



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ PODVOZKU FORMULE STUDENT

MODELING AND CONTROL OF REAR DRIVEN AXLE FOR FORMULA STUDENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matúš Kavec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Matuš Kavec

ID: 220990

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Modelování a řízení podvozku Formule Student

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte model podvozku formule Dragon v prostředí MATLAB Simulink umožňující modelování prokluzu kol vůči vozovce.
2. Upravte parametry simulace tak, aby co nejvíce odpovídaly reálné soustavě.
3. Ověřte správnost modelu porovnáním s reálným podvozkem formule Dragon.
4. Navrhněte regulaci podvozku tak, aby byla zajištěna požadovaná hodnota prokluzu.
5. Ověřte funkčnost regulace na modelu podvozku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

RILL, Georg; CASTRO, Abel Arrieta. Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling with MATLAB®. CRC Press, 2020.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 23.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá návrhom regulačnej štruktúry pre model monopostu Formula Student. Súčasťou práce je návrh a následné odladenie modelu tak, aby mal čo najlepšiu odozvu v porovnaní s realitou. Pre vytvorenie regulačnej štruktúry bol použitý PID regulátor s dvoma stupňami voľnosti. Vytvorená regulačná štruktúra má za úlohu regulovať prešmyk sústavy na požadovanú hodnotu. Obmedzením prešmyku, ktorý je pri závodných vozidlách častokrát nechcený, môžeme dostať lepšiu odozvu pri akcelerácii.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Kontrola trakcie, regulátor, PID, TCS, Matlab, Simscape, Formula Student, TU Brno Racing, Dragon e1

ABSTRACT

This thesis is focused on design of controll structure of Formula Student monopost. Part of the thesis is a design and subsequent dbgging ofthe model so it has the best possible response compared to reality. A PID controller with two degrees of freedom was used to create the control structure. Created controll structure has the task of regulating the system to the required value. By reducing skid, which is often unwanted in race cars, we can achieve better response while accelerating.

KEYWORDS

Traction control, controller, PID, TCS, Matlab, Simscape, Formula Student, TU Brno Racing, Dragon e1

KAVEC, Matúš. *Modelování a řízení podvozku Formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022, 42 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Matúš Kavec
VUT ID autora: 220990
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma záverečnej práce: Modelování a řízení podvozku Formule Student

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu semestrálnej práce pánovi Ing. Lukášovi Pohlovi Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Taktiež by som sa chcel poďakovať tímu TU Brno Racing za umožnenie meraní na ich vozidle Dragon e1. V neposlednom rade by som sa rád poďakoval rodine, ktorá ma počas štúdia podporovala.

Obsah

Úvod	10
1 Teoretická časť práce	12
1.1 Hnacie ústrojenstvo	12
1.1.1 Motor	13
1.1.2 Prevodovka	13
1.1.3 Pneumatiky	14
1.1.4 Snímanie otáčok kolies	16
1.2 Simulácia	16
1.2.1 Simscape	16
1.2.2 Parameter Estimator	17
1.2.3 CAD 3D model	18
1.3 Kontrola trakcie	19
1.3.1 Anti-lock Brake System – Antiblokovací systém bŕzd	19
1.3.2 Traction control system – Systém na kontrolu trakcie	19
1.3.3 Electronic stability program – ESP	20
2 Výsledky práce	21
2.1 Model	21
2.1.1 Hnacie ústrojenstvo	21
2.1.2 Vozidlo	23
2.2 Reálna sústava	23
2.2.1 Meranie	23
2.2.2 Úprava modelu	25
2.2.3 Porovnanie reálnej sústavy a modelu	26
2.3 Regulátor	29
2.3.1 Výsledky regulácie	30
Záver	35
Literatúra	36
Zoznam symbolov a skratiek	38
Zoznam príloh	39
A Prílohy	40
A.1 Simscape model	40
A.2 Merania	41

Zoznam obrázkov

1	Tím TU Brno Racing na FS Czech	11
1.1	Typické usporiadanie magnetov v PMSM motore [1] a)Radiálne umiestnené magnety b)Magnety umiestnené pod povrchom rotoru c)Povrchovo umiestnené magnety	12
1.2	Momentová charakteristika motora	14
1.3	Závislosť trakcie na teplote a tlaku pneumatiky [2]	15
1.4	Obrázok popisujúci zistenie empirických parametrov pre Pacejka rovnicu[3]	16
1.5	Schematický náčrt snímania otáčok na vozidle [4]	17
1.6	3D model vozidla v prostredí <i>Creo</i>	18
2.1	Submodel nahrádzajúci pohonné ústrojenstvo reálneho modelu	22
2.2	Submodel obsahujúci prvky späté s telom vozidla	24
2.3	Rýchlosť otáčania motorov počas akcelerácie pri strate trakcie	25
2.4	Rýchlosť otáčania motorov počas akcelerácie bez straty trakcie	26
2.5	Porovnanie otáčok motora pred úpravou momentovej charakteristiky s realitou	27
2.6	Porovnanie otáčok reálneho motora a simulácie	27
2.7	Výsledky simulácie pre model pneumatiky využívajúci magickú rovnicu 1.3	28
2.8	Výsledky simulácie pre model pneumatiky využívajúci pozdĺžnu silu	29
2.9	Submodel regulátoru	29
2.10	Porovnanie aktuálnej a žiadanej hodnoty prešmyku pre reguláciu na 10%	31
2.11	Porovnanie rýchlosti otáčania motora pri regulovaní na požadovanú hodnotu 10%	31
2.12	Porovnanie aktuálnej a žiadanej hodnoty prešmyku pre reguláciu na 10%	32
2.13	Porovnanie rýchlosti otáčania motora pri regulovaní na požadovanú hodnotu 10% a nedodržaní 0 ustálenej odchýlky	32
2.14	Porovnanie aktuálnej a žiadanej hodnoty prešmyku pre reguláciu na 20%	33
2.15	Prechodový zákmit systému, detail obrázku 2.14	33
2.16	Porovnanie rýchlosti otáčania motora pri regulovaní na požadovanú hodnotu 20%	34
A.1	Simulačný model sústavy a regulátoru	40
A.2	Namerané hodnoty počas akcelerácie kedy došlo k strate trakcie	41
A.3	Namerané hodnoty počas akcelerácie kedy nedošlo k strate trakcie	42

Zoznam tabuliek

1.1	Parametre motoru TG N6	13
-----	----------------------------------	----

Úvod

Práca sa venuje modelovaniu pohonného systému, vozidla formule študent. Ďalej práca poukazuje na potrebu implementácie regulačnej štruktúry, ktorá obmedzí maximálny krútiaci moment pri akcelerácii tak, aby nedochádzalo k prešmyku pneumatík. Prešmykovanie pneumatík značne zhoršuje dobu akcelerácie.

Formula študent je medzinárodná súťaž, v ktorej sa tímy z technických univerzít snažia zostrojiť jednomiestny závodný monopost¹. Súťaž pochádza zo Spojených štátov Amerických, kde vznikla v roku 1981 a do Európy sa dostala v roku 1998. Cieľom súťaže je za jednu sezónu (zimný a letný semester) vytvoriť závodné vozidlo. S týmto vozidlom následne súťažia v rôznych disciplínach. Jednou z disciplín je akcelerácia na 75m. V tejto práci sa budem venovať najmä optimalizácii jazdných vlastností pre túto disciplínu. Medzi ďalšie dynamické disciplíny patrí *Skidpad*, kde je vozidlo postavené na trať v tvare čísla 8, to umožňuje vyskúšať mechanické spracovanie podvozku. Aby sa vyskúšala aj dlhodobá spoľahlivosť musí vozidlo odjazdiť trať dlhú 22 km. Okrem dynamických disciplín sa súťaží aj v statických disciplínach, kde musí tím prezentovať svoje konštrukčné a aj elektrické riešenie. Tím na súťaži vystupuje ako virtuálna firma, ktorá sa výrobou vozidla snaží vytvoriť zisk. Práve prezentácia tvorby zisku patrí k jednej z ďalších disciplín, v ktorej sa súťaží. Podujatie je celkovo komplikovaná záležitosť, kde si študenti z viacerých oborov vedia nájsť svoje uplatnenie.

Práca je vytvorená v spolupráci s tímom TU Brno Racing, ktorý pôsobí už od roku 2010 na Fakulte strojného inžinierstva. Tím patrí medzi svetovú špičku. Doteraz sa tím venoval vývoju vozidiel len so spaľovacím pohonom. Sezóna 2020/2021 bola výnimočná. Na obrázku 1 môžete vidieť dve vozidlá, ktoré v tomto roku opustili dielňu tímu TU Brno Racing. Červené vozidlo naľavo je poháňané jednovalcovým spaľovacím motorom s turbom. Druhé napravo s označením E74 s elektrickým pohonom, ktoré bolo využité pre merania v tejto bakalárskej práci.

¹Jednomiestny závodný automobil s otvorenou kabínou



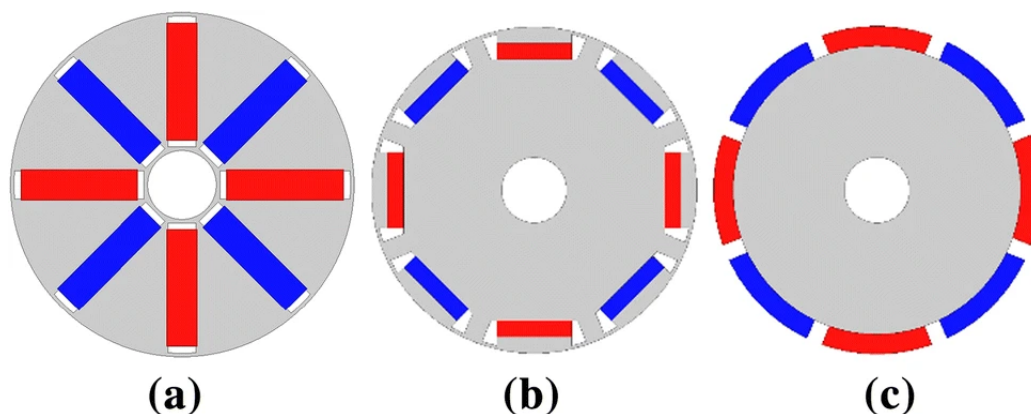
Obr. 1: Tým TU Brno Racing na FS Czech

1 Teoretická časť práce

1.1 Hnacie ústrojenstvo

Naše vozidlo využíva dva nezávislé motory s permanentným magnetom taktiež označované ako PMSM. Tieto motory sú spojením indukčných a bezkartáčový (bezkomutátorový) motorov. Výhodou oproti motorom s komutátorom je, že nedochádza k opotrebeniu kartáčov a komutátoru, ktorý „prepína“ medzi jednotlivými vinutiami motora. PMSM motor má elektronickú komutáciu, o ktorú sa stará frekvenčný menič. Motor je budený sínusovým signálom, ktorý je generovaný frekvenčným meničom. Ten sa snaží udržiavať požadovanú hodnotu prúdu, ktorá tečie motorom. PMSM motor má vysokú hustotu výkonu oproti asynchrónnym indukčným motorom. Práve pre vysokú výkonovú hustotu tieto motory využívame v našom pohonom systéme a sú široko využívané aj komerčných elektrických pohonoch. Nasadenie takéhoto typu motora nám uľahčuje vďaka menším rozmerom jeho zástavbu [5].

Na monoposte sú hnané len zadné kolesá. Každé z týchto hnaných kolies je spojené s motorom pomocou prevodovky s jedným prevodovým stupňom. Vďaka tomuto usporiadaniu vieme ovládať motory nezávisle na sebe. Parametre motora z dátového listu sú uvedené v tabuľke 1.1. Ako som už vyššie spomínal, využívame synchronný motor s permanentnými magnetmi. Jedná sa o 10 pólový motor typu inrunner (rotuje vnútorná časť motora) s povrchovo umiestnenými magnetmi 1.1. Motor je určený na nominálne napätie medziobvodu 400V.



