



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

MODELOVÁNÍ A ANALÝZA VLIVU ABS NA CHOVÁNÍ VOZIDLA

MODELLING AND ANALYSIS OF IMPACTS OF ABS TOLALA BEHAVIOR OF VEHICLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DOMINIK HOLEC

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF STRNADEL, Ph.D.

BRNO 2018

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačových systémů

Akademický rok 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Holec Dominik**

Obor: Informační technologie

Téma: **Modelování a analýza vlivu ABS na chování vozidla**

Modelling and Analysis of Impacts of ABS to Behavior of Vehicle

Kategorie: Modelování a simulace

Pokyny:

1. Zdokumentujte základní pojmy a principy související s činností Anti-lock Breaking Systémů (ABS) v automobilech. Navrhněte vhodnou abstrakci automobilu, jeho okolí a komponent klíčových z pohledu ABS.
2. Po dohodě s vedoucím zvolte vhodné prostředky pro modelování systémů a analýzu jejich vlastností.
3. Pomocí prostředků zvolených v předchozím bodě vytvořte model chování vozidla a jeho řízení i) bez ABS a poté ii) na bázi ABS s cílem sledovat děje klíčové pro řízení a jejich vliv na chování vozidla.
4. Funkčnost modelu demonstруйте v několika vhodně zvolených situacích za účelem vzájemného porovnání řízení a chování vozidla bez ABS a vozidla s ABS.
5. Diskutujte a zhodnoťte možnosti vytvořeného modelu z hlediska sledování dějů a analýzy vlivů zmíněných v bodu 3 a navrhněte možné směry pokračování v projektu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Splnění bodů 1 a 2 zadání, vytvoření modelu chování vozidla a jeho řízení bez ABS.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

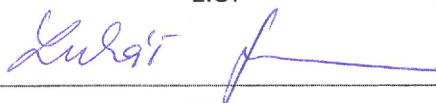
Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Strnadel Josef, Ing., Ph.D., UPSY FIT VUT**

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačových systémů a sítí
612 06 Brno, Božetěchova 2



prof. Ing. Lukáš Sekanina, Ph.D.
vedoucí ústavu

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá brzdovým systémom ABS a jeho vplyvom na brzdnu dráhu vozidla. Práca obsahuje návrh, popis vývoja a testovanie simulačného modelu vo verifikačnom prostredí UPPAAL. Výsledný model je systémom navzájom komunikujúcich časovaných automatov. Analýza vlastností modelu je založená na metóde štatistického overovania modelu. Model umožňuje skúmať najmä priebeh a dĺžku brzdnej dráhy. Ostatné premenné ovplyvňujúce chovanie modelu, ktoré je možné sledovať sú sklz, koeficient trenia, odpor vzduchu, brzdna sila a rýchlosť vozidla. Je možné taktiež zistiť pravdepodobnosť, že vozidlo za zvolených podmienok zastaví do určitého počtu metrov a skúmať vplyv systému ABS na tieto výsledky.

Abstract

Bachelor thesis discusses the ABS braking system and its influence on the braking distance of the vehicle. The thesis includes design, description of the development and testing of the model in the UPPAAL verification environment. The resulting model is a system of intercommunicating timed automata. The analysis of the model properties is based on the method of statistical verification. The model allows us to investigate in particular the course and the length of the braking track. Other variables affecting the behavior of the model that can be tracked are skidding, friction coefficient, air resistance, braking force and vehicle speed. It is also possible to obtain the probability of the vehicle stopping within a certain distance under the chosen conditions and examine the impact of ABS on these results.

Kľúčové slová

ABS, brzdová sústava, brzdna dráha, brzdna sila, brzdový asistent, rýchlosť, vozidlo, simulácia, štatistické overovanie modelu, stochastické časované automaty, hybridný diskretno spojité model

Keywords

ABS, braking system, braking distance, braking force, brake assistant, velocity, vehicle, simulation, statistical model checking, stochastic timed automata, discrete continuous hybrid model

Citácia

HOLEC, Dominik. *Modelování a analýza vlivu ABS na chování vozidla*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Josef Strnadel, Ph.D.

Modelování a analýza vlivu ABS na chování vozidla

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému Modelování a analýza vlivu ABS na chování vozidla vypracoval samostatne, pod dohľadom a vedením pána doktora Josefa Strnadela. Ďalej prehlasujem, že som uviedol literárne pramene a publikácie, z ktorých som počas tvorenia bakalárskej práce čerpal.

.....

Dominik Holec
13. mája 2018

Podakovanie

Veľmi pekne ďakujem vedúcemu Ing. Josef Strnadel, Ph.D. za hodnotné informácie, kvalitné znalosti a vedenie, za pedagogickú, odbornú pomoc a cenné rady pri tvorbe bakalárskej práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Popis reálneho systému – brzdny systém automobilu	4
2.1	Brzdná dráha	4
2.2	Brzdový systém vozidla	5
2.3	Druhy brzd	5
2.4	Súčiastky kotúčových brzd a ich funkcia	6
2.4.1	Piesty	6
2.4.2	Umiestnenie brzdových strmeňov	6
2.4.3	Druhy brzdových kotúčov	6
2.4.4	Brzdové doštičky	7
2.4.5	Brzdové lanká	8
2.5	Systém ABS	8
2.5.1	Princíp ABS	9
2.5.2	História ABS	9
2.5.3	Kompatibilita ABS	9
2.5.4	Zloženie systému ABS	9
2.5.5	Riadiaca jednotka ABS	9
2.5.6	Elektromagnetický ventil	10
2.5.7	Rozdeľovač brzdnej sily	10
2.5.8	Nevýhody ABS	11
2.6	Fyzikálne javy a sily dôležité pre prácu systému ABS	11
2.6.1	Rýchlosť a dráha	11
2.6.2	Sklz	13
2.6.3	Odpor vzduchu	14
2.6.4	Dynamika hmotného bodu	14
3	Návrh modelovaného systému	15
3.1	Terminológia	15
3.2	Verifikačné prostredie <i>UPPAAL</i>	16
3.3	Návrh riešenia, použité abstrakcie	17
4	Implementácia modelu	19
4.1	Model motoru	19
4.2	Model šoféra	19
4.3	Model prekážky na ceste	20
4.4	Model riadiacej jednotky	20
4.5	Model kolesa	22

4.6	Model sklzu	22
4.7	Model ABS	23
4.8	Zvolené konštanty	24
4.9	Testy	25
5	Výsledky simulácií	27
5.1	Test 1: Porovnanie brzdných dráh z rýchlosti 100km/h, na suchej vozovke. . .	27
5.2	Test 2: Porovnanie brzdných dráh z rýchlosti 100km/h, na zasneženej vozovke. .	29
5.3	Test 3: Porovnanie brzdných dráh vozidiel s rôznou hmotnosťou.	31
5.4	Test 4: Dopad zvýšenia pôvodnej rýchlosti vozidla na brzdnú dráhu.	31
5.5	Test 5: Pravdepodobnosť zastavenia vozidla na určitej dráhe.	33
6	Záver	35
	Literatúra	38

Kapitola 1

Úvod

Automobily sú dnes súčasťou života takmer každého z nás. Cestné komunikácie sú čoraz viac preplnené, vzniká teda rastúca otázka bezpečnosti všetkých účastníkov cestnej premávky. Na to slúžia premyslene stanovené dopravné predpisy. Výrobcovia automobilov však nezaostávajú a modernejšie autá sú ekologickejšie, úspornejšie, a hlavne, bezpečnejšie. Automobilky povinne podrobujú svoje vozidlá crash-testom, podľa ktorých kupujúci môže zvoliť bezpečnejšiu alternatívu. V bežných technických parametroch sa typicky kupujúci môže dozvedieť rozmery, výkon vozidla, jeho zrýchlenie, výbavu, avšak len malý dôraz je kladený brzdnej dráhe, ktorá je v prípade kritickej situácie kľúčová. Túto medzeru na trhu vyplňa napríklad nemecký autoklub ADAC, ktorý každoročne testuje rozličné pneumatiky a rôzne vozidlá, a stanovuje dĺžku brzdnej dráhy. Moderným automobилоm v zastavení a v predchádzaní nehodám dopomáhajú prvky aktívnej bezpečnosti, najmä protišmykové, protiblokovacie a stabilizačné systémy (ABS, ESP, ASR, TSC...).

Najstarším a snáď najdôležitejším z nich je systém ABS (anti-lock braking system) slúžiaci na zabránenie blokovania kolies. Povedomie šoférov o fyzikálnych zákonoch a silách vplývajúcich na vozidlo nemusí byť dostačujúce, čo môže byť v premávke nebezpečné. Samotná brzdová sústava má viacero častí a poznanie ich vplyvu na brzdnu dráhu môže mať pozitívny účinok na bezpečnejšiu a ohľaduplnejšiu jazdu vodiča. Táto téma je teda zaujímavým a náučným zdrojom poznania fungovania brzdového systému. Práca sa bude zaoberať predstavením systému ABS v širšej súvislosti celej brzdovej sústavy (kap. 2), návrhom a implemetáciou simulačného modelu, ktorý popisuje zjednodušený systém ABS (kap. 3 a 4). Nakoniec bude výsledný systém podrobený simulačným testom, v ktorých zistíme či a ako významne vplýva systém ABS na dĺžku brzdnej dráhy vozidla (kap. 5).

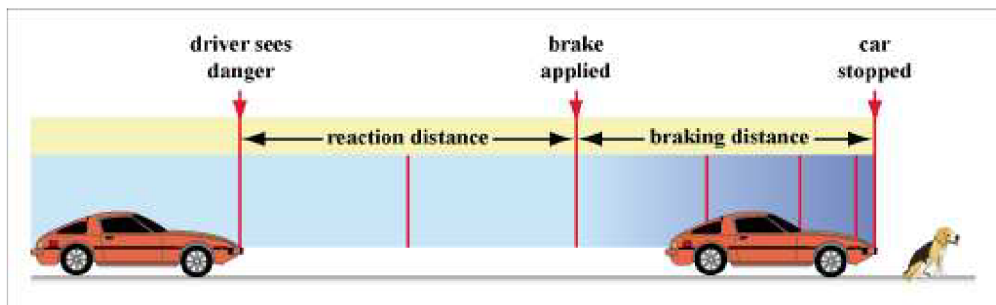
Kapitola 2

Popis reálneho systému – brzdny systém automobilu

V tejto kapitole budú popísané pojmy, ktoré vystihujú nami modelovaný brzdny systém automobilu. Kapitola sa dotkne pojmov brzdna dráha, ujasní, z akých súčiastok sa brzdny systém automobilu skladá. Vybrané súčiastky popíše podrobnejšie a bude sa venovať funkčnosti systému ABS, jeho princípu a fyzikálnym zákonitostiam.

2.1 Brzdna dráha

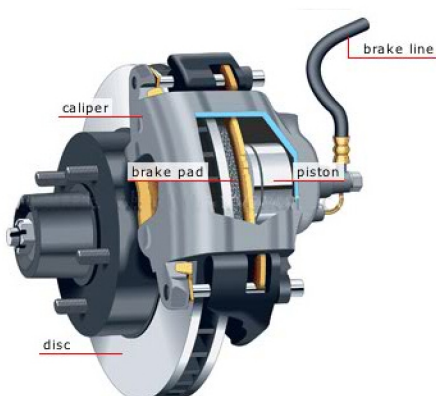
Brzdna dráha je vzdialenosť, na ktorej vozidlo z počiatočnej rýchlosti zastaví (viď. obrázok 2.1). Dôležitým prvkom je reakcia vodiča, teda vyhodnotenie situácie ako núdzovej – tá typicky trvá približne jednu sekundu a je závislá na skúsenostiach vodiča a okolnostiach. Po stlačení brzdového pedálu naplno prebieha nábeh brzdy, kedy ešte brzdna sila nie je maximálna. Potom vodič typicky brzdí maximálnou silou po celú dobu, až kým vozidlo nezastaví. [6] Nás bude zaujímať ako rýchlo, a na akej vzdialenosti auto zastaví. Bude taktiež zaujímavé sledovať, akú vzdialenosť vozidlo prejde počas reakcie vodiča. Keďže budeme porovnávať brzdnu dráhu vozidla s a bez systému ABS, dôležité pre nás bude núdzové brzdenie, kedy má vodič snahu zastaviť vozidlo čo najrýchlejšie. Vynecháme teda situácie, kedy šofér brzdí v bežnej premávke plynulo a systém ABS sa do brzdenia nezapája. Na brzdnu dráhu má samozrejme vplyv aj sklon vozovky, teda či sa auto pohybuje po rovine, prípadne hore alebo dole kopcom, kedy na auto pôsobí odpor prostredia. Nás bude zaujímať zjednodušená situácia, kedy sa auto pohybuje po rovnej vozovke.



Obr. 2.1: Brzdna dráha a reakcia vodiča.¹

2.2 Brzdový systém vozidla

Koleso auta je pripojené osou ku náprave vozidla. Vo vnútri kolesa sa nachádza statický brzdový strmeň ktorý je pripojený ku pohyblivému brzdovému kotúču (rotoru). Brzdenie začína v momente stlačenia brzdového pedálu vodičom. Zatiaženie vyvolá presun brzdovej kvapaliny cez brzdové lanká až ku brzdovému strmeňu. V brzdovom strmeni sa nachádza piest, ktorý privedením brzdovej kvapaliny vyvolá tlak na brzdové doštičky. Tie sa dotýkajú brzdového kotúča a formou sily trenia vozidlo postupne zastavujú. (Náhľad ponúka obrázok 2.2). V princípe sa teda kinetická energia vozidla premieňa vplyvom trenia na tepelnú energiu. Netreba tiež zabudnúť na pneumatiky, ich stav a funkciu. Do systému vstupuje ešte aj systém ABS, ktorý je nezávislou jednotkou. Vplyv týchto súčiastok na brzdnu dráhu vozidla bude ďalej adresovaný v ďalších podkapitolách.



Obr. 2.2: Brzdový systém – kotúčová brzda. ²

2.3 Druhy brzd

Kotúčová brzda:

Hlavnými súčiastkami sú brzdové doštičky a brzdový kotúč (rotor). Stlačením brzdového pedálu sa nepohyblivé brzdové doštičky trú o plochu pohyblivého brzdového kotúča, čo vyvoláva silu trenia. Tá je priamo závislá na sile, ktorou je brzdová doštička pritlačená na kotúč a na súčiniteli trenia. Čím je dotyková plocha menšia, tým je potrebné vyvinutie väčšej sily. Kinetická energia sa tu premieňa na teplo a preto je dôležité dostatočné chladenie – typicky nasmerovaním prívodu vzduchu. Brzdy sa môžu prehriať pri zjazde z vysokého prevýšenia, a takto prehriate brzdy strácajú svoju účinnosť. [6]

Bubnová brzda:

Tak isto funguje na princípe trenia. Je predchodcom brzdy kotúčovej. Skladá sa z bubna a brzdnych čelustí. Čeluste sú pritlačené na vnútornú stenu bubna, čím vzniká sila trenia. [6] Bubnové brzdy majú viac častí, sú menej efektívne a dnes je ich použitie už na ústupe. Nájde ich už len v brzdovom systéme zadných kolies, väčšinou však už len pri starších, prípadne lacnejších vozidlách. Z uvedených dôvodov sa ďalej budeme zaoberať len súčiastkami diskových brzd a ich vplyvom na brzdnu dráhu vozidla.

