použil hodnotu $\Delta\omega$, tedy rozdíl mezi otáčkami jednotlivých kol při jízdě v zatáčce (9-6).

$$\Delta\omega = \omega_{v_R} - \omega_{v_L} = \omega_v \cdot \frac{L_v + \frac{d_v}{2} \cdot \tan \delta}{L_v} - \omega_v \cdot \frac{L_v - \frac{d_v}{2} \cdot \tan \delta}{L_v} = \omega_v \frac{d_v \cdot \tan \delta}{L_v} = 2 \cdot \omega_v k \quad (9-6)$$

$$\frac{d_v \cdot \tan \delta}{2 \cdot L_v} = k \quad (9-7)$$



Graf. 5 Korekce k.

Zavedl jsem si novou proměnnou, k (9-7), kterou jsem natabeloval do tabulky v programové paměti mikroprocesoru. Jednoduchým přepsáním hodnot natabelovaná funkce k v programu řídicího mikrokontroléru lze pak diferenciál uzpůsobit i pro použití na vozidlech s jiným rejdem. Pokud bychom použili motory s vyššími maximálními otáčkami, pak stačí změnit regulační krok otáček na 1 bit k_ω (9-5).

Podle vzorců (9-8) a (9-9) pak mikroprocesor dopočítává požadovanou hodnotu otáček levého a pravého kola.

$$\omega_{V_P} = \omega_V + \frac{\Delta\omega}{2} = \omega_V + \frac{\omega_V \frac{d_V \cdot \tan \delta}{L_V}}{2} = \omega_V \left(1 + \frac{\frac{d_V \cdot \tan \delta}{L_V}}{2} \right) = \omega_V \left(1 + \frac{d_V \cdot \tan \delta}{2 \cdot L_V} \right) = \omega_V + \omega_V k$$

(9-8)

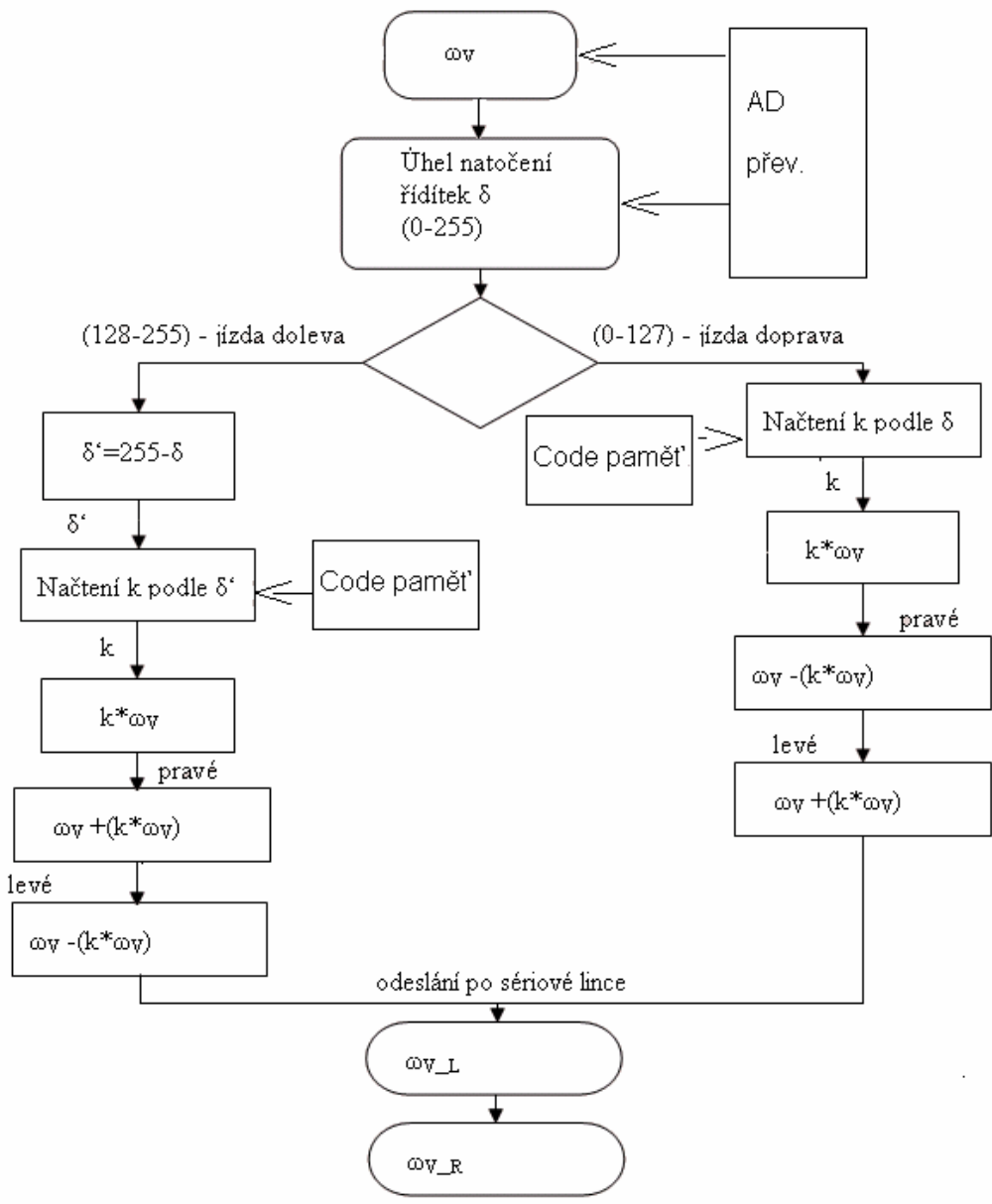
$$\omega_{V_L} = \omega_V - \frac{\Delta\omega}{2} = \omega_V - \frac{\omega_V \frac{d_V \cdot \tan \delta}{L_V}}{2} = \omega_V \left(1 - \frac{\frac{d_V \cdot \tan \delta}{L_V}}{2} \right) = \omega_V \left(1 - \frac{d_V \cdot \tan \delta}{2 \cdot L_V} \right) = \omega_V - \omega_V k$$