Obr. 1.1: Typické usporiadanie magnetov v PMSM motore [1] a) Radiálne umiestnené magnety b) Magnety umiestnené pod povrchom rotoru c) Povrchovo umiestnené magnety

Tab. 1.1: Parametre motoru TG N6

Menovité otáčky	5500	min^{-1}
Menovitý krútiaci moment	35	Nm
Menovitý prúd	90	A
Menovitý výkon	24,5	kW
Maximálne otáčky	10770	min^{-1}
Maximálny krútiaci moment	72	Nm
Maximálny prúd	218	A
Maximálny výkon	32,4	kW
EMF konštanta	26	V/1000
Momentová konštanta	0,43	Nm/A
Hmotnosť	13,8	kg
Zotrvačnosť motora	25,6	kg cm^2

1.1.1 Motor

Motor je v modeli reprezentovaný blokom *Motor & Drive*. Tento blok nahrádza všeobecný motor ako aj jeho riadenie, čo umožňuje rýchlu implementáciu do modelu [6]. Parametre tohto bloku boli nastavené podľa dátového listu motora 1.1. Po spustení simulácie a porovnaní výsledkov simulácie a reality bola momentová charakteristika upravená tak, aby odpovedala realite. Pokiaľ by sa výsledky simulácie a reality nezhodovali došlo by k značnému zaneseniu chyby do regulácie v prípade, že by sa tento systém aplikoval na reálnu sústavu. Na obrázku 1.2 je modrou farbou zaznačená upravená momentová charakteristika motora, s ktorou následne aj model motora počíta. Oranžovou je vyznačená charakteristika prebratá z dátového listu motora TG N6.

1.1.2 Prevodovka

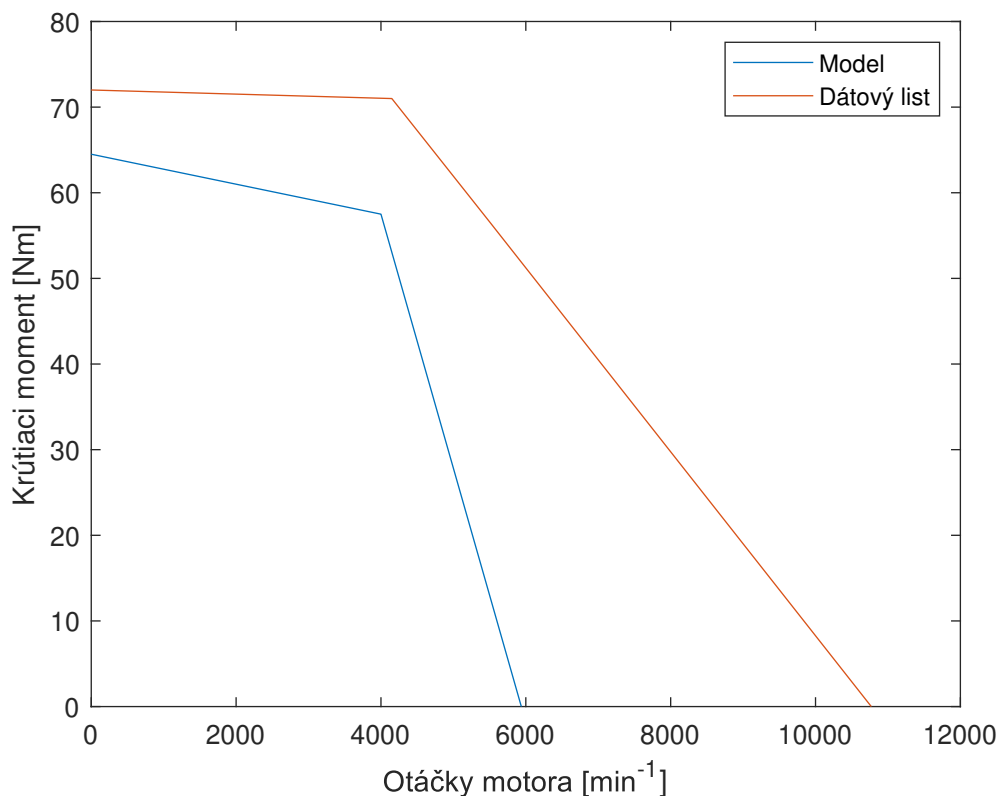
Vo vozidle sa nachádza prevodovka s čelným ozubením a prevodovým pomerom 22/111. Vďaka tomuto prevodovému pomeru sa otáčky motora približne 5 násobne spomalia, čím ale dostaneme teoretickú maximálnu rýchlosť 96,5 km/h.

$$\omega = \omega_m \cdot k = \frac{2\pi}{60} 5500 \cdot \frac{22}{111} = 114,15 \text{ rad/s} \quad (1.1)$$

kde ω_m je uhlová rýchlosť motora v rad/s a k je prevodový pomer prevodovky.

$$v = \omega \cdot r = 114,15 \cdot 0,235 = 26,83 \text{ m/s} \quad (1.2)$$

kde v je obvodová rýchlosť kolesa a r je polomer kolesa. Kolesá sú spojené s prevodovkou pomocou poloosi zakončených homo-kinetickými klbmi. Tie umožňujú voľný pohyb zavesenia kolies a zároveň prenášajú krútiaci moment na koleso.



Obr. 1.2: Momentová charakteristika motora

1.1.3 Pneumatiky

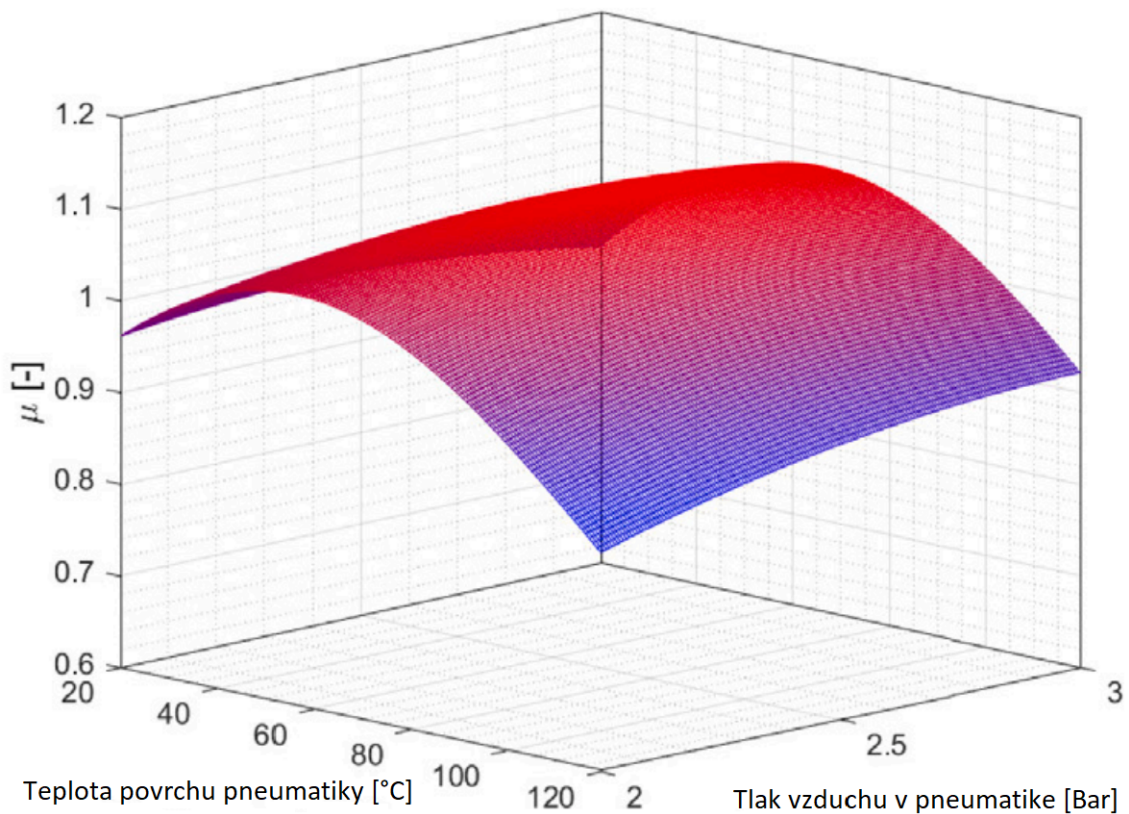
Jednou z najdôležitejších súčastí na vozidle sú práve pneumatiky. Je to jediná časť automobilu, ktorá sa priamo dotýka vozovky a prenáša všetku silu generovanú motormi. Monopost využíva pneumatiky značky Continental s modelovým označením C19 a rozmerom 205/470 R13. Jedná sa o hladké pneumatiky bez dezénu pre maximalizáciu kontaktnej plochy.

Na správanie pneumatiky na danom druhu povrchu pôsobí veľké množstvo faktorov. Napríklad druh podkladu, na ktorom sa pneumatika pohybuje, jej zataženie, teplota, ktorá je priamo spojená s tlakom alebo samotný rozmer pneumatiky. Pokiaľ pneumatiku príliš zatažíme tak sa nielen zväčší kontaktná plocha, čo je žiaduci efekt ale taktiež sa zvýši jej valivý odpor. Naše pneumatiky majú z pozorovania najlepšiu odozvu na suchom asfaltovom povrchu. [2]

Druhým faktorom, ktorý má na správanie sa pneumatiky veľký dopad je jej teplota. Tento jav je možné vidieť na obrázku 1.3. Pokiaľ je pneumatika studená, má nižší koeficient trenia, nedokáže preniesť veľký krútiaci moment a dôjde k jej prešmyku, to isté sa deje pokiaľ je pneumatika prehriata. Pokiaľ chceme pneumatiku využívať na maximum je potrebné ju prevádzkovať v oblasti jej maximálneho

koeficientu trenia.

Domnievam sa, že toto správanie spôsobuje druh zmesi pneumatiky. Pokiaľ je zmes tvrdá (studená pneumatika alebo má iné chemické zloženie) nedochádza k dostatočnému vyplneniu pórov v asfalte alebo inak povedané pneumatika sa valí len po povrchu a ľahšie sa na ňom prešmykne. Keď je pneumatika prehriata tak zmes, z ktorej je vyrobená je natoľko riedka, že síce dôjde k splynutiu asfaltu a gummy, ale pri aplikovaní väčšieho krútiaceho momentu sa kúsky materiálu začnú odtrhávať a dôjde opäť k prekĺznutiu pneumatiky na povrchu. Taktiež ak má pneumatika príliš vysokú teplotu dochádza k nadmernému opotrebeniu.



Obr. 1.3: Závislosť trakcie na teplote a tlaku pneumatiky [2]

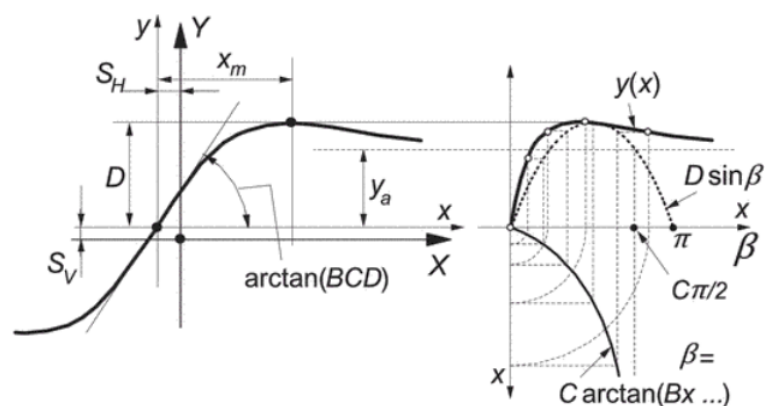
Na modelovanie pneumatiky bol využitý blok *Tire (Magic formula)*, ktorý modeluje pozdĺžne správanie pneumatiky. Tento model využíva na správanie pneumatiky Pacejka rovnicu. Rovnica počíta interakciu pneumatiky a vozovky. Jedná sa o rovnicu s empiricky zistenými koeficientmi. Model pneumatiky bohužiaľ neráta s ohriatím gummy na pneumatike, ku ktorému dochádza počas jazdy.

$$y(x) = D \cdot \sin(C \cdot \arctan[B \cdot x - E \cdot (B \cdot x - \arctan[B \cdot x])]), \quad (1.3)$$

$$Y(X) = y(x) + S_V, \quad (1.4)$$

$$x = X + S_H, \quad (1.5)$$

kde S_v je vertikálny posun, S_h je horizontálny posun a X je vstupná premenná. Parametre B , C , D , E nemajú žiadne fyzikálne opodstatnenie, ale udávajú tvar závislosti sily, ktorú pneumatika dokáže preniesť na pozdĺžnom šmyku pneumatiky. Za bežných okolností je S_h a S_v nulové a krivka prechádza počiatkom. Tvar tejto krivky je často krát meraný v laboratórnych podmienkach kde je pneumatika testovaná na bežiacom páse a sú merané sily, ktoré dokáže preniesť z testovacej stolice na snímač [3].