¹Vid. http://www.hk-phy.org/contextual/mechanics/kin/eq_mo01_e.html

²Vid. <http://www.autoworksofdestin.com/brake-system-operation-and-inspection/>

2.4 Súčiastky kotúčových brzd a ich funkcia

2.4.1 Piesty

Diskové brzdy sa môžu líšiť počtom piestov. Ak je piestov viac, sila trenia môže byť rozložená rovnomernejšie, a brzdové doštičky sú typicky väčšie, brzdia teda efektívnejšie, s menším opotrebovaním. Pre zlepšenie brzdneho účinku v spojení s piestami sa používajú nasledovné spôsoby:

Zväčšenie plochy piestu v brzdovom strmeni:

Vychádza z rovnice $F = P * A$, kde výsledná sila je súčinom tlaku a plochy, na ktorú je tlak aplikovaný. Zväčšenie piestu umožní aplikovať väčšiu silu na brzdové doštičky, to vyvolá väčšiu silu trenia a následne má koleso väčšiu brzdnu silu.

Zvýšenie počtu piestov:

Viac menších piestov môže mať väčšiu plochu ako jeden veľký a preto majú lepší brzdny účinok spôsobený vyšším tlakom na brzdovú doštičku. Navyše, sila je rovnomernejšie rozložená na kotúči.

Rozloženie piestov za sebou:

Viac piestov rozložených za sebou, od najmenšieho po najväčší. Brzdová doštička sa pri styku s brzdovým kotúčom zahrieva a brzdy zahrievaním strácajú účinok – situáciu riešia rôzne veľké piesty, keď je postupne aplikovaná väčšia a väčšia sila daná plochou väčších piestov.

V bežnej žiaľ premávke nepostrehneme rozdiel medzi jednopiestovými a viacpiestovými brzdami. [5]

2.4.2 Umiestnenie brzdových strmeňov

V rámci umiestnenia na brzdovom kotúči majú autá umiestnené brzdové strmene na vnútornej alebo vonkajšej strane kolesa. Vnútorná poloha značí bližšie ku stredu auta (predné koleso viac vzadu, zadné koleso viac vpredu), vonkajšia poloha smerom von z auta (predné koleso viac vpredu, zadné koleso viac vzadu). Pri bežných autách je rozloženie medzi vonkajším a vnútorným umiestnením približne 50/50, zatiaľ čo pri športových autách je to približne 70/30 v prospech vnútornej strany. Pri športových autách je dôvodom snaha o centralizáciu hmotnosti smerom ku stredu auta. Inými dôvodmi pre rôzne umiestnenie brzdových strmeňov môžu byť chladenie (nastavenie prieduchov vzduchu), iné prvky nápravy zabraňujúce umiestneniu brzdového strmeňa, vzhľad (nápad dizajnéra), prípadne cena. Umiestnenie brzdových strmeňov však má len malý vplyv na efektívnosť brzd. [5]

2.4.3 Druhy brzdových kotúčov

Ventilované (vented):

Medzi dvomi platňami kotúča sa nachádzajú medzery, ktoré umožňujú lepšie chladenie. To má za dôsledok väčšiu výdrž týchto kotúčov danú nižším opotrebovaním pri vyšších teplotách a vyššom zaťažení. Používajú sa v bežných automobiloch a uplatnenie našli aj v pretekárskych automobiloch.

Vrtané (drilled):

V kotúči sú vyvrtané diery, ktoré majú slúžiť na lepšie odvádzanie tepla pri brzdení a prípadných odlomkov z brzdových doštičiek. V praxi však majú viac nevýhod – kvôli dieram v kotúči majú menšiu dotykovú plochu pre brzdenie, a pri maximálnom zaťažovaní môže

prísť ku rozdielom v teplotách v rámci kotúča, medzi samotnými dierami, a plochou kotúča. Vrtané kotúče sa preto dnes nepoužívajú ani v pretekárskych autách, ani v bežných osobných automobiloch. Výhodou je zaujímavý vzhľad, preto tento typ kotúčov našiel uplatnenie pri vyšších triedach športových automobilov – značky Ferrari, Lamborghini, AMG divízia značky Mercedes-Benz.

Drážkované (slotted):

Namiesto dier sú vyvrtané drážky (čiary), za podobného predpokladu ako vrtané kotúče. Fungujú o niečo lepšie. Majú použitie v pretekárskych automobiloch. [5]



Obr. 2.3: Brzdový kotúč, ktorý je ventilovaný, drážkovaný, aj vrtaný. ³

Na efektívnosť brzdzenia vplýva veľkosť brzdového kotúča a ku nemu príslušných brzdových doštičiek. Čím je brzdový kotúč väčší, tým väčšie brzdové doštičky naň môžu byť umiestnené. Veľkosť brzdových kotúčov je však v praxi obmedzená rozmerom diskov automobilu. Dôležité je taktiež chladenie brzdových kotúčov, o čo sa typicky starajú prívody vzduchu nasmerované na brzdové kotúče.

2.4.4 Brzdové doštičky

Brzdové doštičky typicky majú v strede vyrezaný malý otvor – slúži ako priestor na odvádzanie trosiek, a v prípade zahriatia brzdových doštičiek dovoľuje ich rozťažnosť bez poškodenia (viď. obrázok 2.4). Väčšie brzdové doštičky umožňujú efektívnejšie brzdenie a menšie opotrebovanie – väčšia brzdová doštička má viac materiálu a lepšie sa chladí. Pre efektívnosť brzdových doštičiek je dôležité poznať vzťah medzi koeficientom trenia a teplotou brzdovej doštičky. Rôzne typy materiálov brzdových doštičiek majú iné vlastnosti za rôznych tepelných podmienok, z toho vychádza aj ich využitie.

V bežných automobiloch sa používajú brzdy, ktoré majú veľmi dobrú účinnosť už za studena, ich účinok sa vytráca pri väčšom zahrievaní. Problém typicky nastáva pri zjazde z vyššie položených horských priechodov, kedy sú brzdy preťažované a prehriate, vplyvom čoho strácajú svoj brzdný účinok. Aj z tohto dôvodu je šoférom pri jazde z kopca odporúčané brzdenie motorom. Naopak v pretekárskych automobiloch je krivka opačná. Tieto brzdové doštičky majú slabú účinnosť pri nízkych teplotách, preto sa potrebujú zahriať na prevádzkovú teplotu (typicky zahrievacím kolom pred pretekom). Po zahriatí už ale majú účinnosť oveľa lepšiu ako bežné autá, a oveľa lepšie zvládajú aj vysoké teploty, ktoré dosahujú extrémnym zaťažením. Materiál brzdových doštičiek sa volí vzhľadom na účel vozidla.

³Vid. <https://www.ecstuning.com/b-ecs-parts/front-cross-drilled-slotted-2-piece-brake-rotors-pair-345x30/000036ecs01akt/>

⁴Vid. <http://www.dexteraxle.com/ufp/products/brakes-brake-accessories/brake-components/disc-brake-pads>



Obr. 2.4: Brzdová doštička. ⁴

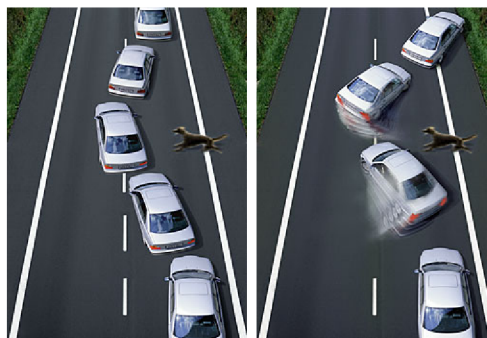
2.4.5 Brzdové lanká

Brzdovými lankami sa zabezpečuje prívod brzdovej kvapaliny k piestom brzdového strmeňa po stlačení brzdového pedála vodičom. V drvivej väčšine vozidiel sa používajú gumené brzdové lanká. Vylepšením by mali byť brzdové lanká z nehrdzavejúcej ocele. Predpokladom je, že je tento materiál tuhší, má menšiu rozťažnosť a prevod kvapaliny by tak mal byť rýchlejší. Brzdové lanká síce spôsobia pevnejší pocit brzdového pedála, rozdiel rýchlosti presunu brzdovej kvapaliny je však zanedbateľný. Rozhodnutie o materiáli brzdových laniek teda nemá vplyv na brzdnú dráhu vozidla.

2.5 Systém ABS

Motivácia: keď núdzovo zabrzdí vozidlo nevybavené systémom ABS, dôjde ku zablokovaniu pneumatiky a jej prehrievaniu a obrusovaniu v mieste dotyku s vozovkou. Obrúsený materiál, ktorý sa nestíha odvádzať spôsobí menšiu príľnavosť, zníži sa tak sila trenia medzi pneumatikou a vozovkou a brzdná dráha sa predlžuje. Vozidlo je v tomto momente nekontrolovateľné a pokračuje v smere pred zablokovaním. V prípade takéhoto brzdovania a zablokovania kolies bez ABS v zákrute, vozidlo pokračuje neovládateľne po dotyčnici smerom von z vozovky.

Systém ABS (Antilock Braking System) zabraňuje zablokovaniu brzdeného kolesa a ponecháva auto ovládateľným v situácii núdzového brzdovania. Ovládateľnosť vozidla je však z dôvodu bezpečnosti nadradená dĺžke brzdnaj dráhy, pretože práve ovládateľnosť dovoľí vodičovi núdzovo manévrovať s vozidlom a potenciálne sa tak vyhnúť prekážke na ceste. Preto systém ABS funguje za každých podmienok, aj keď môže nastať situácia, kedy by vozidlo bez ABS dokázalo zastaviť rýchlejšie. Systém ABS je základným prvkom aktívnej bezpečnosti vozidla. [14]



Obr. 2.5: Vplyv ABS na stabilitu vozidla v praxi, vľavo s ABS, vpravo bez ABS. ⁵

2.5.1 Princíp ABS

V kolesách (alebo diferenciáli) sa nachádzajú senzory kontrolujúce zablokovanie kolesa porovnávaním obvodovej rýchlosti kolesa s referenčnou rýchlosťou vozidla. Pri prudkom zabrzdení sa môže stať, že sa koleso zablokuje, čo snímač zistí priveľkým rozdielom medzi referenčnou a obvodovou rýchlosťou. Riadiaca jednotka situáciu vyhodnotí a na krátky okamih zníži tlak v brzdovom okruhu, ktorým pôsobia brzdové doštičky na brzdový kotúč. Akonáhle sa koleso rozbehne znova, tlak na brzdové doštičky sa opäť zvýši. Potom sa celý proces opakuje a senzory zisťujú, či sa kolesá nezablokovali znova. Snaha systému ABS je teda udržať vozidlo na medzi adhézie – s čo najsilnejším brzdovým účinkom, ale bez zablokovania kolies. Tento proces sa môže opakovať až 10–15krát za sekundu. Systém ABS sa vypína pri rýchlosti 4km/h, aby vozidlo mohlo úplne zastaviť (zablokovať kolesá). [17]

2.5.2 História ABS

Problém zablokovania brzdeného kolesa tu bol s nami už dlho, keď sa ho rozhodli vyriešiť inžinieri firmy Bosch v roku 1936 – systémom nazvaným „Zariadenie k zabráneniu silného brzdzenia kolies motorového vozidla“. ABS ako ho poznáme dnes sa však dostával do povedomia až s nástupom elektronického riadenia, najskôr bol používaný v lietadlách a nákladnej doprave (kamiónoch). Po rozmachu elektroniky zaviedla v roku 1978 systém ABS 2S firma Bosch. [17] Prvýkrát aplikovaný v sériovo vyrábanom aute bol v Mercedese-Benz triedy S, následne v BMW modelovej rady 7. Dnes sa ABS považuje za samozrejmosť a je ním vybavené takmer každý novší automobil. ABS sa stal dôležitým prvkom aktívnej bezpečnosti automobilov s cieľom skrátiť brzdnu dráhu. Stabilitu pomáhajú udržať aj ďalšie prvky aktívnej bezpečnosti, dnes už bežne používané systémy ASR a ESP.

2.5.3 Kompatibilita ABS

Vozidlo nevyžaduje na použitie systému ABS žiadne špeciálne úpravy, je však potrebné, aby vozidlo malo vhodné pneumatiky. Nemenej dôležité sú tlmiče. Pokiaľ by boli tlmiče nekvalitné, dôjde ku rozkmitaniu sústavy pneumatika–tlmič–brzda, čím sa zníži brzdny účinok a predĺži brzdna dráha. [6]

2.5.4 Zloženie systému ABS

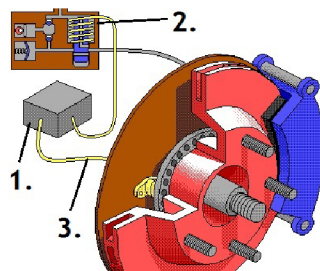
Systém sa skladá z tlakového čerpadla, zásobníka tlakovej kvapaliny, snímačov rýchlosti kolies a riadiacej jednotky. Keď riadiaca jednotka dostane signál od snímačov rýchlosti, že konkrétne koleso spomaľuje viac ako by malo, pomocou špeciálneho ventilu koleso odbrzdí, a po odbrzdení následne druhý ventil pustí tlakovú kvapalinu do brzdy a koleso opäť brzdí. Táto situácia sa opakuje aj desiatky ráz za sekundu. [14] ABS systémy sa delia na troj-snímačové a štvorsnímačové. V prípade štvorsnímačového systému ABS sú čidlá senzorov umiestnené na všetkých kolesách, zatiaľ čo v prípade trojsnímačového sú dva senzory na predných kolesách, a tretí na pastorku zadnej nápravy. [10]

2.5.5 Riadiaca jednotka ABS

Riadiaca jednotka má funkciu riadiacu a diagnostickú. Riadi správny chod systému ABS porovnávaním obvodovej rýchlosti daného kolesa oproti referenčnej rýchlosti vozidla, prípadne

⁵Vid. <http://www.autolexicon.net/cs/articles/abs-anti-lock-braking-system/>

⁶Vid. <http://www.autorubik.sk/clanky/protiblokovaci-system-abs-antilock-braking-system/>



Obr. 2.6: Súčiastky ABS: 1. riadiaca jednotka 2. regulačný ventil 3. snímač otáčok. ⁶

medzi kolesami navzájom. Riadi ďalšie súčiastky systému ABS, aby vykonávali potrebnú funkciu (zvýšenie brzdného tlaku, zníženie brzdného tlaku, udržanie brzdného tlaku). ABS systém sa skladá z dvoch pracovných systémov, ktoré zbierajú zo snímačov rovnaké údaje vyhodnocované v riadiacej jednotke. Tieto dáta sú spočítané v dvoch procesoroch riadiacej jednotky a očakávaným správaním je, že dáta z rovnakých zdrojov poskytnú totožné výsledky. Vtedy je systém v poriadku a pracuje správne. V prípade, že sa spočítané dáta líšia, riadiaca jednotka vyhodnotí, že niekde v systéme mohla nastať porucha a že dáta, ktoré dostala na vstup, sú pravdepodobne nesprávne. [9] Nesprávne dáta by mohli zapríčiniť nežiadúce správanie celého systému ABS, preto je systém v tomto prípade vypnutý, a porucha je oznámená vodičovi kontrolkou na prístrojovej doske. Vozidlu teda v prípade pokazeného ABS systému ďalej bežne funguje brzdový systém, avšak v prípade núdzového brzdzenia sa bude vozidlo správať ako vozidlo bez systému ABS. [14]

2.5.6 Elektromagnetický ventil

Elektromagnetický ventil je zodpovedný za privádzanie správneho brzdného tlaku na jednotlivé kolesá. Môže sa nachádzať v troch fázach:

Zvýšenie tlaku:

Hlavný brzdový valec je spojený s kolesovým brzdovým valcom, tlak brzdy sa môže zvyšovať (brzdny účinok nie je maximálny).

Udržanie tlaku:

Tlak je konštantný, brzda kolesa je odpojená od brzdového valca (fáza pri takmer ideálnom sklze s , s takmer maximálnym brzdny účinkom, bez zablokovania kolesa).