(9-9)

Průběh funkce v grafu (Graf. 5) je symetrický podle osy y , pouze pro záporné úhly natočení je záporný, toto je logické, protože v jednom směru zatáčení se rychlost kola snižuje o korekci, v druhém směru otáčení se zvyšuje o korekci. Rozlišíme tedy úhel natočení řídicích, pro výstup z AD převodníku 0-127 (0-2,5V) jsem zavedeme že, vozidlo zatáčí vpravo (u pravého kola tedy korekci odečítáme, u levého přičítáme), pro výstup z AD převodníku 128-255 (2,5 – 5V) počítejme že vozidlo zatáčí vlevo (u pravého kola tedy korekci přičítáme a u levého odečítáme). Pak stačí natabelovat průběh k pro výstup z AD v hodnotách 0-127. Hodnoty korekce pro výstup z AD 128-255 pak upravíme tak že, hodnotu odečteme od 255 (plný rozsah AD) a korekci vyhledáme pro výsledek tohoto rozdílu. Korekce má však opačné znaménko.

Hodnota korekce k , uložená v paměti programu je proti hodnotě reálné, natabelované v grafu (Graf. 5), vynásobena 256 a zaokrouhlena na 8-mi bitové číslo

v binární soustavě. Když je v mikroprocesoru vynásobena hodnotou ω_V , která je také 8-mi bitová, je výsledkem 16-ti bitové číslo. Jeho horních 8 bitů je uloženo v registru B. Pro další výpočet použijeme pouze těchto horních 8 bitů, tedy vlastně výsledek zaokrouhlíme na celé číslo směrem dolů. Pak přičteme vynásobenou korekci k jednomu kolu, a od druhého kola ji odečteme, podle toho, jak jsme na počátku smyčky programu rozhodli o směru zatáčení. Výsledky jsou odeslány po sériové lince.



Obr. 7 Vývojový digram výpočtu otáček kol pro mikroprocesor

V této verzi programu jsou odeslány hodnoty požadovaných otáček kol, v měniči s regulační smyčkou musí být přepočteny na hodnotu frekvence (u asynchronních motorů). Pak by bylo určitě výhodnější pokud by diferenciál odesílal hodnotu frekvence. Bohužel zatím není v tříkolce asynchronní motor použit, a neznáme tedy jaký bude využit typ a jaký bude mít počet pól-párů. Diferenciál tedy odesílá požadovanou rychlost otáčení motorů.

10 Realizace snímání a obvodů pro elektronický diferenciál

Základem celého diferenciálu navrhovaného pro experimentální tříkolku je mikroprocesor 89S8253, jedná se o klon mikroprocesoru 8051, používá stejnou instrukční sadu. Procesor je 8-mi bitový.

Mikroprocesor potřebuje obvody, které budou snímat požadované veličiny a v binární podobě je předají mikrokontroléru. Dále potřebujeme vytvořit rozhraní mezi mikroprocesorem v diferenciálu a podřízenými měniči.

V závislosti na použitém typu řízení je nutné snímat polohy „plynu“ a úhel natočení řídítek.

10.1 Snímání požadavku na moment nebo rychlost

Pro snímání je nejvhodnější převodník polohy na napětí v podobě potenciometru s lineární stupnicí, ten je připojen na zdroj napětí. Snímání polohy potenciometrem se pro tuto aplikaci dostatečně přesné a je především jednoduché a tedy i spolehlivé.

Pokud vezmu v úvahu součástky, které se už běžně vyrábí, výroba speciální rukojeti s integrovaným potenciometrem by podle mě byla příliš nákladná. Velmi dobře by však šla využít běžná plynová rukojeť motocyklu, které jsou vyráběny ve velkých sériích a mají převod na ocelové lanko (bovden). Lanko by pak přes převod otáčelo jezdcem potenciometru, jednalo by se o stejný systém jako mají např. spalovací motory se snímačem polohy škrtkící klapky.

Další možností by bylo umístit na řídítko přímo potenciometr, na který by byla připevněná páčka podobná jako je např. u přehazovačky na kole.

10.2 Snímání úhlu natočení řídítek

Toto snímání je řešeno stejně jako u snímání polohy „plynu“. Pohyb řídítek je potřeba převést na pohyb potenciometru. Jeho výstupní napětí bude odpovídat natočení řídítek δ .

10.3 Realizace a výběr A/D převodníku

Snímání polohy plynového pedálu není nijak náročné na přesnost ani rychlost snímání. Jelikož celý obvod diferenciálu bude pracovat s napájením 5V i logickými úrovněmi 5V potenciometr plynového pedálu bude také připojen na 5V. Výstupní napětí tedy bude 0 – 5V. Tuto hodnotu je třeba převést na binární číslo.