Obr. 1.4: Obrázok popisujúci zistenie empirických parametrov pre Pacejka rovnicu[3]

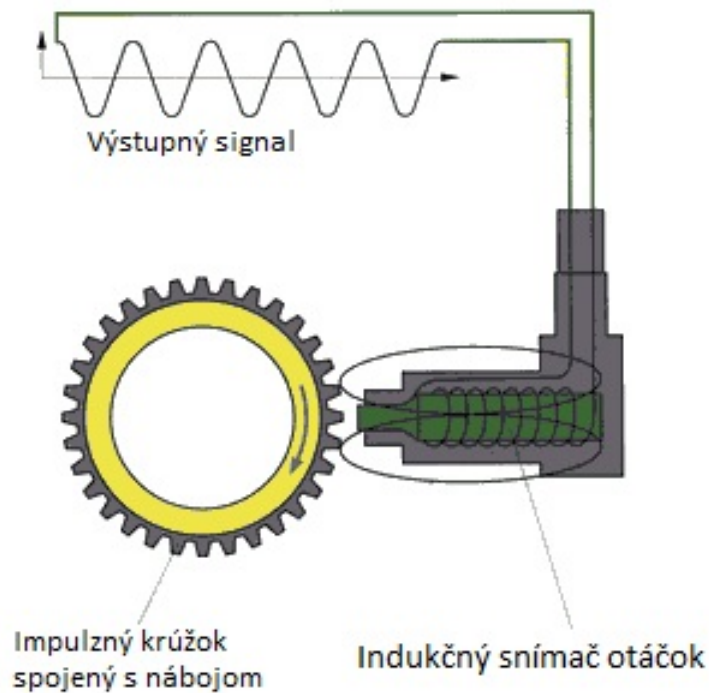
1.1.4 Snímanie otáčok kolies

Vozidlo využíva na snímanie rýchlosti otáčania kolies indukčné snímače. Na náboji kolesa sa nachádza ocelový krúžok s 45 zubami 1.5. Binárny výstup zo snímača následne spracúva hlavná riadiaca jednotka vozidla, vytvorená naším tímom a taktiež aj dátový záznamník Omega L2 od značky Cosworth.

1.2 Simulácia

1.2.1 Simscape

Na vytvorenie simulačného modelu je využité rozšírenie *Simscape*. Je to rozširujúci balíček do prostredia *Matlab Simulink*. Umožňuje modelovanie vo viacerých fyzikálnych doménach zároveň. Túto jeho vlastnosť využívam aj ja vo svojej práci, kedy modelujem ako aj mechanické správanie, tak aj elektrický motor. Zároveň je možné využívať všetky simulačné bloky, ktoré poskytuje *Simulink* a aj priame prepojenie



Obr. 1.5: Schematický náčrt snímania otáčok na vozidle [4]

s *Matlab*-om, v ktorom je jednoduché zobrazovať výsledky a spracúvať namerané dáta. Veľkou výhodou použitia balíčka *Simscape* je, že používateľ nemusí dopodrobna poznať všetky matematické popisy použitých systémov. Tieto matematické operácie sú elegantne schované v jednotlivých blokoch, používateľ len správnym spôsobom prepája jednotlivé bloky a nastavuje parametre simulačných blokov [7].

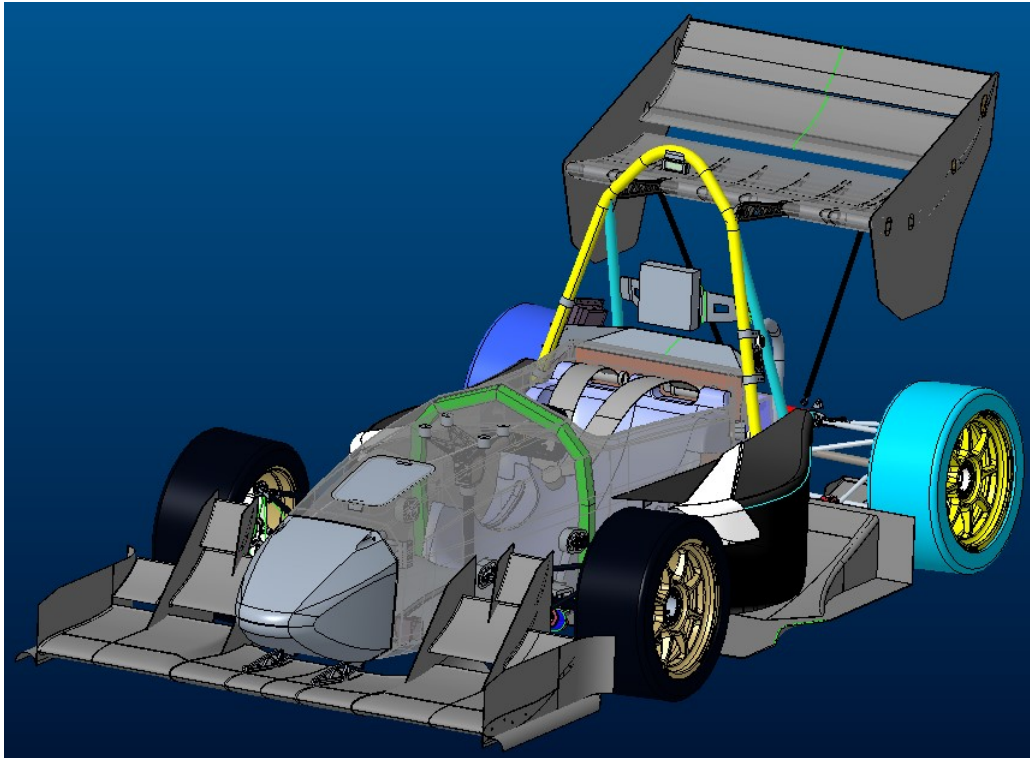
Z rozšírenia *Simscape* som využil balíčky *Electrical*, z ktorého pochádza model PMSM motora, *Driveline*, z ktorého boli využité bloky simulujúce pneumatiku a telo vozidla. Z balíčka *Mechanical* som využil model prevodovky. Regulačná štruktúra je vytvorená z blokov nachádzajúcich sa v samotnom *Simulinku*.

1.2.2 Parameter Estimator

Jedná sa o aplikáciu, ktorá je rozšírením *Simulink*. Táto aplikácia umožňuje zvýšiť presnosť modelu tým, že sa snaží nájsť parametre simulácie tak aby čo najviac odpovedali realite. Existujú rôzne metódy estimácie parametrov. V práci som využil nelineárnu metódu najmenších štvorcov. Táto metóda využíva algoritmus dôveryhodnej oblasti (trust region reflective). Výhodou tohto algoritmu oproti iným, ktoré tento nástroj poskytuje je možnosť využitia výpočtu na viacerých jadrách procesoru [8].

1.2.3 CAD 3D model

V modelovacom prostredí Creo Parametric bol vytvorený 3D model vozidla eD1 z dielne TU Brno Racing. Na tvorbe tohto modelu sa podielali všetky sekcie tímu, napr. sekcia *Suspension* má na starosti návrh kompletného zavesenia podvozku a dynamiku vozidla. Tento 3D model bol využitý na zistenie pozície ťažiska pre definovanie parametrov *Simscape* modelu. 3D model vozidla je zobrazený na obrázku 1.6.



Obr. 1.6: 3D model vozidla v prostredí *Creo*

V tomto prostredí sa nachádza kompletný model vozidla. Každý diel ma priradenú hustotu materiálu, z ktorého je vyrobený. Na základe tejto hustoty dokáže program *Creo* dopočítať hmotnosť jednotlivých dielov. Následne sa diely spoja do jednej zostavy a je možné určiť ťažisko spolu s ďalšími parametrami vozidla. Konkrétnymi využitými parametrami sú výška ťažiska, horizontálna vzdialenosť ťažiska od prednej a zadnej osi kolies a čelná plocha.

1.3 Kontrola trakcie

1.3.1 Anti-lock Brake System – Antiblokovací systém bŕzd

Od roku 2004 sú systémom ABS vybavené všetky novo homologizované vozidlá [9]. Systém je základným aktívnym bezpečnostným prvkom vozidla. Zabezpečuje, aby nedošlo k strate prínavosti medzi kolesom a vozovkou. Systém pozostáva z viacerých častí:

- **Brzdový kotúč alebo bubnová brzda** je mechanicky spojená s nábojom kolesa, zároveň vytvára treciu plochu pre brzdové platničky.
- **Brzdový strmeň** obsahuje hydraulické piesty, ktoré pritláčajú brzdové doštičky o kotúč, čím vzniká trenie a vozidlo začne spomaľovať. Kinetická energia sa premieňa na teplo.
- **Hydraulické brzdové vedenie** pozostáva z vysokotlakových hadíc a potrubí.
- **Hydraulická brzdová kvapalina** jedná sa o špeciálny druh hydraulickej kvapaliny. Táto tekutina má vyšší bod varu z dôvodu, že brzdy produkujú veľké množstvo odpadového tepla.
- **Sústava elektromagnetických ventilov**, ktoré sú v kludovom stave otvorené. V prípade, že systém musí zasiahnuť aktivuje niektorý z ventilov, čím obmedzí tok brzdovej kvapaliny do strmeňa.
- **Posilňovač bŕzd** vytvára dostatočný tlak v brzdovom systéme na to, aby bolo možné zastaviť rotáciu kolesa.
- **Snímače uhlovej rýchlosti kolies** sú dôležitou súčasťou celého systému. Typicky sa využívajú indukčné snímače, ktoré snímajúce drážky v rotujúcom disku. Tento disk je pripevnený na náboj kolesa. Modernejšie riešenie je využitie magnetického prúžku v kombinácii s Hallovým snímačom.
- **Riadiaca jednotka** vyhodnocuje dáta zo snímačov otáčok kolies a rozhoduje či dochádza k prešmyku kolesa. Pokiaľ k tomuto nežiadúcemu javu dôjde aktivuje elektromagnetické ventily [10].

Pravidlá, ktorými sa riadi séria Formula študent nám nedovoľujú akýmkoľvek spôsobom zasahovať do brzdového okruhu. Z tohto dôvodu nie je možné použiť ABS ako systém, ktorý by zabezpečoval dostatočnú trakciu.

1.3.2 Traction control system – Systém na kontrolu trakcie

Trakčná kontrola je široko rozšírený systém v automobilových aplikáciach zvyšujúca stabilitu a bezpečnosť vozidla. TCS predchádza tomu, aby vozidlo pri akcelerácii na nespevnenom povrchu nezačalo vybočovať zo žiadanej trajektórie. To je docielené obmedzením výkonu motora až do momentu, kedy sa vozidlo dokáže pohybovať bez prešmykujúcich kolies. [11]

System a metoda na kontrolu trakcie zahŕňa výpočet ideálneho krútiaceho momentu motora. Oplyvňovaním krútiaceho momentu hnacieho motora vozidla môžeme zamedziť prešmyku kolies. Následne prebehne výpočet požadovanej hodnoty sklzu použitím referenčného modelu [12].

ABS zabezpečuje stabilitu vozidla počas brzdenia a TCS naopak počas akcelerácie po stlačení plynového pedálu. Oba systémy zabezpečujú pozdĺžnu stabilitu vozidla.

1.3.3 Electronic stability program – ESP

Elektronicný stabilizačný program je taktiež označovaný aj ako ESC (Electronic stability control) alebo DSC (dynamic stability control). Tieto skratky označujú stále jeden regulačný protokol, ale každý výrobca mu dal vlastný názov.

System ESP sa objavil v 90-tych rokoch a bol veľkým skokom v automobilovej aktívnej bezpečnosti. System využíva k svojmu správne fungovaniu systémy ABS aj TCS. ESP sa využíva na kontrolu dynamického správania vozidla a kolies v kritických podmienkach, ako sú napríklad vysoká rýchlosť alebo pokiaľ vozidlo dosiahne limit adhézie medzi pneumatikou a vozovkou. ESP vie značne zvýšiť stabilitu vozidla riadením rozloženia pozdĺžnej a priečnej sily pôsobiacej na pneumatiku. [13]

Pri elektrických vozidlách, kde je možné každé koleso poháňať vlastným elektromotorom môže system ESP využívať vektorové riadenie krútiaceho momentu. Vďaka tomuto systému je možné zvýšiť bezpečnú rýchlosť, ktorou vozidlo dokáže prejsť zákrutou.

2 Výsledky práce

2.1 Model

Ako prvé bol vytvorený simulačný model, ktorý sa skladá z troch základných blokov: vozidlo 2.1.2 (Car body), hnacie ústrojenstvo 2.1.1 (Drivetrain), regulátor 2.3 (Controller). Tieto bloky spolu tvoria uzavretú regulačnú slučku.