Zníženie tlaku:

Hlavný brzdový valec je odpojený, kolesový brzdový valec je spojený so spätným tokom, brzdová kvapalina je odvedená do zásobníka tlaku a ďalej do brzdového okruhu (fáza pri zablokovaní kolesa). [10]

2.5.7 Rozdeľovač brzdnej sily

V motorových vozidlách sa používa rozdeľovač brzdnej sily, ktorý sa usiluje o zvýšenie stability a skrátenie brzdnej dráhy. Rozdeľovač uprednostňuje prednú nápravu a dovoľuje na ňu aplikovať vyššiu brzdnu silu, pretože vozidlo má tendenciu sa pri brzdení navážiť na prednú nápravu, zadnú odľahčiť, čím sa znižuje priľnavosť kolies zadnej nápravy, a priveľká brzdna sila zadných kolies by spôsobila ich zablokovanie. [6]

2.5.8 Nevýhody ABS

Vozidlo so systémom ABS môže mať za istých okolností dlhšiu brzdnú dráhu ako vozidlo bez systému ABS. Môže sa tak udiť napríklad na suchej vozovke, keďže sila systému ABS sa naplno prejavuje najmä za podmienok zníženej adhézie vozovky (popadané lístie, dážď, sneh, ľad, námraza). Brzdnú dráhu vozidla so systémom ABS tiež negatívne ovplyvnia faktory spomenuté v podkapitole 2.5.3 venovanej kompatibilite – nevhodné pneumatiky, opotrebované tlmiče. ABS však udržuje vozidlo lepšie ovládateľným za každých okolností oproti vozidlu bez systému ABS, čo je nespornou výhodou v bezpečnosti prevažujúcou všetky spomenuté nevýhody.

2.6 Fyzikálne javy a sily dôležité pre prácu systému ABS

Medzi vozidlom a okolím nastáva pôsobenie rôznych síl. Medzi najpodstatnejšie vzhľadom na brzdnú dráhu vozidla patri tretia sila medzi pneumatikami a vozovkou. Táto podkapitola poskytne nástroje na výpočet brzdných dráh, trecej sily, sklzu a odporu vzduchu.

2.6.1 Rýchlosť a dráha

Bude pre nás dôležité vedieť spočítať, aká bola skutočná brzdná dráha vozidla s alebo bez systému ABS. Budeme vychádzať z rovnice 2.1 – rýchlosť vyjadrená v základnej rovnici pre rovnomerne zrýchlený pohyb. [8]

$$v = v_0 + a * t \quad (2.1)$$

V rovnici 2.1 veličiny postupne znamenajú:

$v[m/s]$ – výsledná rýchlosť

$v_0[m/s]$ – počiatočná rýchlosť

$a[m/s^2]$ – zrýchlenie

$t[s]$ – čas

Pre zistenie brzdných dráh poznáme výslednú rýchlosť $v = 0m/s$ a vieme, že sa bude jednať o pohyb rovnomerne spomalený, čiže znamienko $+$ zameníme za znamienko $-$.

Po dosadení a vyjadrení veličiny času dostávame rovnicu 2.2:

$$t = \frac{v_0}{a} \quad (2.2)$$

Rovnica 2.3 reprezentuje vzorec pre výpočet dráhy odvodeného z rovnice zrýchlenia.

$$s = \frac{1}{2} * v_0 * t \quad (2.3)$$

$s[m]$ – dráha

Po dosadení rovnice 2.2 za čas do rovnice 2.3 dostávame finálny vzorec pre výpočet dĺžky dráhy s pri spomaľovaní z počiatočnej rýchlosti v_0 zrýchlením a :

$$s = \frac{1}{2} * \frac{v_0^2}{a} \quad (2.4)$$

Tabuľka 2.1: Hodnoty statického a kinetického koeficientu trenia medzi povrchmi. Hodnoty prebrané z [16]

Povrchy	μ_s	μ_k
Pneumatika/asfalt	1.00	0.8
Pneumatika/mokrá vozovka	0.6	0.4
Pneumatika/sneh	0.3	0.2

Sila trenia

Dĺžka brzdnkej dráhy je ovplyvnená trecou silou, ktorá vzniká medzi pneumatikou a povrchom vozovky. Treciu silu poznáme statickú a kinetickú. Pri bežnej jazde auta, s voľne odvaluj ucimi sa kolesami existuje medzi kolesami a vozovkou sila statického trenia. Táto sila umoŹňuje autu zrýchľovať, spomaľovať, a bezpečne bočiť. V prípade, že sa auto rozbieha prisilno a dôjde k pret acaniu kolies, alebo brzdí prisilno so zablokovaním kolies (šmykom), sa statické trenie mení na kinetické. [7] Rovnica 2.5 popisuje silu statického trenia, priamo umern u velkosti normálovej sily a koeficientu statického trenia:

$$F_s = \mu_s * F_n \quad (2.5)$$

$F_s[N]$ – sila statického trenia

μ_s [bezrozmerná veličina] – koeficient statického trenia

$F_n[N]$ – normálová sila

Kinetickú treciu silu vyjadríme vzťahom v rovnici 2.6:

$$F_k = \mu_k * F_n \quad (2.6)$$

$F_k[N]$ – sila kinetického trenia

μ_k [bezrozmerná veličina] – koeficient kinetického trenia

Rovnice sa od seba l isia len hodnotou statického respektíve kinetického koeficientu trenia. V tabuľke 2.1 m ozeme vidieť, ako sa hodnoty týchto koeficientov l isia za rôznych podmienok. Dôležité je poznamenať, že hodnota statického koeficientu trenia je v ždy v acšia alebo rovná hodnote kinetického koeficientu trenia. Pre úplnosť uvádzam rovnicu pre výpočet normálovej sily:

$$F_n = m * g \quad (2.7)$$

$m[kg]$ – hmotnosť predmetu/vozidla

$g[m/s^2]$ – gravitačné zrýchlenie

$$s = \frac{1}{2} * \frac{v_0^2}{g * u} \quad (2.8)$$

Dostali sme sa k úprave rovnice 2.4 po dosadení $a = g * u$ za zrýchlenie. [16] Koeficient u v tomto prípade m oze značiť statický koeficient trenia (rovnica bude vyjadrovať brzdnú dráhu dosiahnutú plynulým zastavením bez šmyku) alebo kinetický koeficient trenia (rovnica bude vyjadrovať dráhu dosiahnutú brzdením šmykom). V praxi sa systém ABS snaží o dosiahnutie dráhy čo najkratšej, teda pracovať so statickým koeficientom trenia. Počas práce ABS však na malé okamihy dochádza ku zablokovan iu kolies, brzdenie nie je konštantné a teda reálna dĺžka dráhy bude brať v úvahu kombin aci u statického a kinetického koeficientu trenia v daných časových momentoch.

2.6.2 Sklz

Skzlom rozumieme rozdiel rýchlosti vozidla a obvodovej rýchlosti kolesa. Sklz sa pohybuje od 0% (voľne odvalujúce sa koleso), kedy sa obvodová rýchlosť vozidla a referenčná rýchlosť vozidla rovnajú, do 100% (zablokované koleso), kedy je auto stále v pohybe, avšak obvodová rýchlosť kolesa je 0. [10] Koefficient trenia je ovplyvňovaný najviac práve sklzom pneumatiky. Maximálnu adhéziu dosahuje koleso pri hodnote sklzu 10–40%, označovanej ako úroveň stability (statický koefficient trenia). Nad 40% je oblasť nestability (kinetický koefficient trenia), ktorej sa snaží systém ABS zabrániť. Pre porovnanie rýchlostí potrebujeme pracovať s rovnakými jednotkami, preto vypočítame referenčnú rýchlosť vozidla v uhlovej rýchlosti podľa nasledujúceho vzťahu:

$$\omega_v = \frac{v}{r} \quad (2.9)$$

ω_v [rad/s] – uhlová rýchlosť vozidla

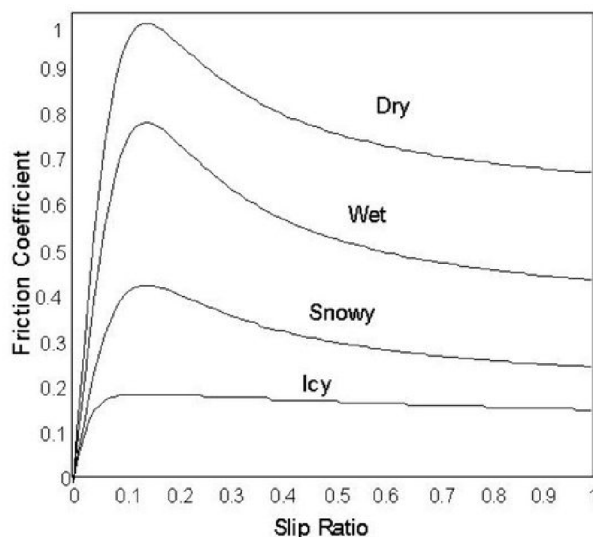
v [m/s] – rýchlosť vozidla v metroch za sekundu

r [m] – polomer kolesa

Obdobne vypočítame uhlovú rýchlosť kolesa vzorcom $\omega_w = \frac{v_w}{r}$. Výsledný sklz vypočítame vzťahom v rovnici 2.10:

$$slip = 1 - \frac{\omega_w}{\omega_v} \quad (2.10)$$

Zo vzťahu vyplýva, že sklz bude pri brzdení nadobúdať hodnoty 0 (odvalovanie kolesa) až 1 (zablokované koleso). [15] Najvhodnejšia úroveň pre ABS sa javí byť okolo hodnoty 0,1–0,2, kedy je brzdzenie najefektívnejšie. Efektívnosť respektíve neefektívnosť daného sklzu vyjadruje zákonitosť medzi sklzom a koefficientom trenia μ , v angličtine takzvaná "mu-slip curve" zobrazená na obrázku 2.7. Priebeh krivky na rôznych povrchoch je mierne odlišný, preto je hodnota maximálneho koefficientu trenia v závislosti na sklze veľmi individuálna.



Obr. 2.7: Závislosť koefficientu trenia na sklze na suchom, mokrom, zasneženom a ľadovom povrchu. ⁷

⁷Vid. <https://www.quora.com/How-does-ABS-reduce-stopping-distance-theoretically>

2.6.3 Odpor vzduchu

Odpor vzduchu je sila pôsobiaca proti smeru vozidla, ktorá je vyvolaná prostredím (vzduch), v ktorom sa vozidlo pohybuje. Vzduch obklopujúci vozidlo bráni jeho pohybu.

$$O_v = \frac{1}{2} * \rho * S * C * v^2 \quad (2.11)$$

$O_v[N]$ – odpor vzduchu

$\rho[kg * m^{-3}]$ – merná hmotnosť vzduchu

$S[m]$ – čelná plocha vozidla

$C[]$ – súčiniteľ vzdušného odporu

$v[m/s]$ – rýchlosť prúdenia vzduchu okolo vozidla

Merná hmotnosť vzduchu závisí od teploty a tlaku vzduchu. Hustota použitá pre účely tejto práce je $\rho = 1,25kg * m^{-3}$, ktorá je platná pre prostredie s teplotou $15^\circ C$ a tlakom 1,013 baru. Rýchlosť prúdenia vzduchu okolo vozidla je daná hlavne rýchlosťou samotného vozidla. Pre určenie presnej rýchlosti prúdenia vzduchu je nutné spočítať rýchlosť vetra a poznať taktiež jeho smer, teda uhol, pod ktorým pôsobí na vozidlo. Pre účely tejto práce budeme predpokladať, že sa vozidlo pohybuje v bezvetří a jediné prúdenie vzduchu okolo vozidla je vytvorené jeho rýchlosťou. Čelná plocha vozidla S je zjednodušené plocha vozidla, ktorú vidíme pri pohľade spredu vozidla. Dá sa zistiť svetelnou projekciou auta na projekčnú stenu, laserovým meracím systémom, alebo formou špecializovaného softvéru na počítači. Ako zjednodušený vzťah vieme použiť rovnicu $S = B * H$, kde B je rozchod kolies vozidla a H je výška vozidla. Podobne ako súčiniteľ vzdušného odporu, ktorý sa určuje v aerodynamickom tuneli, sú tieto technické údaje zverejnené výrobcami automobilov. V rámci programovania modelu budeme postupovať podľa tejto definície odporu vzduchu. V skutočnosti je to však komplikovanejšie – na vozidlo môžu pôsobiť turbulentné sily víriaceho sa vzduchu, indukovaný odpor tvoriaci sa rozdielom tlaku pod a nad vozidlom, vzduch prechádzajúci cez chladenie a ventiláciu, povrchové trenie vzduchu a vírenie vzduchu kolesami. [13]

2.6.4 Dynamika hmotného bodu

Druhý Newtonov zákon – zákon sily, hovorí, že sila je priamo úmerná súčinu hmotnosti telesa m a zrýchlenia a , ktoré vyvoláva.

$$F = m * a \quad (2.12)$$

Ak teda poznáme veľkosť síl, ktoré pôsobia na vozidlo, a poznáme aj jeho hmotnosť, dokážeme určiť zrýchlenie, s ktorým sa vozidlo pohybuje. [8]

Kapitola 3

Návrh modelovaného systému

V tejto sekcii bude prezentované, čo je potrebné pre modelovanie, ako modelovanie prebieha a konečný návrh riešenia v simulačnom jazyku *UPPAAL*.

3.1 Terminológia

Z hľadiska terminológie modelovania a simulácií bude potrebné si zadať, čo vnímame ako systém, akým spôsobom budeme vytvárať jeho model v počítači a aké vzťahy budú medzi reálnym systémom a našim modelovaným systémom.

Systém:

Systémom nazývame súbor elementárnych častí (prvkov systému), ktoré majú medzi sebou určité väzby. Reálnym systémom v našom prípade je vozidlo idúce po vozovke, ktoré bude potrebovať čo najrýchlejšie zabrzdiť. Popisom reálneho systému a jeho zákonitostami sa zaoberala kapitola 2.

Model:

Model je napodobenina systému iným systémom.

Modelovanie:

Modelovanie je proces vytvárania modelov systémov. Pre modelovanie je potrebné poznať podrobne pôvodný reálny systém a dokázať určiť, ktoré jeho prvky sú najdôležitejšie.

Simulácia:

Simulácia je experimentovanie so simulačným modelom. Cieľom simulácie je získanie nových znalostí o systéme v závislosti na vstupných veličinách. Simuláciu typicky vyhľadávame v situácii, kedy experimentovanie s reálnym modelom nie je možné, prípadne je príliš drahé. Simuláciou získavame množinu hľadaných parametrov, pre ktoré má systém nami žiadané chovanie.

Abstraktný model:

Abstraktný model vychádza z reálneho systému. Je však jeho zjednodušenou podobou, pretože v počítači nedokážeme popísať komplexné chovanie reálneho sveta. Abstrahuje teda dáta pre náš problém nepodstatné a ponecháva dáta relevantné účelu a cieľu modelu. Medzi reálnym systémom a abstraktným modelom vzniká homomorfný vzťah. Reprezentáciou abstraktného modelu môžu byť konečné automaty, Petriho siete, Turingove stroje, algebraické/diferenciálne rovnice a iné.

Homomorfný vzťah:

Homomorfný vzťah pri prevode reálneho systému na abstraktný model dovoľuje zjednodušenie – vynechanie určitých, pre nás nepodstatných prvkov (priradenie prvkov $N : 1$). Vyžaduje však, aby pri prvkoch obsiahnutých v abstraktnom modeli boli zachované rovnaké vzťahy ako v reálnom systéme.