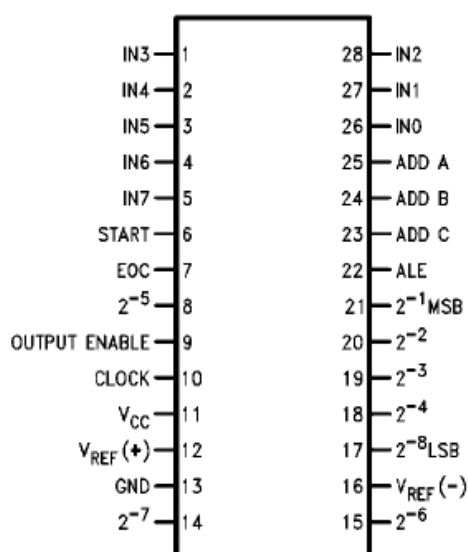
První možností která se nabízela bylo použít obvod který už má přímo integrovaný A/D převodník. Pro řízení elektronického diferenciálu jsem ale zvolil 8-mi bitový procesor s jádrem vycházejícím z řady x51. Tento procesor s integrovaným A/D převodníkem vyráběla např. firma Philips - např. mikrokontrolér 87C550, je těžko sehnatelný v pouzdře DIL, které je pro testování nevhodnější. Navíc pro mikroprocesory z řady x51 v pouzdře DIL40 je v laboratoři už hotový přípravek. Dalším faktorem bylo, že mikrokontroléry z řady x51 s A/D převodníkem jsou oproti klasickým procesorům bez převodníku dost drahé.

Rozhodl jsem se tedy pro použití A/D převodníku jako diskrétního obvodu, který bude pracovat jako periférie použitého procesoru. Pro momentové řízení by stačil A/D převodník jedno-kanálový. Pro řízení otáček ale počítám ještě s možností snímání i úhlu natočení řídítek, proto jsem použil převodník s více multiplexovanými kanály.

Přesnosti převodníku při této aplikaci není kritická. Byl požadován převodník který je běžně dostupný, je v pouzdře DIL a je levný. Všechny tyto kritéria splňoval integrovaný obvod ADC 0808. Navíc tento obvod přímo vychází s typu ADC0801, který byl navržen přímo pro mikrokontrolér 8048, předchůdce procesoru 8051.

Základní parametry ADC0808 [6]:

- výstup 8 bitů
- 8 přepínatelných vstupů pomocí multiplexoru.
- napájení 5V stejnosměrných
- čas konverze 100 μ s.



Obr. 8 Pouzdro ADC 0808 [6]

ADC0808 je převodník, který pracuje na principu postupných aproximací. Samotný konvertor je komparátor s vysokým vstupním odporem, který je postupně připojován k síti 256 odporů. Vstup komparátoru je ještě doplněn 8-mi kanálovým multiplexorem, který je ovládán pomocí tří bitů. Všechny piny jsou plně kompatibilní s TTL logickými úrovněmi. Ovládací piny jsou třístavové, lze je tedy přímo propojit s výstupy mikroprocesoru bez jakýchkoli podpůrných obvodů [6].

| Pin | Popis |
|---------------------|---|
| IN1-7 | Analogové vstupy. |
| START | Nastavením toho pinu do log „1“ se vymaže registr postupných aproximací, sestupnou hranou z log „1“ do „0“ se spustí konverze |
| EOC | Přechod tohoto pinu do log „0“ značí začátek převodu, náběžná hrana indikuje konec převodu. |
| OE | Při log „1“ se výsledek konverze přesune z registru na výstupní piny, pak musí být pin vynulován. |
| 2^{-1} - 2^{-8} | Číslicové výstupy. |
| CLOCK | Taktovací signál. |
| $V_{REF+(-)}$ | Vstupy na které je přivedeno referenční napětí. Tímto napětím nastavíme rozsah vstupního napětí AD (V_{REF-} - V_{REF+}). |
| IN0-7 | Analogové vstupy. |
| ADD A-C | Adresovací piny pro vstupní multiplexor. |
| ALE | Při přechodu tohoto pinu z log „1“ na „0“ se sejmuta hodnota adresovacích pinů. |
| V_{cc} a GND | Napájení. |

tabulka 2 Popis vývodů ADC 0808.

Obsluhu převodníku zajišťuje mikroprocesor 8052, jehož jedna brána je propojena s ovládáním převodníku. Nejprve je nastaven bit EOC a vynulován bit OE, aby byl zablokován výstup z AD, pak je nastaven bit pro výběr vstupu multiplexoru. Pak je nastaven bit ALE, a po něm bit START, aby došlo k smazání vnitřního aproximačního registru. Vynulováním ALE se sejmou hodnoty adresovacích pinů. Vynulováním START se odstartuje konverze. Nyní program čeká na vynulování EOC (konverze začala), a pak čeká na stav kdy EOC = „1“, tedy příznak dokončení konverze. Pak je nastaven bit OE, který přesune hodnotu převodu z vnitřního registru na výstup převodníku. Následuje přečtení výstupu převodníku pomocí V/V brány mikroprocesoru, která je s výstupem AD propojena. Mezi jednotlivými stavy na ovládacích pinech podle katalogového listu výrobce musí být minimální prodlevy v řádu stovek nanosekund, přesto jsem do programu musely být vloženy mezi jednotlivé příkazy prázdné instrukce (NOP) protože jinak funkce nebyla spolehlivá. Toto si vysvětluji přechodovými jevy na plošném spoji, který byl ovlivněn parazitními kapacitami.