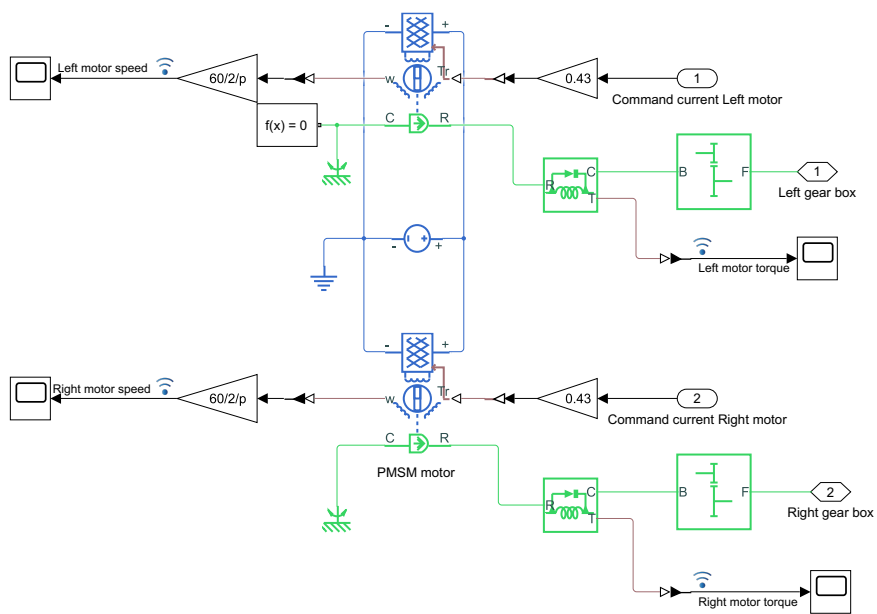
Model obsahuje dve rovnaké regulačné štruktúry, pričom každá ovláda jeden samostatný motor. Tým, že riešim kontrolu trakcie len na akcelerácii nie je potrebné, aby boli tieto dva regulátory spojené nejakou krížovou väzbou. Pokiaľ regulátory budú mať nastavené rovnaké parametre tak ich výstup bude totožný. Taktiež aj odchýlka od požadovanej hodnoty musí byť rovnaká pri oboch regulátoroch, aby sme dostali rovnaký výstup z regulátorov.

Ďalej model obsahuje dva prepínače pomocou ktorých sa dá vybrať či bude vozidlo riadené regulátorom, alebo bude na vstupe konštantná hodnota. Inak povedané, vieme pomocou prepínača *TCS state* vybrať či bude trakčná kontrola zapnutá alebo vypnutá. Túto skutočnosť signalizuje aj kontrolka nad prepínačom. Pomocou posúvača *Pedal position* vieme do regulátoru vniesť žiadanú hodnotu prúdu. Presnejšie tento posúvač predstavuje polohu plynového pedálu v percentách, následne túto polohu vynásobím hodnotou 1,9 A, čím prevediem pozíciu pedálu na rozsah 0 až 190 A.

2.1.1 Hnacie ústrojenstvo

Základným stavebným blokom tohto subsystému je blok *Motor & Drive*, ktorý predstavuje motor s permanentnými magnetmi a aj jeho riadenie. Je to jeden z modulov, ktorý má vstupy vo viacerých fyzikálnych oblastiach. Jedným zo vstupov je elektrické napätie, ktoré tomuto systému poskytuje ideálna batéria. Ďalej tento blok na svojom výstupe **R** generuje mechanickú rotáciu, ktorá sa vzťahuje ku vstupu **C**, na ktorý je pripojená taktiež mechanická referencia. Na vstup **Tr** je privedená požadovaná hodnota momentu. Tá je počítaná ako násobok požadovaného prúdu momentovou konštantou z tabuľky 1.1. Na výstupe **w** nájdeme aktuálnu hodnotu otáčok v rad/s, tá je následne prevedená na rpm (revolutions per minute - otáčky za minútu) z dôvodu jednoduchšieho porovnávanie reálnej a simulovanej sústavy.

Okrem iného sa v tomto submodelu nachádza aj prevodovka, ktorá nahrádza reálnu prevodovú sústavu vo vozidle. V simulácii sa neuvažujú hydrodynamické straty prevodovky a ani vôľa na ozubení. Výstup z prevodovky je pripojený na výstupný port submodelu. Posledným nespomenutým blokom je ideálny snímač krútiaceho momentu, ktorý som pridal iba za účelom optickej kontroly výsledkov.



Obr. 2.1: Submodel nahrádzajúci pohonné ústrojenstvo reálneho modelu

2.1.2 Vozidlo

Rám vozidla je v simulácii reprezentovaný blokom *Vehicle body*. Na obrázku 2.2 je tento blok označený červeným štvorcem. Tento blok simuluje správanie rámu vozidla počas jazdy. Simulácia ráta s hmotnosťou vozidla a jeho aerodynamickým odporom, ktorý sa uplatňuje najmä vo veľkých rýchlostiach alebo v prípade vetra smerujúceho proti jazde vozidla. Jedným zo vstupov do bloku sú rýchlosť vetra a uhol stúpania, oba tieto parametre sú nastavené na 0, pretože merania s vozidlom boli uskutočnené za bezveterného počasia a na rovnom úseku vozovky bez významnejšieho stúpania.

Pre správnosť simulácie boli do bloku vložené aj súradnice ťažiska vozidla. Tie boli zobrazené z CAD modelu vozidla. V tomto modeli sa nachádza virtuálna kópia vozidla so všetkými jeho prvkami, každý z komponentov má priradenú hustotu, z ktorej sa dopočítava hmotnosť.

Ďalšou časťou sú kolesá vozidla označené *Tire xx*, kde prvé písmeno predstavuje či sa jedná o zadné (R -> Rear) alebo predné (F -> Front) kolesá a druhé stranovú orientáciu. Kolesá nachádzajúce sa na pravej strane vozidla v smere jazdy sú označené (R -> Right) a na opačnej strane sú ľavé (L -> Left). Do tohto bloku na vstupe označenom ako **N** vstupuje normálová sila pôsobiaca na koleso. Port **H** označuje horizontálny pohyb, **A** je mechanická rotácia a na výstupnom porte **S** môžeme nájsť priamo prešmyk pneumatiky voči rýchlosti vozidla.

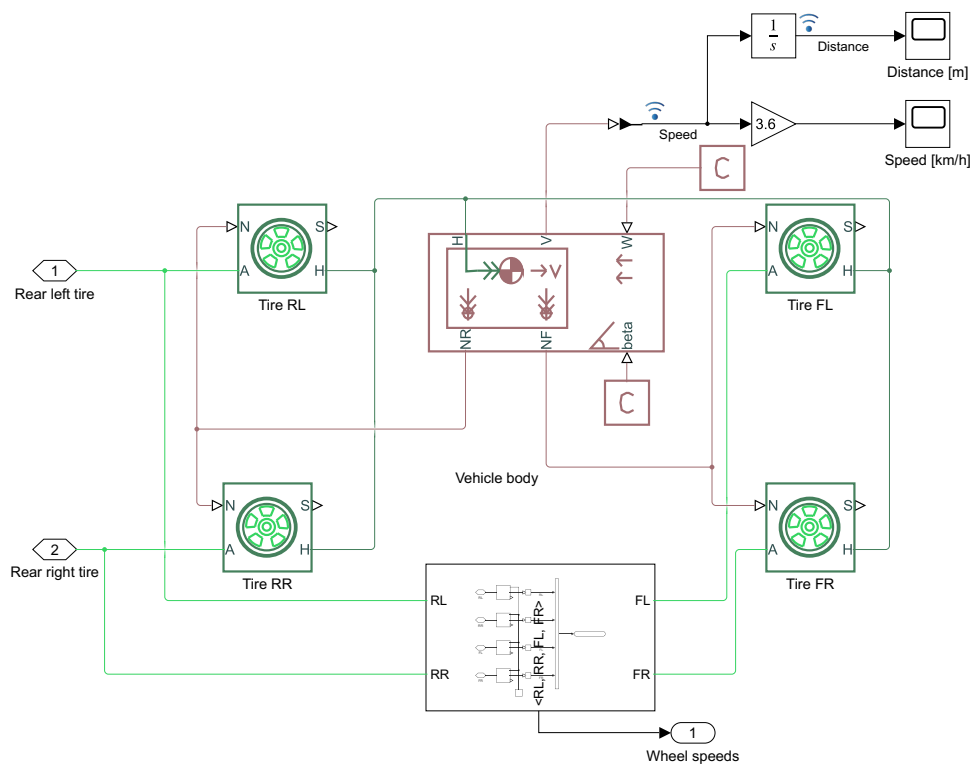
Tento blok obsahuje ešte jeden subsystém *Wheel speeds*, v ktorom sa nachádzajú ideálne snímače otáčok. Výstup z týchto snímačov je „zbalený“ pomocou multiplexeru do jedného signálu a odoslaný na výstup subsystému. Na reálnom monoposte je snímanie otáčok riešené pomocou indukčného snímača, ktorý sníma ocelové kolečko s 45 zubmi pripevnené priamo na náboj kolesa.

2.2 Reálna sústava

2.2.1 Meranie

Aby bolo možné namerané výsledky porovnávať medzi sebou a zároveň aj s modelom vytvoril som meranie, ktoré blízko súvisí aj s jednou z dynamických disciplín na závodoch série Formula Študent. Jedná sa o akceleráciu na 75 m, na ktorej má vozidlo za úlohu tento rovný úsek prekonať za čo najkratší čas. Bohužiaľ náš testovací priestor neumožňuje bezpečne postaviť trať dlhú 75 m a preto bola skrátená na približne 50 m. Tým, že počas merania nebol vyznačený začiatok a koniec tak musel šofér túto dráhu odhadnúť.

Meranie bolo uskutočnené na asfaltovom povrchu, na ktorom by mala mať pneumatika najlepšiu priľnavosť. Vozidlá Formule študent nemôžu používať žiaden druh



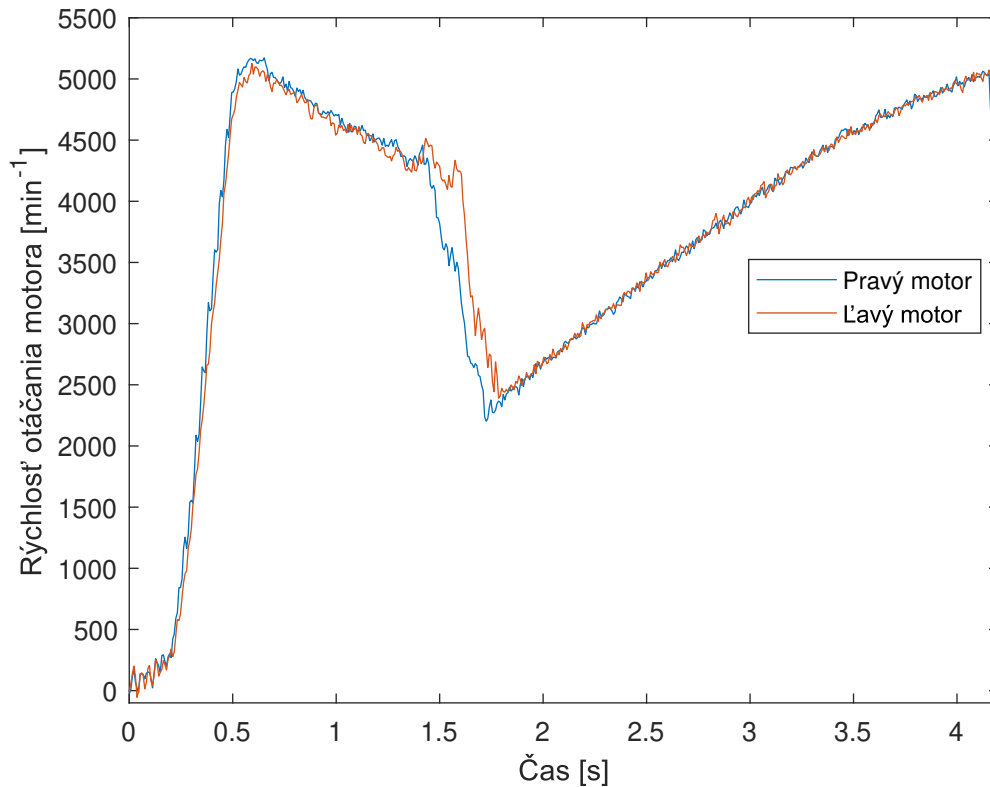
Obr. 2.2: Submodel obsahujúci prvky späté s telom vozidla

ohrevu pneumatík pred jazdou ako je to možné vidieť v sérii F1. Preto bola teplota pneumatík na začiatku merania rovnaká ako teplota okolitého vzduchu. Táto teplota bola 15 °C, čo je na tento druh pneumatiky málo. Z pozorovaní tímových kolegov zo sekcie dynamiky vozidiel vyplýva, že optimálna teplota pneumatiky je okolo 40 °C.