Simulačný model:

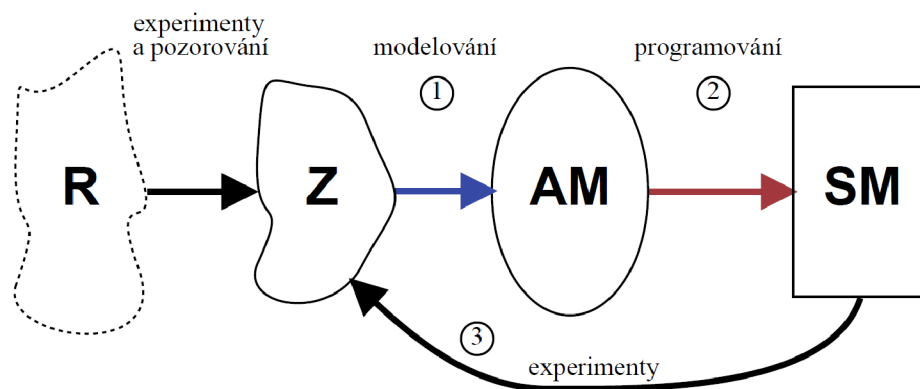
Simulačným modelom označujeme abstraktný model zapísaný formou počítačového programu. Medzi abstraktným modelom a simulačným modelom teda vzniká izomorfný vzťah. Implementácia simulačného modelu bude závisieť na implementovanom systéme a na voľbe simulačného nástroja. Použiť môžeme všeobecné programovacie jazyky (*C*, *C++*, *Java*), knižnice nad týmito jazykmi (napr. *SIMLIB/C++*), prípadne simulačné jazyky (*Simula67*, *Modelica*, *UPPAAL*).

Izomorfný vzťah:

Izomorfný vzťah pri prevode abstraktného modelu na simulačný model vyžaduje priradenie prvkov systémov v pomere 1 : 1. Rovnako vyžaduje zhodnosť vzťahov medzi prvkami. Izomorfný vzťah oproti homomorfnému vzťahu predstavuje silnejší vzťah ekvivalencie – vyžaduje zhodnosť štruktúr a chovania prvkov.

Verifikácia a validita modelu:

Verifikáciou modelu overujeme zachovanie vzťahu izomorfizmu medzi abstraktným modelom a simulačným modelom. Validácia modelu – snaha dokázať, že pracujeme s modelom adekvátnym ku modelovanému systému. Nie je možné dokázať úplne presne, preto chápeme validitu modelu ako mieru správnosti získaných výsledkov.



Obr. 3.1: Realita → Znalosti → Abstraktný model → Simulačný model [11]

3.2 Verifikačné prostredie UPPAAL

UPPAAL je nástroj pre validáciu (pomocou simulácie) a verifikáciu (vdaka model-checkingu) real-time systémov. Skladá sa z grafického užívateľského rozhrania a prostriedku pre model-checking. Užívateľské rozhranie je implementované v jazyku *Java*. Simuláciu môžeme prevádzkať krok po kroku a sledovať tak, či systém pracuje tak ako bolo zamýšľané. Model-checking prebieha na základe prvku *Verifier*, ktorý overuje možnosť splnenia rôznych podmienok — dostupnosť stavu, možnosť uviaznutia (deadlock), hodnoty premenných v čase a iné. V jazyku *UPPAAL* modelujeme systém pomocou časovaných automatov – konečných automa-

tov s časom. Pomocou týchto modelov simulujeme a verifikujeme rôzne parametre. Systém sa skladá zo siete procesov. Procesy sú zložené z miest. Správanie procesu systému určujú práve miesta a prechody medzi miestami. Čas v simulačnom jazyku *UPPAAL* je meraný hodinami časovaných automatov, a tento čas je spojitý. Systém sa skladá zo súbežných procesov. Každý proces je modelovaný ako automat. Automat má množinu miest a prechodov medzi nimi. Prechody dokážeme kontrolovať rôznymi podmienkami a vieme zabezpečiť aj synchronizáciu prechodov. [4]

3.3 Návrh riešenia, použité abstrakcie

Reálny brzdový systém a fyzikálne deje vplývajúce na pohyb auta sú veľmi rozsiahle a niektoré aj ťažko popísateľné v celej svojej podstate. Preto je vhodné sa zamyslieť nad vhodnou úrovňou abstrakcie. Musíme zvážiť, ktoré detaily môžeme zanedbať a ktoré a nakoľko si môžeme dovoliť zjednodušiť. Budeme predpokladať, že auto riadi šofér, ktorý môže spustiť a vypnúť motor, môže zrýchľovať a spomaľovať a po zbadaní prekážky na ceste bude s určitou odozvou reagovať plným zošliapnutím brzdového pedála. Pre jednoduchosť budeme predpokladať, že šofér bude v testoch s ABS a bez ABS vždy držať brzdový pedál zošliapnutý naplno, aj keď bude koleso zablokované.

Budeme predpokladať, že sa vozidlo pohybuje po ceste bez nerovností, kopcov, a že sa bude pohybovať po priamke. Zanedbáme valivý odpor kolies, niektoré časti odporu vzduchu, budeme sa sústrediť hlavne na proces brzdenia a práce systému ABS. Správanie kolies, ich blokovanie a odbrzdovanie, ich uhlovú rýchlosť a sklz bude reprezentovať jedno koleso, zjednodušene popisujúce chovanie celého vozidla. Správanie modelu budú definovať viaceré komponenty. Vodič, ktorý dáva pokyn na spustenie motora, sa náhodne rozhoduje o zmene rýchlosti a prirodzene reaguje na prekážku na ceste, následne núdzovo brzdí.

Riadiaca jednotka, ktorá príkazy vodiča vykonáva – dáva príkaz na spustenie motora, monitoruje rýchlosť a pracuje na jej zmene na základe stlačenia pedálov, počíta prípadnú veľkosť brzdnej sily a zisťuje, či nezačalo núdzové brzdenie. Motor, ktorý môže byť zapnutý alebo vypnutý. Koleso, ktoré sa po spustení motora pohybuje a pravidelne zisťuje informácie o svojej rýchlosti a sklze a dopomáha určiť aktuálny koeficient trenia a treciu silu medzi kolesom a vozovkou. Model sklzu, ktorý vyhodnocuje, či sa sklz kolesa nachádza v oblasti stability, alebo v oblasti nestability, kedy je potrebný zásah systému ABS, povolenie brzdneho tlaku a cieľom je návrat do oblasti stability, kde je brzdenie efektívnejšie. Model ABS, ktorý pre účely testu môže byť zapnutý alebo vypnutý. ABS bude na základe sklzu a oblasti stability alebo nestability zasahovať do procesu brzdenia. Poslednou komponentou bude automat na vyvolanie krízovej dopravnej situácie, ktorý bude vyvolávať udalosť v daný, pevný čas, aby bolo možné porovnávať vývoj rýchlosti a ostatných fyzikálnych veličín vo vozidle so systémom ABS, a bez neho. Viď. kapitola 2, na brzdnu dráhu sa zameriame s výpočtom bez aj s reakciou vodiča, aby sme dokázali vnímať akú časť brzdnej dráhy tvorí vyhodnotenie situácie vodičom. Testy brzdnej dráhy bude možné vykonávať z rôznych počiatočných rýchlostí, aby sme dokázali skúmať závislosť vplyvu systému ABS na počiatočnej rýchlosti.

Brzdny systém budeme vnímať ako jeden celok, nebudeme teda brať do úvahy konkrétne súčiastky ako brzdové doštičky, ich veľkosť, kvalitu kotúča, umiestnenie brzdového strmeňa. Veľkosť brzdnej sily budeme považovať za konštantnú, ovplyvniteľnú len koeficientom trenia a odporom vzduchu, a to z dôvodu, že určiť veľkosť vplyvu brzdových doštičiek, kotúčov, a ďalších komponent brzdovej sústavy, je aj v realite náročné a nemá na konečné výsledky podstatný vplyv. Systém ABS bude obsahovať len jeden modul, funkcia elektromagnetic-

kého ventilu uberajúceho brzdný tlak bude zakomponovaná do aproximovanej funkcie, ktorá zvyšuje uhlovú rýchlosť kolesa v momente, kedy je sklz v oblasti nestability. Sklz a sila trenia budú premenné programu, ktoré budú ovplyvňované ostatnými komponentami.

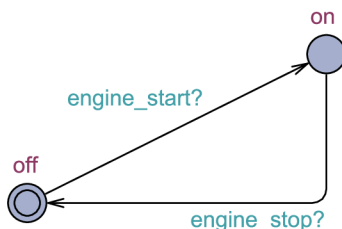
Kapitola 4

Implementácia modelu

V tejto kapitole bude popísaná konkrétna implementácia modelu v simulačnom nástroji UPPAAL. Implementácia sa bude pridržiavať požiadaviek zo sekcie návrhu riešenia (viď. 3.3). Jednotlivé automaty budú popísané postupne, a budú spomenuté aj najdôležitejšie premenné reprezentujúce fyzikálne veličiny.

4.1 Model motoru

V prípade automatu motoru *Engine* nás bude zaujímať, či je motor vypnutý, alebo zapnutý – tento automat teda bude reprezentovaný dvoma stavmi, a signály na zmenu stavu budú prijímané od automatu riadiacej jednotky. Výkon, ktorým motor prispieva ku zrýchleniu bude reprezentovaný premennou zrýchlenia a , ktorá nebude priamo spätá s modelom motoru.



Obr. 4.1: Automat Engine znázorňujúci model motora

4.2 Model šoféra

V automate modelu šoféra *Driver* sa po približne 5 časových jednotkách posiela šofér signál *start!* riadiacej jednotke, ktorá naštartuje motor. Pri prechode do stavu *ready* sa nuluje globálna jednotka času x , ktorá je neskôr určená na vyvolanie krízovej situácie v automate *ObstacleSpotted*.

V stave *ready* sa model rozhoduje s pravdepodobnosťou 50% medzi prechodmi do stavov *pedal_accelerator* a *pedal_braking*. Po vybratí jedného zo stavov tu automat cyklí, maximálne však desaťkrát, aby maximálna hodnota premennej predstavujúcej intenzitu stlačenia daného pedálu neprekročila maximálnu hodnotu, v našom prípade stanovenú na hodnotu 100. Automat teda cyklením akumuluje hodnotu v rozmedzí 0–100, v násobkoch čísla 10.

Po uplynutí 1 časovej jednotky – v našom prípade jednej desatiny sekundy – sa automat vracia do stavu *ready* a celý proces sa opakuje. Na základe hodnôt premenných *p_brake* a *p_throttle* sa vo funkcii *velocity()* počíta veľkosť zrýchlenia *a*. Premenná brzdiaceho pedálu je odčítaná od premennej plynového pedálu. Tento proces vytvára vo funkcii *velocity()* interval $[-100, 100]$, ktorý je rozdelený na 9 menších intervalov, na základe ktorých sa vypočíta hodnota zrýchlenia. Keďže je rovnako pravdepodobné navštívenie stavu na akumuláciu brzdivého pedálu ako na akumuláciu plynového pedálu a našou snahou je, aby vozidlo pred testom nadobudlo určitú rýchlosť, je vo funkcii *velocity()* zvolená vhodná množina premenných, ktorá zabezpečuje, že auto s väčšou pravdepodobnosťou bude zrýchľovať. Aby sme sa pridržiali reálnej dopravnej situácie na bežných komunikáciách, po prekročení rýchlosti 135km/h má auto možnosť len spomaľovať. Obmedzenie veľkosti premennej zrýchlenia v oblastiach rýchlosti 45–55, 85–95, 125–135km/h simuluje reálnu situáciu, kedy sa vodič snaží dodržiavať dopravné predpisy v obci, mimo obce alebo na diaľnici. Je žiadúce, aby bolo vozidlo podrobené testom brzdenia práve z týchto rýchlostí.

Tento proces funguje správne pokiaľ sa auto rozbieha z nulovej rýchlosti a má rozumne veľký čas, aby sa dostalo na tieto rýchlosti, pretože zrýchlenie simuluje primeranú jazdu v realite. V modeli však bola vytvorená funkcia na nastavenie počiatočnej rýchlosti, a to z dvoch dôvodov. Jednak budeme potrebovať, aby testy boli štandardizovanejšie a teda nebudeme nechávať veľkosti počiatočnej rýchlosti pri začiatku brzdenia veľké odchýlky. Druhým dôvodom je, že sa v teste zameriavame primárne na proces brzdenia – bude teda lepšie, ak sa stane v skoršom okamihu testovania, aby sme mali presnejší pohľad do grafu rýchlosti počas simulácie – ten nebude skreslený dĺžkou simulácie.

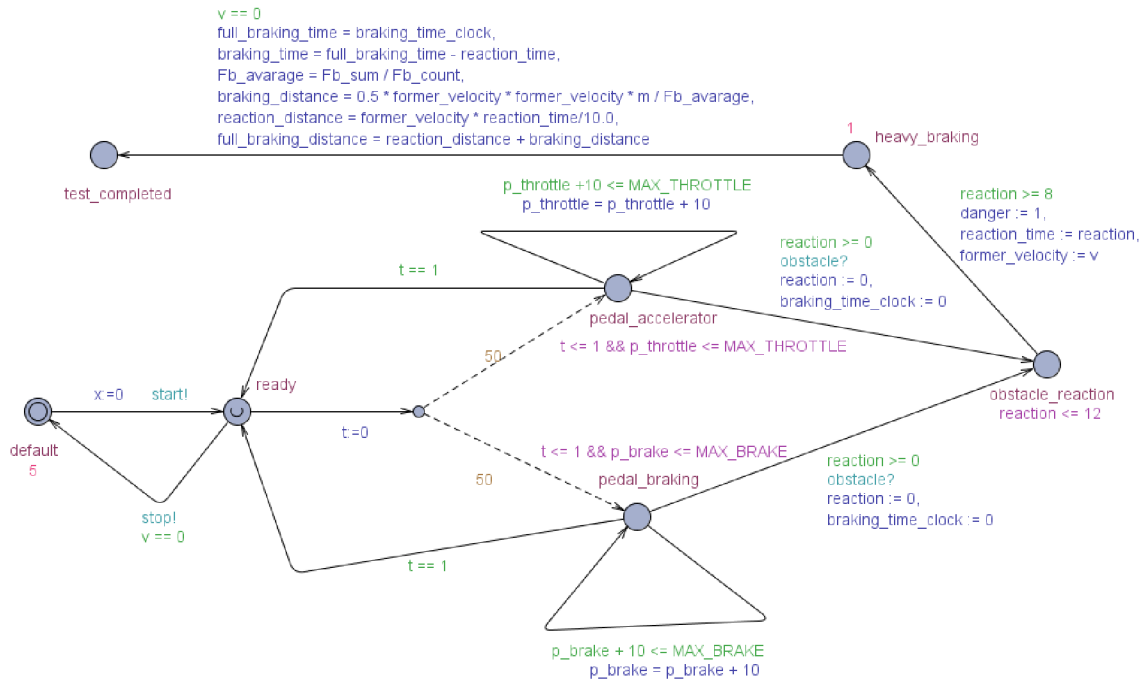
Počas cyklenia medzi stavmi brzdenia a zrýchľovania môžeme obdržať signál *obstacle* značiaci výskyt prekážky na ceste. Vodič následne reaguje 8–12 časových jednotiek (0,8 – 1,2 sekundy), po ktorých začína samotné brzdenie. Ostatné automaty sa o vzniknutí núdzového brzdenia dozvedajú nastavením premennej *danger* na hodnotu 1. Po zastavení vozidla, čo indikuje nulová rýchlosť, sa v tomto automate vypočítajú konečné štatistické údaje – čas brzdenia, priemerná brzdná sila, dráha brzdenia s/bez reakčného času vodiča.