10.4 Odesílání hodnoty do měničů

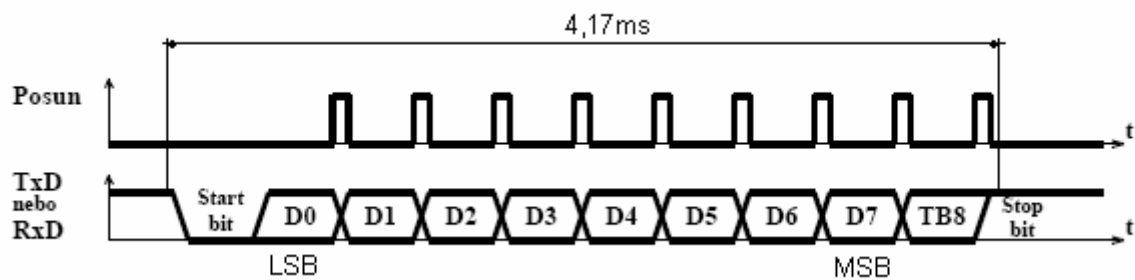
Pro odeslání výsledné hodnoty do výkonového měniče probíhá po sériové lince, kterou je mikroprocesor řady 8052 vybaven, módem s asynchronním přenosem, jehož přenosová rychlost je dána přetečením časovače T1. Rychlost přenosu je stanovena na 2400 Bd/s. Při tomto přenosu je vysláno celkem 10 bitů, první je start-bit, pak následuje 8 bitů datových a poslední je stop-bit. První se vysílá LSB, poslední MSB.

Celé odesílání 10 bitů trvá přibližně 4,17 ms. Jelikož doba převodu AD je 0,1 ms a celý program není příliš náročný, bude rychlost s jaká budou do měniče odesílána aktuální data, vzhledem k dynamice vozidla naprosto dostatečná.

U rychlostního řízení musíme odeslat dvě odlišné informace, otáčky pravého a levého kola. Použit je tedy mód 3, který funguje stejně jako mód 1, s tím rozdílem že je vysláno 9 datových bitů, 9. bit je hodnota bitu TB8 z registru SCON [7]. Při tomto přenosu je prvně odeslána požadovaná hodnota otáček pravého kola, pro kterou TB8 = „0“. Pak je odeslána požadovaná hodnota otáček pro levé kolo, TB8 = „1“.

Mikroprocesor v měniči, který hodnotu přijal tak může snadno rozlišit, jakou hodnotu má přiřadit kterému kolu.

Výhodu sériového přenosu je, že pro přenos většího množství dat nám stačí 2 vodiče, dále že sériový asynchronní přenos je velmi rozšířený a lze ho snadno zpracovat téměř jakýmkoli mikroprocesorem.

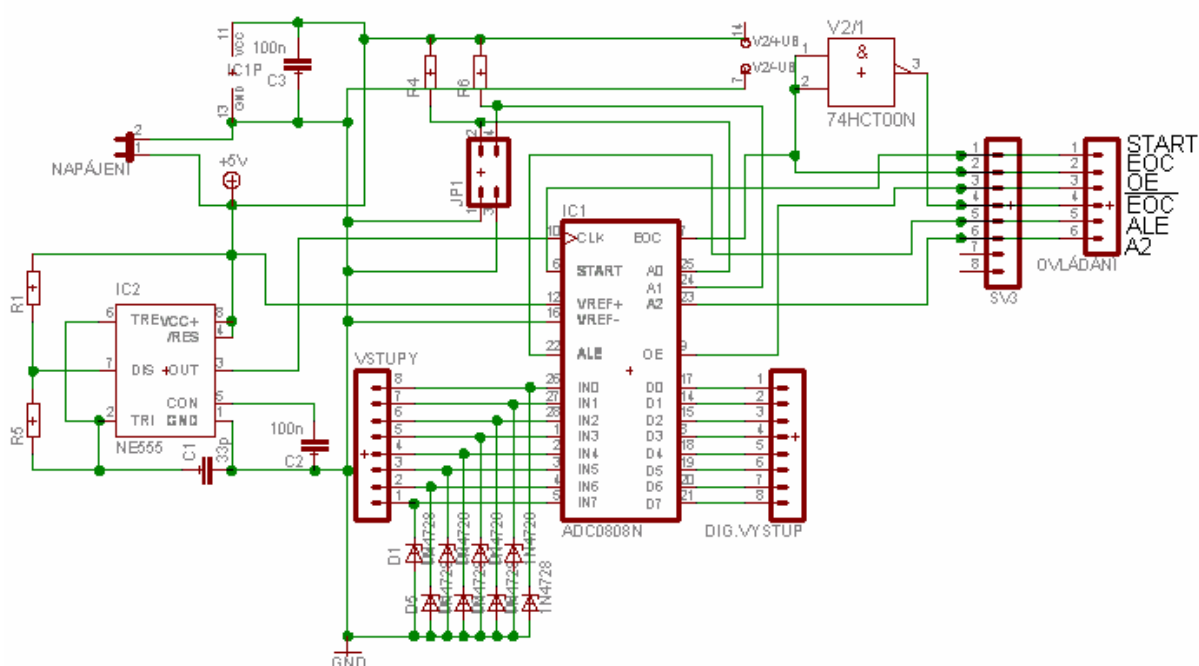


Obr. 9 Slovo odesílané po sériové lince pro rychlost 2400 Bd/s. [8]

11 Praktická realizace

11.1 Realizace testovacího přípravku s AD

Pro vyzkoušení a odladění navržených snímačů a samotného elektronického diferenciálu bylo navrženo zapojení AD převodníku, které lze spojit s přípravkem s mikroprocesorem 89S8253, využívaným při výuce mikroprocesorové techniky.