Vozidlo štartovalo zo stoja na svoju maximálnu rýchlosť, ktorú na 50 m dokáže vyvinúť. Šofér od začiatku akcelerácie držal stlačený plyn na maximum, aby motory produkovali maximálny krútiaci moment. Z grafu 2.3 je vidieť, že za čas približne 0,5 s dosiahol motor 5000 otáčok za minútu, čo je viac ako na konci testovacej trate, kde malo vozidlo najväčšiu rýchlosť. Z toho vyplýva že došlo k veľkému prešmyku zadných kolies, ktoré poháňajú vozidlo vpred. Ako vozidlo postupne zrýchľovalo tak dochádzalo ku klesaniu otáčok motora a v čase 1,75 s došlo k rapídному poklesu otáčok. Tento prepad je spôsobený opätovným získaním trakcie. Od tohto momentu otáčky motora stúpajú úmerne s rýchlosťou vozidla.

Po niekoľkých jazdách na testovacej trati došlo k otepleniu vzduchu o 5 °C a taktiež aj k zahriatiu pneumatík, čím vozidlo získalo väčšiu trakciu. Túto skutočnosť potvrdzuje aj graf 2.4, ktorý zobrazuje priebeh otáčok motora. Z grafu je vidieť, že

rýchlosť otáčok plynule stúpa bez straty trakcie.

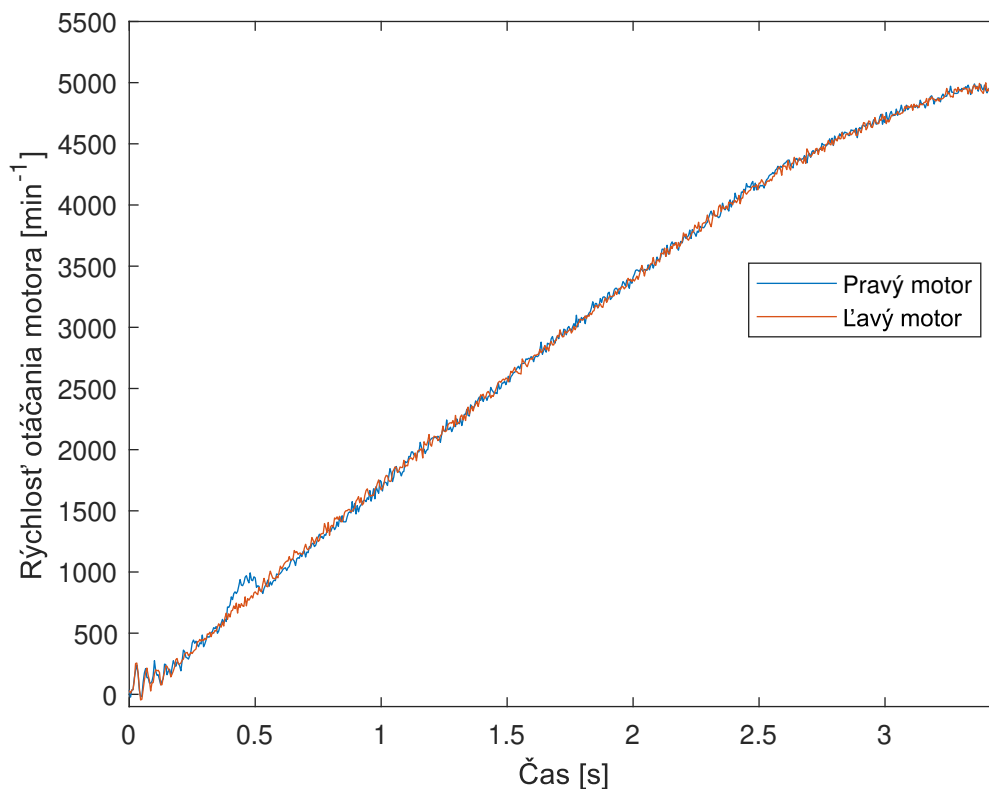


Obr. 2.3: Rýchlosť otáčania motorov počas akcelerácie pri strate trakcie

2.2.2 Úprava modelu

Ako prvé boli nastavené dáta z dátových listov do modelu vozidla, ktorý bol vytvorený v prostredí *Simscape*. Tento model je priložený v prílohách ako obrázok A.1. Z dátových listov boli použité parametre motora a pneumatiky. Niektoré parametre boli priamo zmerané na vozidle iné zas vyčítané z CAD modelu.

Na základe nameraných dát bol model upravený tak, aby sa čo najviac zhodoval s realitou. Ako prvé som začal upravovať parametre motora. Na základe dát zmeraných pri akcelerácii vozidla som upravoval momentovú charakteristiku. Zrýchľovanie vozidla nebolo obmedzené prešmykom pneumatiky, čo zabezpečuje neustálu akceleráciu. Na dosiahnutie tohto stavu bol znížený maximálny výkon motorov a taktiež pred jazdou boli zahriate pneumatiky, čo značne pomohlo zrýchľovaniu vozidla.



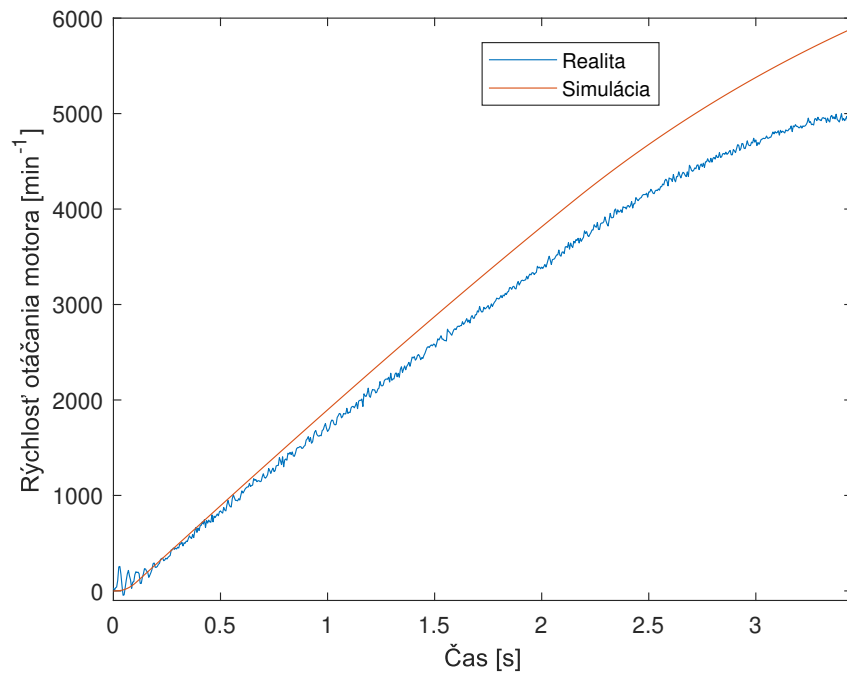
Obr. 2.4: Rýchlosť otáčania motorov počas akcelerácie bez straty trakcie

2.2.3 Porovnanie reálnej sústavy a modelu

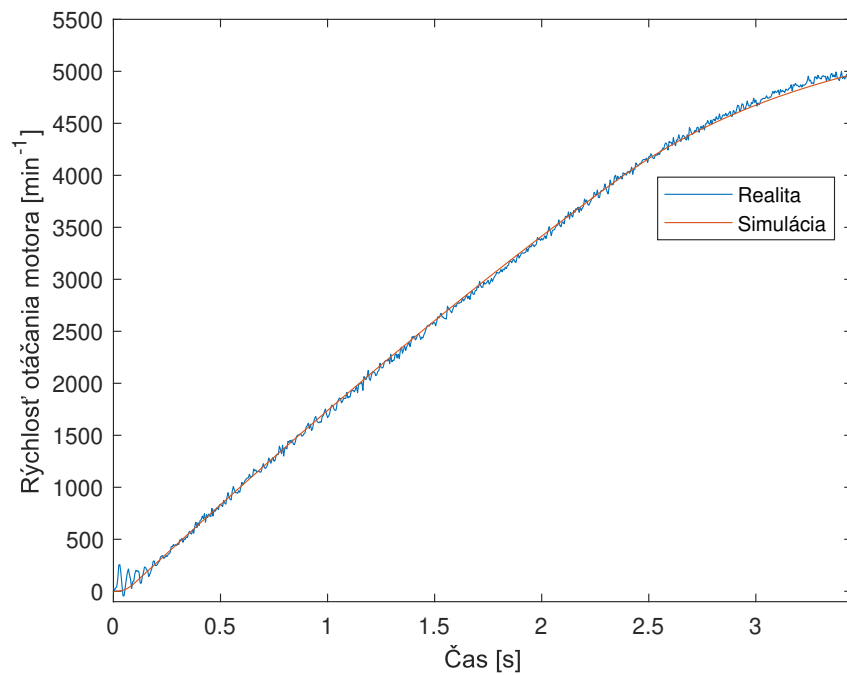
V grafe 2.5 vidíme, že rýchlosť otáčania motora sa nezhoduje s realitou. V čase 3,5 s predstavoval rozdiel približne 900 otáčok za minútu. Už od začiatku simulácie sa tieto dve krivky rozchádzajú. Tieto výsledky ma priviedli k rozhodnutiu, že je potrebné upraviť momentovú charakteristiku motora. Charakteristiku som iteratívne upravoval z dôvodu, že sa nám nepodarilo zmerať momentovú odozvu motora.

Postupným upravovaním parametrov motora, presnejšie jeho momentovej charakteristiky som sa dopracoval k výsledku, kde sa realita a model zhodujú. Túto zhodu je možné vidieť na obrázku 2.6. Dáta z reálnej sústavy sú namerané počas akcelerácie, pri ktorej nedochádzalo k prešmyku kolies. V modeli som tento stav dosiahol použitím ideálnej pneumatiky, ktorá má nekonečný koeficient trenia. Takáto pneumatika dokáže preniesť nekonečný krútiaci moment.

Následne bolo potrebné upraviť parametre pneumatiky, tak aby bolo možné simulovať jej prešmyk. To som dosiahol postupným upravovaním empirických parametrov B , C , D a E . Tento proces bol celkom náročný, pretože aj malá zmena mala veľký dopad na správanie modelu. Zároveň tieto parametre nemajú žiadne fyzikálne opodstatnenie a nedá sa povedať, čo dosiahneme zmenou daného parametru. Na

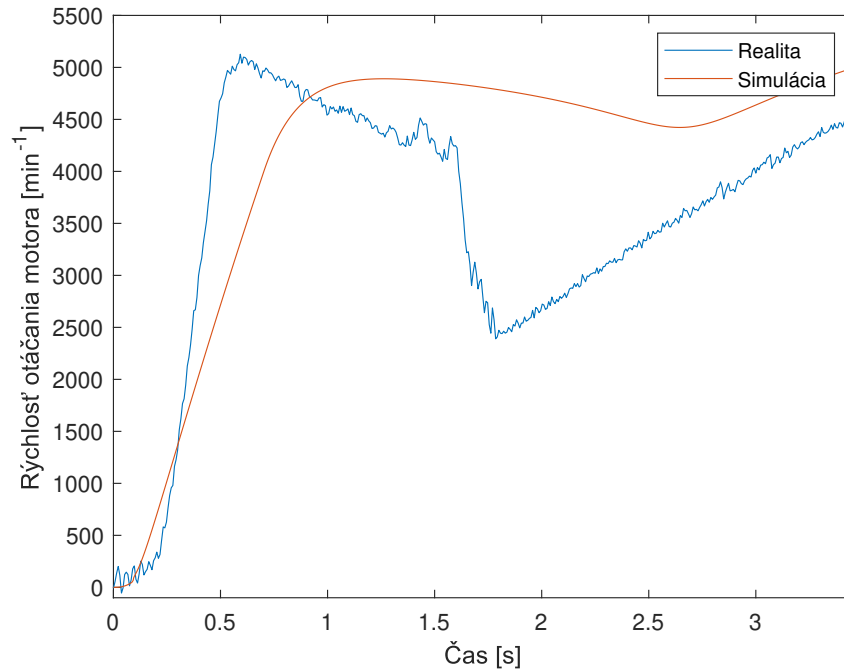


Obr. 2.5: Porovnanie otáčok motora pred úpravou momentovej charakteristiky s realitou