4.3 Model prekážky na ceste

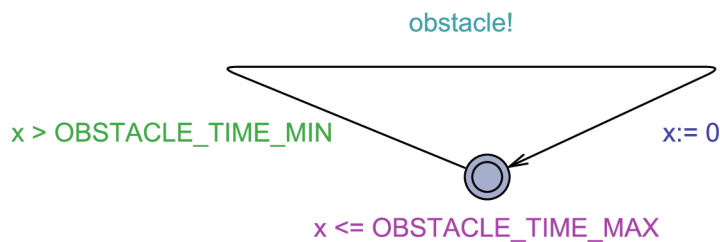
Jediná funkcionalitu automatu *ObstacleSpotted* je generovanie udalosti *obstacle*, ktorá oboznamuje automat vodiča o vzniku krízovej situácie. Udalosť je generovaná v intervale $[OBSTACLE_TIME_MIN, OBSTACLE_TIME_MAX]$, v programe nastavené na hodnoty $[100, 105]$ časových jednotiek. Z dôvodov uvedených v sekcii model šoféra (4.2) sú hodnoty nastavené nízko. V prípade testovania správania auta pred núdzovým brzdením je potrebné nastaviť počiatočnú rýchlosť na nulovú, predĺžiť dĺžku simulácie v testoch a nastaviť interval výskytu udalosti *obstacle* na vyššie hodnoty.

4.4 Model riadiacej jednotky

Model riadiacej jednotky *ControlUnit* signálmi riadi spustenie a vypnutie motora po obdržaní signálov o spustení a vypnutí od vodiča. Po spustení motora je v modeli priradená počiatočná rýchlosť funkciou *speed()*. Táto rýchlosť môže byť nulová, náhodná alebo pevne zadaná užívateľom programu v definíciách konštánt. Dôvody na zavedenie počiatočnej rýchlosti boli objasnené v sekcii modelu šoféra (4.2).



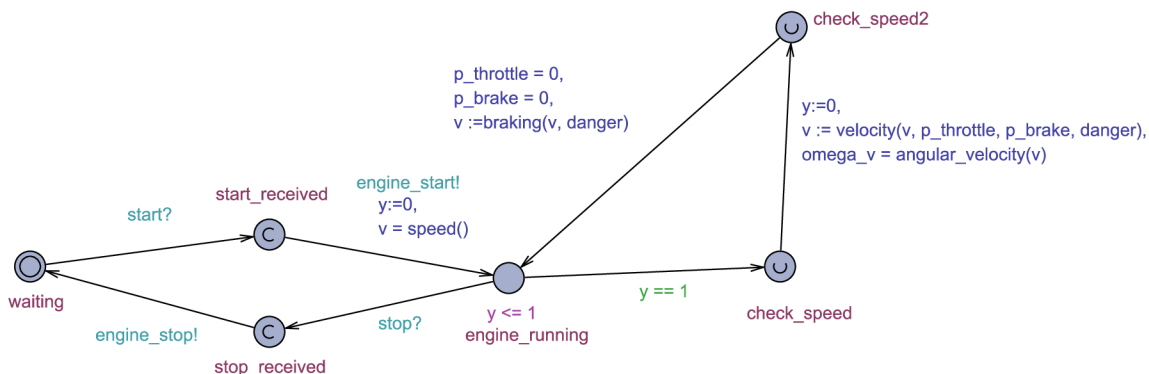
Obr. 4.2: Automat Driver znázorňujúci model šoféra



Obr. 4.3: Automat ObstacleSpotted generujúci prekážku na ceste

Následne tento automat cyklí stavmi *check_speed* a *check_speed2*, kde počíta rýchlosť, uhlovú rýchlosť a brzdnú silu v prípade núdzového brzdzenia. Funkcia *velocity()* počíta na základe pomeru intenzity stlačenia brzdového respektíve plynového pedálu zrýchlenie a . Tento proces je objasnený v sekcii modelu šoféra (4.2). Podľa vzorca pre rovnomerne zrýchlený pohyb $v = v_0 + a * t$ sa na základe rýchlosti z predchádzajúceho cyklu a práve vypočítaného zrýchlenia počíta nová rýchlosť. Hodnota času v tomto prípade je $\frac{1}{10}$ – desatina sekundy. Funkcia *angular_velocity()* vypočíta pomocou vzorca $\omega = v/R$ uhlovú rýchlosť na základe aktuálnej rýchlosti. Ako polomer je zvolená konštanta, bližšie popísaná v sekcii zvolené konštanty (4.8). Potrebné je aj nulovanie času a pedálových premenných.

Funkcia *braking()* v prípade bežného behu ponecháva výpočet rýchlosti funkcii *velocity()*. V prípade núdzového brzdzenia sa hodnota decelerácie a nová hodnota rýchlosti počíta v tejto funkcii. Vychádza sa z upraveného vzorca $F = m * a$, kde za celkovú silu pôsobiacu proti vozidlu budeme považovať brzdnú silu F_b pozostávajúcu zo sily trenia a odporu vzduchu. Spočítané zrýchlenie je následne zakomponované do vzorca pre rovnomerne spomalený pohyb.



Obr. 4.4: Automat Driver zobrazujúci prácu riadiacej jednotky

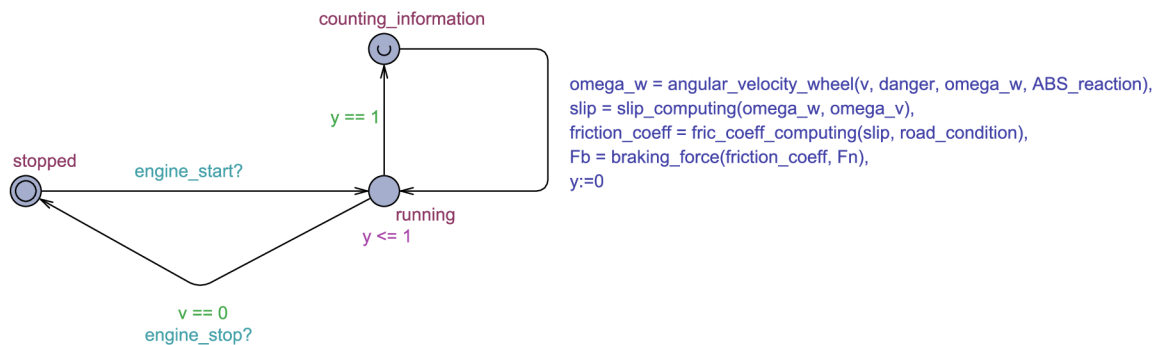
4.5 Model kola

Automat *Wheel* pracuje podobne ako ostatné automaty v cykle opakujúcom sa každú jednotku s počítaním priebežných výsledkov. Funkcia *angular_velocity_wheel()* počíta uhlovú rýchlosť kola na základe referenčnej rýchlosti vozidla. V čase núdzového brzdenia táto funkcia stojí za simulovaním vzniku sklzu kola a tak isto simuluje povolenie tlaku elektromagnetickým ventilom systému ABS. V prípade vytvárania sklzu ide o delenie uhlovej rýchlosti kola jednou z dvoch empiricky zvolených konštánt (hodnoty 1,1 a 1,2) na základe stochastiky, čím sa znižuje uhlová rýchlosť kola, v prípade nezasiahnutia ABS a dostatočne veľkej počiatočnej rýchlosti, až ku hodnote 0, čím sa vytvára 100% sklz. Dosiahnutie maximálneho sklzu je najjednoduchšie pri vypnutí systému ABS a pri dlhej brzdnéj dráhe v zasnežených podmienkach (konštanta SNOWY vid. 4.8). Znižovanie brzdného tlaku prebieha v prípade zásahu systémom ABS. Toto chovanie programu je zabezpečené opäť jednoduchým delením pôvodnej uhlovej rýchlosti kola empiricky zvolenými konštántami (0,7; 0,8; 0,9). Program sa najskôr pokúša o čo najväčšie zvolnenie brzdného tlaku (konšt. 0,7), neskôr skúša menšie zvolnenie. Kritériom uplatnenia danej konštanty je, aby novo vypočítaná uhlová rýchlosť kola nepresiahla referenčnú uhlovú rýchlosť vozidla, keďže pri voľne sa odvaľujúcom kolese sú si tieto dve uhlové rýchlosti rovné. Uhlová rýchlosť kola nemôže byť vyššia ako referenčná uhlová rýchlosť vozidla pri brzdení – v praxi je to však možné pri prudkom zrýchľovaní, kedy sa koleso pretáča „naprázdno“.

Funkcia *slip_computing()* vypočíta sklz na základe vzorca $slip = 1 - \frac{\omega_w}{\omega_v}$ (rovnica č. 2.10). Funkcia *fric_coeff_computing()* počíta koeficient trenia na základe krivky mu-slip (mu-slip curve) – závislosti koeficientu trenia na sklze (vid. obr. ??). Funkcia z obrázku je aproximovaná vytvorením desiatich intervalov sklzu veľkosti 0,1 a priradením približnej hodnoty koeficientu trenia tejto hodnote. Program podporuje režim suchej cesty *DRY* a režim zasneženej cesty *SNOWY*. Funkcia *braking_force()* vypočíta brzdnú silu súčinom tlakovej sily a koeficientu trenia.

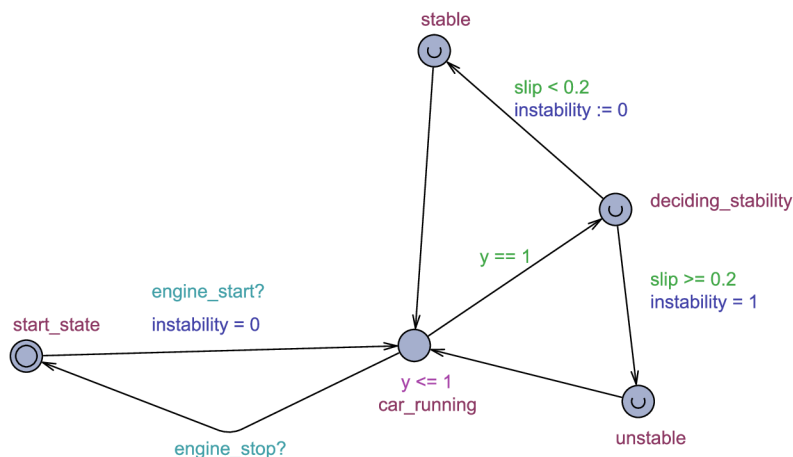
4.6 Model sklzu

Automat *Slip* sa na základe výpočtu sklzu vo funkcii v automate *Wheel* rozhoduje, či sa nachádza sklz v oblasti stability (hodnoty $< 0,2$), alebo v oblasti nestability (hodnoty $\geq 0,2$). Hodnota 0,2 je zvolená empiricky na základe obrázku mu-slip curve (??). Táto hodnota by mala predstavovať zlom funkcie, kedy začína byť na základe sklzu koeficient trenia nižší



Obr. 4.5: Automat Wheel reprezentujúci koleso automobilu

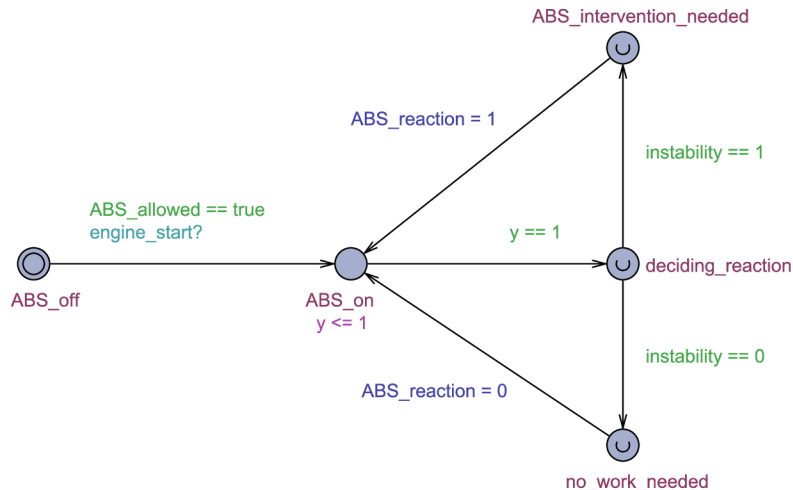
a brzdný účinok menší. Táto hodnota sa pre rôzne cestné podmienky môže líšiť, preto jedna pevne stanovená hodnota nemusí predstavovať presný zlom funkcie pre všetky podmienky a nemusí byť teda najvhodnejšia a najefektívnejšia pre všetky cestné podmienky. V automate je nastavovaná premenná *instability* značiaca oblasť nestability.



Obr. 4.6: Automat Slip predstavuje sklz automobilu

4.7 Model ABS

Model ABS je reprezentovaný automatom *ABS*. Automat sa dostáva z pôvodného stavu a následne tak zasahuje do brzdného procesu len ak je ABS režim povolený (ovplyvňuje konštanta *ABS_allowed*). Na základe premennej *instability* tento automat každú jednu časovú jednotku cyklí a určuje svoje reakciu. Pokiaľ sa automat dostane do stavu *ABS_intervention_needed*, znamená to, že sklz sa dostal do oblasti nestability, brzdenie je neefektívne, vozidlo sa dostáva do šmyku, a je potrebný zásah ABS. Ten prebieha znížením brzdného tlaku pomocou elektromagnetického ventilu, v programe simulovanom vo funkcii *angular_speed_wheel()*, bližšie popísanej v sekcii model kolesa (4.5).



Obr. 4.7: Automat ABS zachytáva prácu systému ABS

4.8 Zvolené konštanty

Program okrem popísaných automatov a premenných reprezentujúcich fyzikálne veličiny obsahuje aj konštanty. Tie plnia funkciu buď riadenia programu, alebo reprezentujú stav automobilu prípadne okolia a ich parametre. Pre účel modelu boli zvolené konštanty reprezentujúce technické parametre vozidla Fiat Croma (r.v.2006) dostupné z [3] a [1]. Ostatné konštanty boli zvolené na základe súčasne platných predpisov a hodnôt fyzikálnych premenných v našich zemepisných končinách. V tejto sekcii budú konkrétne konštanty popísané.

d – konštantu priemeru pneumatiky. Tento priemer pneumatiky sa vzťahuje na pneumatiky o rozmere 205/55 R16.

R – konštantu reprezentujúca polomer pneumatiky. K tomuto rozmeru je vzťahovaný výpočet uhlovej rýchlosti.

m – konštantu reprezentujúca hmotnosť automobilu.

g – konštantu gravitačného zrýchlenia v našich zemepisných šírkach.

DRY a ***SNOWY*** – konštanty reprezentujúce stav vozovky. Ovplyvňujú krivku mu-slip a teda výsledný koeficient trenia, čím ovplyvňujú brzdnú dráhu. Nastavujú sa v premennej *road_condition*.

RANDOM, ***ZERO***, ***ASSIGNED*** – udávajú počiatočnú rýchlosť vozidla. Nastavujú sa v premennej *beginning*. V móde stanovenej rýchlosti potreba nastaviť konštantu *ASSIGNED_SPEED*.

TOWNS_SPEED, ***OUTSIDE_TOWNS_SPEED***, ***MOTORWAYS_SPEED*** – udávajú predpísané rýchlosti, medzi ktorými si vyberá funkcia počiatočnú rýchlosť v náhodnom móde.

ABS_allowed – pravdivostná hodnota určujúca, či má dané vozidlo zapnutý systém ABS.

ro – merná hmotnosť vzduchu.

B – rozchod predných kolies automobilu.

H – výška automobilu.

S – čelná plocha automobilu.