Obr. 10 Zapojení testovacího přípravku

Na přípravku je umístěn ADC 0808. Analogové vstupy a digitální výstupy jsou vyvedeny na konektory typu „LST“. Každý analogový vstup je chráněn proti přepětí zenerovou diodou s Zenerovým napětím 5,1V (použita 1N4733A).

Dva adresovací vstupy multiplexoru jsou připojeny přes PULL-UP rezistory na +5V, pomocí jumperu lze tyto dva bity uzemnit a tak přepínat analogová vstupy. Třetí adresovací bit A2 je vyveden na konektor, aby mohl být obsluhován mikroprocesorem. Zbylé vybavovací piny AD převodníku jsou také připojeny na konektor, aby mohly být ovládány mikroprocesorem. Konektory jsou použity dva, na jeden bude připojen mikroprocesor, druhý sloužil při odladování programu pro připojení osciloskopu a zobrazování log. stavů na jednotlivých pinech. Bit EOC je

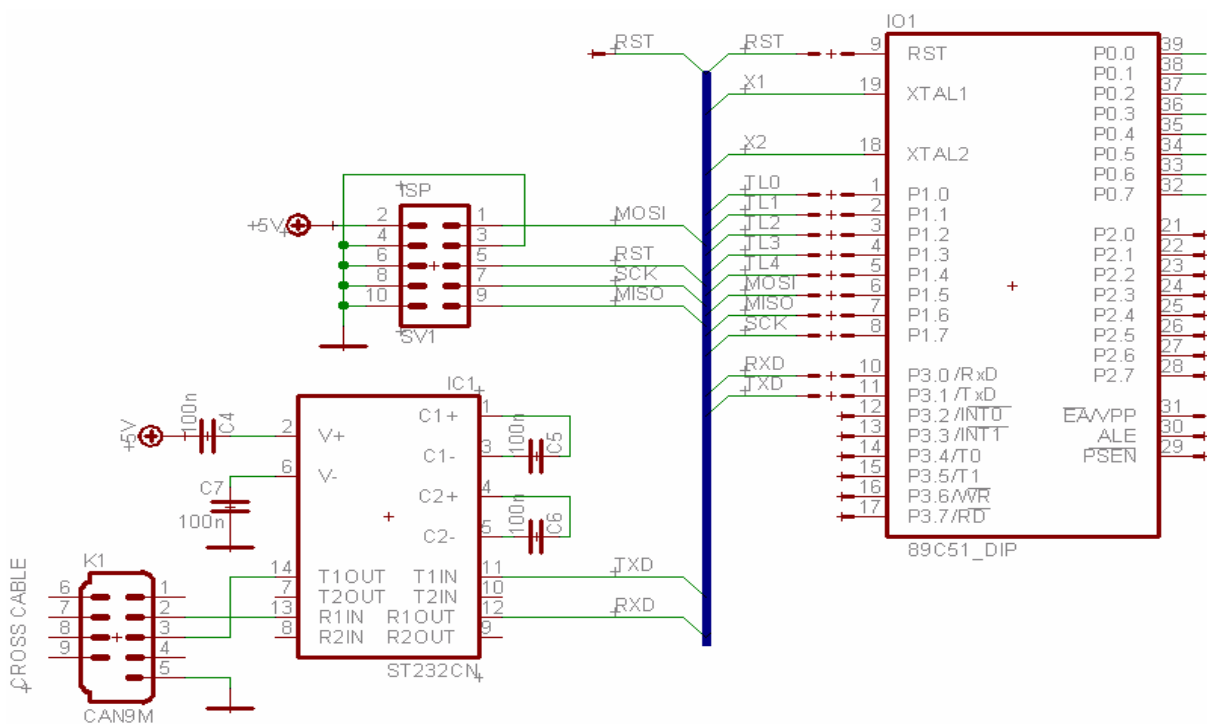
připojen na konektor dvakrát, jednou přímo a podruhé přes investor, realizovaný propojením vstupů jednoho hradla HCT 7400 (NAND). Toto je provedeno proto, aby případně bitem EOC mohl být mikroprocesor přerušován, tuto možnost jsem ale nakonec nepoužil.

Vstupní napětí k převodu bude z rozsahu 0-5V, tedy na vstupní komparátor V_{ref+} a V_{ref-} je připojeno napájecí napětí. Zem je použita společná pro analogovou i digitální část, přestože to není ideální, jelikož může dojít k zvětšení chyby AD převodníku, pro tuto aplikaci ale není přesnost převodu příliš důležitá, a jak ukázalo pozdější testování zapojení vyhovovalo pro daný účel.

Jako generátor taktovacího kmitočtu pro AD převodník je použit univerzální časovač NE555, který je zapojen jako stabilní klopný obvod. Pro taktovací kmitočet 640 kHz, odpovídá hodnota $R_5 = 33 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $C_1 = 33 \text{ pF}$. Jelikož R_5 je mnohonásobně větší než R_1 je střída téměř 1:1.

11.2 Přípravek s mikroprocesorem

Přípravek s ADC0808 je pro testování propojen s již hotovým přípravkem s mikroprocesorem 89S8253. Tento přípravek je univerzální a je využíván při výuce mikroprocesorové techniky.