Obr. 2.6: Porovnanie otáčok reálneho motora a simulácie

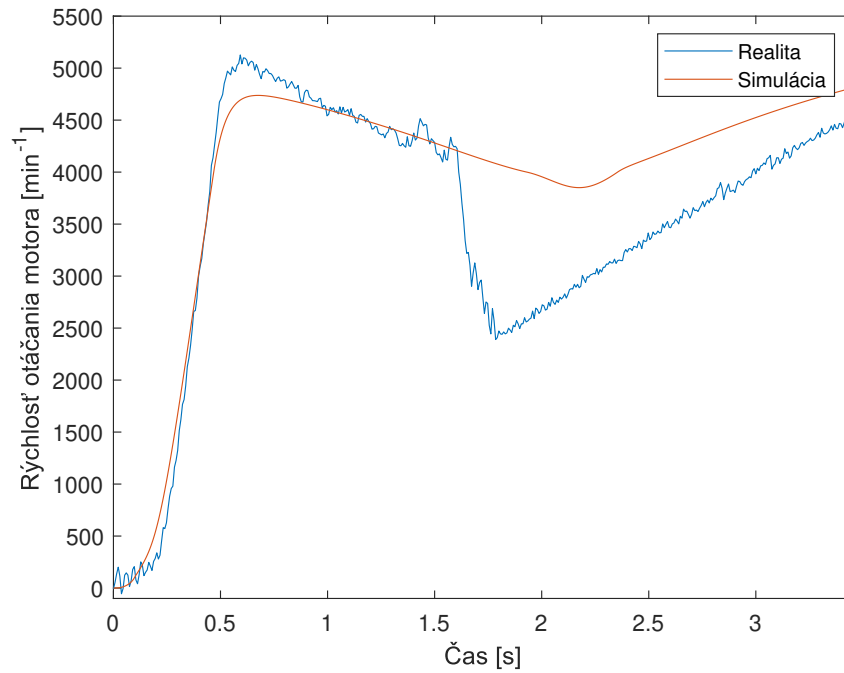
zrýchlenie vývoju modelu som využil nástroj *Parameter estimator*, ktorý na základe nameraných dát upravuje parametre tak, aby simulácia čo najviac odpovedala realite. Približne po 100 iteráciách sa hľadanie parametrov zastavilo z dôvodu, že nasledujúce iterácie mali príliš malú zmenu výstupu oproti predchádzajúcim. Porovnanie reality a výstupu zo simulácie je možné vidieť na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Výsledky simulácie pre model pneumatiky využívajúci magickú rovnicu 1.3

Pre porovnanie odozvy simulácie pneumatiky som použil iný matematický model pneumatiky, ktorý je znázornený na obrázku 2.8. Tento druhý model používa na výpočet maximálnu pozdĺžnu silu, ktorú dokáže pneumatika preniesť a percentuálny prešmyk pneumatiky v tomto maxime. Tento model má v porovnaní s Pacejka modelom lepšiu zhodu s realitou. Na obrázku 2.8 môžeme vidieť, že simulácia sa s realitou nezhoduje na 100% ale má väčšiu podobnosť v porovnaní s modelom 2.7. Preto som sa rozhodol ďalej v simulácii používať tento typ.

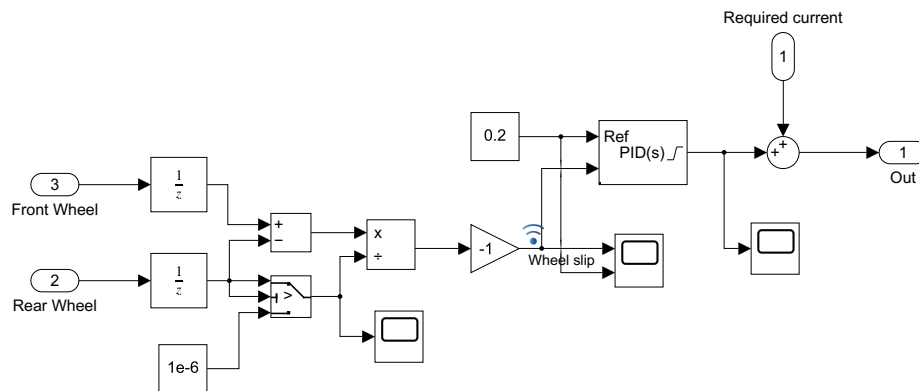
Jednou z vecí ktorú sa mi nepodarilo v simulácii dosiahnuť je prudký prepád otáčok v čase 1,5 s. Do času 1,5 s sa grafy podobajú. Pri reálnom meraní došlo k opätovnému získaniu trakcie.



Obr. 2.8: Výsledky simulácie pre model pneumatiky využívajúci pozdĺžnu silu

2.3 Regulátor

Tento submodul je tvorený dvoma hlavnými časťami, ktoré vidíme na schéme 2.9.



Obr. 2.9: Submodel regulátoru

Prvou časťou je výpočet aktuálneho prešmyku kolies pomocou rovnice 2.1. Nejedná sa o tak triviálnu záležitosť ako sa na prvý pohľad zdá.

$$s = -\frac{\omega_F - \omega_R}{\omega_R} \quad (2.1)$$

kde ω_F je uhlová rýchlosť predného kolesa. Táto hodnota je braná ako referenčná rýchlosť s akou sa vozidlo pohybuje vpred. ω_R je rýchlosť otáčania zadných kolies.

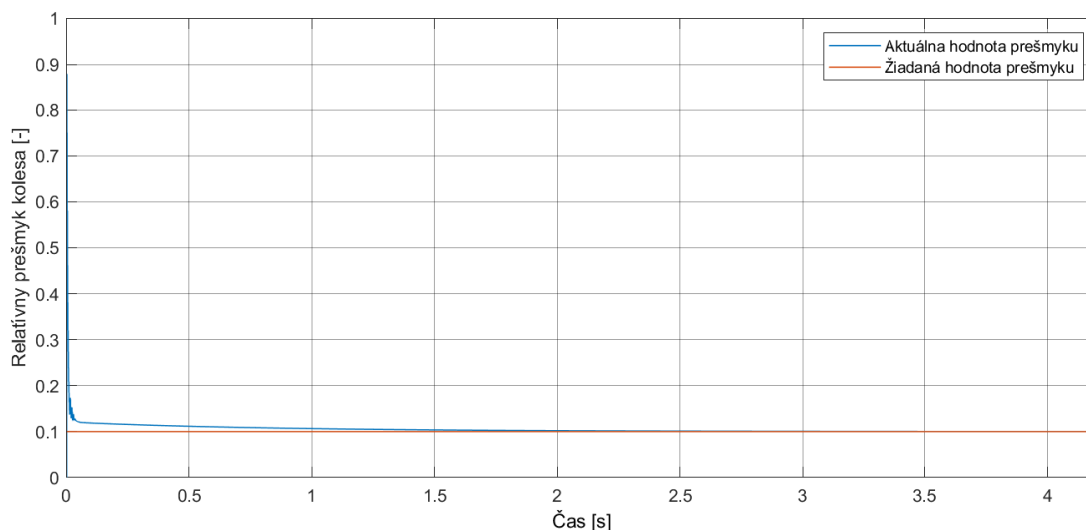
Hodnota nadobúda hodnotu od nula do jedna, kde 0 je stav, kedy má pneumatika maximálnu trakciu a nedochádza k jej prešmyku. Nevýhodou rovnice 2.1 je, že pri stojacom vozidle je uhlová rýchlosť taktiež nulová a dochádzka k deleniu nulou. To spôsobuje problémy ako pri simulácií, tak aj v prípadnej implementácii na vozidle. Aby k tomuto nedochádzalo do výpočtu som pridal prepínač s prahovou hodnotou nastavenou na 0. Pokiaľ je rýchlosť väčšia ako prah tak sa na výstup dostane priamo rýchlosť zadných kolies, ale pokiaľ je rýchlosť nulová nastaví sa na výstup konštantná hodnota $1 \cdot 10^{-6}$, čo je dostatočne malá hodnota na to, aby nespôsobovala chybu.

Druhou časťou regulačnej štruktúry je samotný regulátor. Zvolil som regulátor s dvoma stupňami voľnosti, taktiež zvaný β -PID. Regulátor má na výstupe nastavenú saturáciu na $\pm 190\text{A}$. Hodnota prúdu sa odpočítava od požadovanej hodnoty (required current), ktorú udáva šofér pomocou polohy plynového pedálu. Bol zvolený regulátor s dvoma stupňami voľnosti pre prípadne nasledujúce úpravy. Po nastavení parametrov regulátora pri maximálnom žiadanom prúde som „ubral plyn“ približne na polovicu čím sa znížila aj požadovaná hodnota. Regulačná štruktúra na to zareagovala nie úplne žiadúcim spôsobom. Pri akcelerácii s polovičnou žiadanou hodnotou regulátor zareagoval moc agresívne a otáčky motora sa dostali na malý moment do záporných hodnôt. To znamená, že vozidlu sa na malý moment pretáčali pneumatiky dozadu, čo nám pravidlá FSG nedovoľujú [14]. Aby som zamedzil tomuto efektu som na výstup regulátoru pridal saturáciu, ktorá výstupný prúd obmedzi v rozsahu 0 A až 190 A, čo je maximálny bezpečný prúd, pri ktorom sme motory prevádzkovali.

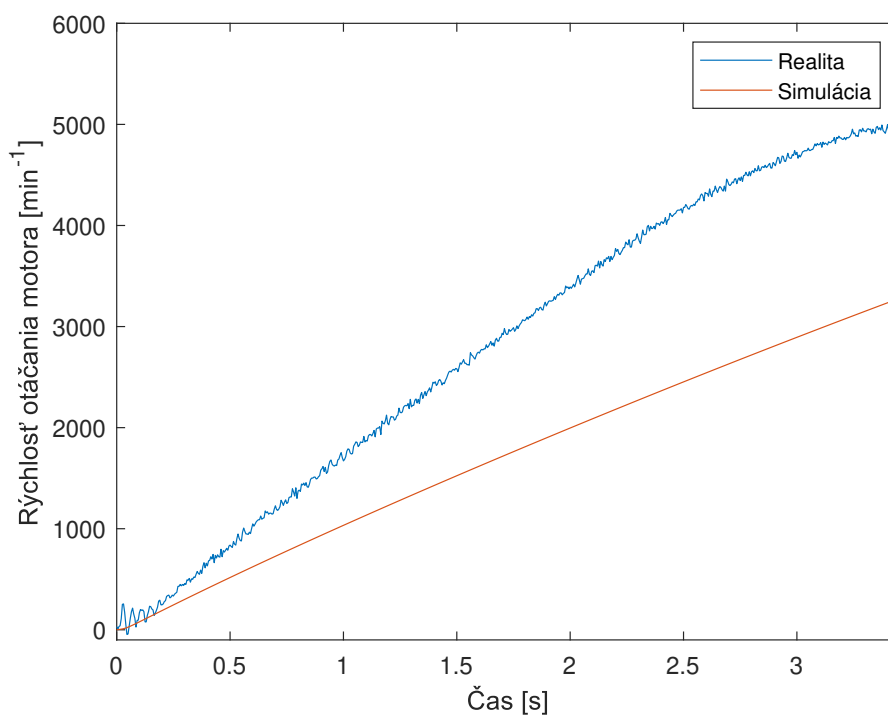
2.3.1 Výsledky regulácie

Požiadavkou na regulátor bolo regulovať systém na žiadanú hodnotu prešmyku s nulovou ustálenou odchýlkou. Požadovanou hodnotou pre regulátor bol zvolený 10% prešmyk kolies. Táto hodnota vyplýva z pozorovaní tímových kolegov zo sekcie *Vehicle Dynamics*, ktorý sa zaoberajú celkovou dynamikou nášho závodného vozidla. V grafe 2.10 môžeme vidieť požadovanú hodnotu a aktuálnu hodnotu pre regulátor, ktorý reguluje na prešmyk 10%. Táto regulácia by sa dala ešte vylepšiť tak, aby sa aktuálna hodnota skôr priblížila požadovanej hodnote prešmyku. Po zobrazení priebehu otáčok motor (obrázok 2.11) som zistil, že regulátor príliš obmedzuje výkon motorov. Z toho dôvodu je rozdiel uhlovej rýchlosti motora na konci simulácie takmer 1700 otáčok za minútu menší. Takéto správanie je pre závodne vozidlo neprípustné.