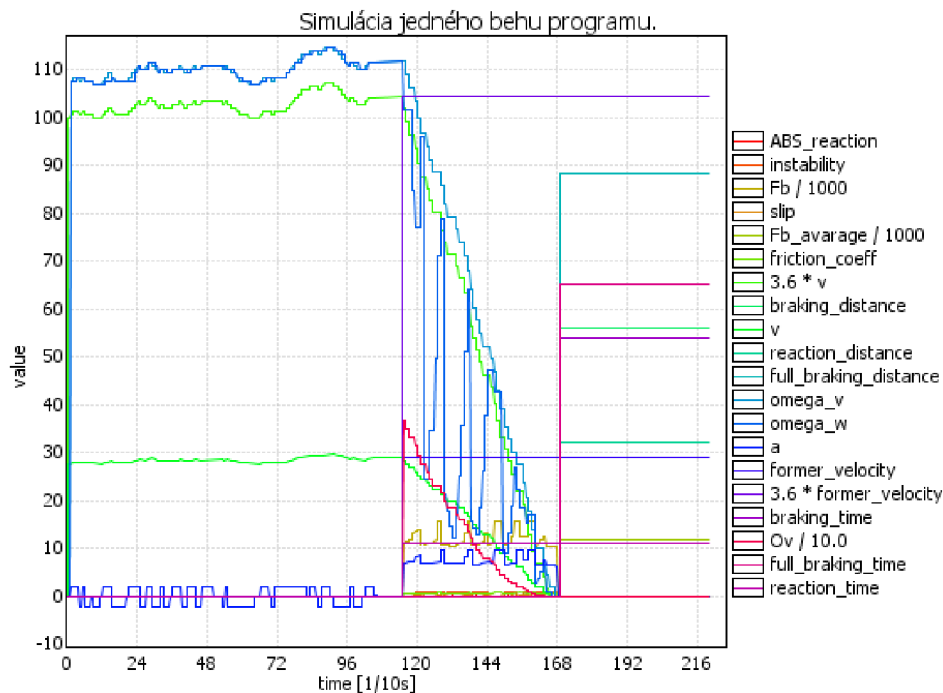
C – súčiniteľ odporu vzduchu.

OBSTACLE_TIME_MIN, ***OBSTACLE_TIME_MAX*** – rozmedzie časových jednotiek, kedy dochádza ku krízovej udalosti.

V prípade testov v kapitole (5) boli tieto hodnoty stanovené na 5 a 10, aby vozidlo malo čo najpodobnejšiu rýchlosť v rôznych testoch, a aby simulácia nebola prídlhá, a teda dobre viditeľná na grafe. Hodnoty je možné meniť, pri vysokých hodnotách (okolo 1000) je možné sledovať správanie šoféra pred brzdením.

4.9 Testy

Súčasťou programu sú aj testy popisujúce chovanie programu. V testoch je zaujímavé pozorovať, ako sa premenné vyvíjajú v čase, ako na sebe závisia a ako sa ovplyvňujú. Pomocou viacerých simulácií je možné sledovať odchýlky a mieru stochastického správania modelu. Nastavovaním rôznych konštánt a vstupných premenných môžeme skúmať pomocou simulácií schopnosť vozidla zastaviť v rôznych podmienkach.



Obr. 4.8: Simulácia jedného behu programu

Výsledkom simulácie je graf vývoja nami zvolených premenných (viď. obr. 4.8). Tento graf zobrazuje všetky premenné, ktoré budeme v rámci simulácií skúmať a je súčasne šablónou pre budúce poznatky výsledkov v kapitole výsledkov simulácií (5). Všetky veličiny bude skúmať na vodorovnej časovej ose, ktorej jednotkou je desatina sekundy. Na horizontálnej osi je vyznačená hodnota premenných. Jednotky týchto veličín sú prispôbené tejto grafickej reprezentácii tak, aby sa dali zobrazit všetky súčasne, a aby sa dali po navzájom závislých skupinách skúmať.

Na grafe sú znázornené premenné popisujúce postupne oblasť nestability, sklz, brzdnú silu v kilonewtonoch, priemernú brzdnú silu v kilonewtonoch, koeficient trenia, rýchlosť v kilometroch za hodinu, rýchlosť v metroch za sekundu, brzdnú dráhu, brzdnú dráhu prejdenú počas reakcie vodiča, celkovú brzdnú dráhu, uhlovú rýchlosť vozidla, kolesa, zrýchlenie, rýchlosť na začiatku brzdenia v metroch za sekundu, reakčný čas, celkový čas brzdenia,

odpor vzduchu v desiatkach Newtonov, reakciu ABS. Z hľadiska fungovania modelu nás budú zaujímať najmä skupiny premenných:

instability/slip/ABS_reaction – či funguje premenná nestability nad hodnotou 0,2, či ABS reaguje správne

slip/fric_coeff/ABS_reaction – ako závisí koeficient trenia na sklze, kedy zasahuje ABS

omega_v/omega_w – závislosť uhlových rýchlostí

Fb/slip – ako závisí výsledná brzdná sila na sklze

braking_distance, reaction_distance, full_braking_distance – ukazatele brzdnaj dráhy

braking_time, reaction_time, full_braking_time – ukazatele času brzdenia

3.6*v – vývoj samotnej rýchlosti

Tieto skupiny budú dôležité pri simulovaní rôznych počiatočných stavov premenných. Výber premenných a skupín premenných podlieha typu testov a udalostiam, ktoré chceme testovať.

Kapitola 5

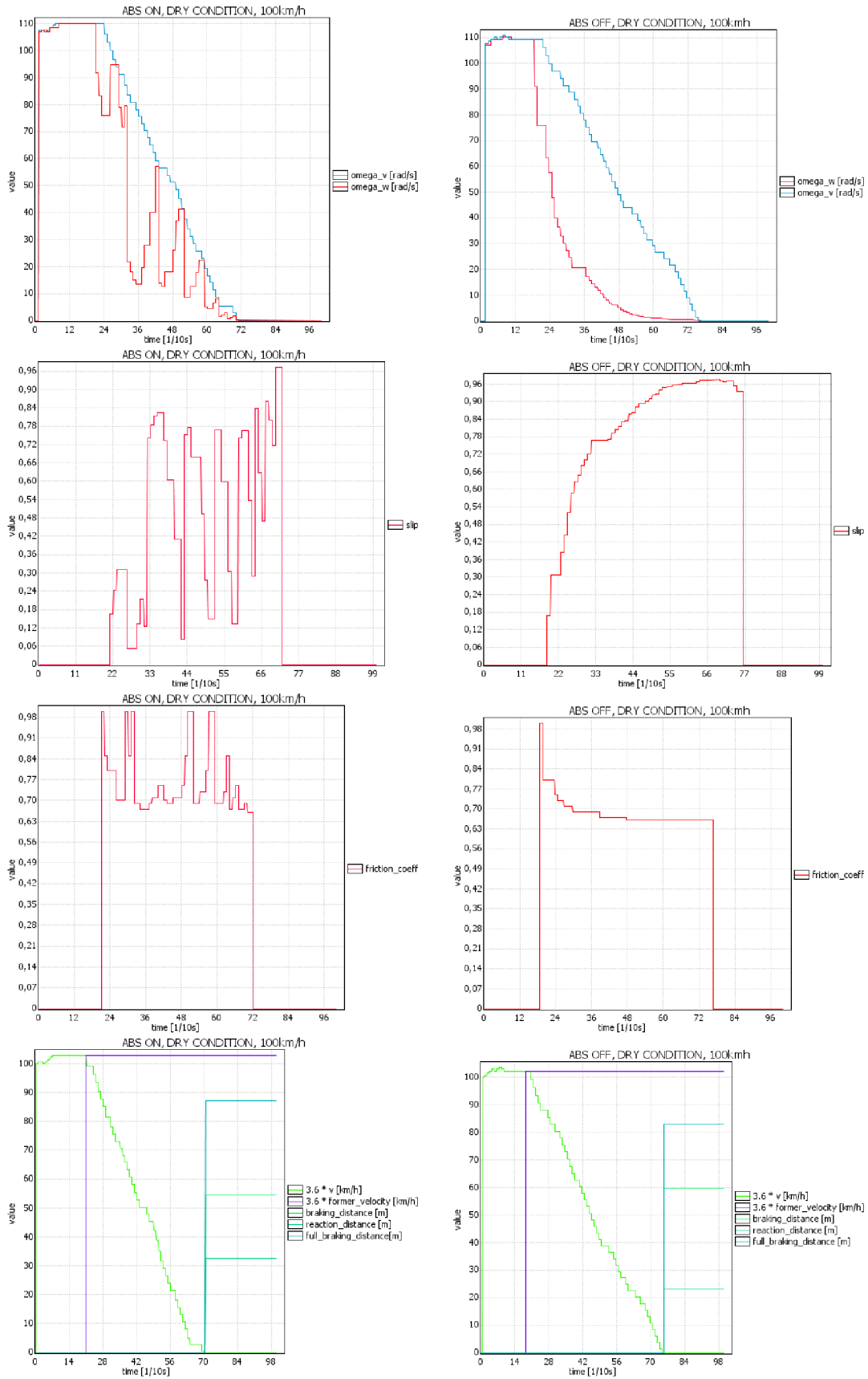
Výsledky simulácií

Cieľom tejto kapitoly bude ukázať, ako vozidlo v modeli reaguje na rôzne podmienky, a ako to ovplyvňuje priebeh jeho rýchlosti a dĺžku brzdnú dráhu. Experimenty prebehnú viac násobne, zaujímať nás bude hlavne rozdiel medzi vozidlom s a vozidlom bez systému ABS. V prvom teste bude vozidlo podrobené brzdeniu z rýchlosti 100km/h na suchom povrchu. V druhom teste si toto brzdenie vozidlo zopakuje v zasnežených podmienkach. V oboch testoch bude načrtnutá variabilita výsledkov, kde si môžeme všimnúť konzistenciu výsledkov a odhadnúť z testov závery. V treťom teste otestujeme, či má hmotnosť v našom modeli vplyv na brzdnú dráhu vozidla. V štvrtom teste načrtneme, aký zásadný vplyv má pôvodná rýchlosť na dĺžku brzdnú dráhu. V piatom teste bude simulačne spočítaná pravdepodobnosť dĺžky brzdnú dráhu.

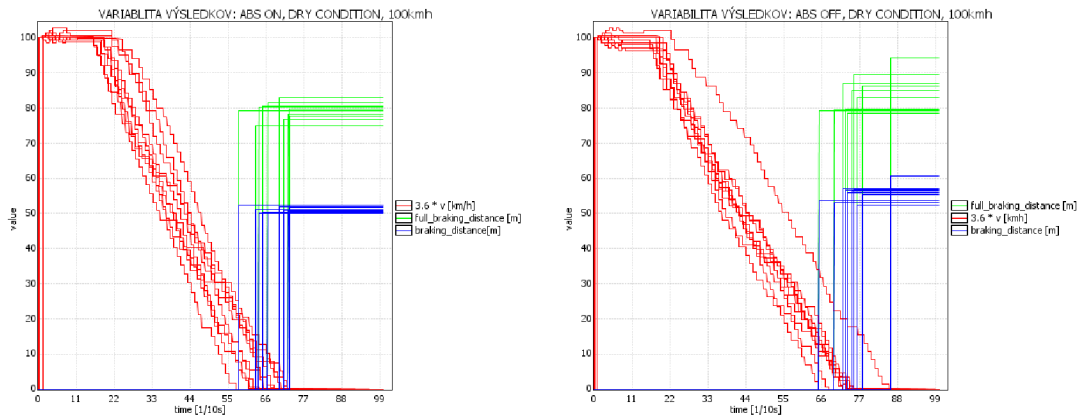
5.1 Test 1: Porovnanie brzdnú dráhu z rýchlosti 100km/h, na suchej vozovke.

Na obrázku 5.1 vidíme priebeh simulácie. Na ľavej strane sú grafy s použitím systému ABS, na pravej strane grafy bez použitia systému ABS. Prvá dvojica grafov znázorňuje priebeh uhlovej rýchlosti vozidla a kolesa. V pravom obrázku je možné vidieť, že uhlová rýchlosť kolesa sa znižuje rýchlejším tempom, ako rýchlosť vozidla, dochádza teda ku zablokovaniu kolesa – šmyku. Na ľavom obrázku je možné pozorovať, že pri veľkých odchýlkach v rýchlosti vozidla a kolesa zasahuje systém ABS, a tieto rýchlosti vyrovnáva povolením brzdného tlaku. Druhá dvojica grafov reprezentuje sklz. Zatiaľ čo v prípade systému ABS sa sklz drží v primeraných hodnotách, kedy je koleso na hrane šmyku, v prípade nepoužitia systému ABS sa koleso dostane do úplného zablokovania a v tomto stave zotrúva, až kým vozidlo nezastane. Dôsledok tohto chovania je znázornený na tretej dvojici grafov – hodnotách koeficientu trenia. S ABS sa koeficient trenia striedavo mení z nevýhodných hodnôt na výhodné, zásahom systému ABS. Bez ABS je koeficient trenia ideálny len pri začiatku brzdenia, v čase sa však len znižuje a nadobúda nevýhodné, menej efektívne hodnoty. V štvrtej dvojici grafov je znázornený priebeh rýchlosti vozidla a veľkosť brzdnú dráhu samotnej, s reakciou vodiča, a dráha prejdená počas reakcie vodiča. Paradoxne, celková brzdná dráha v tejto simulácii bola kratšia bez použitia systému ABS. Ako však vidíme na grafe, tento výsledok bol spôsobený o niečo vyššou pôvodnou rýchlosťou vozidla so systémom ABS, tak isto dlhšou reakciou šoféra.

Aby bolo možné presvedčivejšie určiť, či má výhodu v brzdení vozidlo vybavené systémom ABS, bude nutné previesť viac simulačných behov. Na obrázku 5.2 prebehla predošlá