Obr. 11 Část zapojení přípravku s mikroprocesorem

Na obrázku (Obr. 11) je část zapojení přípravku. Celé zapojení je ještě doplněno o obvod resetu a oscilátor, které jsou připojeny podle doporučení výrobce procesoru v datasheetu [7]. Mikroprocesor je napájen 5V a pracuje v 5V logice.

Z procesoru je vyvedeno na konektor sériové programování ISP vnitřní flash paměti. Po připojení na programátor vyvedeného z LPT portu PC je možné pomocí programovacího software od firmy Atmel, programovat mikroprocesor bez jeho vyjmutí z patice. Toto velmi usnadní ladění programu a případné aktualizace softwaru např. při výměně motorů.

Sériová linka je připojena na obvod MAX232, který obsahuje nábojovou pumpu a převádí výstupní úroveň sériové linky mikroprocesoru na 12V, aby byla kompatibilní s sériovým portem v PC.

Přípravek je ještě v skutečnosti doplněn o 8 LED diod které jsou připojeny na bránu P0 a lze je využít zobrazování proměnných při ladění programu. Všechny piny jsou vyvedeny na LST konektor. Pomocí jumperů mohou být připojeny k perifériím jako LED diody a tlačítka. Tyto další periférie byly využity při ladění programu, do konečného obvodu již nebyly použity.

12 Ověření navržených struktur

Ověření navržené struktury přímo na vozidle nemohlo být uskutečněno, protože do experimentálního elektromobilu v době uzavření této práce nebyly navrženy ani zhotoveny výkonové měniče. Jízdní zkoušky tedy nemohly být provedeny.

Testování probíhalo v laboratoři na testovacím přípravku AD převodníku a mikroprocesoru. Výstup z AD převodníku je připojen na bránu P2. Ovládací piny AD jsou připojeny na P3 (tabulka 3).

| Pin ADC 0808 | Pin mikroprocesoru |
|---------------------|---------------------------|
| OE | P3.2 |
| EOC | P3.3 |
| START | P3.4 |
| ALE | P3.5 |
| A2 | P3.7 |

tabulka 3 Propojení ovládacích pinů AD s mikroprocesorem.

Na vstup AD byl připojen regulovatelný zdroj, aby se dalo měnit vstupní napětí. Výstupní hodnoty jsou odesílány po rozhraní RS 232 do PC, kde pomocí programu Terminál, nakonfigurovanému na odpovídající parametry přenosu, jsou snímány a zobrazovány.

U řešení s řízením rychlosti otáčení byla pouze vyzkoušena funkčnost přípravku. Správnost a přesnost vypočtených hodnot byla ověřena při spuštění programu v softwarovém simulátoru mikroprocesoru. Tyto hodnoty se shodovali s chybou max. 2 bitů, vzniklou v důsledku zaokrouhlování v průběhu výpočtu.

Závěr

Velkou výhodou MMS je, že kola jsou nezávislá na sobě, rozjezd je tedy možný i pokud jedno kolo je na povrchu bez adheze. Obzvláště výhodné je toto u řízení otáček, kdy i kolo bez adheze se bude otáčet pouze otáčkami navolenými akcelerátorem. U momentového řízení se sice kolo bez adheze roztočí na max. otáčky, ale na druhé kolo to nebude mít vliv, pouze se bude plýtvat energií z baterie.

Použití regulace momentu nebo rychlosti otáčení motorů, bude závislé na použití výkonového měniče. U tříkolky je použita varianta stejnosměrného motoru s permanentními magnety, u kterého je moment motoru přímo úměrný rotorovému proudu. U řízení momentu snímáme pouze polohu pedálu akcelerátoru. Poloze akcelerátoru přímo odpovídá požadavek na moment a ten je úměrný rotorovému proudu. Výkonový DC/DC měnič by tak pracoval pouze jako regulátor proudu motoru, na základě požadované hodnoty. Na obě kola by byl přiveden stejný moment, což by podle odvozených vztahů umožnilo plynulé zatáčení vozidla.

Do vozidla se předpokládá i použití asynchronního motoru. Ten je regulován frekvenčním měničem. Pokud bychom byli nuceni použít měnič se skalárním řízením, museli bychom použít variantu diferenciálu s regulací otáček. Pro řízení momentu by musel být použit měnič s vektorovým řízením, jehož realizace je náročnější.

Do vozidla bych navrhoval použít elektronický diferenciál s řízením momentu, protože je výhodou, že nemusíme snímat úhel natočení řídítek. Navíc samotné ovládání akcelerátorem je analogické k ovládání spalovacího motoru, které má již většina lidí zažité. Pouze pokud bychom do elektromobilu instalovali asynchronní motory, bylo by nutné zvážit jak nákladné a komplikované by bylo použití frekvenčního měniče, který umožňuje přímo řídit moment.

Sestavil jsem obvod, který jsem otestoval a který snímá vstupní veličiny a odesílá požadované hodnoty do frekvenčních měničů po sériové lince. Tento obvod jsem vyzkoušel a odladil na něm programy pro mikroprocesor, který celý diferenciál řídí. Tyto kódy programů jsou i se zapojeními v příloze práce, respektive na přiloženém CD. Výstupní hodnoty jsem u momentového řízení zobrazoval v PC, kam byly přeneseny sériovou linkou. U programu pro řízení rychlosti otáčení kol jsem

použil již vyzkoušené programy pro ovládání AD převodníku a sériové linky, které jsem použil u řízení momentu. Samotné zobrazení a porovnání vypočtených a odeslaných hodnot otáček kol v PC by bylo komplikované, proto jsem funkci této části ověřil v simulátoru mikroprocesoru. Hodnoty, vypočtené mikroprocesorem se od hodnot, vypočtených podle odvozených vztahů v tabulkovém editoru liší maximálně o 2 bity, tedy $1/64$ celého rozsahu. Tato chyba je dána zaokrouhlováním v průběhu výpočtu.