Ako ďalšie som sa rozhodol poľaviť z nárokov na reguláciu a to najmä z požiadavky na nulovú odchýlku. Táto úprava parametrov PID regulátora viedla na značné zrýchlenie vozidla, ktoré je možné vidieť na obrázku 2.13. Priebeh uhlovej rýchlosti motora zo simulácie sa takmer zhoduje s priebehom otáčok motora z reality, kde



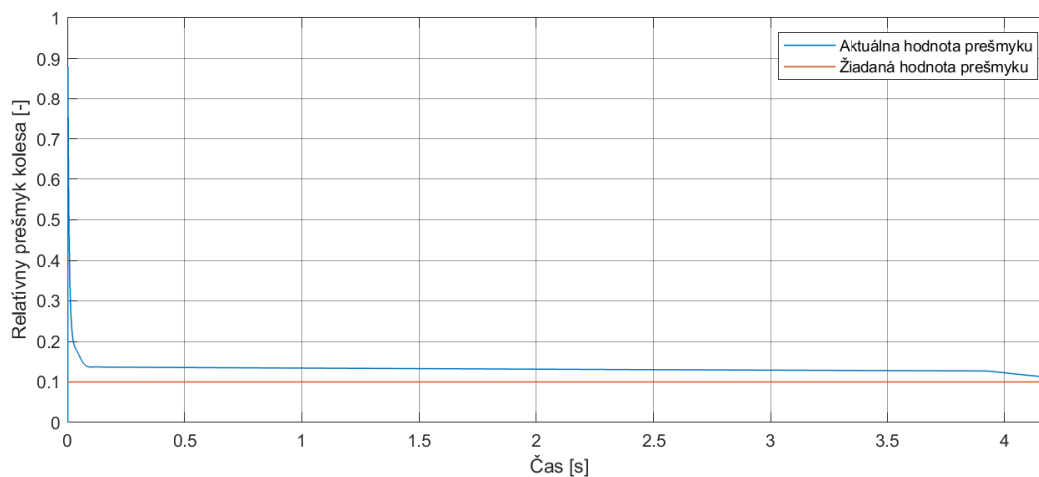
Obr. 2.10: Porovnanie aktuálnej a žiadanej hodnoty prešmyku pre reguláciu na 10%



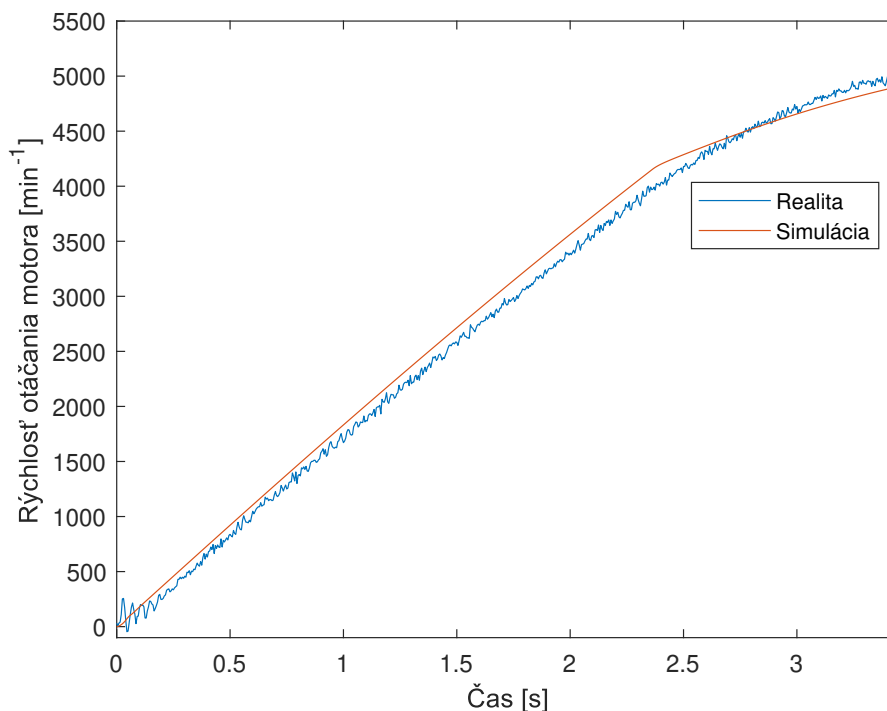
Obr. 2.11: Porovnanie rýchlosti otáčania motora pri regulovaní na požadovanú hodnotu 10%

malo vozidlo dostatočnú trakciu a nedochádzalo k prešmyku pneumatík.

Ďalším mojím krokom bola zmena nároku na prešmyk. Nová požadovaná hodnota je 20%. Tento rozdiel o 10% oproti reálnej pneumatike môže byť spôsobený dvoma vecami. Prvou je, že kolegovia z tímu sa mýlia o 10% v ideálnom prešmyku



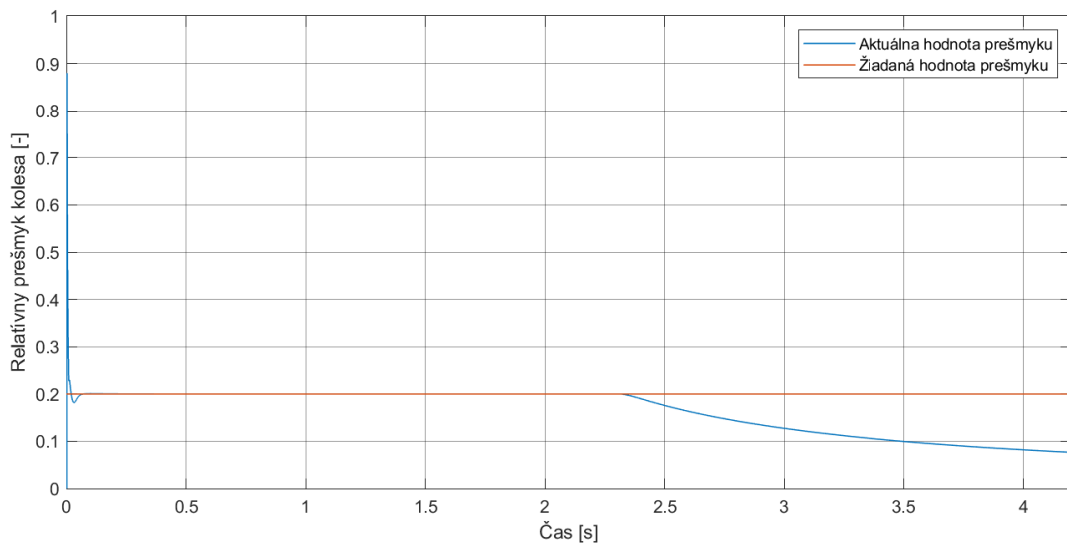
Obr. 2.12: Porovnanie aktuálnej a žiadanej hodnoty prešmyku pre reguláciu na 10%



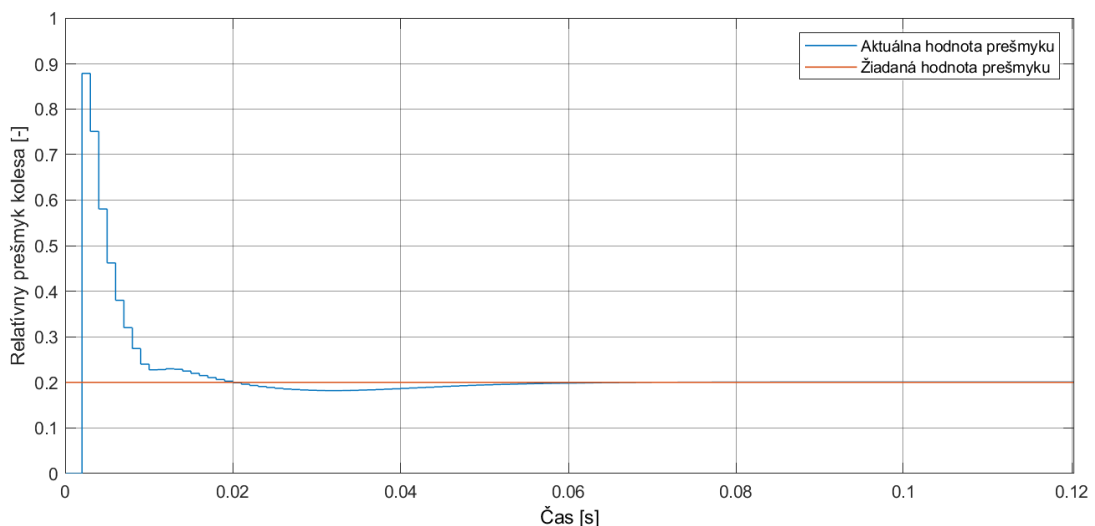
Obr. 2.13: Porovnanie rýchlosti otáčania motora pri regulovaní na požadovanú hodnotu 10% a nedodržaní 0 ustálenej odchýlky

pneumatiky alebo druhá možnosť je, že simulačný model sa líši od toho reálneho. Po zmene nastavení proporčnej, integračnej a derivačnej konštanty regulátora bol výsledok regulácie celkom prijateľný, ale dochádzalo ku značným zákmitom. Toto kmitanie sa mi podarilo potlačiť využitím regulátora s dvoma stupňami voľnosti.

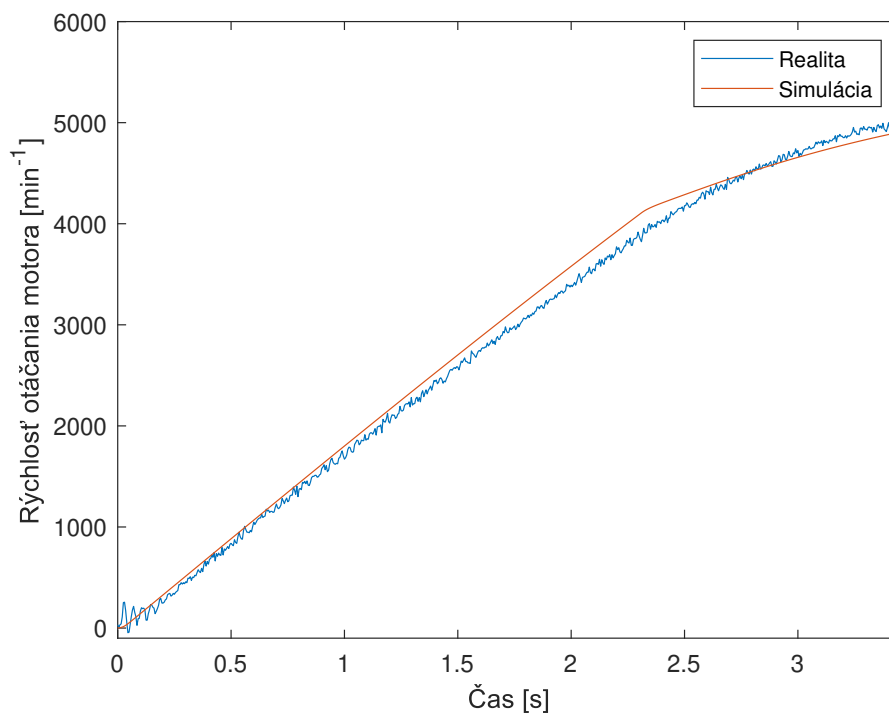
Priebeh hodnôt vstupujúcich do regulátoru môžete vidieť na obrázku 2.14. Od času približne 2,3 s sa aktuálna odchýlka začala vzdalovať od požadovanej hodnoty. Tento jav nie je spôsobený chybnou reguláciou, ale samotným motorom. Od tohto momentu sa motor dostal na svoj maximálny výkonový limit a so stúpajúcimi otáčkami nedokáže generovať dostatočný krútiaci moment na to, aby malo vozidlo stále prešmyk na hodnote 20%. Na začiatku simulácie došlo k veľkému prekmitu až na hodnotu 0.9. Tento prekmít je spôsobený chybou vo výpočte prklzu 2.1, kde sa pri stojacom vozidle delí nulou. Akonáhle sa vozidlo začne pohybovať tak hodnota aktuálneho prešmyku prudko klesne a regulátor ju ďalej dokáže ovládať.



Obr. 2.14: Porovnanie aktuálnej a žiadanej hodnoty prešmyku pre reguláciu na 20%



Obr. 2.15: Prechodový zákmit systému, detail obrázku 2.14



Obr. 2.16: Porovnanie rýchlosti otáčania motora pri regulovaní na požadovanú hodnotu 20%

Záver

Cielom tejto bakalárskej práce bolo navrhnuť regulačnú štruktúru prešmyku kolies pre vozidlo Dragon e1. Ako prvý bol vytvorený komplexný simulačný model v prostredí Simscape. Do modelu boli nastavené základné parametre vozidla, s ktorými simulácia fungovala. Následne boli zmerané dáta na reálnom vozidle. Tieto dáta boli následne použité na verifikáciu modelu. Po porovnaní modelových dát s reálnymi dátami bola prevedená úprava parametrov modelu tak, aby čo najviac odpovedal realite. Týmto vzniklo digitálne dvojča hnacieho ústrojenstva reálneho vozidla.

Na reguláciu tohto systému bol využitý PID regulátor s dvomi stupňami voľnosti. Do regulačnej štruktúry bol taktiež doplnený výpočet aktuálneho prešmyku kolies z rýchlosti predných a zadných kolies. Dostatočne dobré výsledky regulácie boli dosiahnuté až tretím nastavením regulátoru. Okrem parametrov regulátoru bolo potrebné zmeniť aj požadovanú hodnotu prešmyku. Z toho vyplýva, že do ďalšej implementácie regulátoru na reálne vozidlo by bolo vhodné mať požadovanú hodnotu prešmyku ako jeden zo vstupných parametrov. Týmto nastavením sa zamedzilo nechcenému prešmyku kolies pri akcelerácií.