Obz. 5.1: Test1: ABS ON vs ABS OFF, DRY CONDITION, 100km/h



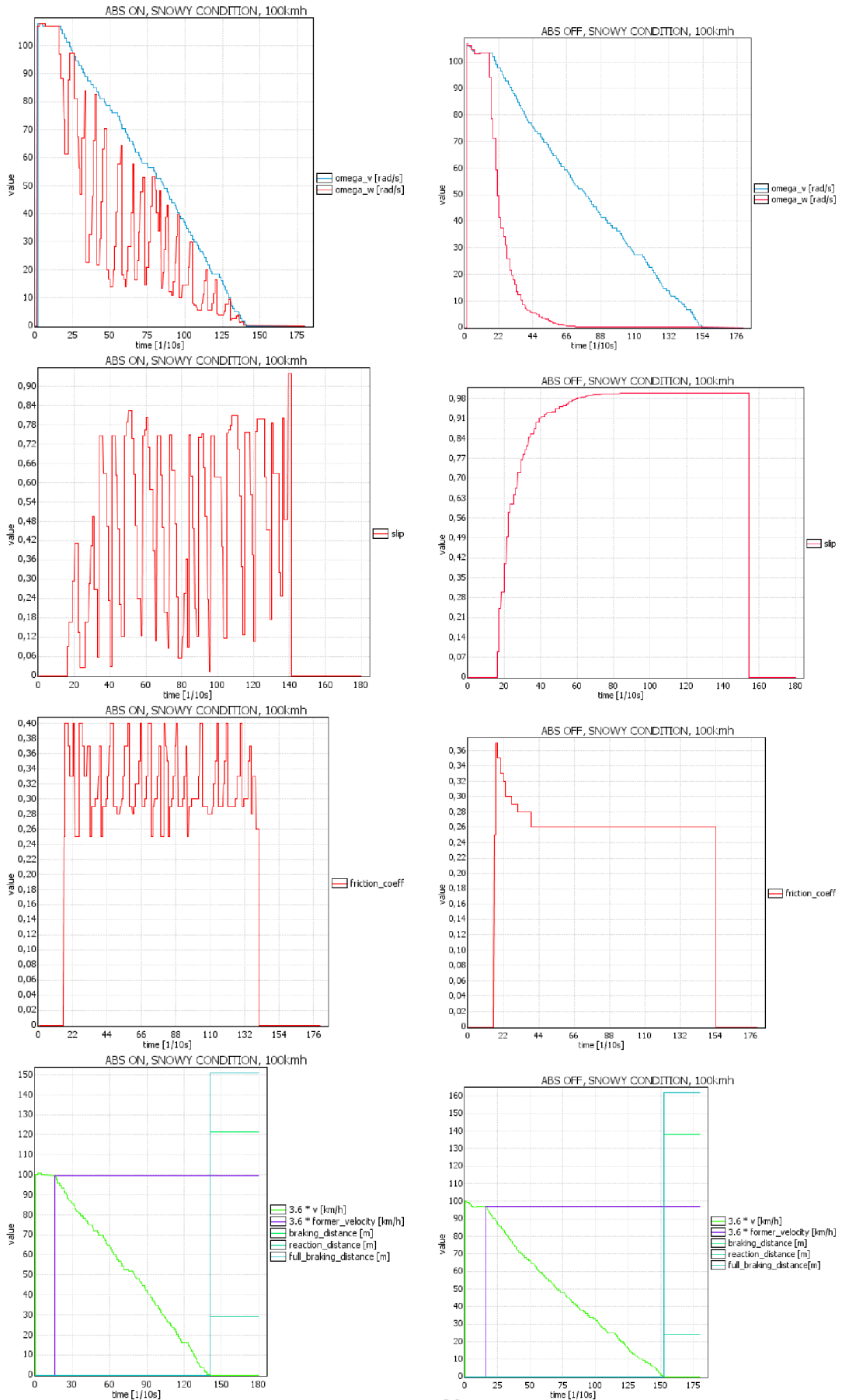
Obr. 5.2: Test1 variabilita: ABS ON vs ABS OFF, DRY CONDITION, 100kmh

simulácia za rovnakých podmienok desaťkrát. V tomto teste môžeme preukázateľnejšie tvrdiť, že lepšie brzdilo vozidlo s ABS. Samotná krivka priebehu rýchlosti vozidla s ABS je mierne strmšia ako krivka vozidla bez ABS. Strednú hodnotu brzdných dráh bez reakcie vodiča so systémom ABS môžeme zaokrúhliť na 51 metrov, zatiaľ čo bez ABS na približne 56 metrov. V prípade plnej brzdných dráh vrátane reakcie šoféra je variabilita výsledkov väčšia. Je spôsobená rôznou dĺžkou reakcie vodiča. Podobný trend efektívnejšieho brzdzenia s ABS je však možné pozorovať aj v tejto premennej.

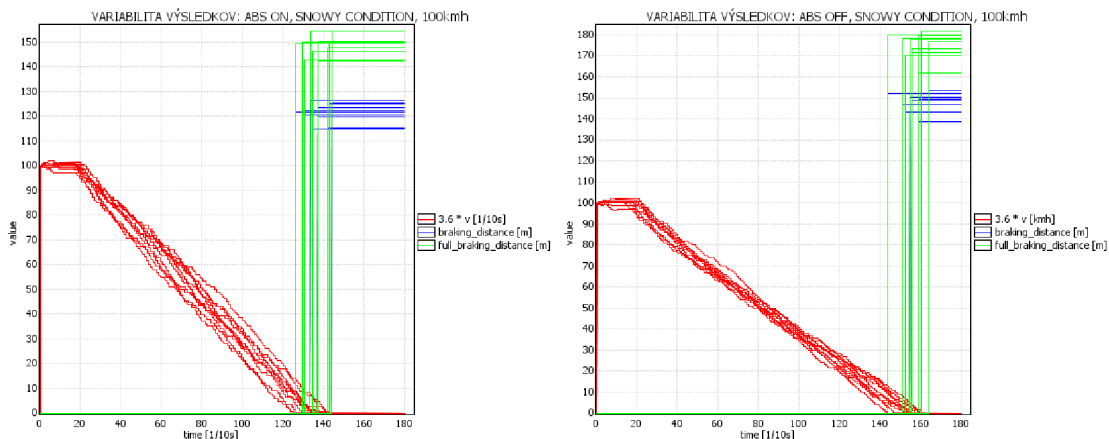
5.2 Test 2: Porovnanie brzdných dráh z rýchlosti 100km/h, na zasneženej vozovke.

Na obrázku 5.3 prebehla simulácia v zasnežených podmienkach. Časový priebeh premenných sa nápadne podobá na predchádzajúci test (obr. 5.1), je však umocnený menšou efektívnosťou brzdzenia a dlhšou brzdnou dráhou. Môžeme teda pozorovať, že uhlová rýchlosť kolesa je bez ABS dlhú dobu nulová, zatiaľ čo na ľavom obrázku pracuje ABS efektívne. Situáciu dokresľuje priebeh sklzu. Pri priebehu hodnôt koeficientu trenia si treba taktiež uvedomiť, že sú tieto hodnoty podstatne nižšie ako v prvom teste, čo je dôvodom významného predĺženia brzdných dráh. V tomto teste si počínalo významne lepšie vozidlo s ABS, a to aj napriek horšej reakcii vodiča. Čistá brzdná dráha bola s ABS približne 122 metrov, bez ABS 138 metrov.

Potlačiť vplyv náhodnosti na predchádzajúci výsledok sa nám podarí viacnásobným testovaním, znázorneným na obrázku 5.4. Test nám odhaľuje, že niet pochýb o dominancii systému ABS v zasnežených podmienkach. Opäť je krivka klesania rýchlosti strmšia so systémom ABS, hodnoty čistej brzdných dráh nižšie (120m vs. 145m), aj hodnoty celkovej brzdných dráh nižšie (145m vs. 175m).



Obr. 5.3: Test2: ABS ON vs ABS OFF, SNOWY CONDITION, 100kmh



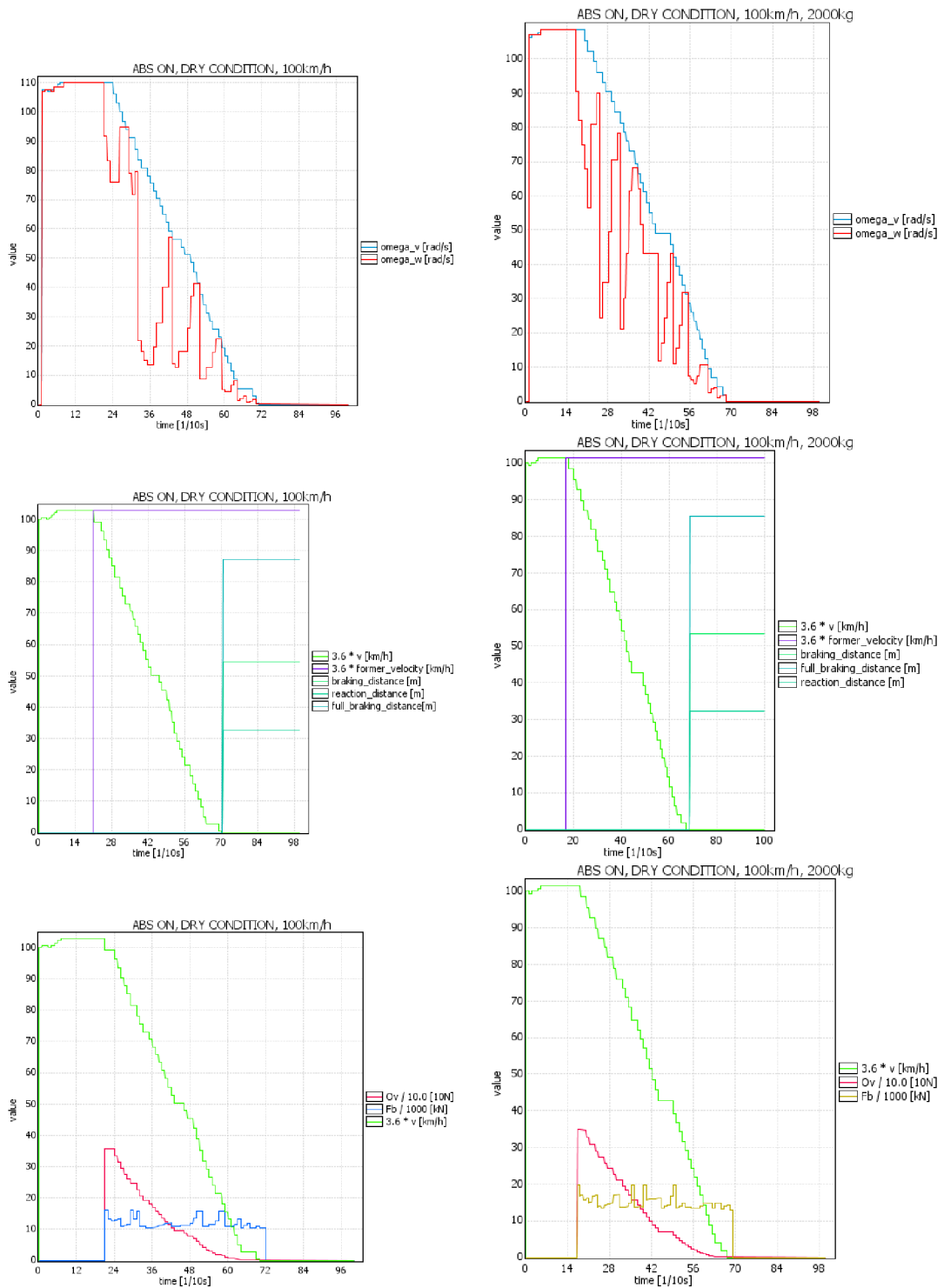
Obr. 5.4: Test2 variabilita: ABS ON vs ABS OFF, SNOWY CONDITION, 100kmh

5.3 Test 3: Porovnanie brzdnjej dráhy vozidiel s rôznou hmotnosťou.

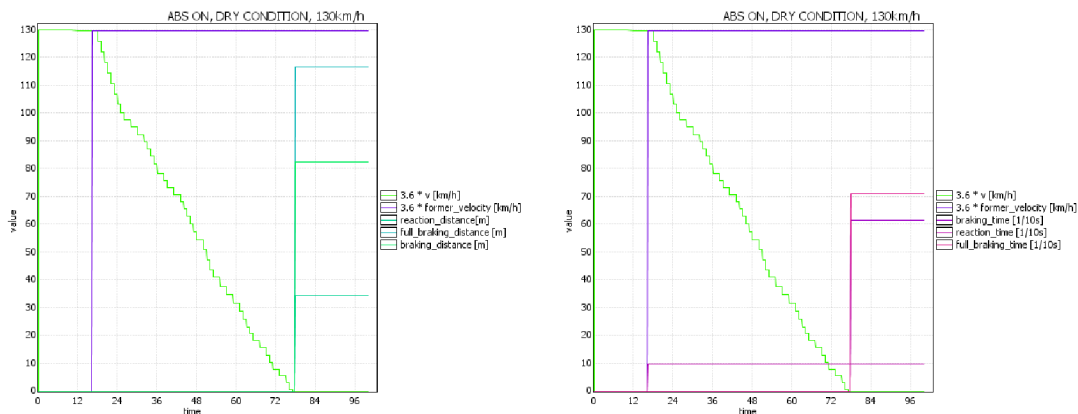
Na obrázku 5.5 môžeme vidieť porovnanie vozidiel s rôznou hmotnosťou. Ľavá sada grafov simuluje vozidlo s 1600kg, pravá sada grafov vozidlo s 2000kg. Ostatné parametre sú zachované. Jedná sa teda o jedno a to isté vozidlo, ktoré je však v prvom prípade len s vodičom, v druhom prípade plne obsadené cestujúcimi a s plným kufrom. Už na pohľad sú simulačné behy veľmi podobné. Premenné majú mierne odlišný priebeh, avšak výsledky sú takmer totožné. Odpor vzduchu, znázornený červenou farbou v tretej dvojici grafov, je pri rovnakej rýchlosti totožný. To sa samozrejme dá predpokladať, keďže je závislý od vonkajších parametrov, ktoré sa zvýšením hmotnosti nezmenili. Vozidlo po nadobudnutí rýchlosti má kinetickú energiu, ktorá závisí priamoúmerne na hmotnosti. Pri brzdení však vozidlo svojou tiažovou silou (priamoúmernou hmotnosti) pôsobí na podložku, čo pomáha pri zastavení. Vplyv hmotnosti sa tak efektívne vynuluje. V praxi dĺžka brzdnjej dráhy nezáleží na hmotnosti, skôr na účinnosti brzdovej sústavy – preto aj väčšie vozidlo s kvalitnejšími brzdami dokáže zastaviť rýchlejšie, ako menšie vozidlo.

5.4 Test 4: Dopad zvýšenia pôvodnej rýchlosti vozidla na brzdnú dráhu.

Vplyv rýchlosti na brzdnú dráhu je v reálnom živote kľúčový, dopomáha napríklad tvoriť dopravné predpisy. Zatiaľ čo bežné zmýšľanie by nás mohlo viesť k tomu, že so zdvojnásobením pôvodnej rýchlosti sa brzdná dráha taktiež zdvojnásobí, je to omyl. Vo vzorci pre výpočet brzdnjej dráhy figuruje druhá mocnina rýchlosti, dĺžka brzdnjej dráhy teda narastá kvadraticky s rýchlosťou. To potvrdzujú aj naše simulácie na obrázku 5.6. Z pôvodnej rýchlosti 130km/h zastavilo vozidlo bez systému ABS na zasneženej vozovke na 275 metroch (z toho 31 metrov reakcia vodiča). Čas potrebný pre zastavenie vozidla bol 17,5 sekundy (z toho 1s reakcia vodiča). V porovnaní s testom č. 2 (obr. 5.3), kde vozidlo taktiež na zasneženej vozovke, avšak z rýchlosti 100km/h zastavilo približne na 162 metroch (z toho 25 metrov reakcia vodiča), sú rozdiely enormné.



Obr. 5.5: Test3: ABS ON, DRY CONDITION, 100kmh, 1600kg vs. 2000kg



Obr. 5.6: Test4: ABS OFF, SNOWY CONDITION, 130kmh

5.5 Test 5: Pravdepodobnosť zastavenia vozidla na určitej dráhe.

Testy 1 a 2 síce poskytli náhľad, ako sa vozidlo správa počas brzdenia a aké trendy môžeme od modelu očakávať, nie sú však dôkazom a zárukou výsledkov, ktoré poskytujú. Jazyk *UPPAAL* poskytuje nástroje na určenie pravdepodobnosti. Potrebujeme určiť, v akom intervale sa má pravdepodobnosť nachádzať, s akou istotou chceme aby bol výsledok správny, a *UPPAAL* odsimuluje beh programu a jeho výsledky toľkokrát, aby sa s odhadom pravdepodobnosti zmestil do nami zadaných kritérií. Pri voľbe požadovanej presnosti treba mať na pamäti, že čím chceme výsledok presnejší a s väčšou istotou, tým dlhšie bude simulácia trvať. Dotaz zadaný jazyku *UPPAAL* vyzerá nasledovne:

$$Pr[\leq 200](\langle t \rangle 190 \text{ and } full_braking_distance < 160) \quad (5.1)$$

Tento dotaz znamená, že má *UPPAAL* zistiť pravdepodobnosť toho, že premenná *full_braking_distance* reprezentujúca brzdnú dráhu bude v čase $t = 190$ menšia ako 160 metrov. Túto pravdepodobnosť má *UPPAAL* zistiť simuláciou ľubovoľného počtu behov, aby dosiahol požadovanú presnosť, pričom každý simulačný beh bude trvať 200 časových jednotiek. Dĺžku simulačného behu je potrebné voliť podstatne väčšiu ako čas bežne potrebný na zabrzdzenie vozidla a nastavenie štatistických premenných. Čas t je potrebné voliť ku koncu simulácie – dôvodom je, že údaj o dĺžke dráhy poznáme až po úplnom zastavení vozidla. A samotnú brzdnú dráhu, ktorej pravdepodobnosť chceme zistiť, volíme na základe predpokladanej veľkosti tejto premennej na základe parametrov modelu – napomôcť nám môžu testy 1 a 2 (obr. 5.2 a 5.4).