Vysvětlivky symbolů použitých v vzorcích

d_w = rozchod vozidla

F_{ODS} = odstředivá síla při zatáčení

F_{ODS}' = třecí síla mezi pneumatikami a vozovkou

g = gravitační zrychlení Země

i_C = celkový převodový poměr od motoru k kolu

i_C = celkový převodový poměr od motoru k kolu

k = korekce pro otáčky kol v zatáčce

$k_{pre.}$ = převodový poměr od motoru k kolu.

L_w = rozvor vozidla

m = hmotnost vozidla

M_L = moment levého kola

M_M = celkový moment obou motorů.

M_R = moment pravého kola

n_L = otáčky levého kola

n_M = otáčky motoru.

n_R = otáčky pravého kola

P_L = výkon odebraný z levého motoru

P_M = celkový výkon vozidla

P_R = výkon odebraný z pravého motoru

R = poloměr otáčení

r = průměr kola

S = střed otáčení

v_C = rychlost vozidla

v_{jizdy} = rychlost jízdy vozidla

v_L = obvodová rychlost levého kola,

v_{max} = maximální rychlost průjezdu zatáčkou

v_R = obvodová rychlost pravého kola

δ = úhel natočení předního kola.

$\Delta\omega$ = diference otáček pravého a levého kola

μ = součinitel adheze mezi pneumatikami a vozovkou

ω_{k_L} = úhlová rychlost otáčení levého kola po zpřevodování

ω_{k_R} = úhlová rychlost otáčení pravého kola po zpřevodování

ω_L = úhlová rychlost otáčení levého kola

ω_M = otáčky motoru (uvažují všechny převodové poměry od motoru k kolu rovny jedné).

ω_R = úhlová rychlost otáčení pravého kola

ω_u = úhlová rychlost zatáčení

ω_v = základní úhlová rychlost otáčení kol

Použité zkratky

MMS – Multi machine system, systém vozidla s více samostatně řízenými motory.

LSB – nejméně význačný bit.

MSB – nejvíce význačný bit.

x51 – mikroprocesory jejichž základem je jádro 8051.

DTC – direct torque control, výkonově měniče které umožňují přímé řízení momentu elektromotoru.

ISP – in system programming, programování mikroprocesoru přímo v zařízení, bez nutnosti jeho vyjmutí.

Seznam literatury

[1] HARTANI, K., et al. *Direct torque control of an elektronical differential for electric vehicle with separate wheel drives* [online]. Alžírsko : Journal of Automation & System engineering, 2008 ,[cit. 2009-05-14]. Angličtina. Dostupný z WWW: <http://jase.esrgroups.org/2_2_2_08%20proof.pdf>. ISSN 1112-8542.

[2] KOREIS, Josef; KOREISOVÁ, Gabriela; ŠEFČÍK, Ivo; MAZÁNEK, Jan; *Řízení a distribuce výkonu na poháněná kola vozidla*. Česká republika : Scientific papers of the University of Pardubice, 1999/5 ,[cit. 2009-05-14]. Čeština. Dostupný z WWW: <<http://library.upce.cz/Sources/CL117.pdf>>. ISSN 1211-6610.

[3] VLK, František. *Převodová ústrojí motorových vozidel*. 2000. vyd. Brno : Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. 312 s. ISBN 80-238-5275-2.

[4] NOVÁK, Jaroslav. *Elektromechanické systémy v dopravě a ve strojírenství*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. 86 s. ISBN 80-01-02457-1.

[5] SZTWIERTNIA, Juraj. *Stabilita vozidla při jízdě v zatáčce*. Pardubice, 2006. 61 s. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí bakalářské práce Slamka, Juraj. Dostupný z WWW: <<http://library.upce.cz/Sources/D15706.pdf>>.

[6] *ADC0808/ADC0809 8-Bit mP Compatible A/D Converters with 8-Channel Multiplexer* [online]. National Semiconductors, 1995 [cit. 2009-05-14]. Angličtina. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS005672.PDF>>.

[7] *Datashetet mikroprocesoru 89S8253*, Atmel, 2003 [cit. 2009-05-14]. Angličtina. Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc3286.pdf>.

[8] SKALICKÝ, Petr. *Mikroprocesory řady 8051*. 1998. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 1998. 159 s.

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| tabulka 1 Parametry experimentálního elektromobilu | 12 |
| tabulka 2 Popis vývodů ADC 0808. | 41 |
| tabulka 3 Propojení ovládacích pinů AD s mikroprocesorem. | 47 |