Pre následnú aplikáciu tohto systému na vozidlo by bolo vhodnejšie použiť samonastavovateľný regulátor, ktorý sa dokáže prispôbiť rôznym podmienkam ako napríklad zmena nastavenia podvozku, mokrá vozovka a iné. Pre zlepšenie modelu by bolo vhodné previesť viacero meraní v rôznych podmienkach, čím by sa dosiahla väčšia presnosť modelu.

Literatúra

- [1] Hanwoong Ahn, Hyunjong Park, Changhyun Kim, and Hyungwoo Lee. A review of state-of-the-art techniques for pmsm parameter identification. *Journal of electrical engineering & technology*, 15(3):1177–1187, 2020.
- [2] F Farroni and A Sakhnevych. Tire multiphysical modeling for the analysis of thermal and wear sensitivity on vehicle objective dynamics and racing performances. *Simulation modelling practice and theory*, 117, 2022.
- [3] Hans Pacejka and Igo J. M Besselink. *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier Science & Technology, Oxford, 3 edition, 2012.
- [4] Ing. Jan Sajdl Ph.D. autolexicon.net. Abs (anti-lock braking system). [Online], 2022. URL: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/abs-anti-lock-braking-system/>.
- [5] Infineon Technologies AG. Permanent magnet synchronous motor (pmsm). [Online], 2022. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/applications/solutions/motor-control-and-drives/permanent-magnet-synchronous-motor/>.
- [6] Inc. The MathWorks. Motor & drive (system level). [Online], 2022. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/motordrivesystemlevel.html>.
- [7] Inc. The MathWorks. Get started with Simscape. [Online], 2022. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/getting-started-with-simscape.html>.
- [8] Inc. The MathWorks. Parameter estimator. [Online], 2022. URL: <https://www.mathworks.com/help/slido/ref/parameterestimator-app.html>.
- [9] Radek Pecák CZECH NEWS CENTER a.s. Abs slaví čtyřicátiny. začalo to u letadel, povinné je však teprve 12 let. 2018. URL: <https://www.autorevue.cz/abs-slavi-ctyricatiny-zacalo-to-u-letadel-povinne-je-vsak-teprve-12-let>.
- [10] RONG-BIN GUO. Anti-lock brake system, 2016.
- [11] Pascal Cardinale, Camillo D’Angelo, and Massimo Conti. Traction control system for motorcycles. *EURASIP journal on embedded systems*, 2009(1):1–10, 2008.

- [12] EBERL THOMAS, REICHENSDOERFER ELIAS, ODENTHAL DIRK, and ZECH ALEXANDER. Traction control system, 2020.
- [13] Zhen Wang, Zhehao Hong, Yumeng Wang, and Jinjun Zheng. Study on vehicle electronic stability program control algorithm under electronic mechanical braking. *Chemical engineering transactions*, 66:739–744, 2018.
- [14] Formula Student Germany e.V. Fs-rules 2022 v1.0. [Online], 2022. URL: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf.

Zoznam symbolov a skratiek

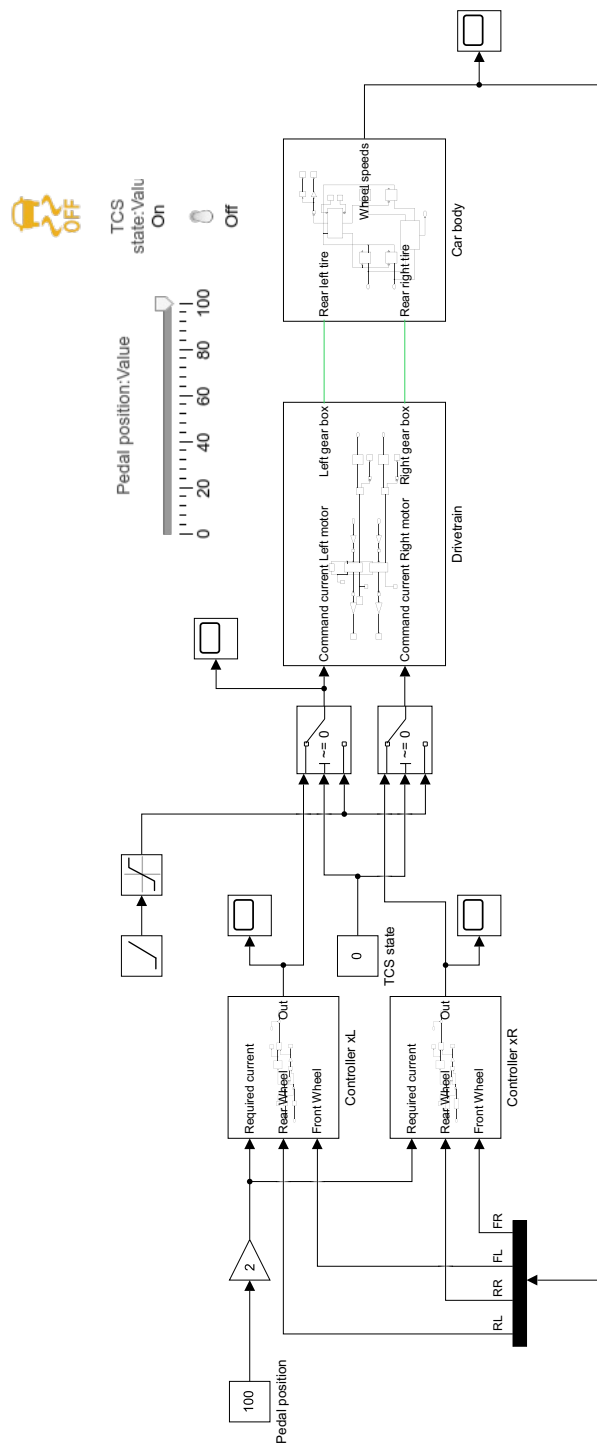
PMSM	Permanent magnet synchronous motor – Synchrónny motor s permanentnými magnetmi
EMF	Electromotive force – Elektromotorická sila
CAD	Computer-aided design – Počítačom podporované projektovanie
ABS	Anti-lock Brake System – Antiblokovací systém brzd
TCS	Traction control system – Systém na kontrolu trakcie
ESP	Electronic stability program – Elektronický stabilizačný program

Zoznam príloh

A Prílohy	40
A.1 Simscape model	40
A.2 Merania	41

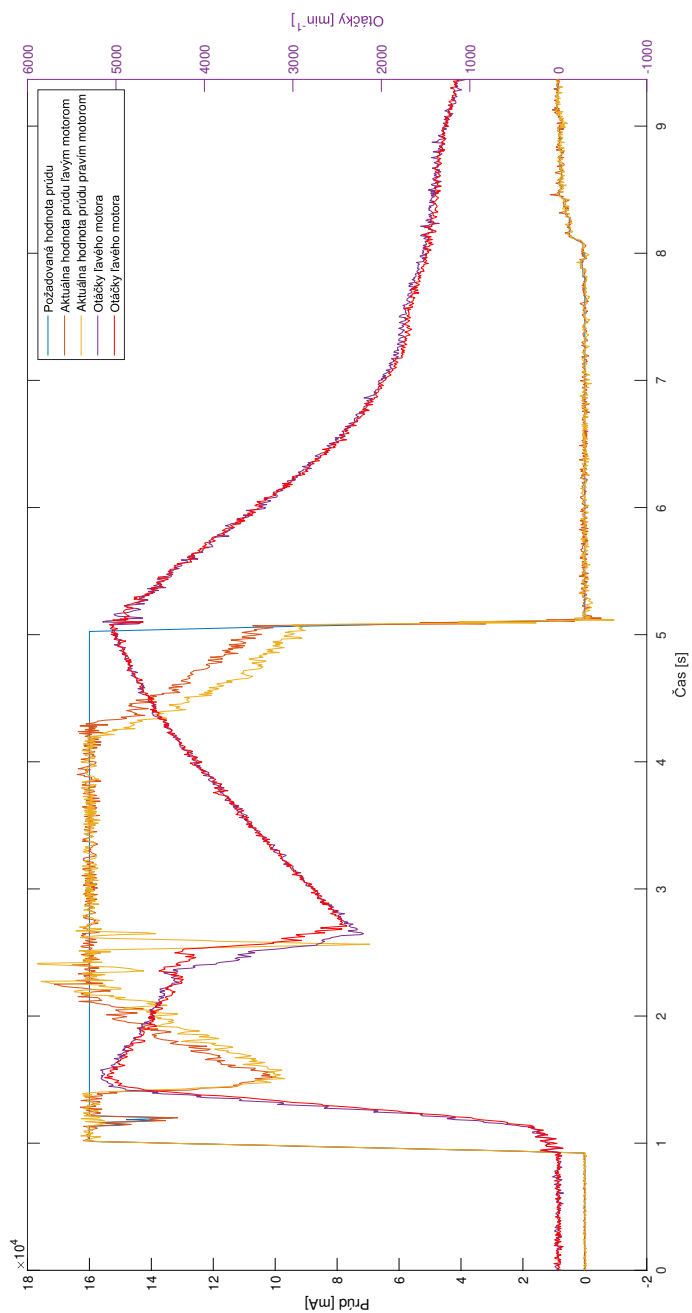
A Prílohy

A.1 Simscape model

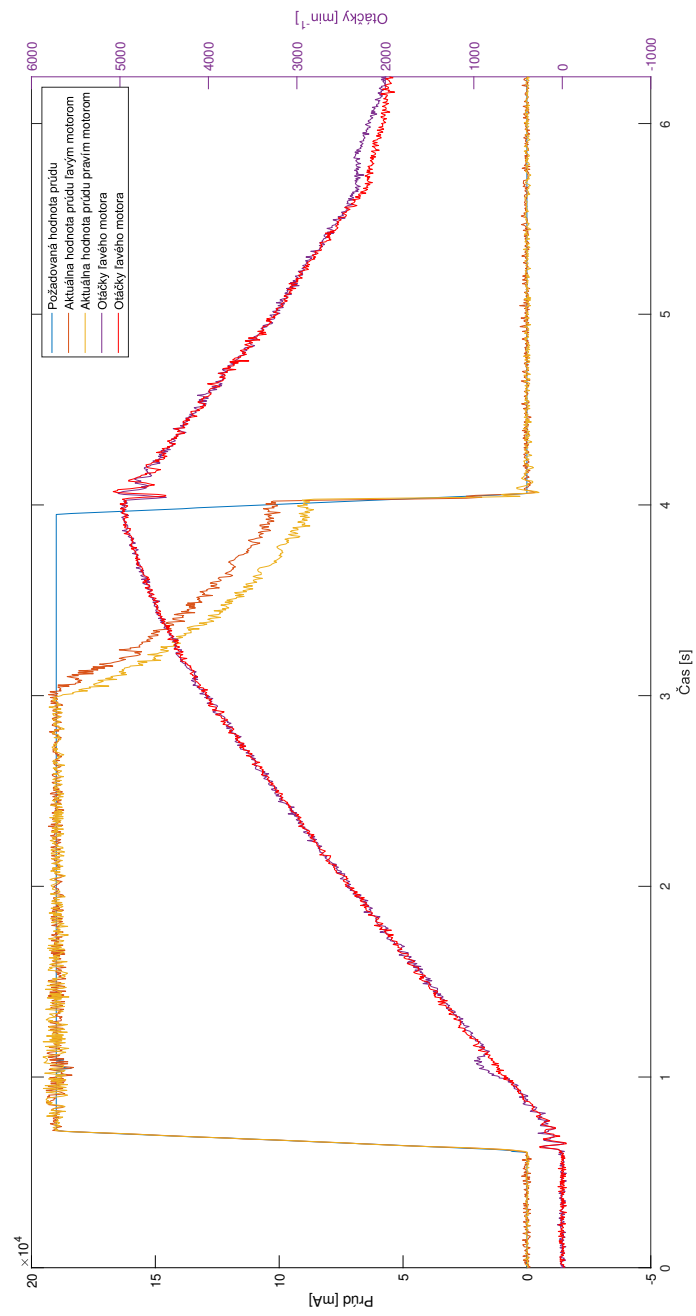


Obr. A.1: Simulačný model sústavy a regulátoru

A.2 Merania



Obr. A.2: Namerané hodnoty počas akcelerácie kedy došlo k strate trakcie



Obr. A.3: Namerané hodnoty počas akcelerácie kedy nedošlo k strate trakcie