Pre zapnuté ABS som zvolil hodnoty brzdnéj dráhy 70, 72, 75, 78, 80, 85 a 90 metrov. Hodnoty s vypnutým ABS som zvolil na 75, 78, 80, 85, 90 a 95 metrov. Výsledné pravdepodobnosti a porovnanie je k dispozícii v tabuľke 5.1.

Z tabuľky je zrejmé, že vozidlo s ABS má skutočne na suchom povrchu z rýchlosti 100km/h kratšiu brzdnú dráhu. Zatiaľ čo bez ABS má vozidlo fakticky nulovú šancu zastaviť pod 75 metrov, vozidlu s ABS sa to darí približne jedenkrát z päť pokusov. Vozidlu s ABS sa podarí zastaviť na dráhe kratšej ako 80 metrov s vyššou pravdepodobnosťou, ako vozidlu bez ABS na dráhe pod 85 metrov.

Do tabuľky 5.2 sú zaznamenané výsledky rovnakého testu, avšak na zasneženej vozovke.

Opäť môžeme konštatovať, že brzdná dráha so systémom ABS je podstatne kratšia, ako bez neho. Rozdiel snáď najviac drasticky popisuje vzdialenosť 165 metrov, kedy s ABS sa to podarí vozidlo takmer s istotou, zatiaľ čo bez ABS len veľmi zriedka. Môžeme taktiež vidieť, že významný rozdiel v brzdných dráhach sa prejavuje o to viac, čím je pôvodná rýchlosť vyššia a čím sú podmienky horšie.

Tabuľka 5.1: Pravdepodobnosť, že vozidlo zastane skôr ako na danej vzdialenosti, suché podmienky, 100km/h

	ABS ON, DRY, 100km/h	ABS OFF, DRY, 100km/h
70m	0–2%	–
72m	4–6%	–
75m	20–22%	0–2%
78m	45–47%	4–6%
80m	62–64%	13–15%
85m	93–95%	54–56%
90m	98–100%	90–92%
95m	–	98–100%

Tabuľka 5.2: Pravdepodobnosť, že vozidlo zastane skôr ako na danej vzdialenosti, snehové podmienky, 100km/h

	ABS ON, SNOWY, 100km/h	ABS OFF, SNOWY, 100km/h
140m	3–5%	–
145m	23–25%	–
150m	54–56%	–
155m	82–84%	–
160m	95–97%	0–2%
165m	98–100%	5–7%
170m	–	21–23%
175m	–	52–54%
180m	–	80–82%
185m	–	94–96%
190m	–	98–100%

Kapitola 6

Záver

V bakalárskej práci sa podaril preukázať predpoklad, že vozidlo so systémom ABS má pozitívny vplyv na dĺžku brzdnú dráhu. Vďaka simulačnému modelu je možné zistiť, akými silami a akým spôsobom sa rozdiel medzi brzdou dráhou s ABS a bez ABS vytvára. Pomocou nástroja model-checkingu je možné analyzovať a štatisticky overovať vlastnosti modelu. V kapitole výsledkov simulácií (5) sú tieto analýzy zhrnuté do výsledných grafov.

Simulačný program sa správal validne pre všetky mnou vyskúšané vstupy, prípadné odchýlky od reality boli popísané v tejto práci. Pre množinu vstupov prezentovaných v tejto práci je teda možné program prehlásiť za validný.

Nakoľko pokrytie celej podstaty spojenej s riadením a brzdením automobilu presahuje rozsah tejto bakalárskej práce, v nasledujúcom textu zhrniem možnosti, ktorými je aktuálne riešenie možné rozšíriť do zaujímavejšej a reálnejšej podoby.

- **Odozva ABS:**

V reálnom vozidle reaguje ABS s istým oneskorením, teda v podstate reaguje na situáciu vzniknutú v minulosti. Je to spôsobené nenulovým časom na detekciu problému. V programe nebola reakcia systému ABS implementovaná. Dôvodom bol simulačný čas, ktorého najmenšia jednotka bola desatina sekundy. V skutočnosti dokáže systém ABS zasiahnuť až 10–15x za sekundu. Zavedenie oneskorenia 0,1s do aktuálneho modelu by teda znemožnilo systému ABS v modeli zasahovať dostatočne často. Zavedenie oneskorenia systému ABS teda má zmysel, keď je simulačný čas v modeli dostatočne malý, aby táto odozva dokázala kopírovať oneskorenie skutočných systémov ABS v realite.

- **Pneumatiky:**

V realite sa javia byť pneumatiky najdôležitejšou komponentou ovplyvňujúcou brzdnú dráhu vozidla. Rozdiely medzi pneumatikami pravidelne preukazujú testy ADAC (viď. napr. [12]). V testoch sú však porovnávané nové pneumatiky s ideálnou hĺbkou dezénu, zatiaľ čo v realite šoféri jazdia so značne zjazdenejšími pneumatikami. Rozdiel v koeficientoch trenia medzi pneumatikou a vozovkou teda dokáže ovplyvniť brzdnú dráhu viac, ako použitie systému ABS. Dokazuje to test Autobildu, v ktorom rovnaké vozidlo so štandardným obutím zabrzdlilo z rýchlosti 100km/h na 34,9 metroch, s úsporným obutím na 42,4 metroch [2]. V modeli bol vplyv pneumatík zanedbaný, nakoľko sa vychádzalo z jednej grafickej závislosti sklzu na koeficiente trenia. V skutočnosti má túto závislosť inú každý druh pneumatiky. Závislosť sa líši pochopiteľne aj na základe stavu vozovky, a jedna pneumatika môže mať túto závislosť v čase rôznu (pri rôznej hĺbke dezénu). Na zjednodušené modelovanie tejto situácie by bolo potrebné zistiť hodnoty koeficientov trenia rôznych značiek a typov pneumatík.

- **Brzdová sústava:**

Aj keď bol vplyv brzdovej sústavy mierne popísaný v teoretickej časti (kap. 2.2 – 2.4.5), v modeli nebol zahrnutý. Dôsledkom teda bolo, že vozidlo s rovnakými technickými parametrami ako výška, šírka a hmotnosť, brzdili rovnako. To však v skutočnosti nemusí byť pravda, napríklad pri porovnaní približne rovnako veľkého bežného a športového auta. Rozdiel pri brzdení tvorí hlavne kvalita brzdového systému. V pokračovaní práce by bolo možné zahrnúť aspoň zjednodušene vplyv kvality brzdovej sústavy.

- **Zjednodušenie kolesa:**

V modeli kolesá automobilu reprezentovalo jedno koleso. V skutočnosti však majú vozidlá typicky 4 kolesá, a každé z nich sa do istej miery môže správať nezávisle. Toto tvrdenie platí dvojnásobne v prípade, že vozidlo ide po krajnici a povrch cesty na jednej strane vozidla je iný, ako na druhej strane vozidla. Zaujímavé by bolo sledovať, aký má vplyv rôzne kvalitná brzdová sústava na predných a zadných kolesách. Zvolenie počtu kolies by umožnilo presnejšie simulovať viacnápravové vozidlá, ako kamióny, autobusy, prípadne špeciálne prípady ako motorcky.

- **Spolupráca systémov:**

V skutočnosti je síce ABS jeden z najvýznamnejších systémov, dokonca povinných, dnes je však jeden z najstarších a pracuje v spolupráci s novšími systémami. Pri bežnej jazde a zrýchľovaní vozidla by sme do modelu mohli zahrnúť funkciu tempomatu. Nadstavbou by bol režim adaptívneho tempomatu, ktorý by dokázal sledovať auto pred sebou a na základe jeho zmien rýchlosti prispôbovať rýchlosť svoju. V prípade brzdovania sa do procesu typicky pri šmyku zapája aj systém ESP (elektronický stabilizačný systém), ktorý dokáže odbrzďovať a zabrzďovať rôzne kolesá pri pretáčavých aj nedotáčavých šmykoch, umožňujúc získať nad vozidlom stratenú kontrolu.

- **Viacero prostredí:**

V modeli boli zahrnuté len prostredia suchej a zasneženej vozovky. Celkom jednoducho by sa dali do modelu ako rozšírenia pridať možnosti ako mokrá vozovka, poľadovica alebo padajúce mokré lístie. Ako špeciálne rozšírenie by sa dalo považovať rôzne prostredie na stranách vozidla. Príkladom môže byť zľadovatená krajnica na inak suchej ceste v zime.

- **Inteligentnejší šofér:**

Pre účely našich testov šofér vždy zatlačil naplno brzdový pedál a držal ho naplno stlačený až do zastavenia vozidla, čo môže odpovedať menej skúsenému vodičovi v stresujúcej situácii. V skutočnosti panujú diskusie, či skúsený/profesionálny vodič nezastaví vozidlo efektívnejšie dávkovaním brzdného tlaku pedálom podľa vlastného uváženia, bez použitia systému ABS. Šofér by sa v tomto prípade správal ako systém ABS, s rovnakými cieľmi, avšak s inou frekvenciou dávkovania brzdového pedálu.

- **Terén vozovky:**

Model predstavuje jazdu vozidla po rovnej ceste, bez akýchkoľvek nerovností. Vhodným rozšírením by bolo zahrnúť jazdu z a do kopca. To by si vyžadovalo štúdium odporu, ktorý kladie sklon cesty na vozidlo. Špeciálnym a náročnejším rozšírením by mohla byť jazda vozidla do rôznych zákrut.

- **Lepšie empiricky stanovený sklz:**

Síce na výsledkoch testov bolo vidieť, že má vozidlo zablokované kolesá dlhšie na zasneženom povrchu ako na suchom, v modeli je to však spôsobené len dlhšou brzdnou dráhou.

Nie je rešpektovaný rozdiel vo vzniku sklzu na rôznych povrchoch, zatiaľ čo v realite je auto náchylnejšie dostať šmyk rýchlejšie na zasneženom povrchu.

- **Vyhľadanie simulácií použitím diferenciálnych rovníc:**

Ako je možné pozorovať na grafoch výsledných simulácií, najnižšia časová jednotka modelu bola 1/10s, zatiaľ čo v skutočnosti sa tieto udalosti dejú častejšie. Riešením tohto problému a hranatosti výsledných grafov je použitie diferenciálnych.

- **Odpor vzduchu:**

Jednoduchý odpor vzduchu bol v modeli zahrnutý. Držal sa však len svojej najhlavnejšej zložky, odporu spôsobeného rýchlosťou vozidla. V skutočnosti by však tento odhad bol presný len za bezvetria. Nárazový vietor, či už čelný alebo do chrbta, dokáže ovplyvniť veľkosť odporu vzduchu. Model by teda mohol obsahovať aspoň módy bezvetria a istého čelného vetra, prípadne vetra do chrbta. Implementácia bočného vetra by si vyžadovala sčítanie vektorov a počítanie s rôznymi smermi, čo by bolo náročnejšie. Pri vyšších rýchlostiach môže vzniknúť turbulentný odpor vzduchu. Existuje taktiež indukovaný odpor vzduchu vznikajúci rozdielom tlaku pod a nad vozidlom. Špeciálne merania by si vyžadoval pokus o implementáciu odporu vzduchu prechádzajúceho cez prieduchy vozidla a chladič.

- **Skutočná brzdná dráha nových automobilov:**

Rebríček portálu AutoBild v roku 2016 zistil brzdné dráhy 50 najlepších brzdiacich automobilov z rýchlosti 100km/h [2]. Týchto 50 automobilov malo brzdné dráhy v rozmedzí 31,3 až 35,9 metra. Hmotnosť nemala priveľký vplyv na brzdnú dráhu vozidla, keďže sa v rebríčku objavili aj ťažké autá ako Mercedes S500 (hmotnosť 2,3 tony). Brzdná dráha závisela predovšetkým na sile brzdného účinku a vyladení brzdových systémov, preto sa v rebríčku objavilo viacero športových automobilov. Dôležitým údajom je, že sa priemerná brzdná dráha vyše 500 testovaných vozidiel za posledných 10 rokov skrátila z približne 40 metrov na 36,4 metra.

Hodnota výslednej dráhy modelovaného systému zo 100km/h však bola dlhšia. Rozdiel spôsobuje nedostatočne presné stanovenie koeficientu trenia medzi pneumatikami a vozovkou, nedokonale naprogramovaný systém ABS, zanedbanie síl, ktoré môžu proti vozidlu pôsobiť a testovanie na parametroch automobilu z roku 2006. Tieto vlastnosti modelu je možné vylepšiť v budúcnosti v nadväzujúcej práci.

Literatúra

- [1] Auto-SME: *Fiat Croma 1,9 JTD*. [Online; navštíveno 08.05.2018].
URL <https://auto.sme.sk/c/2567691/fiat-croma-19-jtd.html>
- [2] AutoBild-Slovensko: *Rebríček 50 áut: Tieto majú najlepšie brzdy*. [Online; navštíveno 08.05.2018].
URL <https://autobild.cas.sk/clanok/211901/rebricek-50-aut-tieto-maju-najlepsie-brzdy/>
- [3] AutoNoto: *Fiat Croma 1.9 Multijet 16v 150 Emotion*. [Online; navštíveno 08.05.2018].
URL <https://autonoto.cz/katalog/detail/fiat-croma-1-9-multijet-16v-150-emotion>
- [4] David, A.; Larsen, K. G.; Legay, A.; aj.: *Uppaal SMC tutorial. International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, ročník 17, 8 2015: s. 397–415,
doi:10.1007/s10009-014-0361-y.
- [5] Fenske, J.: *Engineering Explained - Brakes, Safety, and Control Systems*. [Online; navštíveno 10.05.2018].
URL <https://www.youtube.com/playlist?list=PLB85E2FB44D430CDE>
- [6] Jantač, M.: *Současný stav a vývojové tendence v konstrukci brzdových zařízení*.
Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [7] KHANACADEMY: *What are the forces of static and kinetic friction?* [Online; navštíveno 08.05.2018].
URL <https://www.khanacademy.org/science/physics/forces-newtons-laws/inclined-planes-friction/a/what-is-friction>
- [8] Krempaský, J.: *Fyzika : příručka pre vysoké školy technické*. Bratislava : ALFA -
Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry ; Praha : SNTL - Nakladatelství
technické literatury, 1988.
- [9] Maňák, R.: *Systémy bezpečnosti provozu vozidla*. Bakalářská práce, Vysoké učení
technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [10] Musil, J.: *Elektronické stabilizační systémy osobních automobilů*. Bakalářská práce,
Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [11] Peringer, P.: *Modelování a simulace. Studijní opora*. VUT, 2012.
- [12] Pneumatiky.cz: *Test letních pneumatik 205/55 R16 - ADAC 2018*. [Online; navštíveno 08.05.2018].

URL <https://www.pneumatiky.cz/info/test-letnich-pneumatik-205-55-r16-adac-2018.html>

- [13] Prachař, R.: *Jízdní odpory vozidel*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2010, str. 24–38.
- [14] Slíž, M.: *Diagnostika pasivních a aktivních bezpečnostních prvků vozidel*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [15] The-MathWorks-Inc: *Modeling an Anti-Lock Braking System*. [Online; navštíveno 08.05.2018].
URL <https://www.mathworks.com/help/simulink/examples/modeling-an-anti-lock-braking-system.html?w.mathworks.com>
- [16] Townsend, B.: *Static and Kinetic Friction*. University of Alaska Fairbanks, [Online; navštíveno 08.05.2018].
URL http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/ben_townsend/staticandkineticfriction.htm
- [17] Čípek, R.: *Návrh a realizace výukového modelu ABS*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009, str. 24–38.