Seznam obrázků

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 1 | Uspořádání elektromobilu – MMS [1] | 11 |
| Obr. 2 | Geometrie vozidla v zatáčce [1] | 16 |
| Obr. 3 | Blokové schéma mechanického diferenciálu | 23 |
| Obr. 4 | Nákres mechanického diferenciálu | 23 |
| Obr. 5 | Blokové schéma pohonu pro řízení s přímým požadavkem momentu | 30 |
| Obr. 6 | Blokové schéma rychlostní regulace | 32 |
| Obr. 7 | Vývojový digram výpočtu otáček kol pro mikroprocesor | 37 |
| Obr. 8 | Pouzdro ADC 0808 [6] | 41 |
| Obr. 9 | Slovo odesílané po sériové lince pro rychlost 2400 Bd/s. [8] | 43 |
| Obr. 10 | Zapojení testovacího přípravku | 44 |
| Obr. 11 | Část zapojení přípravku s mikroprocesorem | 46 |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf. 1 Úhlová rychlost otáčení kol v závislosti na úhlu natočení řídítek, pro základní úhlovou rychlost 100 rad/s. | 21 |
| Graf. 2 Závislost difference otáček pravého a levého kola v závislosti na úhlu natočení řídítek pro základní úhlovou rychlost 100 rad/s | 22 |
| Graf. 3 Otáčky motoru při zatáčení ve vztahu k maximální rychlosti průjezdu zatáčkou | 33 |
| Graf. 4 Rychlost otáčení kol pro otáčky omezené na 3500 ot/min | 34 |
| Graf. 5 Korekce k. | 35 |

Seznam příloh

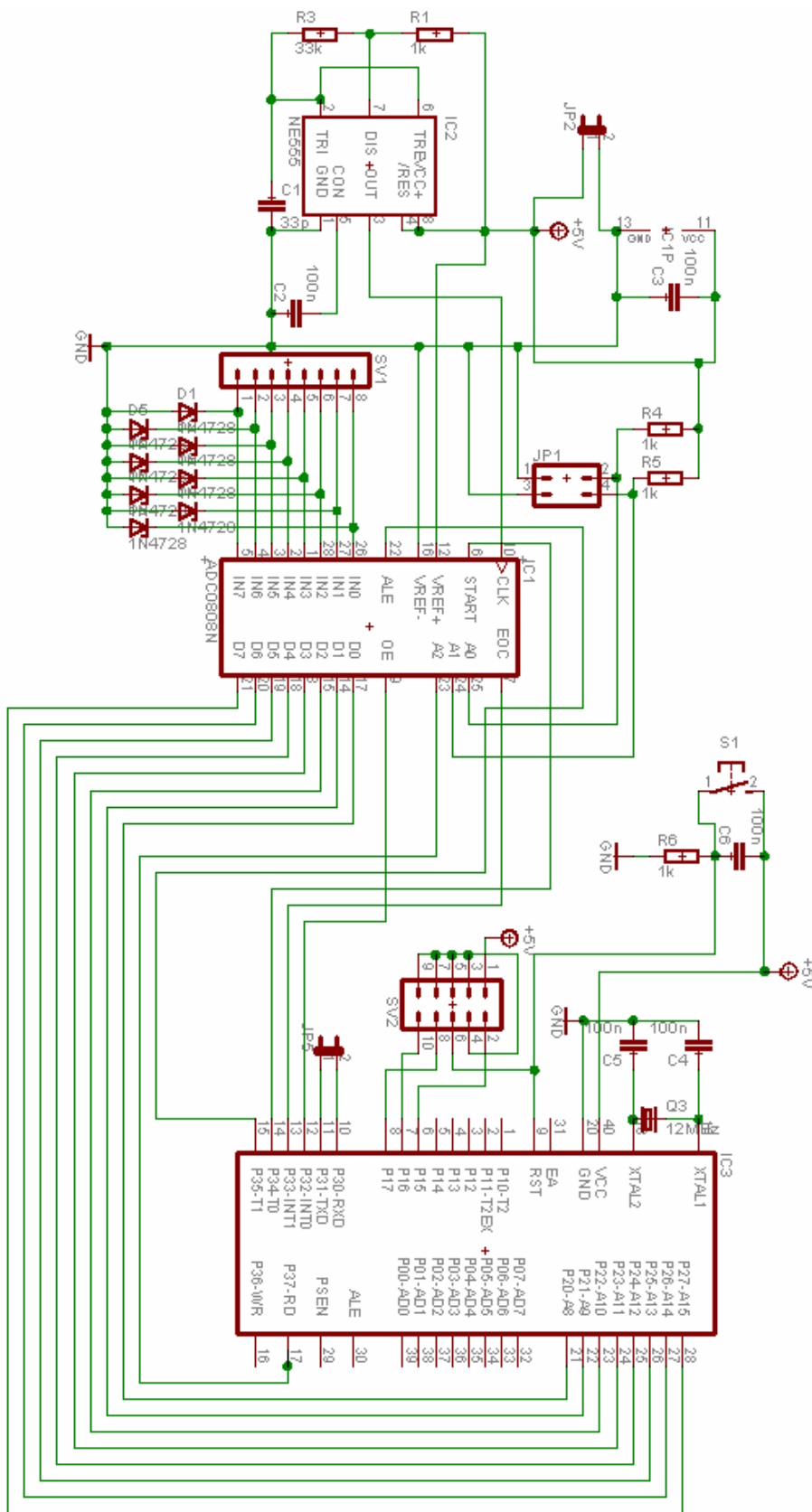
- 1) Zapojení elektronického diferenciálu.
- 2) Návrh plošného spoje pro elektronický diferenciál.

Na CD:

- 3) Program v jazyce Assembler-51 pro diferenciál s řízením momentu.
- 4) Program v jazyce Assembler-51 pro diferenciál s řízením otáček.
- 5) Schéma diferenciálu a plošný spoj v programu Eagle.

Příloha č. 1 – Schéma zapojení elektronického diferenciálu

+



Příloha č. 2 – Návrh plošného spoje pro elektronický diferenciál

